

Futur collisionneur circulaire (FCC)

Rapport d'étude de faisabilité

Volume 3 : Génie civil, implantation et durabilité

Traduction française du chapitre 1, "Génie civil"

La traduction de cette publication technique/scientifique a été réalisée à l'aide d'outils automatisés. Elle peut différer de la version originale en anglais à divers égards.

En cas de doute, la version anglaise fait foi.

31 mars 2025

Soumis à la revue European Physical Journal ST, publication conjointe de EDP Sciences, de Springer Science+Business Media, et de la Società Italiana di Fisica.

Note de la rédaction

L'une des recommandations de la mise à jour 2020 de la stratégie européenne pour la physique des particules était que « l'Europe et ses partenaires internationaux étudient la faisabilité technique et financière d'un futur collisionneur de hadrons au CERN avec une énergie au centre de masse d'au moins 100 TeV et avec une installation de productions d'électrons-positrons, d'interactions de Higgs et d'interactions électrofaibles dans une première étape ».

En juin 2021, le Conseil du CERN a lancé l'étude de faisabilité du FCC, qui doit être achevée d'ici 2025, à temps pour la prochaine mise à jour de la stratégie européenne pour la physique des particules. Les résultats de l'étude sont rendus publics dans le présent rapport d'étude de faisabilité du FCC, en tant que contribution au processus de mise à jour de la stratégie européenne pour la physique des particules, lancé par le Conseil du CERN en mars 2024. Les études présentées dans le présent rapport d'étude de faisabilité du FCC n'impliquent aucun engagement de la part des États membres ou membres associés du CERN en faveur de la construction du futur collisionneur circulaire.

Le présent rapport et les hypothèses qu'il contient ne préjugent pas des analyses de faisabilité territoriale qui seront menées par les États hôtes, la France et la Suisse, ni des résultats de leurs débats publics et processus de concertation respectifs, ni des décisions futures de leurs autorités compétentes.

Remerciements

Nous tenons à remercier les membres du Comité de pilotage international :

F. Gianotti (Président), CERN
R. Bello, CERN
P. Chomaz, CEA, France
M. Cobal, INFN et Université d'Udine, Italie
B. Heinemann, DESY, Allemagne
T. Koseki, KEK, Japon
M. Lamont, CERN
L. Merminga, FNAL, États-Unis
J. Mnich, CERN
M. Seidel, PSI et EPFL, Suisse
C. Warakaulle, CERN

et les membres du Comité consultatif scientifique :

A. Parker (Président), Université de Cambridge, Royaume-Uni
R. Bartolini, DESY, Allemagne
A. Chabert, SFTRF, France
H. Ehrbar, Heinz Ehrbar Partners LLC, Suisse
B. Gavela Legazpi, UAM Madrid, Espagne
G. Hiller, TU Dortmund, Allemagne
S. Krishnagopal, FNAL, États-Unis
P. Križan, Université de Ljubljana, Slovénie
P. Lebrun, ESI, France
P. McIntosh, STFC, ASTeC, UKRI, Royaume-Uni
M. Minty, BNL, États-Unis
R. Tenchini, INFN Sezione di Pisa, Italie

pour leurs conseils constants et leur révision minutieuse qui ont permis de mener à bien ce rapport.

Les recherches menées par la collaboration internationale pour le FCC, hébergée par le CERN, ont conduit à la présente publication et ont été financées par le programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne sous les numéros de subvention 951754 (FCCIS), 654305 (EuroCirCol), 764879 (EASITrain), 730871 (ARIES), 777563 (RI-Paths) et du FP7 sous le numéro 312453 (EuCARD-2).

Ce travail a également bénéficié du soutien de l'initiative CHART (Swiss Accelerator Research and Technology), fondée en 2016 en tant que collaboration faîtière pour les activités de recherche et de technologie portant sur les accélérateurs. Les partenaires actuels de CHART sont le CERN, l'Institut PSI, l'EPFL, l'ETH-Zurich et l'Université de Genève.

Avis concernant les marques : Toutes les marques commerciales figurant dans le présent rapport sont reconnues comme telles.

Le présent rapport a été édité avec le système collaboratif de rédaction et de publication Overleaf.com. La mise en page et la préparation finale de l'impression ont été réalisées avec pdfTeX 3.14159265-2.6-1.40.17.
E

Copyright CERN pour le bénéfice de la collaboration FCC 2024, Creative Commons Attribution 4.0

Le transfert de connaissances fait partie intégrante de la mission du CERN.

Le CERN publie ce volume en libre accès sous la licence Creative Commons Attribution 4.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) afin d'en permettre une large diffusion et utilisation. La soumission d'une contribution au serveur de documents du CERN est réputée valoir acceptation, de la part du contributeur, de la présente déclaration de droits d'auteur et de licence. Les contributeurs sont priés d'obtenir les autorisations éventuellement nécessaires à cette fin.

Le présent volume est indexé dans : Serveur de documents du CERN (CDS) :

CERN-FCC-ACC-2025-0003 DOI
10.17181/CERN.I26X.V4VF

<http://cds.cern.ch/record/2928194>

La présente édition du rapport doit être citée de la façon suivante :

Rapport d'étude de faisabilité du futur collisionneur circulaire, Volume 3 : Génie civil, implantation et durabilité, édition préliminaire publiée par M. Benedikt et al, Rapports sur les accélérateurs du CERN,

CERN-FCC-ACC-2025-0003, DOI 10.17181/CERN.I26X.V4VF, Genève, 2025.

Disponible en ligne : <https://cds.cern.ch/record/2928194>

Liste des éditeurs au 31 mars 2025

M. Benedikt¹ (Chef d'étude), F. Zimmermann¹ (Chef d'étude adjoint), B. Auchmann^{1,2}, W. Bartmann¹, J.P. Burnet¹, C. Carli¹, A. Chancés, P. Craievich², M. Giovannozzi¹, C. Grojean^{4,5}, J. Gutleber¹, K. Hanke¹, A. Henriques¹, P. Janot¹, C. Lourenço¹, M. Mangano¹, T. Otto¹, J. Poole¹, S. Rajagopalan⁶, T. Raubenheimer⁷, E. Todesco¹, L. Ulrici¹, T. Watson¹, G. Wilkinson^{1,8}.

Liste des contributeurs au 31 mars 2025

A. Abada^{9,10,11}, M. Abbrescia^{12,13}, H. Abdolmaleki^{14,15}, S.H. Abidi⁶, A. Abramov¹, C. Adam^{9,16,17}, M. Ady¹, P.R. Adzic¹⁸, I. Agapov⁴, D. Aguglia¹, I. Ahmed¹⁹, M. Aiba², G. Aielli^{20,21}, T. Akāņ²², N. Akchurin²³, D. Akturk²⁴, M. Al-Thakeel^{1,25,26}, G.L. Alberghi²⁵, J. Alcaraz Maestre²⁷, M. Aleksa¹, R. Aleksan³, F. Alharthi^{9,10,28}, J. Alimena⁴, A. Alimenti²⁹, S. Alioli^{30,31}, L. Alix^{1,9,16}, B.C. Allanach³², L. Allwicher⁴, A.A. Altintas³³, M. Altinli^{33,34}, M. Alviggi^{35,36}, G. Ambrosio³⁷, Y. Amhis^{9,10,11}, A. Amiri^{38,39}, G. Ammirabile⁴⁰, T. Andeen⁴¹, K.D.J. Andréi¹, J. Andrea^{9,42,43}, A. Andreazza^{44,45}, M. Andreini¹, T. Andriollo⁴⁶, L. Angel⁴⁷, M. Angelucci⁴⁸, S. Antusch⁴⁹, M.N. Anwar^{12,50}, L. Apolinário⁵¹, G. Apollinari³⁷, R.B. Appleby^{52,53}, A. Apresyan³⁷, Aram Apyan⁵⁴, Armen Apyan⁵⁵, A. Arbey^{9,56,57}, B. Argiento^{35,36}, V. Ari⁵⁸, S. Arias⁵⁹, B. Arias Alonso¹, O. Arnaez^{9,16,17}, R. Arnaldi⁶⁰, F. Arneodo⁶¹, H. Arnold⁶², P. Arrutia Sota¹, K. Arundell⁶³, M.E. Ascioti^{64,65}, K.A. Assamagan⁶, S. Aumiller⁶⁶, G. Aydin⁶⁷, K. Azizi^{38,68}, P. Azzi⁶⁹, N. Bacchetta⁶⁹, A. Bacci⁴⁴, B. Bai⁷⁰, Y. Bai⁷¹, L. Balconi^{44,45}, G. Baldinelli^{64,65}, B. Balhan¹, A.H. Ball^{1,72}, A. Ballarino¹, S. Banerjee⁷³, S. Banik^{2,74}, D.P. Barber^{4,75}, M.B. Barbero^{9,76,77}, D. Barducci^{40,78}, D. Barna⁷⁹, G.G. Barnaföldi⁷⁹, M.J. Barnes¹, A.J. Barr⁸, R. Bartek⁸⁰, H. Bartosik¹, S.A. Bass⁸¹, U. Bessler^{9,82,83}, M.J. Basso^{84,85}, A. Bastianin^{45,86}, P. Bataillard⁸⁷, M. Battistini¹, J. Bauche¹, L. Baudin¹, J. Baudot^{9,42,43}, B. Baudouy³, L. Bauerdick³⁷, C. Bayındır^{88,89}, H.P. Beck⁹⁰, F. Bedeschi⁴⁰, C. Bee⁶², M. Begel⁶, M. Behtouei⁴⁸, L. Bellagamba²⁵, N. Bellegarde¹, E. Belli^{1,91}, E. Bellingeri⁹², S. Belomestnykh³⁷, A.D. Benaglia³⁰, G. Bencivenni⁴⁸, J. Bendavid¹, M. Benmergui⁹³, M. Benoit⁹⁴, D. Benvenuti^{1,40}, T. Bergauer⁹⁵, N. Bernachot⁹⁶, G. Bernardi^{9,97,98}, J. Bernardi⁹⁹, Q. Berthet^{100,101,102}, S. Bertoni¹⁰³, C. Bertulani¹⁰⁴, M.I. Besana², A. Besson^{9,42,43}, M. Bettelini¹⁰⁵, S. Bettoni², S. Beuvier¹⁰⁶, P.C. Bhat³⁷, S. Bhattacharya¹⁰⁷, J. Bhom¹⁰⁸, M.E. Biagini⁴⁸, A. Bibet-Chevalier¹⁰⁹, M. Bicerli¹¹⁰, M. Biglietti¹¹¹, G.M. Bilei⁶⁴, B. Bilki^{112,113}, K. Bisgaard Christensen¹, T. Biswas¹¹⁴, F. Blanc¹¹⁵, F. Blekman^{4,116,117}, A. Blondel^{9,102,118}, J. Blümlein⁴, D. Boccanfuso^{35,119}, A. Bogomyagkov¹²⁰, P. Boillon¹⁰⁹, P. Boivin¹⁰¹, M.J. Boland¹²¹, S. Bologna¹²², O. Bolukbasi³³, R. Bonnet¹⁰³, J. Borburgh¹, F. Bordry¹, P. Borges de Sousa¹, G. Borghello¹, L. Borriello³⁵, D. Bortoletto⁸, M. Boscolo⁴⁸, L. Bottura¹, V. Boudry^{9,82,83}, R. Boughezal¹²³, D. Bourilkov¹²⁴, M. Boyd^{84,125}, D. Boye⁶, G. Bozzi^{126,127}, V. Braccini⁹², C. Bracco¹, B. Bradu¹, A. Braghieri¹²⁸, S. Brabant^{25,26}, J. Bramante¹²⁹, G.C. Branco¹³⁰, R. Brenner¹³¹, N. Brisa¹⁰³, D. Britzger¹³², G. Broggi^{1,91}, L. Bromiley¹, E. Brost⁶, Q. Bruant³, R. Bruce¹, E. Bründermann¹³³, L. Brunetti^{9,16,17}, O. Brüning¹, O. Brunner¹, X. Buffat¹, E. Bulyak¹³⁴, A. Burdyko^{44,135}, H. Burkhardt^{1,136}, P.N. Burrows¹³⁷, S. Busatto^{44,91}, S. Buschaert⁸⁷, D. Buttazzo⁴⁰, A. Butterworth¹, D. Butti¹, G. Cacciapaglia^{138,139,140}, Y. Cai⁷, B. Cai¹¹, V. Cairo¹, O. Cakir⁵⁸, P. Calafiura¹⁴², R. Calaga¹, S. Calatroni¹, D.G. Caldwell¹⁴³, A. Çalışkan¹⁴⁴, C. Calpini¹⁴⁵, M. Calviani¹, E. Camacho-Pérez¹⁴⁶, P. Camarri^{20,21}, L. Caminada^{2,74}, M. Campajola^{35,36}, A.C. Canbay⁵⁸, K. Canderan¹, S. Candido¹, F. Canelli⁷⁴, A. Canepa³⁷, S. Cantarella⁴⁸, K.B. Cantún-Avila¹⁴⁶, L. Capriotti^{147,148}, A. Carami¹⁴⁹, A. Carbone⁴⁴, J.M. Carceller¹, G. Carini⁶, C. Carli¹, F. Carlier¹, C.M. Carloni Calame¹²⁸, C. Caron¹⁵⁰, F. Carra¹, C. Cartannaz⁸⁷, S. Casenove¹, G. Catalano¹⁵¹, V. Cavaliere⁶, C. Cazzaniga¹⁵², C. Cecchi^{64,65}, F.G. Celiberto¹⁵³, M. Cepeda²⁷, F. Cerutti¹, F. Cetorelli^{30,31}, G. Chachamis⁵¹, Y. Chae⁴, F. Chagnet¹⁵⁴, I. Chaikovska^{9,10,11}, M. Chalhoub⁸⁷, M. Chamizo-Llatas⁶, M. Champagne¹⁵⁵, H. Chanal^{9,156,157}, G. Chapelier¹⁰⁹, P. Charitos¹, C. Charles¹⁰⁶, T.K. Charles¹⁵⁸, C. Charlot^{9,82,83}, S. Chatterjee⁴, A. Chaudhuri¹⁵⁹, R. Chehab^{9,10,11}, S.V. Chekanov¹⁶⁰, H. Chen⁶, T. Chesne¹⁰⁶, F. Chiapponi^{25,26}, G. Chiarello^{161,162}, M. Chiesa¹²⁸, P. Chiggiato¹, Ph. Chomaz³, M. Chorowski¹⁶³, J.P. Chou¹⁶⁴, M. Chrzaszcz¹⁰⁸, W. Chung¹⁶⁵, S. Ciarlantini^{69,166}, A. Ciarma⁴⁸, D. Cieri¹³², A.K. Ciftci¹⁶⁷, R. Ciftci¹⁶⁸, R. Cimino⁴⁸, F.

Cirotto^{35,36}, M. Ciuchini¹¹¹, M. Cobal^{169,170}, A. Coccaro¹⁴¹, R. Coelho Lopes De Sa¹⁷¹, J.A. Coleman-Smith¹, F. Collamati¹⁷², C. Colldelram¹⁷³, P. Collier¹, P. Collins¹, J. Collot^{9,174,175}, M. Colmenero¹, L. Colnot¹⁵¹, G. Coloretti⁷⁴, F.A. Conventi^{35,176}, A. Cook¹, L. Cooley^{177,178}, A.S. Cornell¹⁷⁹, C. Cornella¹, G. Cornette¹⁰⁶, I. Corredoira¹⁸⁰, P. Costa Pinto¹, F. Couderc³, J. Coupard¹, S. Coussy⁸⁷, R. Crescenzi¹⁸¹, I. Crespo Garrido^{1,182}, T. Critchley^{1,102}, A. Crivellin⁷⁴, T. Croci⁶⁴, C. Cudré¹⁰⁶, G. Cummings³⁷, F. Cuna¹², R. Cunningham¹, B. Curé¹, E. Curtis¹⁸³, M. D'Alfonso¹⁸⁴, L. D'Aloia Schwartzentruber¹⁸⁵, G. D'Amen⁶, B. D'Anzi^{12,13}, A. D'Avanzo^{35,36}, D. d'Enterria¹, A. D'Onofrio³⁵, M. D'Onofrio¹⁸⁶, M. Da Col¹⁵¹, M. Da Rocha Rolo⁶⁰, C. Dachauer¹⁸⁷, B. Dagli²⁴, A. Dainese⁶⁹, B. Dalena³, W. Dallapiazza¹⁸⁸, M. Dam¹⁸⁹, H. Damerau¹, V. Dao⁶², A. Das¹⁹⁰, M.S. Daugaard¹, S. Dauphin¹⁰⁹, A. David¹, T. Davídek¹⁹¹, G.J. Davies¹⁸³, S. Dawson⁶, J. de Blas¹⁹², A. de Cosa¹⁵², S. De Curtis¹⁹³, N. De Filippis^{12,50}, E. De Lucia⁴⁸, R. De Maria¹, E. De Matteis⁴⁴, A. De Roeck¹, A. De Santis⁴⁸, A. De Vita^{1,69,166}, A. Deandrea^{9,56,57}, C.J. Debono¹⁹⁴, M. Deeb¹⁰¹, M.M. Defranchisi¹, J. Degens¹⁸⁶, S. Deghaye¹, V. Del Duca⁴⁸, C.L. Del Pio⁶, A. Del Vecchio⁹¹, D. Delikaris¹, A. Dell'Acqua¹, M. Della Pietra^{35,36}, M. Delmastro^{9,16,17}, L. Delprati¹, E. Delugas¹⁵¹, Z. Demiragli¹⁹⁵, L. Deniau¹, D. Denisov⁶, H. Denizli¹⁹⁶, A. Denner¹⁹⁷, A. Denot¹⁰⁹, G. Deptuch⁶, A. Desai¹⁹⁸, H. Deveci¹, A. Di Canto⁶, A. Di Ciaccio^{20,21}, L. Di Ciaccio^{9,16,17}, D. Di Croce^{1,115}, C. Di Fraia^{35,36}, B. Di Micco^{29,111}, R. Di Nardo^{29,111}, T.B. Dingley⁸, F. Djama^{9,76,77}, F. Djurabekova¹⁹⁹, D. Dockery³⁷, S. Doebert¹, D. Domange^{1,200}, M. Donegà¹⁵², U. Dosselli⁶⁹, H.A. Dostmann^{1,201}, J.A. Dragovich³⁷, I. Drebot⁴⁴, M. Drewes²⁰², T.A. du Pree²⁰³, Z. Duan²⁰⁴, C. Duarte-Galvan²⁰⁵, O. Duboc²⁰⁶, M. Duda², P. Duda¹⁶³, H. Duran Yildiz⁵⁸, H. Durand¹⁰⁶, P. Durand¹⁰⁶, G. Durieux²⁰², Y. Dutheil¹, I. Dutta³⁷, J.S. Dutta²⁰⁷, S. Dutta²⁰⁸, F. Duval¹, F. Eder¹, M. Eisterer⁹⁹, Z. El Bitar^{9,42,43}, A. El Saied²⁰⁹, M. Elisei⁴⁴, J. Ellis^{1,210}, W. Elmetenawee¹², J. Elmsheuser⁶, V. Daniel Elvira³⁷, S.C. Eno²¹¹, Y. Enomoto²¹², B.A. Erdelyi^{69,166}, O.E. Eruteya^{102,213}, M. Escobar²¹⁴, O. Etisken²¹⁵, I. Eymard¹⁴⁵, J. Eysermans¹⁸⁴, D. Falchieri²⁵, C. Falkenberg²⁰⁶, F. Fallavollita^{1,132}, A. Afalou^{1,9,10}, J. Faltova¹⁹¹, J. Fanini¹, L. Fanò^{64,65}, K. Fanti¹⁰⁶, R. Farinelli²⁵, M. Farino¹⁶⁵, S. Farinon¹⁴¹, H. Fatehi³⁸, J. Fatterbert¹⁰⁶, A. Faure²¹⁶, A. Faus-Golfe^{9,10,11}, G. Favia¹, L. Favilla^{35,119}, W.J. Fawcett³², A. Federowicz³⁷, L. Feligioni^{9,76,77}, L. Felsberger¹, Y. Feng²³, A. Fernández Téllez²¹⁷, R. Ferrari¹²⁸, L. Ferreira¹, F. Ferro¹⁴¹, M. Fiascaris¹, C. Fiorio⁴⁵, S.A. Fleury¹, L. Florez¹⁸⁸, M. Florio^{45,151}, A. Fondacci⁶⁴, B. Fontimpe²¹⁴, K. Foraz¹, R. Fortunati², M. Foudaidy^{9,10,11}, M. Fouaidy^{9,10,11}, A. Foussat¹, A. Fowler¹, J.D. Fox²¹⁸, M. Francesconi³⁵, B. Francois¹, R. Franqueira Ximenes¹, F. Franesini⁴⁸, A. Frasca^{1,186}, A. Freitas²¹⁹, J.A. Frost⁸, K. Furukawa²¹², A. Gabrielli^{25,26}, A. Gaddi¹, F. Gaede⁴, A. Gallén¹³¹, R. Galler^{220,221}, E. Gallice¹⁰⁶, E. Gallo^{4,116}, H. Gamper¹, G. Ganis¹, S. Ganjour³, S. Gao⁶, A. Garandi⁴⁹, C. Garaus²⁰⁶, D. Garcia¹, R. García Alía¹, R. García Gil²²², C.M. Garcia Jaimes^{1,115}, H. Garcia Rodrigues^{2,223}, C. Garion¹, M. Garlaschè¹, D. Garnier¹⁵⁴, M.V. Garzelli¹¹⁶, S. Gascon-Shotkin^{9,56,57}, M. Gasior¹, G. Gaudino^{35,119}, G. Gaudio¹²⁸, V. Gaur²²⁴, K. Gautam^{74,117}, V. Gawas¹, T. Gehrman⁷⁴, A. Gehrman-De Ridder^{74,152}, K. Geiger¹, M. Genco¹⁵¹, F. Gerigk¹, H. Gerwig¹, A. Ghribi^{1,9,225}, P. Giacomelli²⁵, S. Giagu^{91,172}, E. Gianfelice³⁷, S. Giappichini¹³³, D. Gibellieri^{1,226}, F. Giffoni¹⁵¹, G. Gil da Silveira²²⁷, S.S. Gilardon¹, M. Giovannetti⁴⁸, T. Girardet¹⁰⁶, S. Girod^{1,106}, P. Giubellino⁶⁰, P. Giubilato^{69,166}, F. Giuliani^{20,21}, M. Giuliani¹⁰³, E.L. Gkoukousis^{1,74}, S. Glukhov²²⁸, J. Gluza²²⁹, B. Goddard¹, C. Goffing^{1,133}, D. Goldsworthy¹, T. Golling¹⁰², R. Gonçalves^{51,230}, V.P. Gonçalves^{47,231}, T. Gonçalves Da Silva²¹⁴, J. Gonski⁷, R. Gonzalez Suarez¹³¹, S. Gorgi Zadeh¹, S. Gori²³², E. Gorini^{161,233}, L. Gouskos²³⁴, M. Gouzevitch^{9,56,57}, E. Granados¹, F. Grancagnolo¹⁶¹, S. Grancagnolo^{161,233}, A. Grassellino³⁷, A. Grau¹³³, E. Graverini^{40,78,115}, F.G. Gravili^{161,233}, H.M. Gray^{142,235}, M. Grazzini⁷⁴, Mario Greco^{29,111}, Michela Greco^{60,236}, A. Greljo⁴⁹, J.-L. Grenard¹, A.V. Gritsan²³⁷, R. Gröber^{69,166}, A. Grudiev¹, E. Gschwendtner¹, J. Gu²³⁸, D. Guadagnoli^{117,138,239}, G. Guerrieri¹, A. Guiavarch²⁰⁹, G. Guillermo Canton^{1,240}, M. Guinchard¹, Y.O. Günaydin²⁴¹, K. Gurcel⁹³, L.X. Gutierrez Guerrero^{242,243}, D. Gutiérrez Rueda¹, A. Gutiérrez-Rodríguez²⁴⁴, V. Guzey^{199,245}, C. Haber¹⁴², T. Hacheney²⁴⁶, B. Hacıahinoglu³³, K. Hahn¹²³, J. Hajer¹³⁰, T. Hakulinen¹, J.C. Hammersley²⁴⁷, M. Hance²³², J.B. Hansen¹⁸⁹, B. Härer¹³³, E. Hauzinger²²⁰, M. Haviernik¹⁹¹, B. Hegner¹, C. Helsen¹¹⁵, Ana Henriques¹, C. Hernalsteens¹, H. Hernández-Arellano²¹⁷, R.J. Hernández-Pinto²⁰⁵, M.A. Hernández-Ruíz²⁴⁴, J. Hernández-Sánchez²¹⁷, J.W. Heron¹, L.M. Herrmann¹, R. Hirosky²⁴⁸,

J.F. Hirschauer³⁷, J.D. Hobbs⁶², S. Höche³⁷, M. Hofer¹, G. Hoffstaetter^{6,249}, W. Höfle¹, M. Hohlmann²⁵⁰, F. Holdener²⁵¹, B. Holzer¹, C.G. Honorato²¹⁷, H. Hoorani²⁵², A. Houver¹⁰⁶, E. Howling^{1,8,137}, X. Huang⁷, F. Hug²⁵³, B. Humann¹, P. Hunchak¹²¹, Y. Husein¹, A. Hussain^{1,254}, G. Iadarola¹, G. Iakovidis⁶, G. Iaselli^{12,50}, P. Iengo³⁵, A. Ilg⁷⁴, M. Iodice¹¹¹, A.O.M. Iorio^{35,36}, V. Ippolito¹⁷², U. Iriso¹⁷³, J. Isaacson³⁷, G. Isidori⁷⁴, R. Islam²⁵⁵, A. Istepanyan¹⁰⁶, S. Izquierdo Bermudez¹, V. Izzo³⁵, P.D. Jackson¹⁹⁸, R. Jafari^{1,38}, S.S. Jagabathuni^{1,102}, S. Jana^{256,257}, C. Järmyr Eriksson¹, P. Jausserand¹⁵⁴, M. Jensen²⁵⁸, J.M. Jimenez¹, F.R. Joaquim¹³⁰, O.R. Jones¹, J. Joos¹⁰⁹, E. Jourd'huy^{9,259}, E. Jourdan²¹⁴, J.M. Jowett^{1,260}, A. Jueid²⁶¹, A.W. Jung²⁰⁷, M. Kagan⁷, I. Kahraman⁵⁸, V. Kain¹, J. Kalinowski²⁶², J.F. Kamenik^{263,264}, A. Kanso²⁶⁵, T. Kar²⁶⁶, S.O. Kara²⁶⁷, H. Karadeniz²⁶⁸, S.R. Karmarkar²⁰⁷, V. Karpati²⁶⁹, I. Karpov¹, M. Karppinen¹, P. Karst^{9,76,77}, S. Kartal³³, V.V. Kashikhin³⁷, U. Kaya⁵⁸, A. Kehagias^{1,270}, J. Keintzel¹, M. Kennouche¹, M. Kenzie³², M. Kerréveur-Lavaud⁴⁶, R. Kersevan^{1,271}, V. Keus^{199,272}, H. Khanpour^{14,273,274}, V.V. Khoze²⁷⁵, V.A. Khoze²⁷⁵, P. Kicsiny¹, R. Kieffer¹, C. Kiel¹¹⁵, J. Kieseler¹³³, A. Kilic²⁷⁶, B. Kilminster⁷⁴, S. Kim²⁷⁷, Z. Kırca²⁷⁶, M. Klein¹⁸⁶, A. Klimentov⁶, M. Klute¹³³, V. Klyukhin^{120,278}, M. Knecht^{138,279,280}, B. Kniehl¹¹⁶, P. Ko²⁸¹, S. Ko¹, F. Kocak²⁷⁶, T. Koffas²⁸², C. Kokkinos^{283,284}, K. Kołodziej²²⁹, K. Kong²⁸⁵, P. Kontaxakis¹⁰², I.A. Koop¹²⁰, P. Kopciwicz¹, P. Koppenburg²⁰³, M. Koratzinos^{1,2}, K. Kordas²⁸⁶, A. Korsun^{9,10,11}, O. Kortner¹³², S. Kortner¹³², B. Korzh¹⁰², T. Koseki²¹², J. Kosse², P. Kostka^{1,186}, S. Kostoglou¹, A.V. Kotwal⁸¹, G. Kozlov^{1,278}, I. Kozsar¹, T. Kramer¹, P. Krkotic¹, H. Kroha¹³², K. Kröninger²⁴⁶, S. Kuday^{1,58}, G. Kuhlmann²⁸⁷, O. Kuhlmann^{1,288}, M. Kuhn²⁸⁹, A. Kulesza²⁹⁰, M. Kumar²⁹¹, F. Kurian⁶, A. Kurtulus^{1,152}, T.H. Kwok⁷⁴, S. La Mendola¹, M. Lackner^{99,292}, T. Ładzinski¹, D. Lafarge¹, P. Laïdouni¹, G. Lamanna^{9,16,17}, N. Lamas¹⁹, G. Landsberg²³⁴, C. Lange², D.J. Lange¹⁶⁵, A. Langner¹, A.J. Lankford²⁹³, M.S. Larson²⁹⁴, K. Lasocha¹, A. Latina¹, S. Lauciani⁴⁸, M. Laufenberg¹⁰⁶, G. Lavezzari¹, L. Lavezzi⁶⁰, L. Lavezzo¹, M. Le Garrec^{1,9,16}, A. Le Jeune¹⁰³, Ph. Lebrun^{1,295}, Y. Léchevin¹, A. Lechner¹, E. Lecointe¹⁰⁶, J.S.H. Lee²⁹⁶, S.W. Lee²⁹⁷, S.J. Lee^{281,298}, T. Lefevre¹, C. Leggett¹⁴², T. Lehtinen²⁹⁹, S. Leone⁴⁰, C. Leonidopoulos³⁰⁰, S. Leontsinis⁷⁴, G. Leprince-Maillère³⁰¹, G. Lerner¹, O. Leroy^{9,76,77}, T. Lesiak¹⁰⁸, P. Levai⁷⁹, A. Leveratto⁹², R. Levi¹⁵⁴, A. Li⁶, S. Li^{302,303}, D. Liberati³⁰⁴, G.L. Lichtenstein⁴⁷, M. Liepe²⁴⁹, Z. Ligeti¹⁴², H. Lin³⁰⁵, S. Linda¹⁴⁵, E. Lipeles³⁰⁶, Z. Liu³⁰⁷, S.M. Liuzzo³⁰⁸, T. Loeliger²⁸⁹, A. Loeschcke Centeno³⁰⁹, A. Lorenzetti⁷⁴, C. Lorin³, R. Losito¹, M. Louka^{12,310}, M.L. Loureiro García¹⁸², I. Low^{123,160}, K. Lubonis¹⁵⁴, M.T. Lucchini^{30,31}, V. Lukashenko⁷⁴, G. Luminati⁴⁸, A.J.G. Lunt^{1,311}, A. Lusiani^{40,312}, M. Luzum³¹³, H. Ma⁶, A. Maas³¹⁴, E. Macchia^{1,91,172}, A. Macchiolo⁷⁴, G.E. Machinet²⁶⁵, R. Madar^{9,156,157}, T. Madlener⁴, C. Madrid²³, A. Magalotti²⁹, M. Maggiora^{60,236}, A.-M. Magnan¹⁸³, M.A. Mahmoud³¹⁵, Y. Mahmoud^{316,317}, F. Mahmoudi^{1,9,56}, H. Mainaud Durand¹, J. Maitre¹⁰⁹, Y. Makhloufi¹⁰², B. Malaescu^{9,118,318}, A. Malagoli⁹², C.H. Malan¹⁰⁹, M. Malekhosseini³⁸, M. Malekhosseini³⁸, A. Maloizel^{1,97,98}, S. Malvezzi³⁰, A. Malzac¹⁴⁹, G. Manco¹²⁸, L.S. Mandacarú Guerra¹⁶⁵, P. Manfrinetti^{92,319}, E. Manoni⁶⁴, J. Mans³⁰⁷, L. Mantani³²⁰, S. Manzoni¹, L. Marafatto¹⁶⁹, C. Marcel¹, T. Marcel¹¹⁰, R. Marchevski¹¹⁵, G. Marchiori^{9,97,98}, F. Mariani^{44,91}, V. Mariani^{64,65}, S. Marin¹, C. Marinas³²⁰, V. Marinozzi³⁷, S. Mariotto^{44,45}, C. Marquis¹⁰⁶, J. Martelain³²¹, G. Martelli^{64,65}, A. Martens^{9,10,11}, I. Martin-Melero¹, V.I. Martinez Outschoorn¹⁷¹, F. Martinez²¹⁷, C.M. Jardim²⁷, L. Marzola^{322,323}, S. Masciocchi^{260,266}, A. Mashal¹⁴, A. Masi¹, I. Masina^{147,148}, P. Mastrapasqua²⁰², V. Mateu³²⁴, S. Mattiazzo^{69,166}, M. Maugis¹⁰³, D. Mauree¹⁴⁵, G.H.I. Maury-Cuna³²⁵, A. Mayoux¹, E. Mazzeo¹, S. Mazzoni¹, M. McCullough¹, M. Meena^{9,42,43}, E. Meftah¹⁰², Andrew Mehta¹⁸⁶, Ankita Mehta¹, B. Mele¹⁷², R. Mena-Andrade¹, M. Mentink¹, D. Mergelkuhl¹, V. Mertinger²⁶⁹, L. Mether¹, S. Meylan¹⁰⁶, T. Michel¹⁰³, T. Michlmayr², M. Migliorati^{91,172}, A. Milanese¹, C. Milardi⁴⁸, G. Milhano⁵¹, C. Mirabelli³²⁶, T. Miralles^{9,156,157}, L. Miralles Verge¹, D. Mirarchi¹, K. Mirbaghestan⁷⁴, N. Mirian^{4,327}, V.A. Mitsou³²⁰, D.S. Mitzel²⁴⁶, M. Mlynarikova¹, S. Möbius⁹⁰, M. Mohammadi Najafabadi^{1,14}, G.B. Mohanty³²⁸, R. N. Mohapatra²¹¹, S. Moneta⁶⁴, P.F. Monni¹, E. Monnier^{9,76,77}, S. Monteil^{9,156,157}, I. León Monzón²⁰⁵, F. Moortgat^{1,329}, N. Morange^{9,10,11}, M. Moretti^{147,148}, S. Moretti⁷², T. Mori^{1,212}, I. Morozov¹²⁰, A. Morozzi⁶⁴, M. Morrone¹, A. Moscariello¹⁰², F. Moscatelli^{64,330}, I. Moulin²¹⁶, N. Mounet¹, A. Mueller³³¹, A.-S. Müller¹³³, B.O. Müller²⁸⁷, J. Mundet²²², E. Musa^{1,4}, V. Musat^{1,8}, R. Musenich¹⁴¹, E. Musumeci³²⁰, M. Mylona¹, V.V. Mytrochenko^{9,10,134}, B. Nachman¹⁴², T. Nakamoto²¹², M. Napsuciale³²⁵, M.

Nardecchia^{91,172}, G. Nardini³³², G. Narváez-Arango³³³, S. Naseem⁶¹, A. Navascues , Cornago¹, B. Naydenov¹, G. Nergiz¹, A.V. Nesterenko²⁷⁸, C. Neubüser³³⁴, H.B. Newman³³⁵, F. Niccoli^{1,336}, O. Nicrosini¹²⁸, U. Niedermayer²²⁸, G. Niehues¹³³, J. Nielsen¹, G. Nigrelli^{1,91,172}, S. Nikitin¹²⁰, I.B. Nikolaev¹²⁰, A. Nisati¹⁷², N. Nitika^{169,170}, J.M. No³³⁷, M. Nonis¹, Y. Nosochkov⁷, A. Novokhatski^{1,7}, J.M. O'Callaghan³³⁸, S.A. Ochoa-Oregon²⁰⁵, K. Ohmi^{204,212}, K. Oide^{1,102,212}, V.A. Okorokov¹²⁰, C. Oleari^{30,31}, D. Oliveira Damazio^{1,6}, Y. Onel¹¹³, A. Onofre^{339,340,341}, P. Osland³⁴², T. Otto¹, Y.M. Oviedo-Torres^{343,344,345}, A. Ozansoy⁵⁸, F. Ozaydin^{88,346}, K. Ozdemir³⁴⁷, A. Ozturk¹, M.A. Pérez de León²⁰⁵, S. Pacetti^{64,65}, H. Pacey⁸, J. Paciello¹⁰⁹, C.E. Pagliarone^{348,349}, A. Paillex¹⁰⁶, H.F. Pais da Silva¹, F. Palla⁴⁰, A. Pampaloni¹⁴¹, C. Pancotti¹⁵¹, M. Pandurovic³⁵⁰, O. Panella⁶⁴, G. Panizzo^{169,170}, C. Pantouvakis^{69,166}, L. Panwar^{9,118,318}, P. Paolucci³⁵, Y. Papa¹⁰⁶, A. Papaefstathiou³⁵¹, Y. Papaphilippou¹, A. Paramonov¹⁶⁰, A. Paret^{128,352}, B. Parker⁶, V. Parma¹, F. Parodi^{141,319}, M. Parodi¹, B. Paroli^{44,45}, J.A. Parsons³⁵³, D. Passarelli³⁷, D. Passeri^{64,65}, B. Pattnaik³²⁰, A. Patwa³⁵⁴, C. Paus¹⁸⁴, F. Pauss¹⁵², F. Peauger¹, I. Pedraza²¹⁷, R. Pedro⁵¹, J. Pekkanen¹, G. Peoni¹, A. Perez¹¹⁰, E. Perez¹, F. Pérez¹⁷³, J.C. Perez¹, J.M. Pérez²²⁷, R. Perez-Ramos^{138,139,355}, G. Pérez Segurana¹, A. Perillo Marcone¹, S. Perna^{35,36}, K. Peters⁴, S. Petracca^{35,356}, A.R. Petri⁴⁴, F. Petriello¹²³, A. Petrovic¹, L. Pezzotti²⁵, G. Piacquadio⁶², G. Piazza¹⁸¹, A. Piccini¹, F. Piccinini¹²⁸, A. Pich³²⁰, T. Pieloni¹¹⁵, J. Pierlot¹, A.D. Pilkington⁵², M. Pillet³²⁶, M. Pinamonti^{169,170}, N. Pinto²³⁷, L. Pintucci^{169,170}, F. Pinzauti¹, K. Piotrkowski²⁷³, C. Pira⁴⁸, M. Pitt¹, R. Pittau¹⁹², S. Pittet¹, P. Placidi^{64,65}, W. Płaczek³⁵⁷, S. Plätzer^{314,358}, M.-A. Pleier⁶, E. Ploerer^{74,117}, H. Podlech^{359,360}, F. Poirier^{9,16,17}, G. Polesello¹²⁸, M. Poli Lener⁴⁸, J. Polinski¹⁶³, Z. Polonsky⁷⁴, N. Pompeo²⁹, M. Pont¹⁷³, G. Alexandru-Popeneciu³⁶¹, W. Porod¹⁹⁷, L. Porta¹, L. Portales³, T. Portaluri³⁰⁹, M.A.C. Potenza⁴⁵, C. Prasse²⁸⁷, E. Premat¹⁸⁵, M. Presilla¹³³, S. Prestemon¹⁴², A. Price³⁵⁷, M. Primavera¹⁶¹, R. Principe¹, M. Prioli⁴⁴, F.M. Procacci¹², E. Proserpio^{44,135}, A. Provino^{92,319}, C. Pueyo¹, T. Puig¹⁹, N. Pukhaeva²⁷⁸, S. Pulawski²²⁹, G. Punzi^{40,78}, A. Pyarelal³⁶², J. Qian³⁰⁵, H. Quack³⁶³, F. S. Queiroz⁴⁷, G. Quintas-Neves³⁰¹, H. Rafique⁷², J.-Y. Raguin², J. Raidal³²², M. Raidal³²², P. Raimondi³⁷, A. Rajabi⁴, S. Ramírez-Urbe²⁰⁵, S. Randles¹⁸⁶, T. Rao⁶, C.Ø. Rasmussen⁶, A. Ratkus³⁶⁴, P.N. Ratoff^{53,365}, P. Razis^{366,367}, P. Rebello Teles^{1,368}, M.N. Rebelo¹³⁰, M. Reboud^{9,10,11}, S. Redaelli¹, C. Regazzoni¹⁰⁶, L. Reichenbach^{1,369}, M. Reissig¹³³, E. Renou¹⁰⁶, A. Rentería-Olivo³²⁰, J. Reuter⁴, S. Rey¹⁰⁶, A. Ribon¹, D. Ricci¹, M. Rignanese^{69,166}, S. Rimjaem³⁷⁰, R.A. Rimmer³⁷¹, R. Rinaldesi¹, L. Rinolfi^{1,295}, O. Rios¹, G. Ripellino¹³¹, B. Rivas³⁷², A. Rivetti⁶⁰, T. Robens³⁷³, F. Robert¹⁸⁵, E. Robutti¹⁴¹, C. Roderick¹, G. Rodrigo³²⁰, M. Rodríguez-Cahuantzi²¹⁷, L. Röhrig^{156,157,246}, M. Roig³⁷⁴, F. Rojati¹⁰⁹, J. Rojo^{203,375}, J. Roloff²³⁴, P. Roloff¹, A. Romanenko³⁷, A. Romero Francia¹, H. Romeyer³⁷⁶, N. Rompotis¹⁸⁶, N. Rongieras¹⁰³, G. Rosaz¹, K. Roslon³⁷⁷, M. Rossetti Conti⁴⁴, A. Rossi^{64,65}, E. Rossi^{35,36}, L. Rossi^{44,45}, A.N. Rossia^{69,166}, S. Rostami³⁸, G. Roy¹, B. Rubik³⁷, I. Ruehl¹, A. Ruiz-Jimeno³⁷⁸, R. Ruprecht¹³³, J.P. Rutherford³⁶², L. Rygaard⁴, M.S. Ryu²⁹⁷, L. Sabato^{1,115}, G. Sadowski^{9,42,43}, D. Saez de Jauregui^{133,379}, M. Sahin³⁸⁰, A. Sailer¹, M. Saito³⁸¹, P. Saiz¹, G.P. Salam^{382,383}, R. Salerno^{9,82,83}, T. Salmi²⁹⁹, B. Salvachua¹, J.P.T. Salvesen^{1,8,137}, B. Salvi³⁰¹, D. Sampsonidis²⁸⁶, Y. Villamizar^{138,139,140}, C. Sandoval³³³, S. Sanfilippo², E. Santopinto¹⁴¹, R. Santoro^{44,135}, X. Sarasola¹¹⁵, L. Sarperi²⁸⁹, I.H. Sarpün³⁸⁴, S. Sasikumar¹, M. Sauvain³⁸⁵, A. Savoy-Navarro^{3,9}, R. Sawada³⁸¹, G. Sborlini³⁸⁶, J. Scamardella^{35,36}, M. Schaer², M. Schumann^{1,4}, M. Schenk¹, C. Scheuerlein¹, C. Schiavi^{141,319}, A. Schloegelhofer¹, D. Schoerling¹, A. Schöning²⁶⁶, S. Schramm¹⁰², D. Schulte¹, P. Schwaller^{253,387}, A. Schwartzman⁷, Ph. Schwemling³, R. Schwienhorst³⁸⁸, A. Sciandra⁶, L. Scibile¹, I. Scimemi³⁸⁹, E. Scomparin⁶⁰, C. Sebastiani¹, B. Seeber³⁹⁰, J.T. Seeman⁷, F. Sefkow⁴, M. Seidel^{2,115}, S. Seidel⁷⁵, J. Seixas^{341,391,392}, N. Selimovic⁶⁹, M. Selvaggi¹, C. Senatore¹⁰², A. Senoli¹⁹⁶, N. Serra⁷⁴, A. Seryi³⁷¹, A. Sfyrla¹⁰², Pramond Sharma³⁹³, Punit Sharma⁶, C.J. Sharp¹, L. Shchutska¹¹⁵, V. Shiltsev³⁹⁴, M. Siano^{44,45}, R. Sierra¹, E. Silva²⁹, R.C. Silva^{47,345}, L. Silvestrini¹⁷², F. Simon¹³³, G. Simonetti¹, R. Simoniello¹, B.K. Singh³⁹⁵, S. Singh⁶, B. Singhal⁸⁰, A. Siodmok^{1,357}, Y. Sirois^{9,82,83}, E. Sirtori¹⁵¹, B. Sitar³⁹⁶, D. Sittardi¹, E. Sitti¹⁵², T. Sjöstrand⁵⁹, P. Skands³⁹⁷, L. Skinnari²⁹⁴, K. Skoufaris¹, K. Skovpen³²⁹, M. Skrzypek¹⁰⁸, P. Slavich^{138,139,140}, V. Slokenbergs²³, V. Smaluk⁶, J. Smiesko^{1,398}, S.S. Snyder⁶, E. Solano¹⁷³, P. Sollander¹, O.V. Solovyanov^{1,9,156}, M. Son³⁹⁹, F. Sonnemann¹, R. Soos^{1,9,10}, F. Sopkova¹⁹¹, T. Sorais⁴⁰⁰, M. Sorbi^{44,45}, S. Sorti^{44,45}, R. Soualah⁴⁰¹, M.

Souayah¹, L. Spallino⁴⁸, S. Spanier⁴⁰², P. Spiller²⁶⁰, M. Spira², D. Stagnara¹⁰³, M. Stallmann¹⁸⁸, D. Standen¹, J.L. Stanyard¹, B. Stapf¹, G.H. Stark²³², M. Statera⁴⁴, C. Staudinger^{1,206}, G. Streicher⁴⁰³, N.P. Strohmaier², R. Stroynowski¹⁰⁷, S. Stucci⁶, G. Stupakov⁷, S. Su³⁶², A. Sublet¹, K. Sugita²⁶⁰, M.K. Sullivan⁷, S. Sultansoy²⁴, I. Syratchev¹, R. Szafron⁶, A. Sznajder⁴⁰⁴, W. Tachon⁴⁰⁵, N.D. Tagdulang^{37,173,338}, N.A. Tahir²⁶⁰, Y. Takahashi¹²⁴, J. Tamazirt^{9,10,11}, S. Tang⁶, Y. Tanimoto²¹², I. Tapan²⁷⁶, G.F. Tassielli^{112,406}, A.M. Teixeira^{9,156,157}, V.I. Telnov¹²⁰, H.H.J. Ten Kate^{1,407}, V. Teotia⁶, J. ter Hoeve³⁰⁰, A. Thabuis¹, G.T. Telles¹⁹, A. Tishelman-Charny⁶, S. Tissandier¹⁰⁹, S. Tizchang^{14,408}, J.-P. Tock¹, B. Todd¹, L. Toffolin^{1,169,409}, A. Tolosa-Delgado¹, R. Tomás García¹, T. Tomasini⁴¹⁰, G. Tonelli^{40,78}, T. Tong⁴¹¹, F. Toral²⁷, T. Torims^{1,364}, L. Torino¹⁷³, K. Torokhtii²⁹, R. Torre¹⁴¹, E. Torrence⁴¹², R. Torres^{53,186}, Toshiyuki Mitsuhashi²¹², A. Tracogna¹⁵¹, O. Traver¹⁷³, D. Treille¹, A. Tricoli⁶, P. Trubacova¹, E. Tsesmelis¹, G. Tsipolitis²⁷⁰, V. Tsulaia¹⁴², B. Tuchming³, C.G. Tully¹⁶⁵, I. Turk Cakir⁵⁸, C. Turrioni⁶⁴, J. Tynan¹⁰⁶, F.P. Ucci^{128,352}, S. Udongwo⁴¹³, C.S. Ün²⁷⁶, A. Unnervik¹, A. Upegui^{100,101}, J.P. Uribe-Ramírez²⁰⁵, J. Uythoven¹, R. Vaglio^{36,92}, F. Valchkova-Georgieva⁴¹⁴, P. Valente¹⁷², R.U. Valente¹⁷², A.-M. Valente-Feliciano³⁷¹, G. Valentino^{1,194}, C.A. Valerio-Lizarraga^{205,325}, S. Valette¹, J.W.F. Valle³²⁰, L. Valle¹, N. Valle¹²⁸, N. Vallis^{1,2,115}, G. Vallone¹⁴², P. van Gemmeren¹⁶⁰, W. Van Goethem¹, P. van Hees⁵⁹, U. van Rienen⁴¹³, L. van Riesen-Haupt^{1,115}, P. Van Trappen¹, M. Vande Voorde^{415,416}, A.L. Vanel¹, E.W. Varnes³⁶², J.-L. Vay¹⁴², F. Veit²⁸⁷, I. Veliscek⁶, R. Veness¹, A. Ventura^{161,233}, M. Verducci^{40,78}, C.B. Verhaaren⁴¹⁷, C. Vernier⁷, A.P. Verweij¹, J.-F. Vian⁴¹⁸, A. Vicini^{44,45}, N. Vignaroli^{161,233}, S. Vignetti¹⁵¹, M.C. Villeneuve²²⁰, I. Vivarelli^{25,26}, E. Voevodina^{1,132}, D.M. Vogt⁴¹⁹, B. Voirin⁴²⁰, S. Voiriot¹⁰⁶, J. Voiron¹⁴⁵, P. Vojtyla¹, V. Völkl¹, L. von Freeden¹, Z. Vostrel^{1,421}, N. Voumard¹, E. Vryonidou⁵², V. Vysotsky¹²⁰, R. Wallny¹⁵², L.-T. Wang⁴²², Y. Wang^{9,10,11}, R. Wanzenberg⁴, B.F.L. Ward⁴²³, N. Wardle¹⁸³, Z. Wa⁵¹⁰⁸, L. Watrelot¹, A.T. Watson⁴²⁴, M.F. Watson⁴²⁴, M.S. Weber⁹⁰, C.P. Welsch^{53,186}, M. Wendt^{1,6}, J. Wenninger¹, B. Weyer¹, G. White⁴²⁵, S. White³⁰⁸, B. Wicki¹, M. Wadorski¹, U.A. Wiedemann¹, A.R. Wiederhold⁵², A. Wiedl¹³³, H.-U. Wienands¹⁶⁰, A. Wieser¹⁵², C. Wiesner¹, H. Wilkens¹, D. Willi⁴²⁶, P.H. Williams^{53,427}, S.L. Williams³², A. Winter⁴²⁴, R.B. Wittwer⁷⁴, D. Wollmann¹, Y. Wu¹¹⁵, Z. Wu^{9,16,17}, J. Xiao^{9,56,57}, K. Xie³⁸⁸, S. Xie^{37,335}, M. Yalvac²², F. Yaman^{427,428}, W.-M. Yao¹⁴², M. Yeresko^{9,156,157}, A. Yilmaz¹⁹⁶, H.D. Yoo²⁷⁷, T. You²¹⁰, F. Yu^{253,387}, S.S. Yu⁸⁰, T.-T. Yu⁴¹², S. Yue¹, A. Zaborowska¹, M. Zahnd¹⁰⁶, C. Zamantzas¹, G. Zanderighi^{66,132}, C. Zannini¹, R. Zanzottera^{44,45}, P. Zaro¹⁰³, R. Zennaro², M. Zerlauth¹, H. Zhang²⁰⁴, J. Zhang¹⁶⁰, Y. Zhang²⁰⁴, Z. Zhang^{9,10,204}, Y. Zhao¹, Y.-M. Zhong⁴²⁹, B. Zhou³⁰⁵, D. Zhou²¹², J. Zhu³⁰⁵, G. Zick³⁷⁴, M.A. Zielinski¹, E. Zimmermann¹⁰⁶, A. Zingaretti^{69,166}, J. Zinn-Justin³, A.V. Zlobin³⁷, M. Zbov⁴⁸, F. Zomer^{9,10,11}, S. Zorzetti³⁷, X. Zuo¹³³, J. Zurita³²⁰, V.V. Zutshi³⁹⁴, M. Zykova².

1 Suisse - CERN, European Organization for Nuclear Research

2 Suisse - PSI, Paul Scherrer Institute

3 France - CEA/Irfu, Commissariat à l’Energie Atomique et aux Energies Alternatives, Institut de recherche sur les lois fondamentales de l’Univers

4 Allemagne - DESY, Deutsches Elektronen-Synchrotron

5 Allemagne - Humboldt-Universität zu Berlin

6 États Unis d'Amérique - BNL, Brookhaven National Laboratory

7 États Unis d'Amérique - SLAC National Accelerator Laboratory

8 Royaume Uni - University of Oxford

9 France - CNRS/IN2P3, Centre National de la Recherche Scientifique, Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules

10 France - IJCLab, Laboratoire de Physique des 2 Infinis Irène Joliot Curie

- 11 France - Université Paris-Saclay et Université Paris-Cité
- 12 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Bari
- 13 Italie - Università di Bari
- 14 Iran - IPM, Institute for Research in Fundamental Science
- 15 Iran - Malayer University
- 16 France - LAPP, Laboratoire d'Annecy de Physique des Particules
- 17 France - Université Savoie Mont Blanc
- 18 Serbie - University of Belgrade
- 19 Espagne - ICMAB/CISC, Institut de Ciència de Materials de Barcelona, Consejo Superior de Investigaciones Científicas
- 20 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Roma Tor Vergata
- 21 Italie - Università Roma Tor Vergata
- 22 Turquie - Yozgat Bozok Üniversitesi
- 23 États Unis d'Amérique - Texas Tech University
- 24 Turquie - TOBB ETU, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
- 25 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Bologna
- 26 Italie - Università di Bologna
- 27 Espagne - CIEMAT, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas
- 28 Arabie Saoudite - KACST, King Abdulaziz City for Science and Technology
- 29 Italie - Università Roma Tre
- 30 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Milano-Bicocca
- 31 Italie - Università di Milano-Bicocca
- 32 Royaume Uni - University of Cambridge
- 33 Turquie - İstanbul Üniversitesi
- 34 Turquie - Eskişehir Teknik Üniversitesi
- 35 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Napoli
- 36 Italie - Università di Napoli Federico II
- 37 États Unis d'Amérique - FNAL, Fermi National Accelerator Laboratory
- 38 Iran - University of Tehran
- 39 Iran- FUM, Ferdowsi University of Mashhad
- 40 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Pisa
- 41 États Unis d'Amérique - University of Texas Austin
- 42 France - IPHC, Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien
- 43 France - Université de Strasbourg
- 44 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Milano

- 45 Italie - Università di Milano
- 46 Suisse - PIBG, Pôle Invertébrés du Basin Genevois
- 47 Brésil - UFRN, Universidade Federal do Rio Grande do Norte
- 48 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Laboratori Nazionali di Frascati
- 49 Suisse - UNIBAS, University of Basel
- 50 Italie - Politecnico di Bari
- 51 Portugal - LIP, Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas
- 52 Royaume Uni - University of Manchester
- 53 Royaume Uni - CI, Cockcroft Institute
- 54 États Unis d'Amérique - Brandeis University
- 55 Arménie - A. Alikhanyan National Laboratory
- 56 France - IP2I, Institut de Physique des 2 Infinis de Lyon
- 57 France - Université Claude Bernard Lyon 1
- 58 Turquie - Ankara Üniversitesi
- 59 Suède - Lund University
- 60 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Torino
- 61 Émirats arabes unis - New York University Abu Dhabi
- 62 États Unis d'Amérique - Stony Brook University
- 63 Royaume Uni - Springer Nature
- 64 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Perugia
- 65 Italie - Università di Perugia
- 66 Allemagne - Technische Universität München
- 67 Turquie - Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi
- 68 Turquie - Doguş, Üniversitesi
- 69 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Padova
- 70 République Populaire de Chine - Harbin Institute of Technology
- 71 États Unis d'Amérique - University of Wisconsin-Madison
- 72 Royaume Uni - RAL, Rutherford Appleton Laboratory, Science and Technology Facilities Council
- 73 Inde - IMSc, Institute of Mathematical Sciences, Chennai
- 74 Suisse - Universität Zürich
- 75 États Unis d'Amérique - University of New Mexique
- 76 France - CPPM, Centre de Physique des Particules de Marseille
- 77 France - Aix-Marseille Université
- 78 Italie - Università di Pisa

- 79 Hongrie - HUN-REN Wigner Research Centre for Physics
- 80 États Unis d'Amérique - Catholic University of America
- 81 États Unis d'Amérique - Duke University
- 82 France - LLR, Laboratoire Leprince-Ringuet
- 83 France - École Polytechnique, Institut Polytechnique de Paris
- 84 Canada - TRIUMF, Canada's National Laboratory for Particle and Nuclear Physics
- 85 Canada - Simon Fraser University
- 86 Italie - FEEM, Fondazione Ente Nazionale Idrocarburi (ENI) Enrico Mattei
- 87 France - BRGM, Bureau de Recherches Géologiques et Minières
- 88 Turquie - Isık Üniversitesi
- 89 Turquie - Istanbul Teknik Üniversitesi
- 90 Suisse - UNIBE, University of Bern
- 91 Italie - Università di Roma la Sapienza
- 92 Italie - CNR-SPIN, Consiglio Nazionale delle Ricerche
- 93 France - Expert naturaliste et entomologiste
- 94 États Unis d'Amérique - ORNL, Oak Ridge National Laboratory
- 95 Autriche - HEPHY, Institut für Hochenergiephysik
- 96 Suisse - Geos, Bureau d'ingénieurs conseils en géotechnique, génie civil, hydraulique et environnement
- 97 France - APC, Laboratoire AstroParticule et Cosmologie
- 98 France - Université Paris Cité
- 99 Autriche - TUWIEN, Technische Universität Wien
- 100 Suisse - HEPIA, Haute École du Paysage, d'Ingénierie et d'Architecture de Genève
- 101 Suisse - HES-SO University of Applied Sciences and Arts Western Suisse
- 102 Suisse - UNIGE, Université de Genève
- 103 France - SETEC ALS, Société d'ingénierie conseil en infrastructures de transport, génie civil et environnement
- 104 États Unis d'Amérique - East Texas A&M University
- 105 Suisse - Amberg Engineering Ltd
- 106 Suisse - ECOTEC Environnement SA, Bureau d'études et de conseil en environnement
- 107 États Unis d'Amérique - Southern Methodist University
- 108 Pologne - IFJ PAN, Institute of Nuclear Physics, Polish Academy of Sciences
- 109 France - Cerema, établissement public pour l'élaboration, le déploiement et l'évaluation de politiques publiques d'aménagement et de transport
- 110 Royaume Uni - Rendel Ltd, Engineering design consultancy firm

- 111 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Roma Tre
- 112 Turquie - Istanbul Beykent Üniversitesi
- 113 États Unis d'Amérique - University of Iowa
- 114 Inde - Indian Institute of Technology Kanpur
- 115 Suisse - EPFL, École Polytechnique Fédérale de Lausanne
- 116 Allemagne - Universität Hamburg, Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften
- 117 Belgique - VUB, Vrije Universiteit Brussel
- 118 France - LPNHE, Laboratoire de Physique Nucléaire et de Hautes Énergies
- 119 Italie - Scuola Superiore Meridionale
- 120 Affiliated with an institute formerly covered by a cooperation agreement with CERN
- 121 Canada - University of Saskatchewan and the Canadian Light Source
- 122 Royaume Uni - University of Bristol
- 123 États Unis d'Amérique - Northwestern University
- 124 États Unis d'Amérique - University of Florida
- 125 Canada - York University
- 126 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Cagliari
- 127 Italie - Università di Cagliari
- 128 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Pavia
- 129 Canada - Queen's University
- 130 Portugal - CFTP-IST, Centro de Física Teórica de Partículas, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa
- 131 Suède - Uppsala University
- 132 Allemagne - MPP, Max-Planck-Institut für Physik Garching
- 133 Allemagne - KIT, Karlsruher Institut für Technologie
- 134 Ukraine - NSC KIPT, National Science Center Kharkiv Institute of Physics and Technology
- 135 Italie - Università degli Studi dell'Insubria
- 136 Allemagne - Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
- 137 Royaume Uni - JAI, John Adams Institute for Accelerator Science, University of Oxford
- 138 France - CNRS/INP, Centre National de la Recherche Scientifique, Institut de Physique
- 139 France - LPTHE, Laboratoire de Physique Théorique et Hautes Energies
- 140 France - Sorbonne Université
- 141 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Genova
- 142 États Unis d'Amérique - LBNL, Lawrence Berkeley National Laboratory
- 143 Italie - IIT, Istituto Italiano di Tecnologia

- 144 Turquie - Gümüşhane Üniversitesi
- 145 Suisse - WSP Ingénieurs Conseils SA
- 146 Mexique - UADY, Autonomous University of Yucatan
- 147 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Ferrara
- 148 Italie - Università di Ferrara
- 149 France - MARCELEON, Cabinet d'ingénierie juridique et foncière
- 150 Allemagne - Springer Nature
- 151 Italie - CSIL (Economic Research Institute)
- 152 Suisse - ETHZ, Swiss Federal Institute of Technology Zurich
- 153 Espagne - UAH, Universidad de Alcalá Madrid
- 154 France - CIA, Conseil Ingénierie Acoustique
- 155 France - Evinerude, Bureau d'études environnementales
- 156 France - LPCA, Laboratoire de Physique de Clermont Auvergne
- 157 France - Université Clermont Auvergne
- 158 Australie - ANSTO, Australien Synchrotron
- 159 Inde - Brahmananda Keshab Chandra College
- 160 États Unis d'Amérique - ANL, Argonne National Laboratory
- 161 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Lecce
- 162 Italie - Università di Palermo
- 163 Pologne - Wrocław University of Science and Technology
- 164 États Unis d'Amérique - Rutgers University
- 165 États Unis d'Amérique - Princeton University
- 166 Italie - Università di Padova
- 167 Turquie - IUE, İzmir Ekonomi Üniversitesi
- 168 Turquie - Ege Üniversitesi
- 169 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Gruppo Collegato di Udine
- 170 Italie - Università di Udine
- 171 États Unis d'Amérique - University of Massachusetts Amherst
- 172 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Roma
- 173 Espagne - CELLS/ALBA, Consortium for the Construction, Equipment and Exploitation of the Synchrotron Light Laboratory
- 174 France - LPSC, Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie
- 175 France - Université Grenoble Alpes
- 176 Italie - Università degli Studi di Napoli Parthenope
- 177 États Unis d'Amérique - National High Magnetic Field Laboratory

- 178 États Unis d'Amérique - Florida State University
- 179 Afrique du Sud - University of Johannesburg
- 180 Espagne - IGFAE, Instituto Galego de Fisica de Altas Enerxías, Universidade de Santiago de Compostela
- 181 Royaume Uni - LSE, London School of Economics
- 182 Espagne - Universidade de Santiago de Compostela
- 183 Royaume Uni - Imperial College London
- 184 États Unis d'Amérique - MIT, Massachusetts Institute of Technology
- 185 France - CETU, Centre d'Etude des Tunnels
- 186 Royaume Uni - University of Liverpool
- 187 Suisse - Linde Kryotechnik AG
- 188 Suisse - ILF Consulting Engineers
- 189 Danemark - NBI, Niels Bohr Institute
- 190 Japon - Hokkaido University
- 191 République Tchèque - CUNI, Charles University
- 192 Espagne - Universidad de Granada
- 193 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Firenze
- 194 Malte - University of Malta
- 195 États Unis d'Amérique - BU, Boston University
- 196 Turquie - IBU, Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi
- 197 Allemagne - Julius-Maximilians-Universität Würzburg
- 198 Australie - University of Adelaide
- 199 Finlande - HIP, Helsinki Institute of Physics, University of Helsinki
- 200 Belgique - ULB, Université Libre de Bruxelles
- 201 Allemagne - IMA, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart
- 202 Belgique - CP3, Centre de Cosmologie, de Physique des Particules et de Phénoménologie, Université Catholique de Louvain
- 203 Pays Bas - NIKHEF, Nationaal instituut voor subatomaire fysica
- 204 République Populaire de Chine - IHEP, Chinese Academy of Sciences
- 205 Mexique - UAS, Universidad Autónoma de Sinaloa
- 206 Autriche - BOKU, Universität für Bodenkultur Wien
- 207 États Unis d'Amérique - Purdue University
- 208 Inde - University of Delhi
- 209 France - Ginger BURGEAP, bureau d'études en environnement
- 210 Royaume Uni - King's College London
- 211 États Unis d'Amérique - University of Maryland
- 212 Japon - KEK, High Energy Accelerator Research Organization

- 213 Suisse - Geoenergy, Reservoir Geology and Basin Analysis Group
- 214 France - SETEC International, Société d'ingénierie en charge des transports et des infrastructures
- 215 Turquie - KÜ, Kırıkkale Üniversitesi
- 216 France - SETEC LERM, Société d'ingénierie conseil en matériaux de construction
- 217 Mexique - BUAP, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
- 218 États Unis d'Amérique - Stanford University
- 219 États Unis d'Amérique - University of Pittsburgh
- 220 Autriche - MUL, Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Subsurface Engineering, Geotechnik und unterirdisches Bauen
- 221 Autriche - MUL-ZaB, Underground Research Center, Zentrum am Berg
- 222 Espagne - IFAE, Institut de Física d'Altes Energies
- 223 Suisse - FHNW, University of Applied Sciences Northwestern Suisse
- 224 Inde - UPES, University of Petroleum and Energy Studies
- 225 France - GANIL, Grand Accélérateur National d'Ions Lourds
- 226 France - Université Caen Normandie
- 227 Brésil - UFRGS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul
- 228 Allemagne - Technische Universität Darmstadt
- 229 Pologne - University of Silesia in Katowice
- 230 Portugal - Universidade de Coimbra
- 231 Brésil - UFPel, Universidade Federal de Pelotas
- 232 États Unis d'Amérique - University of California Santa Cruz
- 233 Italie - Università del Salento
- 234 États Unis d'Amérique - Brown University
- 235 États Unis d'Amérique - University of California Berkeley
- 236 Italie - Università di Torino
- 237 États Unis d'Amérique - Johns Hopkins University
- 238 République Populaire de Chine - Fudan University
- 239 France - LAPTh, Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de Physique Théorique
- 240 République Populaire de Chine - Dongguan University of Technology
- 241 Turquie - Kahramanmaraş, Sütçü İmam Üniversitesi
- 242 Mexique - UNACH, Universidad Autónoma de Chiapas
- 243 Mexique - MCTP, Mesoamerican Centre for Theoretical Physics
- 244 Mexique - UAZ, Universidad Autónoma de Zacatecas
- 245 Finlande - University of Jyväskylä

246 Allemagne - Technische Universität Dortmund
 247 Royaume Uni - Overleaf
 248 États Unis d'Amérique - University of Virginia
 249 États Unis d'Amérique - Cornell University
 250 États Unis d'Amérique - FIT, Florida Institute of Technology
 251 Suisse - Shirokuma GmbH
 252 Pakistan - National Centre for Physics
 253 Allemagne - Johannes Gutenberg Universität Mainz
 254 Pakistan - PAEC, Pakistan Atomic Energy Commission
 255 Inde - Mathabhanga College
 256 Inde - Harish-Chandra Research Institute
 257 Allemagne - MPIK, Max-Planck-Institut für Kernphysik Heidelberg
 258 Suède - European Spallation Source ERIC
 259 France - Centre de calcul de l'IN2P3
 260 Allemagne - GSI, Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH
 261 République de Corée - IBS, Institute for Basic Science, Center for Theoretical Physics of the Universe
 262 Pologne - University of Warsaw
 263 Slovénie - University of Ljubljana
 264 Slovénie - Jozef Stefan Institute
 265 France - Microhumus, Bureau d'étude et d'ingénierie spécialisé dans la gestion des sols dégradés
 266 Allemagne - Fakultät für Physik und Astronomie, Universität Heidelberg
 267 Turquie - Nigde Ömer Halisdemir Üniversitesi
 268 Turquie - Giresun Üniversitesi
 269 Hongrie - University of Miskolc
 270 Grèce - NTUA, National Technical University of Athens
 271 Suisse - Transmutex SA
 272 Irlande - DIAS, Dublin Institute for Advanced Studies, School of Theoretical Physics
 273 Pologne - AGH, University of Science and Technology
 274 Iran - University of Science and Technology of Mazandaran
 275 Royaume Uni - IPPP, Institute for Particle Physics Phenomenology, Durham University
 276 Turquie - Bursa Uludağ Üniversitesi
 277 République de Corée - YU, Yonsei University
 278 Affiliated with an international laboratory covered by a cooperation agreement with CERN

279 France - CPT, Centre de Physique Théorique
280 France - Aix-Marseille Université et Université du Sud Toulon Var
281 République de Corée - KIAS, Korea Institute for Advanced Study
282 Canada - Carleton University
283 Grèce - FEAC Engineering P.C.
284 Grèce - UPATRAS, University of Patras
285 États Unis d'Amérique - University of Kansas
286 Grèce - AUTH, Aristotle University of Thessaloniki
287 Allemagne - IML, Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik
288 Allemagne - RWTH Aachen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
289 Suisse - ZHAW, Zurich University of Applied Sciences
290 Allemagne - Universität Münster
291 Afrique du Sud - University of the Witwatersrand
292 Autriche - Fachhochschule Technikum Wien
293 États Unis d'Amérique - University of California Irvine
294 États Unis d'Amérique - Northeastern University
295 France - ESI, European Scientific Institute
296 République de Corée - UOS, University of Seoul
297 République de Corée - KNU Kyungpook National University
298 République de Corée - KU, Korea University
299 Finlande - Tampere University
300 Royaume Uni - University of Edinburgh
301 Suisse - BG Ingénieurs Conseils
302 République Populaire de Chine - T.-D. Lee Institute
303 République Populaire de Chine - Shanghai Jiao Tong University
304 Italie - CNR, Consiglio Nazionale delle Ricerche
305 États Unis d'Amérique - University of Michigan
306 États Unis d'Amérique - University of Pennsylvania
307 États Unis d'Amérique - University of Minnesota
308 France - ESRF, European Synchrotron Radiation Facility
309 Royaume Uni - SUSSEX, University of Sussex
310 Italie - Università di Bari Aldo Moro
311 Royaume Uni - University of Bath
312 Italie - Scuola Normale Superiore di Pisa

313 Brésil - Universidade de São Paulo
 314 Autriche - Universität Graz
 315 Egypte - Center for High Energy Physics, Fayoum University
 316 Egypte - Center of theoretical physics, British University in Egypte
 317 Egypte - Cairo University
 318 France - Sorbonne Université et Université Paris Cité
 319 Italie - Università di Genova
 320 Espagne - IFIC-CSIC/UV, Instituto de Física Corpuscular, Consejo Superior de Investigaciones Científicas/Universidad de Valencia
 321 Suisse - Service de géologie, sols et déchets du canton de Genève
 322 Estonie - NICPB, National Institute for Chemical Physics and Biophysics
 323 Estonie - UT, University of Tartu
 324 Espagne - Universidad de Salamanca
 325 Mexique - UGTO, Universidad de Guanajuato
 326 Suisse - Edaphos engineering
 327 Allemagne - Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf
 328 Inde - Tata Institute of Fundamental Research Mumbai
 329 Belgique - Universiteit Gent
 330 Italie - CNR-IOM, Consiglio Nazionale delle Ricerche
 331 Autriche - JKU, Johannes Kepler Universität Linz
 332 Norvège - University of Stavanger
 333 Colombie - Universidad Nacional de Colombia
 334 Italie - Trento Institute for Fundamental Physics and Applications
 335 États Unis d'Amérique - Caltech, California Institute of Technology
 336 Italie - Università della Calabria
 337 Espagne - IFT, Instituto de Física Teórica, Universidad Autónoma de Madrid
 338 Espagne - UPC, Universitat Politècnica de Catalunya
 339 Portugal - Departamento de Física, Universidade do Minho
 340 Portugal - Centro de Física das Universidades do Minho e do Porto
 341 Portugal - LaPMET, Laboratory of Physics for Materials and Emergent Technologies
 342 Norvège - University of Bergen
 343 Chili - SAPHIR, Instituto Milenio de Física Subatómica en la Frontera de Altas Energías
 344 Chili - Universidad Andres Bello
 345 Brésil - IIP, International Institute of Physics
 346 Japon - Tokyo International University

- 347 Turquie - Izmir Bakırçay Üniversitesi
- 348 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Laboratori Nazionali del Gran Sasso
- 349 Italie - Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale
- 350 Serbie - Vinca Institute of Nuclear Sciences
- 351 États Unis d'Amérique - Kennesaw State University
- 352 Italie - Università di Pavia
- 353 États Unis d'Amérique - Columbia University
- 354 États Unis d'Amérique - DOE, Department of Energy of the États Unis d'Amérique of America
- 355 France - IPSA, Institut Polytechnique des Sciences Avancées
- 356 Italie - Università degli Studi del Sannio
- 357 Pologne - UJ, Université Jagellonne (Cracovie)
- 358 Autriche - Universität Wien
- 359 Allemagne - Goethe-Universität Frankfurt, Institut für Angewandte Physik
- 360 Allemagne - HFFH, Helmholtz Forschungsakademie Hessen für FAIR
- 361 Roumanie - INCDTIM, National Institute for Research and Development of Isotopic and Molecular Technologies
- 362 États Unis d'Amérique - University of Arizona
- 363 Allemagne - Technische Universität Dresden
- 364 Lettonie - RTU, Riga Technical University
- 365 Royaume Uni - Lancaster University
- 366 Chypre - University of Chypre
- 367 Chypre - Cosmos Open University
- 368 Brésil - CBPF, Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas
- 369 Allemagne - Universität Bonn
- 370 Thaïlande - CMU, Chiang Mai University
- 371 États Unis d'Amérique - JLAB, Thomas Jefferson National Accelerator Facility
- 372 Équateur - ESPOL, Escuela Superior Politécnica del Litoral
- 373 Croatie - IRB, Rudjer Boskovic Institute
- 374 France - Air Liquide Advanced Technologies
- 375 Pays Bas - VU Amsterdam
- 376 France - INGÉROP ,Groupe d'ingénierie et de conseil en mobilité durable, transition énergétique et cadre de vie
- 377 Pologne - Warsaw University of Technology
- 378 Espagne - IFCA, Instituto de Física de Cantabria
- 379 Allemagne - Institut für Beschleunigerphysik und Technologie
- 380 Turquie - Uşak Üniversitesi

381 Japon - ICEPP, International Center for Elementary Particle Physics, University of Tokyo
382 Royaume Uni - Rudolf Peierls Centre for Theoretical Physics, University of Oxford
383 Royaume Uni - All Souls College, University of Oxford
384 Turquie - Akdeniz Üniversitesi
385 Suisse - Latitude Durable SARL
386 Espagne - USAL, Universidad de Salamanca
387 Allemagne - PRISMA+ Cluster of Excellence
388 États Unis d'Amérique - Michigan State University
389 Espagne - Universidad Complutense Madrid
390 Suisse - scMetrology SARL
391 Portugal - IST, Instituto Superior Tecnico, Universidade de Lisboa
392 Portugal - CeFEMA, Center of Physics and Engineering of Advanced Materials
393 Inde - Indian Institute of Science Education and Research Mohali
394 États Unis d'Amérique - NIU, Northern Illinois University
395 Inde - Banaras Hindu University
396 Slovaquie - Comenius University
397 Australie - Monash University
398 Slovaquie - Slovak Academy of Sciences
399 République de Corée - KAIST, Korea Advanced Institute of Science and Technology
400 France - Amberg Engineering Chambéry
401 Émirats arabes unis - Khalifa University of Science and Technology
402 États Unis d'Amérique - University of Tennessee
403 Autriche - WIFO, Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung
404 Brésil - Universidade do Estado do Rio de Janeiro
405 France - Mélica, NATURA SCOP, Études et expertises environnementales
406 Italie - Università LUM, Casamassima
407 Pays Bas - University of Twente
408 Iran - Arak University
409 Italie - Università di Trieste
410 France - ForestAllia, Cabinet de gestion et d'expertise forestières
411 Allemagne - Universität Siegen
412 États Unis d'Amérique - University of Oregon
413 Allemagne - Universität Rostock
414 Suisse - CEGELEC SA
415 Suède - KTH, Royal Institute of Technology, Stockholm

- 416 Suède - OKC, Oskar Klein Centre for Cosmoparticle Physics
- 417 États Unis d'Amérique - Brigham Young University
- 418 France - Expert foncier et agricole
- 419 Allemagne - ITSM, Institut für Thermische Strömungsmaschinen und
Maschinenlaboratorium, Universität Stuttgart
- 420 France - École Normale Supérieure de Lyon
- 421 République Tchèque - CTU, Czech Technical University
- 422 États Unis d'Amérique - University of Chicago
- 423 États Unis d'Amérique - Baylor University
- 424 Royaume Uni - University of Birmingham
- 425 Royaume Uni - University of Southampton
- 426 Suisse - Swisstopo, Federal Office of Topography
- 427 Royaume Uni - Daresbury Laboratory, Science and Technology Facilities Council
- 428 Turquie - IZTECH, Izmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü
- 429 Hong Kong - City University of Hong Kong
- + décédé(e)

Résumé

Le Volume 3 du rapport de faisabilité du FCC présente des études relatives au génie civil, à l'élaboration d'un scénario d'implantation du projet, ainsi qu'aux aspects environnementaux et de durabilité. Le rapport détaille les améliorations itératives apportées aux concepts de génie civil depuis 2018, en tenant compte des conditions du sous-sol, des exigences en matière d'accélérateurs et d'expériences, ainsi que de considérations de nature territoriale. Il décrit une configuration de génie civil techniquement réalisable et économiquement viable qui sert de base aux études de sous-sol détaillées, à la conception de la construction, à l'estimation des coûts et à la planification de la mise en œuvre du projet. En outre, le rapport met en évidence les études de sous-sol en cours dans des zones clés afin de soutenir le développement d'un modèle souterrain 3D amélioré pour la région.

Le rapport décrit le développement du scénario de projet basé sur l'approche d'optimisation itérative « Éviter-Réduire-Compenser ». Le scénario de référence établit un équilibre entre les performances physiques optimales et la compatibilité territoriale, les risques de mise en œuvre et les coûts. Des études environnementales sur le terrain couvrant près de 600 hectares et portant sur de nombreux aspects urbains, économiques, sociaux et techniques ont confirmé la faisabilité technique du projet et ont contribué à la préparation des documents d'entrée essentiels pour la phase d'autorisation officielle du projet. Le résumé souligne également l'ouverture d'un dialogue public dans le cadre de la procédure d'autorisation. Les résultats d'une évaluation complète de l'impact socio-économique, qui comprend aussi les effets environnementaux significatifs, sont présentés. Même dans les conditions les plus prudentes et les plus strictes, on obtient un ratio coûts-bénéfices positif pour la phase FCC-ee. Enfin, le rapport donne un bref résumé des études menées pour documenter l'état actuel de l'environnement.

Préface de la Directrice générale du CERN

En 2021, en réponse à la mise à jour 2020 de la stratégie européenne pour la physique des particules, le Conseil du CERN a lancé l'étude de faisabilité du futur collisionneur circulaire (FCC).

Le présent rapport résume l'immense travail effectué par la collaboration internationale pour le FCC pendant plusieurs années. Il couvre, entre autres, les objectifs et le potentiel de la physique, la géologie, le génie civil, l'infrastructure technique, l'implantation territoriale, les aspects environnementaux, les besoins en R&D pour les accélérateurs et les détecteurs, les bénéfices socio-économiques et le coût. Il constitue une contribution importante à la mise à jour en cours de la stratégie européenne pour la physique des particules.

L'étude de faisabilité a nécessité la participation active d'un large éventail de parties prenantes. En particulier, tout au long de l'étude, le CERN a été accompagné par ses deux États hôtes, la France et la Suisse et a travaillé avec des entités aux niveaux local, régional et national. Je suis très reconnaissante aux autorités et aux équipes des États hôtes pour leur aide précieuse. En outre, des parties importantes de l'étude ont été soutenues par l'Union européenne dans le cadre des programmes-cadres Horizon 2020 et Horizon Europe. L'étude a également bénéficié des contributions de laboratoires d'accélérateurs et d'universités de toute l'Europe, comme l'initiative CHART (Swiss Accelerator Research and Technology), ainsi que des Amériques, de l'Asie, de l'Afrique et de l'Australie.

Le programme FCC intégré proposé comprend deux étapes possibles : un collisionneur électron-positron servant à la production de bosons de Higgs, d'interactions électrofaibles et de quarks top fonctionnant à différents niveaux d'énergie au centre de masse, suivi ultérieurement par un collisionneur proton-proton fonctionnant à un niveau d'énergie de collision sans précédent d'environ 100 TeV. Les programmes de physique complémentaires de chaque étape correspondent aux priorités dans le domaine de la physique, telles qu'elles sont exprimées dans la mise à jour 2020 de la stratégie européenne pour la physique des particules.

L'une des principales réalisations de l'étude de faisabilité est le choix de l'emplacement de l'anneau du collisionneur et de l'ensemble de l'infrastructure, y compris les sites de surface et les puits d'accès, qui a été développé et optimisé pendant plusieurs années selon le principe « éviter, réduire, compenser ». Des études de durabilité ont évalué l'efficacité énergétique, l'utilisation des sols, la gestion de l'eau et des ressources, ainsi que l'impact socio-économique, garantissant que le FCC soit conçu conformément aux normes environnementales et sociétales les plus actuelles.

Je tiens à remercier toutes celles et tous ceux qui ont contribué à ce rapport pour leur travail acharné et leur engagement, qui ont permis d'obtenir les résultats exceptionnels présentés ici.

Fabiola Gianotti CERN,

Directrice générale

Préface du Président du conseil de collaboration FCC

S'appuyant sur la précédente étude de conception du futur collisionneur circulaire (FCC) menée entre 2014 et 2018, l'étude de faisabilité du FCC (2021-2025) a été réalisée grâce à une solide collaboration internationale, qui comprend désormais plus de 160 instituts dans le monde entier. Le « programme intégré » du FCC, développé dans le cadre de l'étude de faisabilité, consiste en un premier collisionneur électrons-positrons, le FCC-ee, qui pourra être suivi d'un collisionneur protons-protons, le FCC-hh. Cet échelonnement dans le temps tient compte des priorités dans le domaine de la physique, telles que formulées dans les mises à jour de la stratégie européenne pour la physique des particules de 2012 et 2020, ainsi que de l'état de préparation technologique et des coûts relatifs des FCC-ee et FCC-hh.

Au fil des ans, j'ai suivi de près l'avancement régulier de l'étude, en représentant la collaboration FCC au sein du Comité directeur international et en participant aux réunions annuelles de la Semaine FCC, qui comprennent les sessions du Comité de collaboration internationale. L'engagement et l'enthousiasme des membres de la collaboration ont toujours été impressionnants. L'effort collectif est clairement visible. La participation des étudiants et des chercheurs en début de carrière est en augmentation. Il existe vraiment une détermination commune et un élan pour aller de l'avant.

La forte collaboration internationale autour du FCC et son réseau mondial constituent une base solide pour l'avenir de ce projet. La communauté FCC ne cesse de s'agrandir, avec l'engagement croissant de nouveaux instituts et partenaires dans le monde entier. Ce large soutien sera essentiel lorsque le projet entrera dans sa prochaine phase.

L'étude de faisabilité du FCC démontre non seulement la viabilité technique du projet, mais aussi la force de la communauté internationale qui le soutient. Alors que nous passons à l'étape suivante de la phase de prise de décision, cet effort collectif est essentiel pour montrer la voie à suivre. Le FCC promet des opportunités scientifiques de grande envergure et des avantages à long terme pour l'innovation, la formation et la collaboration mondiale dans le domaine de la science et de la technologie.

Philippe Chomaz CEA,

Président du comité de collaboration internationale FCC

Table des matières

1. Génie civil.....	28
1.1. Introduction	28
1.1.1. Tunnel de l'accélérateur	33
1.1.2. Tunnels de dérivation	36
1.1.3. Tunnels de raccordement.....	37
1.1.4. Puits.....	37
1.1.5. Cavernes	39
1.1.6. Structures souterraines pour l'infrastructure radiofréquences	41
1.1.7. Alcôves	42
1.1.8. Caverne des absorbeurs de faisceau	43
1.1.9. Matériaux excavés	44
1.1.10. Creusement de tunnel dans la roche molassique	45
1.2. Structures de surface	46
1.2.1. Site de surface PA	48
1.2.2. Site de surface PB	51
1.2.3. Site de surface PD	53
1.2.4. Site de surface PF	54
1.2.5. Site de surface PG.....	54
1.2.6. Site de surface PH.....	55
1.2.7. Site de surface PJ	55
1.2.8. Site de surface PL	55
1.3. Approche par étapes.....	57
1.3.1. Structures souterraines.....	57
1.3.2. Structures de surface	58
1.4. Études des sites souterrains	60
1.4.1. Géologie de la région.....	60
1.4.2. Développement d'un modèle géologique en 3D.....	61
1.4.3. Phase 1 de l'étude des sites souterrains.....	62
1.4.4. Phase 2 de l'étude des sites souterrains.....	68
1.4.5. Cartographie des failles et modélisation sismique.....	69
1.4.6. Résumé de l'étude des sites souterrains	69
1.5. Gestion des matériaux excavés	70
1.5.1. Introduction.....	70
1.5.2. Les quantités de matériaux excavés.....	70
1.5.3. Les caractéristiques des matériaux excavés.....	71
1.5.4. Approche de gestion des matériaux excavés et des risques associés	72
1.5.5. Cadres réglementaires	74
1.5.6. Scénarios envisagés pour la gestion des matériaux excavés.....	76
1.5.7. Aperçu des études suivantes	81

1. Génie civil

1.1. Introduction

Depuis l'achèvement de l'étude conceptuelle du FCC en 2018, plusieurs modifications importantes ont été apportées au génie civil. Celles-ci découlent d'une meilleure définition des exigences relatives aux systèmes en interface avec le génie civil, tels que les accélérateurs, les détecteurs et l'infrastructure technique à intégrer dans les structures souterraines et de surface. En outre, la localisation plus précise des sites de surface a permis de mieux comprendre les contraintes géographiques et environnementales à prendre en compte dans le développement de l'infrastructure de génie civil. Les principales améliorations apportées depuis la finalisation de l'étude conceptuelle du génie civil souterrain nécessaire pour le collisionneur FCC-ee sont les suivantes :

- réduction de la circonférence totale du tunnel de l'accélérateur de 97,8 km à 90,6 km ;
- réduction du nombre de sites de surface (et de points d'accès au sous-sol) de 12 à 8 ;
- réduction du nombre de puits permanents nécessaires à l'exploitation de 18 à 12 ;
- réduction de la profondeur du puits le plus profond de 578 m à 400 m ;
- ajout de génie civil souterrain pour les systèmes RF sur les sites techniques PH et PL ;
- simplification du génie civil nécessaire pour le système d'absorbeur de faisceau ;
- simplification de l'infrastructure souterraine nécessaire pour les lignes de transfert de faisceau, avec l'utilisation d'un seul tunnel pour accueillir les transferts vers le FCC dans le sens des aiguilles d'une montre et dans le sens inverse.

En complément des points précédents, les exigences relatives au génie civil en surface ont donné lieu à une compréhension plus détaillée, qui ne cesse de s'affiner. Des dispositions spatiales initiales ont été élaborées pour les huit sites de surface, avec un dimensionnement préliminaire des bâtiments, des routes et autres infrastructures de surface nécessaires fournissant une base pour des ajustements futurs. Pour deux des huit sites, des études préliminaires de conception de bâtiments ont été réalisées dans le cadre d'une collaboration avec le Laboratoire national des accélérateurs Fermi aux États-Unis. Les résultats apportent des indications précieuses sur les besoins en espace, les besoins d'accès des utilisateurs et les enveloppes de coûts. Ces indications s'appuient principalement sur les besoins techniques des systèmes en interface. L'intégration de l'approche « Éviter, Réduire, Compenser » pour développer les sites de surface est un processus itératif, qui nécessite des efforts continus pour comprendre les besoins techniques, les exigences et les contraintes territoriales, ainsi que les implications sur les coûts et les risques du projet. La compréhension des exigences des systèmes techniques est un élément d'orientation essentiel. L'analyse de l'état actuel de l'environnement, également réalisée dans le cadre de l'étude de faisabilité, est un autre aspect qui éclairera les activités ultérieures.

Une approche du génie civil par étapes a été étudiée. L'infrastructure essentielle au fonctionnement du collisionneur FCC-ee et de ses expériences associées est incluse dans la phase initiale, de même que tout le génie civil nécessaire au FCC-hh qu'il serait impossible, peu pratique ou inefficace de construire au cours d'une deuxième phase. Cette approche par étapes concerne principalement l'infrastructure de surface, puisqu'il est relativement simple de construire des bâtiments supplémentaires dans un deuxième temps.

Le génie civil du FCC-ee, tel qu'il est défini dans le présent document, s'appuie sur les études achevées lors de la phase d'étude conceptuelle et réalisées au cours de la phase d'étude de faisabilité. La conception actuelle démontre la faisabilité technique du génie civil du FCC. Il convient toutefois

de noter qu'il reste des zones dans lesquelles des travaux supplémentaires doivent être réalisés afin de réduire les risques techniques, notamment pour tenir compte des données restantes qui seront fournies à l'issue de la phase 1 des investigations des sites souterrains, qui ont débuté en octobre 2024 et dont la conclusion est prévue pour la fin 2025.

Les travaux réalisés depuis l'achèvement de l'étude conceptuelle ont largement maintenu des éléments spatiaux similaires pour les ouvrages souterrains (dimensions des cavernes, puits, tunnels, etc.). Il n'a donc pas été nécessaire d'entreprendre de calculs supplémentaires pour la stabilité structurale d'ensemble de ces éléments. En outre, les méthodologies de construction restent largement telles que celles qui avaient été identifiées lors de la phase d'étude conceptuelle, bien que la séquence d'exécution des travaux ait été revue, notamment pour tenir compte du nombre réduit de points d'accès au génie civil souterrain.

La contribution essentielle à l'étude de faisabilité est venue de l'interaction précoce entre l'équipe de génie civil du FCC et les éventuels futurs acteurs industriels. Le CERN a organisé un certain nombre de réunions et d'ateliers avec plusieurs grands entrepreneurs spécialisés dans le génie civil souterrain. Le retour d'information reçu s'est avéré inestimable pour développer non seulement des solutions techniques robustes, mais aussi pour élaborer un calendrier réaliste et efficace pour l'exécution des travaux de génie civil. Les retours de l'industrie ont également joué un rôle important lors de la réflexion initiale du CERN sur les solutions contractuelles envisageables pour la réalisation de la conception et de la construction du génie civil. Le calendrier des travaux de génie civil élaboré dans le cadre de l'étude de faisabilité a été intégré aux activités ultérieures d'installation des infrastructures et des machines. Le calendrier intégré qui en résulte se traduit par un transfert progressif du génie civil pour chacun des huit secteurs, ce qui permet une exécution parallèle et plus efficace des activités d'installation dans le tunnel principal.

1.1 Structures souterraines

Plusieurs améliorations ont été apportées aux structures souterraines depuis l'achèvement du rapport d'étude conceptuelle. Les structures souterraines nécessaires au collisionneur FCC-ee, ainsi que celles du collisionneur FCC-hh qui ne peuvent être différées ont fait l'objet d'une identification approfondie. Ces dernières seront construites dans le cadre des travaux de génie civil nécessaires au collisionneur FCC-ee et aux expériences associées.

Une structure de décomposition des produits (PBS, Product Breakdown Structure) a été produite jusqu'au niveau 4, avec 205 structures identifiées de manière unique. Le Tableau 1.1 présente la structure PBS et les structures associées pour le secteur PA à PB. Les PBS des autres secteurs suivent une structure similaire. Au total, les travaux de génie civil souterrains consistent en douze puits permanents pour l'exploitation, un puits temporaire étant nécessaire uniquement pendant la construction du génie civil, douze grandes cavernes avec des portées supérieures à 20 m, ainsi que de nombreuses cavernes plus petites, des alcôves, des tunnels de connexion et de dérivation, qui constituent collectivement le génie civil souterrain. La Fig. 1.1 présente un schéma du génie civil souterrain.

Tableau 1.1 : PBS pour les structures souterraines du secteur PA à PB.

Niveau PBS				Description
1	2	3	4	
2				Génie civil
2	3			Structures souterraines
2	3	1		Site PA
2	3	1	1	Puits d'expérience
2	3	1	2	Puits de service
2	3	1	3	Caverne expérimentale
2	3	1	4	Caverne de service
2	3	1	5	Alcôves
2	3	1	6	Tunnel de faisceau Secteur AB
2	3	1	7	Tunnel de dérivation AL
2	3	1	8	Tunnel de dérivation AB
2	3	1	9	Tunnels et galeries de raccordement
2	3	1	10	Élargissements de tunnel

Pour l'illustration, voir le texte en anglais.

Fig. 1.1 : Schéma du génie civil souterrain du FCC-ee.

La circonférence totale du tunnel d'accélération qui abritera les collisionneurs est de 90,6 km, ce qui correspond à une réduction d'environ 7 % par rapport au tunnel de 97,8 km qui avait été étudié lors de la phase de conception. Le tunnel de l'accélérateur, qui abritera le collisionneur, a un diamètre nominal interne de 5,5 m. Sur la base de données d'étude de sites préexistantes et récentes, l'élévation moyenne est de 300 m au-dessus du niveau de référence et l'inclinaison du plan du tunnel a été maintenue à 0,1 % et 0,4 % dans les deux axes. Il en résulte une profondeur de tunnel qui varie entre 30 m, là où le tunnel passe sous le Rhône, et 560 m, là où le tunnel passe sous le plateau de la Borne, à l'est du site global de l'étude. La profondeur moyenne du tunnel est d'environ 240 m sous la surface du sol.

Deux tailles de complexes de cavernes d'expérience sont envisagées ; elles sont similaires en termes de disposition et de fonction. Le premier type comprend une caverne destinée à accueillir le plus grand détecteur FCC-hh prévu, d'une portée de 35 m (similaire à celle de la caverne du détecteur ATLAS existant) et le second type comprend une caverne destinée à accueillir les détecteurs FCC-hh plus petits, d'une portée de 25 m (similaire à celle de la caverne du détecteur CMS existant).

Un seul tunnel de transfert reliant le système d'injection au FCC est envisagé. Ce tunnel commence près de la surface sur le site actuel du CERN à Prévessin, où il sera relié au tunnel en tranchée couverte qui abritera le LINAC à haute énergie. Le tunnel descendra sur une distance d'environ 5 km, après quoi il se ramifiera à un endroit proche du site PA pour permettre une injection symétrique dans le FCC, dans le sens des aiguilles d'une montre et dans le sens inverse. L'injection aura lieu de part et d'autre de la zone d'expérience au site PA.

Les prévisions concernant la géologie qui sera rencontrée pendant les travaux de génie civil des structures souterraines sont cohérentes avec celles qui ont été établies pendant la phase de conception de l'étude FCC-ee et qui donnent une base solide pour l'affinement et l'atténuation des risques au cours des phases ultérieures. On s'attend actuellement à ce que la majorité des tunnels et des complexes de cavernes soient situés dans la molasse, une roche sédimentaire peu ou moyennement résistante composée de séquences complexes de marnes et de grès. Ce matériau est bien adapté au creusement de tunnels, car il est généralement étanche et peut être soutenu par la mise en œuvre d'une gamme de mesures standard de soutien de la roche, telles que les boulons de roche, le béton projeté, les segments de béton armé, etc. Les cavernes plus grandes peuvent devenir plus difficiles et nécessiteront des méthodes plus complexes pour l'excavation et le soutènement de la masse rocheuse. Ce point est détaillé dans la Section 1.1.5.

Le tunnel de l'accélérateur traversera environ 4,4 km de roche calcaire. Il sera certainement possible de creuser la roche à l'aide d'un tunnelier ou de méthodes traditionnelles de forage et d'abattage. Cependant, cette masse rocheuse est susceptible de receler de grands vides interconnectés (karsts) avec de l'eau et de la vase sous haute pression. Des mesures de construction spécifiques peuvent se révéler nécessaires dans cette zone, comme indiqué à la Section 1.1.1. L'optimisation de la position des structures souterraines a permis de s'assurer que l'emplacement des plus grandes structures souterraines, telles que les cavernes et les puits, évite les zones où des formations calcaires sont susceptibles d'être rencontrées. Cette question devra être examinée attentivement à l'issue de la campagne d'investigations en cours sur le terrain. Les puits devront être creusés à travers des couches plus ou moins profondes de ce que l'on appelle les strates morainiques, avant d'atteindre la roche molassique. Ce type de strate est un mélange d'argiles, de sables, de graviers et de cailloux. On sait que ces strates contiennent des aquifères.

Le CERN a plus de 40 ans d'expérience dans la gestion de projets relatifs à la construction de tunnels, de puits et de cavernes dans la roche molassique et dispose donc de l'expérience et des connaissances nécessaires pour prendre en charge le génie civil du FCC. Certains aspects, mentionnés ci-dessous, seront complexes mais resteront néanmoins à la portée de nombreux entrepreneurs en génie civil des États membres.

– La profondeur moyenne à laquelle les structures souterraines seront construites est environ trois fois supérieure à la profondeur moyenne du tunnel du LHC. Il en résultera des contraintes au sol plus élevées qui devront être prises en compte dans la conception des structures souterraines et dans le choix des méthodes de construction à utiliser. Des solutions techniques éprouvées seront appliquées pour atténuer efficacement les problèmes potentiels, tels que la déformation des sols et pour assurer le bon fonctionnement du tunnelier.

Le tunnel devra traverser une zone dite de « molasse charriée », formation géologique présentant des caractéristiques différentes de celles de la molasse rocheuse, dans laquelle sont construites les structures souterraines existantes du CERN. Ces facteurs seront soigneusement pris en compte dans la conception et la méthodologie de construction afin de garantir un processus d'excavation sûr et efficace.

– Le tunnel traversera plusieurs kilomètres de calcaire, susceptibles de contenir de l'eau sous haute pression. Des conditions similaires ont été rencontrées lors de la construction du tunnel du LEP, fournissant des informations précieuses sur les mesures d'atténuation possibles. La conception du tunnel, le choix des méthodes de creusement et le traitement du sol à l'avant du front de taille devront être soigneusement étudiés dans cette zone de roche calcaire. Les solutions techniques modernes, associées à l'expérience du CERN, garantissent que les difficultés éventuelles seront bien comprises et pourront être gérées efficacement.

– Le tunnel passera sous le Lac Léman. Dans la mesure du possible, l'horizon du tunnel sera maintenu à l'intérieur de la roche molassique. Si cela n'est pas possible, il faudra recourir à d'autres techniques de creusement de tunnels pour traverser les sables/graviers/silts contenant de l'eau comme, par exemple, des tunneliers à équilibre de pression de terre ou des tunneliers à boue.

– Il est probable que lors de la construction de certains puits, des strates morainiques contenant de l'eau devront être traversées avant d'atteindre la roche morainique plus favorable. Là encore, il faudra recourir à des méthodes de construction spécialisées telles que les parois moulées ou la congélation du sol.

Bien que certains aspects de la construction souterraine du génie civil soient techniquement plus difficiles que les projets de construction précédents du CERN, on estime que les structures souterraines du génie civil peuvent être conçues et construites à l'aide des techniques conventionnelles existantes et éprouvées, y compris la vaste expérience du CERN en matière de construction souterraine. Cette considération est étayée par les discussions techniques que le CERN a menées avec des entreprises spécialisées dans le creusement de tunnels.

Les contraintes liées à l'environnement géologique à grande échelle qui pèsent sur la réalisation des ouvrages de génie civil souterrains, telles qu'elles ont été décrites dans le rapport d'étude conceptuelle, demeurent largement valables. Il convient toutefois de noter que la réduction de la circonférence du tunnel du collisionneur et de l'accélérateur a entraîné l'augmentation de la probabilité que le tunnel soit principalement positionné dans la roche molassique favorable, grâce à son éloignement général des régions calcaires associées aux affleurements du Jura, du Vuache et de la Mandallaz. Encore une fois, cela devrait être confirmé par l'achèvement des enquêtes actuellement réalisées sur place.

1.1.1. Tunnel de l'accélérateur

La majeure partie des 90,6 km de circonférence du tunnel du FCC consiste en un tunnel de 5,5 m de diamètre interne, comme illustré à la Fig. 1.2. Il y a huit secteurs, chacun d'une longueur d'environ 11,3 km. La majeure partie de chaque secteur consiste en un arc de cercle d'un rayon de 14,5 km.

Pour l'illustration, voir le texte en anglais.

Fig. 1.2 : Coupe transversale du tunnel de l'accélérateur.

Le tunnel de l'accélérateur abrite le faisceau et l'infrastructure de service, ainsi qu'un couloir de transport. La conception actuelle du tunnel suppose que là où des tunneliers sont utilisés pour l'excavation, un revêtement segmentaire en béton armé préfabriqué sera utilisé pour soutenir le tunnel. Dans les zones où les tunneliers ne seront pas utilisés, un support primaire composé de boulons de roche et de béton projeté renforcé par des fibres sera utilisé avec un revêtement secondaire en béton coulé sur place. Le sol du tunnel sera en béton coulé sur place et installé sur des ensembles formant des cavités pour le drainage du tunnel et l'amenée d'air frais. Les chambres d'accès au réseau de drainage seront espacées tous les 100 mètres le long du tunnel. Afin de garantir un diamètre interne d'au moins 5,5 m pour l'intégration de l'infrastructure technique, le tunnel de l'accélérateur sera construit avec une enveloppe de tolérance de 100 mm.

L'installation du revêtement segmentaire préfabriqué qui soutient le sol est effectuée automatiquement au sein du tunnelier. Le CERN s'est renseigné auprès d'un fabricant européen de tunneliers au sujet des besoins potentiels en machines pour la construction du FCC. Ce fabricant a indiqué qu'un tunnelier à double bouclier ou à bouclier unique pourrait être utilisé.

Pour l'illustration, voir le texte en anglais.

Fig. 1.3 : Tunnelier à bouclier unique. Source : Herrenknecht

L'avantage type d'un tunnelier à double bouclier par rapport à un tunnelier à simple bouclier est l'augmentation de la vitesse de construction, car la machine peut simultanément excaver le sol et installer le revêtement segmentaire du tunnel. À l'inverse, une machine à bouclier unique nécessite que ces deux phases se déroulent de manière séquentielle. Une machine à double bouclier est également mieux adaptée à une géologie variable et à un sol instable.

Toutefois, la complexité accrue du tunnelier à double bouclier entraîne un coût d'investissement plus élevé, un besoin de maintenance plus important et un risque accru de panne du tunnelier, par rapport au tunnelier à bouclier unique.

Les entreprises de génie civil spécialisées dans le creusement de tunnels ont fait savoir au CERN que, dans la molasse relativement stable du FCC, un tunnelier à bouclier unique pourrait être une solution plus rentable. En outre, la vitesse de construction accrue offerte par un tunnelier à double bouclier pourrait ne pas être atteinte, car la logistique de la livraison des matériaux et de l'extraction des déblais au niveau des puits, et sur les longues distances de creusement, constituera une contrainte plus importante pour la vitesse d'avancement du tunnelier que la capacité de la machine elle-même.

La majeure partie de l'excavation du tunnel se fera dans la molasse rocheuse, qui se prête à l'excavation au tunnelier, comme détaillé ci-dessus, mais un tunnelier spécialement conçu pourra être utilisé pour la section de 4,4 km de calcaire de Mandallaz qui sera probablement rencontrée dans le secteur PG à PH. Ce tunnelier, conçu pour les roches tendres et dures, sera également capable de sonder l'avant du front de taille du tunnel et de fournir une évaluation en temps réel de l'état du sol devant le tunnelier. La machine aura la capacité d'injecter un coulis à base de ciment à l'avant de

l'excavation, afin de réduire le risque d'effondrement du sol et d'afflux d'eau. Pour tenir compte des difficultés potentielles rencontrées dans le calcaire, la vitesse d'avancement du tunnelier a été réduite d'une moyenne de 16 m/jour à 9 m/jour dans le calendrier de construction.

Si elle n'est pas excavée par un tunnelier, cette section de calcaire devra l'être par forage et dynamitage. Il s'agit d'une technique conventionnelle de creusement de tunnels, qui implique l'utilisation d'explosifs pour excaver la paroi rocheuse. En fonction de l'état du calcaire dans cette zone, un traitement supplémentaire du sol pourra être nécessaire à l'avant du front de taille du tunnel afin d'éviter les infiltrations d'eau pendant l'excavation. Les investigations en cours sur le site permettront de caractériser la composition du calcaire le long du tracé du FCC, et donc d'obtenir une plus grande assurance concernant les conditions de creusement du tunnel.

Pour la présente étude de faisabilité, il a été supposé qu'un revêtement préfabriqué en une seule passe serait le système de soutènement le plus efficace et le plus performant, car il s'agit de la méthode de construction la plus rapide et la plus rentable. Si les futures études sur site révèlent des conditions de sol plus difficiles que celles qui ont été estimées, il faudra alors revoir le système de soutènement du tunnel. Le cas échéant, un système de soutènement plus approprié, consistant en un revêtement drainé en béton armé in situ, pourra s'avérer nécessaire.

Le Tableau 1.2 présente les paramètres d'excavation et de revêtement retenus pour l'étude de faisabilité.

Tableau 1.2 : Paramètres proposés pour l'excavation au tunnelier et pour le revêtement.

Parameter	Properties
Minimum internal diameter (m)	5.5
Characteristic concrete compressive strength for pre-cast concrete, fck (MPa)	50
Pre-cast concrete thickness (m)	0.30
Reinforcement density for steel fibre reinforced pre-cast concrete (kg/m ³)	35
Reinforcement density for steel bar reinforced pre-cast concrete (kg/m ³)	80
Gasketed segments	yes
Total radial construction tolerance (m)	0.10
Excavation diameter	6.6

L'hypothèse actuelle pour les sites de départ et d'arrivée de chacun des tunneliers est présentée à la Figure 1.4. Le principal avantage de cet arrangement est qu'il permet d'achever plus tôt les sites techniques, car ceux-ci ne sont pas associés à des activités d'installation ou de désinstallation de tunneliers. Il s'agit d'un avantage majeur qui permet d'installer plus tôt l'infrastructure et les composants de l'accélérateur dans les zones souterraines. Les autres avantages de cette approche sont les suivants :

- Les tunneliers sont des machines lourdes et de grande taille qui ne peuvent pas être facilement manipulées dans les espaces confinés d'un chantier souterrain. L'installation d'un tunnelier prend quatre à six mois et nécessite une caverne suffisamment grande pour permettre l'installation. Sur les quatre sites d'expérience, les deux grandes cavernes et les longues sections élargies du tunnel du faisceau principal peuvent être utilisées pour l'installation et la mise en service des tunneliers.
- La présence d'un puits situé directement au-dessus de l'axe du tunnel du faisceau principal offre un avantage significatif pour l'installation du tunnelier. Ce puits permet d'installer le tunnelier par parties relativement grandes, ce qui réduit le temps d'installation.
- L'existence de deux puits, chacun étant capable de fournir la logistique et les services nécessaires pour soutenir un tunnelier (transport de personnes, évacuation des déblais, matériel, électricité, eau, etc.), offre un niveau de redondance puisque, si un puits est hors service, les travaux peuvent continuer en ayant recours au second puits.
- Deux puits permettent une meilleure évacuation des personnes en cas d'accident ou d'urgence lorsque l'accès à un puits n'est plus possible.
- La concentration du génie civil souterrain sur les quatre sites d'expérience permettra de réduire l'impact des quatre sites techniques sur les riverains et l'environnement locaux (moins de poussière, de bruit, de circulation routière, etc.).

Pour l'illustration, voir le texte en anglais.

Fig. 1.4 : Disposition proposée pour les longueurs d'avancement du tunnelier.

Le CERN a commandé une étude sur la sécurité, la ventilation et les aspects logistiques de la construction du FCC pour répondre aux préoccupations dues aux risques importants que présenteraient le tunnel de 5,5 m de diamètre interne et les 11 km des longueurs d'avancement du tunnelier en matière de sécurité et de logistique, en particulier avec un seul moyen d'accès et d'évacuation. Il a été démontré qu'en utilisant la technologie actuellement disponible, le tunnel pouvait être construit en toute sécurité et que le taux d'avancement supposé du tunnelier pouvait être atteint. Il a été démontré que les exigences en matière de ventilation étaient satisfaites sur toute la longueur du tunnel, les spécifications des conduits et des ventilateurs ayant été calculées pour assurer une alimentation en air frais adéquate au niveau du front d'excavation. Enfin, des mesures de sécurité ont été définies pour garantir que les activités de construction respecteront les normes nationales et internationales en vigueur. Un exemple de coupe transversale du tunnel pendant la construction est présenté à la Figure 1.5. La Figure 1.6 présente un exemple des chambres de refuge de sécurité spécifiées dans l'étude.

Pour tenir compte de la séparation des faisceaux e+ et e- de la machine FCC-ee à proximité des détecteurs et de la nécessité de conserver de l'espace pour l'anneau booster, le tunnel de l'accélérateur doit être agrandi de chaque côté des cavernes d'expérience aux sites PA, PD, PG et PJ. Il y a au total 8 zones d'élargissement du tunnel, qui s'étendent sur 1,1 km de part et d'autre des cavernes d'expérience. Afin de réduire au maximum les coûts de construction et d'optimiser l'efficacité, les élargissements seront créés en plusieurs étapes, comme le montre la Figure 1.7.

Les secteurs élargis du tunnel sont divisés en 6 sections de part et d'autre de la caverne d'expérimentation, allant de 18,6 m à 14,5 m de portée et des longueurs de section variant entre 20 et 160 m. Un septième secteur d'élargissement passe d'une portée de 14,5 m au diamètre habituel de 5,5 m du tunnel de l'accélérateur. Ce septième secteur commence à la fin de la longue section droite et se poursuit jusqu'à la section en arc sur une longueur de 438,5 m. L'absorbeur de rayonnement sera situé à 500 m du point d'interaction (PI) dans la section 3 de l'élargissement du tunnel. Une section de 20 m de hauteur supplémentaire du tunnel pourra être nécessaire pour permettre l'installation d'une grue autour de l'absorbeur de rayonnement. Actuellement, cet aspect n'est pas pris en compte dans l'étude de faisabilité de base pour le génie civil. Si cela est confirmé comme nécessaire, cela sera intégré dans la base de référence lors de la prochaine phase de conception.

La construction des sections élargies du tunnel est proposée en utilisant des méthodes d'excavation conventionnelles, telles que des haveuses et/ou des brise-roches hydrauliques. Un revêtement final en béton projeté est proposé afin de réduire le temps de construction et de permettre ainsi une installation plus rapide des tunneliers, ce qui se fera dans les sections élargies du tunnel, de part et d'autre de chaque caverne expérimentale.

Pour l'illustration, voir le texte en anglais.

Fig. 1.5 : Coupe transversale du tunnel de l'accélérateur pendant la construction. Source : Amberg

Pour l'illustration, voir le texte en anglais.

Fig. 1.6 : Exemple de chambre de refuge placée à l'arrière du tunnelier. Source : mineARC

1.1.2. Tunnels de dérivation

Des tunnels de dérivation sont nécessaires dans chacune des quatre zones d'expérience pour permettre l'accès pour le transport, le personnel et les services directement à partir de la caverne de service vers le tunnel de l'accélérateur, contournant ainsi la caverne expérimentale et les zones de détection. Ces tunnels auront un diamètre interne de 5,5 m, similaire à la section transversale du tunnel de l'accélérateur. La longueur des tunnels de dérivation varie entre 110 et 115 m en fonction de la zone d'expérience. Les coudes d'un rayon de 30 m permettent le déplacement des véhicules de transport et assurent la protection contre les rayonnements entre le tunnel de l'accélérateur et la caverne de service. Les tunnels de dérivation relient la caverne de service au tunnel de l'accélérateur dans la première section de l'élargissement du tunnel, à environ 74 m de la caverne expérimentale. La jonction entre le tunnel de l'accélérateur et le tunnel de dérivation se fait avec un angle de 45 degrés, pour des raisons de réalisation du génie civil. Toutefois, les besoins en matière de transport pourront nécessiter la spécification d'un angle plus faible. Dans la prochaine phase conceptuelle, les détails des jonctions entre les deux tunnels seront réévalués et, si nécessaire, une caverne de jonction ou un autre moyen plus efficace d'aménager la liaison sera mis en œuvre.

Les tunnels de dérivation seront construits à l'aide d'une haveuse et recouverts d'un revêtement final en béton coulé sur place. La construction de ces tunnels sera achevée parallèlement aux travaux des tunnels de raccordement et des sections d'élargissement du tunnel à chaque point d'expérience.

Pour l'illustration, voir le texte en anglais.

Fig. 1.7 : Vue en plan de l'élargissement caractéristique du tunnel dans une caverne d'expérience.

1.1.3. Tunnels de raccordement

Les tunnels de raccordement entre les cavernes de service et les cavernes expérimentales permettent l'accès du personnel et le transport des matériaux/équipements. Ces tunnels abritent également les conduits de service, les câbles et les canalisations qui relient les cavernes de service aux détecteurs et aux tunnels de l'accélérateur. La Figure 1.8 montre une disposition type des galeries de liaison et de sondage au niveau d'un point d'expérience. Deux tunnels de raccordement de 5,5 m de diamètre relient chacune des extrémités de la caverne de service directement avec le tunnel de l'accélérateur. Ces tunnels comportent une section d'embranchement supplémentaire, d'une portée de 2,8 m, pour permettre l'accès du personnel tandis que les portes de protection contre les rayonnements restent fermées sur toute la section de 5,5 m du tunnel. Deux tunnels d'évacuation de 3,3 m de portée permettent au personnel de s'échapper en toute sécurité de la caverne d'expérience pour se rendre directement à la caverne de service. Ces tunnels sont conçus avec une chicane pour assurer la protection contre les rayonnements entre les deux cavernes. Au niveau inférieur, un tunnel de raccordement de 5,5 m de diamètre est nécessaire pour les raccordements de service et l'accès du personnel au niveau de la caverne expérimentale. Le tunnel de transport a une portée de 10 m pour permettre le déplacement de gros équipements, et le tunnel de raccordement a une portée de 5,5 m pour l'accès du personnel et l'acheminement des services entre les deux cavernes. À chacun des 4 points d'expérience, un tunnel de raccordement de 10 m de diamètre interne entre le fond du puits d'accès et la caverne d'expérience est nécessaire pour transporter les grands composants du détecteur vers les zones inaccessibles par le puits principal desservant la caverne d'expérience.

Pour l'illustration, voir le texte en anglais.

Fig. 1.8 : Vue en plan du site PA montrant la disposition des tunnels de raccordement entre la caverne de service et la caverne d'expérience.

1.1.4. Puits

Treize puits sont proposés pour accéder aux structures souterraines :

- quatre puits de 12 m de diamètre, à raison d'un dans chacune des zones techniques PB, PF, PH et PL, pour les besoins d'accès et de service ;
- deux puits de 18 m de diamètre, à raison d'un dans chacune des zones d'expérience, PA et PG, pour l'accès et l'installation des composants du détecteur dans la caverne d'expérience ;
- deux puits de 15 m de diamètre, à raison d'un dans chacune des zones d'expérience, PD et PJ, pour l'accès et l'installation des composants du détecteur dans la caverne d'expérience ; Il est à noter que ces puits d'expérience plus petits sont dimensionnés pour accueillir les détecteurs plus petits prévus pour les sites PD et PJ ;
- quatre puits de 18 m de diamètre, à raison d'un dans chacune des cavernes de service aux points PA, PD, PG et PJ, pour l'accès, les besoins de service et pour faciliter la descente des plus grands composants de l'accélérateur ;
- un puits de 10 m de diamètre sur le site du CERN à Préveressin, pour permettre la construction du tunnel de transfert du complexe d'injection vers le FCC. Ce puits ne sera utilisé que pour la construction, notamment pour permettre l'assemblage du tunnelier qui creusera les 5 km du tunnel de transfert.

Pour l'illustration, voir le texte en anglais.

Fig. 1.9 : Coupe transversale du puits de service de 12 m de diamètre, tel qu'il est proposé dans les quatre zones techniques.

Les puits de service de chacun des huit points permettent d'accéder aux cavernes de service. Pendant la phase de construction, ils seront utilisés pour l'installation et la mise en service de l'infrastructure et des composants de l'accélérateur. Ils seront également utilisés pendant les arrêts de la machine pour la maintenance et la mise à niveau de l'accélérateur et de l'infrastructure de soutien. Ils seront équipés de deux ascenseurs et d'une cage d'escalier situés dans une gaine intérieure pressurisée, qui constitue une issue de secours sûre en cas d'incendie. Le puits contient également un espace vertical dégagé en continu permettant à la grue de descendre les équipements.

Les quatre cavernes d'expérience sont desservies par un puits de 18 m ou de 15 m de diamètre interne situé directement au-dessus de la caverne d'expérience. Ces puits servent principalement à transporter les composants des détecteurs, qui seront descendus dans les puits depuis le hall en surface (SX) pour être installés dans les cavernes expérimentales souterraines (UX). Ces puits contiendront également des conduits de ventilation et d'autres services nécessaires au fonctionnement du détecteur dans les cavernes UX. Comme les sites PA et PG correspondent aux plus grandes zones d'expérience, des puits de 18 m de diamètre sont nécessaires. Étant donné que les zones d'expérience sont plus petites, les sites PD et PJ n'ont besoin que d'un puits d'expérience de 15 m sur chaque site.

Le puits de construction proposé pour l'avancement du tunnelier dans le tunnel de transfert pourra être utilisé pendant la phase d'installation des infrastructures pour transporter les équipements et/ou des composants de la surface jusqu'au tunnel de transfert.

Table 1.3: Shaft depths at each site.

Site	PA	PB	PD	PF	PG	PH	PJ	PL	Transfer Tunnel
Moraine Depth [m]	54	30	25	<5	24	20	31	40	12
Molasse Depth [m]	147	171	156	400	202	215	222	210	17
Total Depth [m]	201	201	181	400	226	235	253	250	29

Les puits ont des profondeurs variables autour de l'anneau, allant de 29 m à 400 m. Le Tableau 1.3 résume les profondeurs des puits sur chaque site, y compris les profondeurs des couches géologiques de moraine et de molasse. En règle générale, les puits sont situés directement au-dessus de la caverne correspondante. Cependant, sur les sites PF et PB, les contraintes de surface exigent que le puits soit décalé par rapport à la caverne de service. Pour cela, sur le site PF, un tunnel d'accès de 9 m de diamètre interne et d'une longueur de 585 m sera construit, comme le montre la Fig. 1.10.

Tous les puits seront creusés dans les strates morainiques. Historiquement, les méthodes de soutènement telles que les parois moulées, les pieux sécants et la congélation du sol ont toutes été utilisées dans les projets du CERN et seront donc appropriées pour la construction des puits du FCC.

Les profondeurs des puits au-dessous des strates morainiques seront situées dans la roche molassique. Historiquement, les puits dans la molasse ont été construits de la manière la plus rentable en utilisant des techniques de construction conventionnelles (haveuse, marteau hydraulique) combinées avec du béton projeté et des boulons de roche comme support primaire, avec à la suite un revêtement permanent en béton armé coulé sur place. La construction d'une paroi moulée consiste à creuser un certain nombre de sections droites de paroi pour obtenir une forme quasi-circulaire. Les parois de ces

excavations sont soutenues par un mélange temporaire de boue de bentonite, qui est remplacé par des cages d'armature et du béton pour former le revêtement primaire, à l'intérieur duquel l'excavation du puits peut se poursuivre. La Figure 1.11 montre un exemple de coupe transversale d'un puits de service type de 12 m de diamètre dans la moraine en utilisant la technique de la paroi moulée.

Lorsque la roche stable (c'est-à-dire la molasse) est atteinte, l'excavation est soutenue temporairement par un renforcement de la roche, par exemple par des boulons de roche et du béton projeté, avant l'installation d'une membrane étanche et la réalisation d'un revêtement permanent en béton armé coulé sur place. La technique du coffrage glissant peut être utilisée pour le revêtement permanent, avec coulage du béton dans un coffrage grimpant en continu.

Les gaines pour les escaliers et les ascenseurs nécessaires dans les puits de service pour l'accès du personnel et du matériel sont construits à partir d'éléments préfabriqués qui sont empilés les uns sur les autres à partir du haut du puits. Elles font partie des dernières activités de construction, une fois que tous les principaux travaux de génie civil seront achevés en sous-sol et avant la remise des structures de génie civil au CERN.

Pour l'illustration, voir le texte en anglais.

Fig. 1.10 : Vue en plan de l'aménagement souterrain du site PF, montrant le puits de service décalé et l'aménagement du tunnel d'accès.

Les puits du FCC étant plus profonds que tous ceux qui ont été construits précédemment au CERN, un consultant spécialisé dans le fonçage de puits a fourni une évaluation des techniques d'excavation envisageables pour ces plus grandes profondeurs. L'étude s'est concentrée sur les considérations logistiques de construction et d'entretien des puits jusqu'à 400 m de profondeur (le puits le plus profond sur le site PF). L'évaluation a conclu qu'en utilisant les technologies actuelles et les bonnes pratiques de travail, il est possible de construire les puits tels qu'ils sont proposés. L'étude a indiqué, étant donné que tous les puits seront construits en parallèle, qu'il serait essentiel de mobiliser à l'avance suffisamment de main-d'œuvre et d'équipements spécialisés pour garantir la disponibilité de ressources suffisantes et réduire ainsi à un minimum le risque de retard dans le calendrier de construction. L'étude a également mis en évidence la possibilité que les équipements utilisés pour le fonçage des puits soient également utilisés pour les travaux ultérieurs d'excavation des cavernes et des tunnels. Cela pourrait être bénéfique à la fois pour le coût et pour le calendrier de construction. En outre, le CERN a été informé que les progrès de la mécanisation et des futures technologies de fonçage de puits pourraient réduire les délais de construction et diminuer les risques, notamment grâce à la mise au point récente d'une machine de fonçage de puits vertical qui ne nécessite pas d'intervention humaine dans le puits lui-même.

1.1.5. Cavernes

Des cavernes de grande portée sont nécessaires aux deux sites d'expérience PA et PG pour accueillir les détecteurs FCC et l'infrastructure associée. La caverne proposée a des dimensions de 66 m × 35 m × 35 m (Longueur × largeur × Hauteur) et les cavernes seront construites à une profondeur allant jusqu'à 226 m dans la roche molassique. Bien qu'il s'agisse des plus grandes cavernes jamais construites au CERN, elles ne seront pas beaucoup plus grandes que l'actuelle caverne ATLAS du LHC.

La séquence de construction consistera en des excavations en gradins à l'aide de brise-roche et de haveuses, le soutènement principal étant assuré par des boulons de roche, des boulons de câble et des couches de béton projeté renforcé par de l'acier. Lors de l'élargissement de la zone de la couronne de la caverne d'expérience, des poutres en treillis supplémentaires et des couches de béton projeté renforcé par de l'acier seront installées. Les poutres en treillis pour les différentes étapes de

l'excavation peuvent être boulonnées ensemble pour soutenir la roche de façon continue le long de la zone d'excavation. Le revêtement secondaire sera construit en béton coulé sur place, afin d'apporter une résistance et une protection supplémentaires aux parois de la caverne.

Une membrane d'imperméabilisation et de drainage sera installée entre les revêtements primaire et secondaire afin de garantir que la caverne reste sèche et que la structure ne sera pas soumise à une pression d'eau excessive due à la présence éventuelle d'eaux souterraines.

Pour l'illustration, voir le texte en anglais.

Fig. 1.11 : Coupe transversale du puits de service de 12 m de diamètre avec paroi moulée.

Pour l'illustration, voir le texte en anglais.

Fig. 1.12 : Coupe transversale du modèle 3D au site PA, montrant la caverne de service (à gauche) et la caverne d'expérience (à droite).

Deux cavernes d'expérience plus petites, de 66 m × 25 m × 25 m (L x l x H), sont nécessaires aux sites PD et PJ. Ces cavernes seront construites jusqu'à 253 m de profondeur en utilisant les mêmes techniques d'excavation et de soutènement que les cavernes d'expérience situées aux sites PA et PG.

Une caverne de service située à la même hauteur que le tunnel de l'accélérateur et mesurant 100 m × 25 m (L x l) doit être adjacente à chacune des quatre cavernes d'expérience. Sous le puits de service, la hauteur des cavernes de service est de 22,4 m, ce qui permet un accès direct au niveau de la caverne expérimentale pour les équipements et les composants des détecteurs de grandes dimensions. Le reste de la caverne de service de 100 m de long a une hauteur de 15 m. Des cavernes de service plus courtes de 60 m de long sont nécessaires aux quatre points techniques restants. Les cavernes de service abriteront les équipements d'infrastructure tels que l'électricité, le refroidissement, la ventilation et la cryogénie. En outre, les cavernes constitueront un refuge en cas d'urgence, avec une zone pressurisée dédiée au fond du puits. Ces cavernes seront construites de la même manière que les cavernes d'expérience. Sur les sites d'expérience, l'espacement entre les deux cavernes est d'environ 50 m, afin d'atténuer les effets électromagnétiques provenant du détecteur sur les équipements électriques situés à proximité. Cela permet également d'améliorer l'efficacité structurale globale en fournissant un pilier rocheux suffisamment grand entre les cavernes d'expérimentation et de service, réduisant ainsi au maximum la nécessité d'un soutien structural et réduisant les risques et la complexité de la construction.

Les cavernes de service comprendront trois niveaux, avec des structures en acier pour chaque niveau. Cela augmente considérablement l'espace utilisable pour les infrastructures et les services techniques. Des structures en acier seront également utilisées pour créer les niveaux de galerie autour des détecteurs dans les cavernes expérimentales. Ces galeries seront similaires à celles qui sont actuellement en place dans les cavernes d'expérience du LHC, telles que ATLAS et CMS.

Lorsque des tunnels de dimensions transversales similaires se rejoignent, une caverne de jonction est nécessaire. Les sites PF, PH et PL nécessitent chacun une caverne de jonction où le tunnel de raccordement de 7 m de diamètre de la caverne de service croise le tunnel de l'accélérateur de 5,5 m de diamètre. Chaque caverne mesure 16 m de longueur et a une portée de 10 m.

Une caverne supplémentaire pour l'absorbeur de faisceau de la machine FCC-ee sera située au site PB et accueillera deux absorbeurs de faisceau, à raison d'un pour chacune des deux lignes de faisceau. De plus amples détails sur cette structure sont donnés à la Section 1.1.8.

Des galeries de sondage sont nécessaires dans chacune des quatre cavernes d'expérience pour inspecter l'alignement du faisceau de part et d'autre des détecteurs. Il s'agit de tunnels d'une portée de 1,5 m et d'une longueur de 60 m, parallèles au tunnel de l'accélérateur, avec des raccordements perpendiculaires tous les 15 m dans la section 1 d'élargissement du tunnel. La possibilité de les incorporer dans les sections élargies du tunnel afin de réduire la complexité et le coût de la construction sera étudiée dans la prochaine phase de conception.

1.1.6. Structures souterraines pour l'infrastructure radiofréquences

Pour l'illustration, voir le texte en anglais.

Fig. 1.13 : Modèle 3D de l'agencement de la galerie de klystrons au site PH.

Les galeries de klystrons sont un élément essentiel du génie civil du FCC-ee, car elles abriteront les klystrons et les autres composants du système de radiofréquences (RF). Pour abriter l'infrastructure nécessaire, deux galeries distinctes seront construites, l'une au site PH et l'autre au site PL. La galerie des klystrons au site PH (Fig. 1.13) aura une longueur de 2012 m pour le système RF du collisionneur, tandis que la galerie du site PL aura une longueur de 1446 m pour le système RF du booster. Pour permettre l'accès aux galeries de klystrons pendant le fonctionnement de la machine FCC-ee, il faut prévoir un blindage suffisant contre les rayonnements. Pour ce faire, 10 m de roche seront maintenus entre les galeries RF et le tunnel de l'accélérateur. Les dimensions internes des galeries sont de 10 m de portée et 5,5 m de hauteur pour permettre le transport et la mise en place des équipements dans les galeries, ainsi que l'accès pour la maintenance et les réparations pendant la phase d'exploitation.

Les galeries sont dimensionnées avec une extension de 50 m de longueur à chaque extrémité pour incorporer l'espace destiné aux équipements de service. Cette solution est proposée au lieu de construire les grandes alcôves le long du tunnel de l'accélérateur, ce qui permet une utilisation plus efficace de l'excavation du tunnel et de l'espace.

Les galeries sont reliées directement au tunnel de l'accélérateur par des conduits à guide d'ondes de 1 m de diamètre interne, espacés de quelques mètres le long de la galerie (voir Fig. 1.14). Il y aura 428 conduits de guide d'ondes individuels au site PH et 312 au site PL.

Le concept de sécurité du FCC exige, pour l'évacuation en cas d'urgence, que des cages d'escalier soient placées tous les 341 m le long de la galerie, afin de relier les galeries au tunnel de l'accélérateur.

Pour l'accès aux galeries de klystrons, un tunnel de raccordement de 7 m de diamètre interne relie le niveau supérieur de la caverne de service à la galerie de klystrons. Ce tunnel de raccordement a une longueur de 62 m. La taille du tunnel de raccordement est conçue pour permettre l'accès du personnel et le transport des équipements RF dans la galerie.

Les galeries de klystrons seront creusées à l'aide des mêmes machines que celles qui auront été utilisées pour l'excavation des cavernes et des tunnels de raccordement aux points PH et PL. L'excavation à la haveuse est efficace et précise, ce qui permet de creuser les galeries avec exactitude. Le revêtement de la galerie de klystrons sera constitué d'un revêtement primaire en béton projeté et d'un revêtement secondaire en béton coulé sur place. Il sera envisageable d'utiliser du béton projeté pour le revêtement final de la galerie, ce qui permettrait une construction plus rapide et un coût moins élevé. Cette option sera étudiée lors de la prochaine phase. Le sol de la galerie sera également en béton coulé sur place et comprendra un canal de drainage et l'entrée des conduits de guide d'ondes sortant de la dalle du sol. L'entrée des conduits de guide d'ondes dans la galerie nécessitera l'utilisation d'une chicane pour assurer la protection contre les rayonnements. Elle sera probablement

construite avec une unité de béton préfabriquée placée après l'installation finale de l'infrastructure de la ligne cryogénique (QRL) à travers le conduit.

Pour l'illustration, voir le texte en anglais.

Fig. 1.14 : Coupe transversale de la galerie de klystrons et du tunnel de l'accélérateur, y compris le conduit de guide d'ondes entre les deux.

Les conduits de guide d'ondes, qui contiendront les guides d'ondes reliant les klystrons aux cavités RF dans le tunnel de l'accélérateur, seront excavés par forage ascendant. Ce procédé consiste d'abord à percer un trou pilote, puis à fixer une tête d'alésoir à la base, qui est tirée vers le haut, creusant le conduit par le bas dans la direction verticale. Cette méthode d'excavation est efficace et réduit la perturbation de la roche environnante à un minimum. Un revêtement en acier ou en béton sera coulé dans la roche afin de fournir une surface finie appropriée et un revêtement final.

1.1.7. Alcôves

Tous les 1,6 km autour de la machine, des alcôves d'équipements, comme illustré à la Figure 1.15, sont nécessaires pour accueillir les équipements électriques, les services et les besoins en matière de transport. La majorité de ces alcôves sont considérées comme « ordinaires », mesurant 40 m de long, 10,6 m de large et 4,6 m de haut. Placées à l'intérieur de l'anneau, les alcôves sont disposées perpendiculairement au tunnel de l'accélérateur.

Pour l'illustration, voir le texte en anglais.

Fig. 1.15 : Disposition des alcôves autour de l'anneau FCC.

En plus des alcôves ordinaires, douze « grandes » alcôves sont nécessaires de part et d'autre de chacun des points d'accès au FCC afin de fournir un espace supplémentaire pour les équipements électriques. Ces grandes alcôves mesurent 29 m de long, 18 m de large et 8,3 m de haut. Elles sont situées à l'extrémité des longues sections en alignement, de part et d'autre des cavernes. Deux grandes alcôves sont nécessaires aux points PA, PB, PD, PF, PG et PJ, mais pas à PH ou PL, car la taille supplémentaire des galeries de klystrons offre le volume nécessaire à l'équipement. Un exemple de grande alcôve est présenté à la Figure 1.16. Au total, le projet nécessite 40 alcôves ordinaires et 12 grandes alcôves.

Une zone d'accès à chaque alcôve est prévue pour accueillir les parois de la chicane de protection contre les rayonnements. Cette section mesure 6 m de longueur, avec une portée de 10,6 m à l'entrée des deux types d'alcôves, grandes et ordinaires.

Un passage pour le transport est nécessaire à l'entrée de chaque alcôve. Cela facilitera le passage des véhicules de transport circulant dans les deux sens à l'intérieur du tunnel. La voie de dégagement offre également un espace pour le stationnement des véhicules de transport pendant l'installation et les arrêts de la machine, ainsi qu'un espace supplémentaire pour l'entretien et la réparation des véhicules si nécessaire. La majorité des voies de dégagement sont logées dans une caverne le long de l'alignement du tunnel de l'accélérateur et mesurent 16 m de long et 11 m de large. Des voies de dégagement supplémentaires plus grandes sont nécessaires au milieu de chaque arc du tunnel de l'accélérateur. Il y aura donc au total 8 grandes cavernes de voie de dégagement, mesurant 30 m sur 11 m. Elles faciliteront le passage des véhicules de livraison des aimants pendant la phase d'installation de la machine FCC-ee. La Figure 1.17 montre un exemple de grande voie de dégagement.

Pour l'illustration, voir le texte en anglais.

Fig. 1.16 : Vue schématisée d'une grande alcôve et d'une voie de dégagement pour le transport.

Pour l'illustration, voir le texte en anglais.

Fig. 1.17 : Exemple d'alcôve ordinaire et de grande voie de dégagement situées au centre de chaque secteur d'arc.

Contrairement aux cavernes et aux tunnels situés à proximité des points FCC, qui peuvent être au moins partiellement excavés parallèlement à l'avancement du tunnelier, l'excavation des alcôves et des voies de dégagement devra être achevée après la fin de l'avancement du tunnelier. En effet, toute la section du tunnel est nécessaire pour soutenir le tunnelier (ventilation, convoyeur pour l'évacuation des déblais, couloir de transport pour les revêtements segmentaires en béton, couloir pour le personnel, etc.). Il sera donc nécessaire de briser le revêtement en béton du tunnel et d'excaver la caverne de voie de dégagement et les alcôves en pratiquant une excavation à la haveuse. Les travaux de revêtement intérieur des alcôves seront ensuite réalisés avant le regarnissage des tunnels de l'accélérateur. Cette opération devra être coordonnée avec la réalisation du sol du tunnel. La séquence globale de construction et la conception structurale seront similaires à celles des cavernes, comme indiqué en détail à la Section 1.1.5.

La complexité de la construction des alcôves et les problèmes logistiques associés ont un impact majeur sur le calendrier de construction, puisque chaque alcôve se trouve potentiellement sur le chemin critique pour les travaux de génie civil. Le CERN a commandé une étude supplémentaire pour déterminer la méthode optimale de construction des alcôves, afin de réduire au maximum l'impact sur le calendrier global de construction. Par conséquent, l'hypothèse actuelle du calendrier reste que les alcôves pourront être construites parallèlement les unes aux autres, en maintenant des normes suffisantes en matière d'accès, de sécurité et de logistique. En adoptant une séquence d'activités de construction qui se chevauchent, toutes les alcôves de chaque secteur peuvent être construites dans un délai de 12 mois, ce qui permet de respecter la date prévue de remise de chaque secteur en vue de l'installation ultérieure de l'infrastructure et de l'accélérateur.

1.1.8. Caverne des absorbeurs de faisceau

Les absorbeurs de faisceau FCC-ee seront situés au site PB. L'agencement de la caverne de l'absorbeur de faisceau comprend une caverne de 708 m de long avec une portée de 13,6 m, pour abriter l'infrastructure des absorbeurs des faisceaux e^+ et e^- . La taille de la caverne a été dictée par la longueur et l'angle d'extraction du faisceau, ce qui nécessite une séparation d'au moins 5,5 m par rapport à la ligne de l'accélérateur et un angle septum/kicker de 10 mrad. Les deux lignes d'extraction du faisceau sont disposées de manière à se croiser au centre de la caverne, à proximité du centre de la longue section en alignement du site PB. Cela permet d'optimiser le volume de la caverne de l'absorbeur de faisceau.

Pour permettre la séparation des deux faisceaux FCC-ee à l'approche de PB, une série de sections d'élargissement du tunnel est nécessaire de part et d'autre de la caverne. Trois sections d'élargissement du tunnel, d'une longueur de 83 à 330 m, seront construites de part et d'autre de la caverne afin d'augmenter la portée du tunnel de l'accélérateur de 5,5 à 7,8 m.

La caverne de l'absorbeur sera creusée de la même manière que les autres cavernes, à l'aide d'une haveuse et/ou d'un brise-roche pour creuser à partir du niveau de la voute vers le bas en pratiquant

une série de « gradins ». En raison des contraintes en surface, le puits de service et la caverne devront être décalés par rapport au point central de la section droite longue (LSS). Le puits de service décalé sera donc positionné à 350 m du centre de la LSS et sera raccordé à la caverne de l'absorbeur de faisceau via un tunnel de raccordement d'une longueur de 97 m.

La caverne de l'absorbeur sera construite comme indiqué à la Section 1.1.5. Il y aura un revêtement primaire constitué de béton projeté et de boulons de roche, et un revêtement secondaire en béton coulé sur place. Cependant, l'option de créer le revêtement final en béton projeté sera envisagée dans le cadre de l'évolution future de la conception, afin de réduire éventuellement les coûts et les délais de construction. Il reste à confirmer si un mur ou une structure de blindage est nécessaire dans la caverne pour protéger l'accélérateur de l'appareillage de l'absorbeur de faisceau, mais cette structure ou ce mur serait construit avec des blocs de béton préfabriqués bien après l'achèvement des travaux de génie civil. La Figure 1.18 présente une vue schématique du site PB, avec la caverne de l'absorbeur de faisceau.

1.1.9. Matériaux excavés

Pour construire les structures souterraines, environ 6,3 millions de m³ (volume in situ) de roche seront excavés. Ces matériaux seront extraits via les huit points d'accès au FCC. Le type de roche prédominant sera la molasse, qui représente 96 % du matériau total. La roche morainique représente 1,5 % des matériaux excavés et le calcaire constitue les 2,5 % restants.

La Figure 1.4 de la Section 1.1.1 montre la disposition de base pour les longueurs d'avancement du tunnelier. Comme indiqué, les secteurs du tunnel de l'accélérateur seront excavés au moyen d'un tunnelier. Les puits seront creusés à l'aide de machines d'excavation conventionnelles ou de machines de fonçage de puits verticaux. L'utilisation de parois moulées sera nécessaire pour assurer le soutènement de l'excavation des puits à travers la couche morainique initiale. Toutes les autres excavations pour les structures souterraines seront réalisées au marteau hydraulique (brise-roche) et à la haveuse. Les caractéristiques physiques des matériaux excavés diffèrent selon la méthode d'excavation utilisée.

Pour l'illustration, voir le texte en anglais.

Fig. 1.18 : Structure souterraine au site PB, caverne de service (à gauche) et caverne de l'absorbeur de faisceau (à droite).

Table 1.4: Excavation volumes for each FCC sector.

	In-situ Vol, 10 ³ m ³	Bulk Vol., 10 ³ m ³	Compacted Vol., 10 ³ m ³	% of Total
PA	1378	2205	1791	22%
PB	148	237	192	2%
PD	1274	2038	1656	20%
PF	165	264	215	3%
PG	1365	2184	1775	22%
PH	312	499	405	5%
PJ	1289	2062	1675	20%
PL	241	386	313	4%
Transfer Tunnel	122	195	159	2%

Le Tableau 1.4 présente la répartition des quantités de matériaux excavés extraits de chacun des huit sites et de la ligne de transfert entre Prévessin et le tunnel FCC. Les volumes sont exprimés en tant que

volume in situ, c'est-à-dire le volume avant excavation, le volume brut, c'est-à-dire le volume après excavation et le volume compacté, c'est-à-dire le volume après que le matériau a été recompacté, par exemple dans une zone de dépôt de déblais.

Deux tunneliers débiteront au site PA, l'un en direction de PB et l'autre en direction de PL. Le total des matériaux extraits du site PA s'élèvera à près de 1,4 million de m³, dont 62721 m³ de moraine.

Aucun avancement de tunnelier n'est prévu à partir du site PB, le volume de matériau excavé provient donc des structures souterraines de PB, y compris la caverne de l'absorbeur de faisceau. Sur une quantité totale de 147852 m³, 10473 m³ devraient être de la moraine et le reste de la molasse.

Deux tunneliers débiteront au site PD, l'un en direction de PB et l'autre en direction de PF. La quantité résultante de matériaux à extraire du site PD est de 1,3 million de m³, dont 24 925 m³ de moraine.

Aucun avancement de tunnelier n'est prévu à partir du site PF. Comme pour le site PB, les matériaux excavés au site PF proviennent uniquement des structures souterraines directement situées au site PF, et non des tunnels de l'accélérateur situés de part et d'autre. La quasi-totalité des matériaux excavés au site PF seront de la molasse, car il n'y a que peu ou pas de dépôts quaternaires.

Deux tunneliers seront engagés à partir du site PG, l'un en direction de PF et l'autre en direction de PH. La quantité totale de matériaux excavés du site PG s'élève à près de 1,4 million de m³. La moraine représente 30829 m³ du total des matériaux excavés au site PG. Cependant, en raison du secteur de calcaire d'une longueur de 4,4 km le long du tunnel de l'accélérateur entre PG et PH, 141175 m³ du matériau total seront des roches calcaires. Les 1,2 million de m³ de matériaux excavés restants seront constitués de molasse.

Aucun avancement de tunnelier n'est prévu à partir du site PH, par conséquent tous les matériaux excavés proviennent directement des structures souterraines du site PH, y compris la galerie de klystrons et les structures associées. Un volume de 7482 m³ du total des matériaux excavés au site PH devrait être de la moraine et le reste de la molasse.

Deux tunneliers seront engagés à partir du site PJ, l'un en direction de PH et l'autre en direction de PL. Par conséquent, la quantité de matériaux extraits du site PJ est d'environ 1,3 million de m³, dont 29 910 m³ devraient être de la moraine.

Aucun avancement de tunnelier n'est prévu à partir du site PL, le volume de matériau excavé est donc attribué aux structures souterraines du site PL, y compris la galerie de klystrons et les structures associées. La roche morainique devrait représenter 13 468 m³ du total des matériaux excavés sur le site PL.

Les tunnels d'injection, de Prévessin vers SPS et de SPS vers FCC, représentent 122 329 m³ de matériaux excavés, dont la majeure partie sera extraite du site de Prévessin, au moyen du puits de construction proposé. Une petite partie des matériaux excavés sera constituée de moraine, provenant de l'excavation initiale du puits, mais la majeure partie de l'excavation du puits et du tunnel de transfert se fera dans de la roche molassique.

1.1.10. Creusement de tunnel dans la roche molassique

L'environnement géologique à grande échelle dans lequel l'infrastructure souterraine du FCC sera construite est illustré à la Fig. 1.19, la majeure partie du tunnel étant située dans la molasse d'eau douce inférieure (USM) et la molasse marine inférieure (UMM). Le FCC sera excavé à des profondeurs allant jusqu'à 560 m, la longueur totale combinée de toutes les excavations dépassant les 100 km. Alors que l'expérience acquise par le CERN au cours des cinquante dernières années pour la construction du LEP, du LHC et du LHC à haute luminosité a donné des indications précieuses sur les caractéristiques et le comportement prévisibles de la roche molassique, d'autres projets réalisés dans

cette même roche ont également fait l'objet d'une étude documentaire afin d'améliorer la compréhension de l'environnement dans lequel les ouvrages de génie civil du FCC seront construits.

La plupart des projets examinés concernaient des tunnels de transport (routier et ferroviaire) d'une longueur de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres, à faible profondeur. Les tunnels étudiés étaient creusés par excavation conventionnelle, sous forme de tranchée couverte et au moyen d'un tunnelier. Un projet en particulier, le tunnel de Moutier, a été excavé par un tunnelier à bouclier unique dans la molasse tertiaire d'Alsace (mélange de marne, de grès et de calcaire). En raison d'un environnement géologique imprévu, le tunnelier s'est retrouvé bloqué à 190 m de l'entrée du tunnel. Par conséquent, le reste du tunnel a été excavé à l'aide de méthodes conventionnelles. Ce projet met en évidence la nécessité de réaliser des études géotechniques suffisantes et une analyse appropriée avant le début des travaux. À la plus grande profondeur du FCC, la molasse est probablement plus consolidée et il est peu probable qu'elle ait été altérée par les intempéries. Cependant, des études géotechniques et des analyses numériques appropriées seront nécessaires pour mieux prévoir le comportement probable de la roche et son influence sur les performances du tunnelier.

D'une manière générale, l'étude confirme que des excavations dans la roche molassique ont été réalisées à grande échelle en Suisse, en utilisant à la fois des tunneliers et des méthodes conventionnelles. Cependant, le FCC nécessitera une étude géotechnique complète pour évaluer les caractéristiques de la molasse, ainsi que le régime de contraintes in situ. L'étude portera sur les risques potentiels, notamment les risques imputables à l'apparition de variations de pression de l'eau interstitielle, à l'écrasement de la roche et à la présence de failles géologiques.

Un projet de construction de tunnel a été identifié au Royaume-Uni avec des caractéristiques similaires à celles du FCC. Il est actuellement en cours de construction dans le cadre de l'exploitation d'une nouvelle mine de halite. Un tunnelier unique creuse un tunnel de 37 km de long dont les dimensions transversales sont très proches de celles du FCC. En outre, le tunnel est creusé à des profondeurs comparables et dans une géologie sédimentaire qui n'est pas sans rappeler celle qui est prévue pour le FCC. Une vitesse moyenne d'excavation de 20 m/jour a été atteinte. Le CERN évaluera plus en détail les enseignements tirés de ce projet au cours de la prochaine phase d'étude du FCC.

En conclusion, on considère que le génie civil souterrain pour le FCC est réalisable et qu'il est dans les limites de l'expérience et des capacités actuelles de bon nombre des principaux concepteurs et entrepreneurs actuellement en activité dans les États membres du CERN. Des études complémentaires seront nécessaires pour déterminer la profondeur et l'inclinaison précises du tunnel du FCC, ainsi que les propriétés géotechniques de la masse rocheuse, ce qui est indispensable pour que le CERN puisse passer aux phases de conception détaillée et de construction.

Pour l'illustration, voir le texte en anglais.

Fig. 1.19 : Carte géographique de la Suisse. Source : Philippos Garefalakis, F. S. (2019). Processus tectoniques, variations du flux sédimentaire et niveau marin eustatique enregistrés par la transgression burdigalienne dans le bassin molassique suisse il y a 20 millions d'années.

1.2. Structures de surface

Depuis l'achèvement de l'étude conceptuelle, il a été procédé à une rationalisation des sites de surface associés au génie civil du FCC-ee, le nombre de sites de surface ayant été ramené de douze à huit.

Les huit sites de surface comprendront quatre zones propices à l'implantation d'expériences et quatre zones techniques. Ces huit sites sont répartis uniformément sur la circonférence de l'anneau du collisionneur FCC-ee. Les quatre zones d'expérience sont réparties de manière symétrique, de sorte que chaque site est diamétralement opposé à un autre site d'expérience, comme l'illustre la Figure 1.1. Les sites d'expérience se trouvent sur les sites PA, PD, PG et PJ et les sites techniques sur les sites

restants PB, PF, PH et PL. L'emplacement des quatre sites d'expérience en surface est interdépendant puisque les points d'interaction pour chacun des quatre sites définissent l'emplacement des puits d'expérience et de service sur chaque site, comme l'illustre la Figure 1.20.

Pour l'illustration, voir le texte en anglais.

Fig. 1.20 : Options pour l'emplacement des puits d'expérience et de service par rapport au point d'interaction.

Les puits d'accès à l'expérience ne peuvent se trouver qu'à deux endroits par rapport au point d'interaction et les puits d'accès à la machine devraient idéalement être placés directement au-dessus de la caverne de service qui doit elle-même être située à environ 50 m de la caverne d'expérience pour des raisons de stabilité structurale des deux cavernes et de blindage électromagnétique. Comme chacun des quatre points d'interaction associés aux zones d'expérience est situé précisément l'un par rapport à l'autre, les emplacements des puits à chaque point d'expérience sont également fixés par rapport aux puits des autres points d'expérience. Cette interdépendance entre les quatre sites d'expérience influence l'aménagement des sites de surface puisque les deux puits sont associés à des configurations de bâtiments spécifiques.

Le choix des emplacements des sites de surface pour les zones d'expérience doit être soigneusement coordonné, car chaque site est lié à l'emplacement des trois autres. En ce qui concerne les sites techniques, bien que la proximité du centre de la section droite longue (LSS) associée constitue un critère important, il existe une certaine marge de flexibilité. Le puits d'accès pour une seule machine peut être relié au tunnel de l'accélérateur par une galerie d'accès qui, si nécessaire, peut s'étendre sur plusieurs centaines de mètres.

Pour une discussion complète sur les considérations environnementales, notamment en ce qui concerne l'intégration paysagère, les lecteurs peuvent consulter les sections correspondantes des chapitres 2 et 3 du présent volume.

Les plans d'ingénierie des constructions des sites de surface, qui feront partie des dossiers d'autorisation du projet, doivent être adaptés aux exigences des équipements qui seront installés sur chaque site. Les équipements bruyants devront être convenablement isolés contre le bruit et placés dans des constructions permettant de limiter le bruit résiduel à l'intérieur des cadres réglementaires applicables et en vigueur à ce moment-là. Voici quelques exemples de structures susceptibles de nécessiter de telles mesures spécifiques :

- Installations cryogéniques comprenant des compresseurs ;
- Équipements de refroidissement et de ventilation avec pompes, moteurs et ventilateurs ;
- Équipements électriques tels que les transformateurs.

Le choix des matériaux et des techniques de construction pour les bâtiments des sites de surface repose sur divers critères, notamment la durabilité, la sécurité, le coût, les considérations environnementales comme l'intégration paysagère et les contraintes réglementaires telles que les prescriptions en matière d'urbanisme. Les nouveaux matériaux et technologies émergents, ainsi que le suivi continu des prescriptions environnementales et réglementaires, y compris les normes d'efficacité énergétique applicables, seront pris en compte au cours de la phase de conception ultérieure. Conformément au cadre de gouvernance du CERN, le principe de territorialité s'applique, c'est-à-dire que les lois et directives nationales s'appliquent aux infrastructures situées sur les sites de surface dans les États hôtes.

À ce stade, aucune stratégie d'architecture n'a été adoptée. Cela sera fait lors de la prochaine phase de conception. L'élaboration des solutions architecturales comprendra un processus consultatif solide avec les États hôtes, les parties prenantes régionales et les communautés locales. Une discussion plus détaillée est présentée dans la section 2.

Pour des raisons de faisabilité technique et d'évaluation des coûts, le Laboratoire national de l'accélérateur Fermi aux États-Unis a analysé les besoins techniques de deux des huit sites de surface dans le cadre de la collaboration FCC internationale. L'étude s'est servie d'un site d'expérience (PA) et d'un site technique (PB) comme exemples génériques. Le travail a abouti à la production de plans détaillés des bâtiments sur les sites. Ces plans ont servi de base à une première estimation du coût des travaux de surface. Il convient de souligner que ces conceptions représentent des données préliminaires à des fins de faisabilité technique et financière et de planification de la construction uniquement. Il ne s'agit pas de conceptions approuvées.

Les sous-sections ci-dessous présentent des versions simplifiées de ces concepts qui permettent de mettre au point les configurations des sites et les estimations de coûts.

Les chapitres 2 et « Implantation territoriale » fournissent un examen plus détaillé des considérations contextuelles, des stratégies de planification et des difficultés logistiques associées aux sites de surface, apportant un éclairage supplémentaire sur la manière dont ces éléments sont harmonisés dans le cadre d'une vision plus large du projet.

1.2.1. Site de surface PA

Le site de surface PA sera l'emplacement de l'une des quatre zones d'expérience. Ce site est situé à proximité du site de surface P8 du LHC du CERN, ce qui permet de réaffecter certaines installations et infrastructures existantes du LHC du CERN au service des activités du FCC-hh sur le site PA.

Les bâtiments et autres infrastructures de surface nécessaires au génie civil pour tous les sites de surface ont été identifiés et inclus dans la structure de décomposition des produits (PBS) pour le génie civil qui est présentée, pour le site PA uniquement, dans le Tableau 1.5.

Une caractéristique importante de ce site de surface et de tous les sites de surface de la zone d'expérience est le grand hall d'assemblage qui servira au sous-assemblage et à la préparation avant le transfert des composants du détecteur dans la caverne d'expérience souterraine. Il convient de noter qu'un futur hall d'assemblage pour un détecteur FCC-hh devra peut-être être plus grand que celui qui convient à un détecteur FCC-ee, et qu'une surface est donc réservée sur le site pour une telle extension/configuration future du hall d'assemblage. Les derniers détails de la conception de ce bâtiment lors de la phase FCC-hh seront déterminés parallèlement à une future stratégie de fabrication et d'assemblage du détecteur associé.

L'emplacement du site présente certaines contraintes spécifiques, notamment :

- la présence d'un gazoduc adjacent mais extérieur au site ; la disposition des bâtiments sur le site tient compte de la présence de ce gazoduc et, dans le cadre de l'évolution future de la conception, de la manière de le traverser pour permettre aux services de se raccorder au site LHC existant P8 avant la construction du FCC-hh ;
- un développement urbain probable à proximité immédiate du site proposé, avec des vues directes sur Genève et le Mont Blanc. Ces vues ont été prises en compte et les hauteurs des bâtiments ont été maintenues aussi basses que possible et l'élévation globale de la plateforme a été réduite au maximum. À cette fin, le cahier des charges a prévu une élévation du toit qui ne devra pas être supérieure à celle des bâtiments situés à proximité du site proposé ;

– la présence d’une zone protégée de compensation environnementale, immédiatement au nord du site, d’un lotissement existant au sud du site et d’une grande artère routière à l’ouest du site limite la surface disponible et la disposition des bâtiments à l’intérieur de ce site de surface.

Table 1.5: PBS for PA surface structures.

PBS Level					PBS Description
0	1	2	3	4	
	2				Civil Engineering
	2	2			Surface Structures
	2	2	1		Site PA
	2	2	1	1	Roads, parking spaces, footpaths, fences, gates, landscaping, drainage
	2	2	1	2	Technical galleries
	2	2	1	3	Fire fighting equipment and medical station
	2	2	1	4	Control building
	2	2	1	5	Assembly hall
	2	2	1	6	Magnet storage
	2	2	1	7	Shaft head building
	2	2	1	8	Tunnel ventilation
	2	2	1	9	Chilled water production facility
	2	2	1	10	Experiment cavern ventilation
	2	2	1	11	Service cavern ventilation
	2	2	1	12	Cooling plant and waste heat recovery
	2	2	1	13	SF annex
	2	2	1	14	Warm compressor
	2	2	1	15	Helium gas tanks foundations
	2	2	1	16	Liquid Nitrogen storage tank foundations
	2	2	1	17	Power converters building
	2	2	1	18	Electrical equipment building
	2	2	1	19	Electrical substation
	2	2	1	20	Waste material storage building

Les exigences fonctionnelles applicables aux bâtiments de surface sur le site PA sont semblables à celles des bâtiments construits pour les zones d’expérience précédentes du CERN. Les principales exigences sont, par exemple les suivantes :

- Un grand hall d’assemblage pour le pré-assemblage du détecteur. Ce bâtiment abritera au moins une grue capable de descendre les sous-ensembles du détecteur depuis la surface jusqu’à la caverne souterraine située environ 200 m plus bas. Les dimensions et le poids précis de la grue devront être pris en compte lors de la phase de conception détaillée ;
- Un bâtiment de tête de puits destiné à accueillir les ascenseurs, les grues et les escaliers nécessaires à l’accès du personnel aux zones souterraines et au déplacement du matériel, des équipements et des services entre la surface et les zones souterraines. Ce bâtiment abrite également un quai de

déchargement pour les camions transportant le matériel et les équipements à installer dans les zones souterraines ;

- Des bâtiments pour abriter les équipements nécessaires à la ventilation des zones souterraines. L'équipement de ventilation de la caverne d'expérience est logé séparément de l'équipement de ventilation du reste des zones souterraines, car ces deux systèmes entrent dans les zones souterraines et en ressortent par des puits différents. Du fait que ces équipements nécessitent une isolation acoustique efficace, ces bâtiments seront soit construits en béton armé, soit dotés de moyens spécifiques de réduction du bruit incorporés ou fixés à la structure du bâtiment ;
- Bâtiments destinés à accueillir les compresseurs et autres équipements nécessaires aux systèmes cryogéniques qui seront utilisés par le détecteur. Des mesures de réduction du bruit similaires à celles qui sont utilisées pour les bâtiments de ventilation seront nécessaires

Pour l'illustration, voir le texte en anglais.

Fig. 1.21 : Exigences préliminaires simplifiées en matière de surface pour le site PA.

Pour l'illustration, voir le texte en anglais.

Fig. 1.22 : Coupe transversale préliminaire du site PA.

- Les bâtiments de la centrale de refroidissement comprendront les tours de refroidissement et les stations de pompage associées, les bassins, etc. Bien que ces bâtiments soient traditionnellement construits en béton armé, l'utilisation de polyester préfabriqué renforcé de fibres de verre (FRP) peut être envisagée. Dans ce cas, la composante de génie civil serait réduite à la fourniture du bassin de refroidissement et des fondations d'appui appropriées, les tours elles-mêmes étant livrées dans le cadre de l'infrastructure de refroidissement, mécanique et électrique. Dans ce cas, des mesures supplémentaires de réduction du bruit pourront être nécessaires autour de ces tours de refroidissement préfabriquées ;
- Bâtiment de contrôle abritant les bureaux et la salle de contrôle pour le fonctionnement du détecteur. Ce bâtiment abriterait également des espaces destinés à l'accueil des visiteurs, étant donné que PA est la zone d'expérience du FCC la plus proche du campus principal du CERN, ce site est susceptible d'être un point d'intérêt important pour les visiteurs du CERN ;
- Des bâtiments et des structures d'appui pour les transformateurs, les commutateurs, les pylônes, etc. seront nécessaires pour l'infrastructure électrique ;
- D'autres bâtiments plus petits, destinés à des usages divers, sont énumérés dans la structure PBS du Tableau 1.5.

Sur la base des schémas conceptuels initiaux élaborés par le Laboratoire national des accélérateurs Fermi (Fermilab) et de l'évolution des exigences du site de surface PA, les schémas conceptuels ont été affinés afin d'élaborer des scénarios d'aménagement du site, des élévations et des estimations de travaux de terrassement adaptés à la détermination des coûts et du planning. Il convient de noter que ces représentations servent uniquement d'informations préliminaires pour l'évaluation de la faisabilité et la planification et qu'elles n'ont été ni examinées, ni validées, ni approuvées. La Fig. 1.21 présente une vue simplifiée des bâtiments de génie civil proposés et des ouvrages associés, tandis que la Fig. 1.22 illustre une coupe transversale simplifiée du site.

L'un des aspects qui différencie PA des trois autres sites d'expérience PD, PG et PJ est la présence d'un site de surface existant du LHC (P8) à proximité immédiate. Il est donc possible de réduire la surface nécessaire pour le FCC-hh en réutilisant le site existant du LHC (P8) après la fin du programme

physique du LHC. Une galerie technique reliant le site existant au site PA devra être construite avant le FCC-hh pour relier les services des deux sites.

1.2.2. Site de surface PB

Le site PB est un site technique. Sur ce site, il n'y aura pas de zone d'expérience et le génie civil se limite donc à la fourniture des bâtiments nécessaires pour soutenir la machine FCC-ee et l'absorbeur de faisceau associé qui sera installé dans les zones souterraines du site PB. Le site réserve également l'espace nécessaire au génie civil requis pour accueillir une future machine hh, bien que ces bâtiments ne soient pas construits pendant la phase FCC-ee. L'espace réservé sera utilisé temporairement pendant la phase de construction pour abriter les installations, les équipements, le matériel, etc. des entreprises de génie civil. Ce site de surface est le seul prévu sur le territoire suisse. La collaboration avec le Laboratoire national des accélérateurs Fermi (Fermilab) a également permis d'étudier la nécessité d'un site technique, en prenant l'exemple de PB. Sur la base des travaux initiaux, le CERN a élaboré d'autres scénarios d'implantation à des fins de planification et de calcul des coûts.

Le Tableau 1.6 présente la structure de décomposition du produit (PBS) pour les bâtiments et les travaux de génie civil associés à construire sur le site PB.

Le site PB est l'un des plus petits sites techniques. Néanmoins, sa situation à proximité d'un cours d'eau protégé et à la vue des propriétés résidentielles et agricoles voisines nécessitera la réalisation d'études d'intégration rigoureuses. L'intégration harmonieuse dans le paysage existant sera étudiée plus en détail ~~au cours d'une phase préparatoire ultérieure du projet.~~

Lors de la phase FCC-ee, les principales infrastructures de surface sur le site PB sont les suivantes :

- Un bâtiment de tête de puits destiné à accueillir les ascenseurs, les grues et les escaliers nécessaires à l'accès du personnel aux zones souterraines et au déplacement du matériel, des équipements et des services entre la surface et les zones souterraines. Ce bâtiment abrite également un quai de déchargement pour les camions qui apportent le matériel et les équipements à transporter par le puits vers les zones souterraines. Ce bâtiment doit être situé directement au-dessus du puits associé. La position de ce bâtiment et du puits associé pourra être ajustée à l'intérieur des frontières du site pour tenir compte de tout changement ou ajout aux exigences et contraintes de surface. Ce type de bâtiment est généralement construit sur une charpente métallique reposant sur des fondations en béton armé et une dalle en béton armé pour supporter la charge imposée par les véhicules entrant dans le bâtiment pour le déchargement. Le bâtiment comprendra une zone d'accès sécurisée afin de garantir un contrôle d'accès approprié aux zones souterraines ;
- Un bâtiment sera construit pour abriter les équipements nécessaires à la ventilation des zones souterraines, y compris le puits, la galerie d'accès, le tunnel de l'accélérateur et la caverne de l'absorbeur de faisceau. Comme ces équipements comprennent des composants motorisés susceptibles de provoquer des nuisances sonores, la conception du bâtiment intégrera des mesures appropriées de réduction du bruit afin de garantir que les niveaux de bruit à la limite du site ne dépasseront pas les limites requises. Le choix des matériaux de construction et des solutions d'atténuation du bruit sera déterminé en fonction de considérations techniques et environnementales.
- Les bâtiments de la centrale de refroidissement, y compris les tours de refroidissement et les stations de pompage associées, les bassins et le bâtiment de la centrale d'eau déminéralisée ;

Pour l'illustration, voir le texte en anglais.

Fig. 1.23 : Exigences préliminaires simplifiées en matière de superficie pour le site de surface PB.

Pour l'illustration, voir le texte en anglais.

Fig. 1.24 : Coupe transversale préliminaire simplifiée du site de surface PB.

Table 1.6: PBS structure for surface site PB.

PBS Level						PBS Title
0	1	2	3	4	5	
	5	3				PB Construction, testing, commissioning
	5	3	1			Surface works
	5	3	1	1		Roads, footpaths, parking, fences, gates
	5	3	1	2		Technical galleries
	5	3	1	3		Access control building
	5	3	1	4		Fire fighting equipment and medical station
	5	3	1	5		Shaft head building
	5	3	1	6		Ventilation building
	5	3	1	7		Chilled water production building
	5	3	1	8		Cold box and control Building
	5	3	1	9		Cooling plant Building
	5	3	1	10		SF Annex (demineralised water)
	5	3	1	11		Power converters building
	5	3	1	12		Electrical building
	5	3	1	13		Electrical substation (foundations)
	5	3	1	14		Waste material storage

- Divers bâtiments et structures destinés à abriter des équipements électriques, y compris des bâtiments pour les convertisseurs électriques et un système d'alimentation de secours ;
- Un bâtiment de contrôle d'accès destiné à héberger le personnel chargé des opérations de sécurité et de sûreté sur le site.

L'emplacement du site PB dans une campagne plate et ouverte nécessite un examen attentif de son intégration dans le paysage environnant. Pour garantir un impact minimal sur l'environnement, une attention particulière sera accordée aux dispositions architecturales et aux mesures d'atténuation du bruit, tant pendant la phase de construction du FCC-ee que lors de son exploitation ultérieure.

Comme pour le site PA, le plan du FCC-ee pour le site PB a pris en compte les besoins d'un futur collisionneur FCC-hh et de l'espace a été réservé pour le génie civil nécessaire. La clôture de délimitation du site durant la phase FCC-ee englobera déjà ces besoins futurs.

La Figure 1.23 présente une vue simplifiée du site de surface PB. Les bâtiments spécifiques requis pour la phase FCC-ee sont illustrés, ainsi que les emplacements nécessaires réservés pour le futur génie civil de la phase FCC-hh. Une coupe transversale simplifiée est présentée à la Figure 1.24.

1.2.3. Site de surface PD

Le site PD a une fonction identique à celle du site PA, à savoir héberger une expérience et fournir un soutien à l'accélérateur. En tant que telles, les exigences en matière de génie civil sont presque identiques, bien que les spécificités du terrain local et des parcelles exigent une approche différente de l'aménagement du site.

La configuration du site PD présente un certain nombre de contraintes qui doivent être prises en compte. La principale contrainte est l'extension future prévue du réseau routier public dans ces zones, qui réduit l'espace foncier disponible sur le site PD pour le FCC et nécessite un plan d'accès au site qui soit compatible avec la future configuration. Après plusieurs itérations, un aménagement du site conforme aux exigences du CERN et compatible avec le projet d'aménagement routier a pu être mis au point. Le site PD proposé est situé sur un terrain agricole en pente. Le dénivelé d'un bout à l'autre du site est d'environ 20 m. Cela nécessitera des travaux de terrassement afin de créer une plateforme unique et plate sur laquelle les structures de surface pourront être installées.

D'autres caractéristiques spécifiques du site devront être abordées après l'étude de faisabilité, notamment :

- La compatibilité du calendrier des travaux de génie civil du FCC-ee avec le projet d'extension de la route
- La proximité d'un établissement médical sera prise en compte dans la conception du site. Des mesures telles que la plantation d'arbres et des aménagements paysagers pourront être incorporées afin de garantir un environnement bien intégré et visuellement harmonieux.
- La nécessité de passer sous des ponts à proximité du site peut entraîner une limitation de la hauteur des éléments surdimensionnés pouvant être transportés sur le site ;

Pour l'illustration, voir le texte en anglais.

Fig. 1.25 : Exigences préliminaires simplifiées en matière de superficie pour le site de surface PD.

Pour l'illustration, voir le texte en anglais.

Fig. 1.26 : Coupe transversale préliminaire simplifiée du site de surface PD.

Une vue simplifiée et une coupe des structures de génie civil du site PD sont présentées dans les Figures 1.25 et 1.26.

1.2.4. Site de surface PF

PF est un point d'accès technique avec des structures de génie civil de surface dont la fonction est similaire à celle du site PB. Afin d'éviter d'implanter des bâtiments de surface dans un village existant, le site de surface PF est décalé d'environ 600 m par rapport à l'axe du tunnel de l'accélérateur.

Le site est adjacent à une route principale, ce qui réduit la nécessité de construire de nouvelles routes extérieures pour accéder au site. La plateforme nécessaire pour les bâtiments de surface sera suffisamment grande pour accueillir les futurs bâtiments FCC-hh. Une vue simplifiée et une coupe transversale du site PF sont présentées dans les Figures 1.27 et 1.28.

Pour l'illustration, voir le texte en anglais.

Fig. 1.27 : Exigences préliminaires simplifiées en matière de superficie pour le site de surface PF.

Pour l'illustration, voir le texte en anglais.

Fig. 1.28 : Coupe transversale préliminaire simplifiée du site de surface PF.

Les principales contraintes du site PF sont liées à la présence d'une « zone humide » à proximité du site proposé. Il faudra y prêter une attention particulière lors de la conception détaillée des structures de génie civil afin de garantir que l'écoulement de l'eau pendant les phases de construction et d'exploitation n'aura pas d'impact sur cette zone.

En résumé, la construction des infrastructures de génie civil de surface nécessaires pour le FCC-ee au site PF est considérée comme techniquement faisable. Une attention particulière sera portée à la mise en œuvre de mesures garantissant un impact minimal sur l'environnement.

1.2.5. Site de surface PG

Le site PG est un point d'expérience dont les exigences en matière de génie civil sont similaires à ceux du site PA. Le site est situé sur un plateau qui est actuellement partiellement utilisé comme pâturage et partiellement boisé. Pour réduire l'impact sur la zone forestière, les bâtiments de surface associés à la centrale de refroidissement et certains systèmes électriques seront positionnés sur un site secondaire à environ 300 m du site principal. Cette approche suit l'exemple du point 4 du LHC du CERN, où les tours de refroidissement et les stations de pompage sont situées dans une zone éloignée du site principal, dans ce cas précis pour réduire leur impact visuel.

Pour l'illustration, voir le texte en anglais.

Fig. 1.29 : Exigences préliminaires simplifiées en matière de superficie pour le site de surface PG.

Outre l'atténuation de l'impact visuel, l'aménagement du site PG sera conçu de manière à assurer une utilisation efficace de l'espace tout en maintenant l'accessibilité pour l'exploitation et la maintenance. Des mesures de réduction du bruit seront mises en œuvre, le cas échéant, afin de réduire au maximum les nuisances potentielles pour l'environnement. En outre, des efforts seront faits pour intégrer harmonieusement le site dans le paysage.

Pour l'illustration, voir le texte en anglais.

Fig. 1.30 : Coupe transversale préliminaire simplifiée du site de surface PG.

1.2.6. Site de surface PH

PH sera une zone technique qui supportera non seulement les systèmes d'accès et de ventilation nécessaires au tunnel de l'accélérateur, mais aussi l'infrastructure associée aux systèmes RF installés sur ce site.

Le site de surface aura une emprise plus grande et plus complexe que les sites PB et PF, car l'alimentation électrique et la cryogénie associées aux systèmes RF nécessitent des bâtiments supplémentaires et des fondations dédiées pour certaines infrastructures telles que des réservoirs et des transformateurs.

L'aménagement du site sera conçu pour optimiser l'efficacité de l'utilisation de l'espace tout en garantissant l'accessibilité pour la maintenance et l'exploitation. En outre, on veillera tout particulièrement à réduire l'impact sur l'environnement et à intégrer le site dans son environnement en mettant en œuvre des mesures architecturales et paysagères appropriées.

Un schéma préliminaire simplifié du site PH est donné à la Fig. 1.31 et une coupe transversale simplifiée est donnée à la Fig. 1.32.

Le site PH est actuellement situé sur un terrain en pente dans une zone agricole et forestière, avec quelques maisons à proximité. Des études spécifiques sur l'impact visuel de ce site seront nécessaires afin d'identifier les mesures pouvant être mises en place pour réduire son impact visuel sur le paysage environnant.

Pour l'illustration, voir le texte en anglais.

Fig. 1.31 : Exigences préliminaires simplifiées en matière de superficie pour le site de surface PH.

Pour l'illustration, voir le texte en anglais.

Fig. 1.32 : Coupe transversale préliminaire simplifiée du site de surface PH.

1.2.7. Site de surface PJ

Le site PJ sera une zone d'expérience avec des structures de génie civil similaires à celles décrites pour le site PD. Le site est situé dans une zone agricole à proximité d'une autoroute. Au-delà de l'intégration visuelle du site dans son environnement, aucune difficulté majeure n'a été identifiée à ce stade. Un schéma simplifié pour le site PJ est présenté à la Fig. 1.33 et une coupe transversale simplifiée à la Fig. 1.34.

Pour l'illustration, voir le texte en anglais.

Fig. 1.33 : Exigences préliminaires simplifiées relatives à la zone du site de surface PJ.

Pour l'illustration, voir le texte en anglais.

Fig. 1.34 : Coupe transversale préliminaire simplifiée du site PJ.

1.2.8. Site de surface PL

PL sera une zone technique avec des exigences similaires à celles de PH en raison de l'emplacement des systèmes RF du booster à cet endroit. La présence éventuelle d'un aquifère lié à un

approvisionnement en eau potable devra faire l'objet d'une étude ultérieure et, si nécessaire, des techniques et des procédés de construction devront être sélectionnés pour garantir la protection de l'aquifère. Un plan simplifié pour le site PL est présenté à la Fig. 1.35 et une coupe transversale simplifiée à la Fig. 1.36.

Pour l'illustration, voir le texte en anglais.

Fig. 1.35 : Exigences préliminaires simplifiées relatives à la zone du site de surface PL.

Pour l'illustration, voir le texte en anglais.

Fig. 1.36 : Coupe transversale préliminaire simplifiée du site PL.

En résumé, les exigences préliminaires relatives aux huit sites de surface ont été regroupées et des vues préliminaires en plan et en coupe ont été élaborées à un niveau suffisant pour le calcul des coûts et la planification. La construction de ces sites est considérée comme techniquement réalisable. Cependant, une phase préparatoire du projet devra mobiliser des efforts importants pour garantir que ces sites soient soigneusement intégrés dans leurs environnements locaux spécifiques. Ce processus devra être mené en étroite collaboration avec les spécialistes de l'architecture appropriés et inclure un processus de consultation avec les riverains et les autres parties prenantes. Au cours de ce processus, il pourra s'avérer nécessaire d'ajuster et d'optimiser les configurations et les emplacements préliminaires actuels afin de parvenir à un résultat acceptable pour toutes les parties concernées et conforme aux exigences techniques.

1.3. Approche par étapes

Une évaluation du génie civil souterrain et de surface a été réalisée afin d'identifier les structures qui ne seront nécessaires que pour une machine FCC-hh ultérieure et ses détecteurs associés et de classer les structures identifiées en deux catégories : celles dont la construction peut être reportée jusqu'à l'achèvement de l'accélérateur physique FCC-ee et celles qui doivent être construites en même temps que le génie civil de la machine FCC-ee. L'analyse a tenu compte du coût et de la faisabilité pratique de la réalisation des travaux de génie civil pour le FCC-hh lors d'une seconde phase après la mise en service de la machine FCC-ee.

1.3.1. Structures souterraines

Plusieurs ouvrages de génie civil souterrains ont été envisagés pour l'échelonnement des travaux de la manière suivante :

Cavernes des détecteurs d'expérience

Les cavernes des détecteurs d'expérience nécessaires pour le FCC-hh sont presque 100 % plus grandes en volume que celles qui sont nécessaires pour les détecteurs FCC-ee. La possibilité de construire les plus petites cavernes expérimentales lors de la phase initiale FCC-ee et de les agrandir ensuite avant la phase FCC-hh a été étudiée. Cependant, ce scénario a finalement été rejeté, car très peu d'éléments structuraux de la première phase de la caverne seraient conservés pour la seconde phase, et il serait nécessaire de démolir la majorité des travaux de la première phase. Cela serait non seulement d'un coût prohibitif et créerait des quantités importantes de déchets, mais représenterait également un risque important du point de vue de la sécurité puisque la roche renforcée autour de la périphérie de la plus petite caverne FCC-ee devrait être enlevée et ré-étayée pour les cavernes FCC-hh plus grandes.

Cavernes de service

La possibilité d'entreprendre la construction des cavernes de service adjacentes aux cavernes d'expérience aux points PA, PD, PG et PJ a également été envisagée. La raison en était la possibilité de regrouper dans la caverne d'expérience les systèmes traditionnellement hébergés dans la caverne de service, tels que les systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation et les systèmes d'eau déminéralisée. Il a également été envisagé de ne construire qu'une partie de la caverne de service pour la phase FCC-ee et de construire le reste de la caverne nécessaire pour la phase FCC-hh dans un deuxième temps. La construction de la deuxième phase nécessiterait une remobilisation complète du chantier à la surface et la dépose de tous les systèmes de la caverne de service ainsi que, au moins partiellement, du puits d'accès à la machine. Il a finalement été conclu que ni l'échelonnement complet ni l'échelonnement partiel de la réalisation de la caverne de service n'apporterait d'avantages majeurs, car le coût du déplacement des services d'une caverne à l'autre et le coût de la remobilisation du chantier augmenteraient considérablement les coûts par rapport à la réalisation complète de la caverne de service en une seule étape.

Génie civil pour l'absorbeur de faisceau

Le système d'absorption de faisceau pour FCC-ee ne nécessite qu'un agrandissement localisé du tunnel de faisceau sur une longueur de 708 m. Il sera construit sur le site PB.

Bien qu'il ne soit pas encore entièrement défini, le système d'absorption de faisceau pour FCC-hh sera plus complexe et situé sur le site PF. Il nécessitera la construction de plus de deux kilomètres de

tunnels supplémentaires, de deux cavernes d'absorbeur de faisceaux et de plusieurs cavernes de jonction. Étant donné qu'aucune des structures de l'absorbeur de faisceau FCC-hh ne peut être utilisée lors de la phase FCC-ee et compte tenu de la criticité du site PF pour le calendrier global de la construction, il a été jugé préférable de reporter la construction du génie civil de l'absorbeur de faisceau FCC-hh à une deuxième étape. L'inconvénient de cette approche réside dans la nécessité de rouvrir un chantier et de supprimer tous les services du tunnel du faisceau sur plusieurs centaines de mètres de part et d'autre du site PB. En outre, il ne sera pas possible de transporter du personnel ou du matériel par le tunnel principal dans cette zone pendant une période d'environ deux ans pendant les travaux de génie civil de l'absorbeur de faisceau FCC-hh.

Tunnels de transfert FCC-hh

Le génie civil du FCC-ee comprend un seul tunnel de transfert depuis le site de Prévessin jusqu'à la machine FCC. Le tunnel comporte une bifurcation pour permettre l'injection dans le FCC-ee dans le sens des aiguilles d'une montre et dans le sens inverse. Pour une future machine FCC-hh, le complexe de pré-injection utilisera probablement les tunnels SPS ou LHC actuels avec deux nouveaux tunnels de transfert pour l'injection dans le FCC-hh dans le sens des aiguilles d'une montre et dans le sens inverse. Si le tunnel du SPS est reconfiguré pour accueillir le système d'injection FCC-hh, une seule ligne de transfert supplémentaire d'une longueur approximative de 3 000 m et un puits pour la construction du tunnel seront nécessaires. Si le tunnel du LHC est réaffecté, deux tunnels de transfert d'une longueur d'environ 2 500 m chacun seront nécessaires, chacun avec un puits temporaire unique pour les besoins de la construction. Un diamètre de tunnel d'environ 4 m serait nécessaire et des cavernes de raccordement seraient créées pour relier les tunnels de transfert au tunnel principal du FCC.

Tunnels de contournement supplémentaires

Le génie civil du FCC-ee ne comprend que des tunnels de contournement aux quatre sites d'expérience PA, PD, PG et PJ. Sur les sites techniques, les tunnels de contournement ne sont pas nécessaires puisqu'un couloir de transport continu peut être maintenu à travers le tunnel de l'accélérateur.

Pour le FCC-hh, il est possible que de nouvelles galeries de contournement soient nécessaires aux sites PB et PH afin d'éviter que les personnes ne traversent fréquemment des zones de rayonnement plus élevé (en raison de la présence des collimateurs). Si la nécessité de ces tunnels de contournement supplémentaires peut être définitivement confirmée avant l'achèvement des tâches de conception du génie civil du FCC-ee, il serait peut-être plus efficace de les inclure dans la phase FCC-ee. Si le besoin n'est pas entièrement confirmé, ils pourront être construits une fois que l'exploitation de la machine FCC-ee sera réalisée. Ces tunnels seraient construits de la même manière que les tunnels de contournement supplémentaires qui ont été construits pour la mise à niveau du LEP 200 en 1995.

1.3.2. Structures de surface

L'échelonnement du génie civil de surface pour un futur FCC-hh présente moins de difficultés techniques que le génie civil souterrain, car l'accès aux zones de construction se fait directement. Bien que les évaluations détaillées des besoins en génie civil pour les huit sites de surface ne soient pas encore terminées, les études initiales aux points PA et PB suggèrent que les bâtiments suivants pourraient être construits après l'achèvement de l'accélérateur physique FCC-ee et avant la mise en service et l'exploitation du FCC-hh.

Halls d'assemblage pour les éléments des détecteurs du FCC-hh

Les évaluations de l'espace d'assemblage nécessaire pour les éléments détecteurs FCC-hh de plus grande taille comme la bobine de l'aimant supraconducteur indiquent, pour au moins deux des plus grands détecteurs, que certains composants auront des dimensions physiques et des poids rendant leur transport impossible sur les routes existantes sans modifications de l'infrastructure publique actuelle. Il est donc probable que des espaces et des bâtiments plus vastes seront nécessaires pour les activités d'assemblage associées.

Cet espace supplémentaire serait nécessaire pour les activités de fabrication qui ne sont normalement pas réalisées sur le site, telles que l'enroulement des bobines. Étant donné que les besoins précis d'un éventuel détecteur FCC-hh ne sont pas connus à ce stade et qu'il s'écoulera au moins 20 ans entre les installations nécessaires à l'assemblage des détecteurs FCC-ee et FCC-hh, il n'est pas jugé efficace ou nécessaire de construire les installations plus grandes dès la phase FCC-ee. Toutefois, afin d'éviter de futurs travaux de démolition et de reconstruction inutiles, la réservation de l'espace nécessaire pour des halls d'assemblage plus grands sera déjà effectuée sur chacun des quatre sites d'expérience. L'espace pourra être utilisé pour des installations facilement transférables telles que des parkings ou des zones de stockage, mais aucune installation complexe ne sera mise en place dans ces zones réservées et, dans la mesure du possible, les services publics souterrains seront évités, y compris les galeries techniques.

Centrales cryogéniques

Une future machine FCC-hh nécessitera une plus grande capacité cryogénique que pendant la phase FCC-ee. On s'attend actuellement à ce que les quatre sites d'expérience et les sites abritant des systèmes RF aient besoin d'installations cryogéniques pour la phase FCC-ee. Toutefois, un futur FCC-hh nécessiterait des installations mises à niveau et plus grandes sur les sites PA, PD, PG et PJ, ainsi que de nouvelles installations aux points PB et PF, où aucune centrale cryogénique n'est prévue pour le FCC-ee. La même approche que pour le hall d'assemblage sera adoptée, c'est-à-dire que l'espace sera maintenu disponible et libre de toute infrastructure FCC-ee pour l'infrastructure cryogénique FCC-hh actuellement prévue. En outre, l'aménagement paysager et la plantation d'arbres réalisés pour le FCC-ee seront, dans la mesure du possible, exécutés de manière à répondre également aux besoins futurs du FCC-hh.

Bâtiments de refroidissement et de ventilation

Bien que des systèmes de refroidissement et de ventilation soient nécessaires à tous les points de surface pour la phase FCC-ee, on prévoit actuellement que les besoins en refroidissement pour la machine et les expériences à la phase FCC-hh nécessiteront des améliorations de l'installation, y compris une augmentation possible de la capacité de refroidissement et, par conséquent, du nombre de tours de refroidissement. Ces aménagements seront réalisés de la même manière que la centrale cryogénique, en tenant compte des besoins potentiels d'espace et d'écran visuel/acoustique pour la phase FCC-ee.

1.4. Études des sites souterrains

Un modèle géologique 3D fiable et complet est essentiel pour évaluer la faisabilité des projets de génie civil souterrains. Des données géologiques et géotechniques fiables intégrées au modèle sont nécessaires pour concevoir les tunnels, les cavernes et les puits. Au fur et à mesure que le modèle évolue, la compréhension de la géologie souterraine s'améliore, ce qui permet d'identifier les risques potentiels et les contraintes qui pourraient affecter ces structures. Ces facteurs peuvent influencer sur la conception, les coûts et le calendrier, d'où l'importance de recueillir des informations exhaustives sur le sous-sol dès les premières étapes de la planification.

Depuis l'automne 2024, le CERN mène une série d'investigations souterraines sur les sites (SSI) en utilisant une combinaison de méthodes d'acquisition de données. Une fois ces études SSI terminées, les informations obtenues serviront à améliorer la fiabilité du modèle géologique 3D pour la zone d'étude du FCC. La première phase des SSI est actuellement achevée à environ 40 % et les résultats préliminaires sont positifs lorsqu'on les compare aux prévisions du modèle.

1.4.1. Géologie de la région

Pour les besoins de l'étude de faisabilité et des profondeurs visées pour l'infrastructure souterraine, le CERN a considéré que la région de Genève présentait trois strates géologiques primaires : morainique, molassique et calcaire. Une vue en plan de la géologie du bassin genevois est présentée à la Figure 1.37.

Les moraines glaciaires, caractérisées par leur faible résistance, recouvrent la molasse sédimentaire, qui se compose de couches horizontales de marne et de grès dont la résistance varie considérablement. L'épaisseur des moraines varie de quelques mètres à plus de 100 mètres. La molasse est bordée et recoupée par des formations calcaires, dont les contreforts alpins et les chaînes du Jura, du Vuache et du Salève. Les calcaires des contreforts du Jura et du Vuache peuvent potentiellement contenir des karsts dus à une altération chimique. Ces karsts, souvent remplis d'eau et de sédiments, peuvent entraîner des infiltrations d'eau et une instabilité structurale s'ils sont rencontrés lors de l'excavation.

Au-dessous du lac Léman, des études antérieures ont révélé des dépôts très tendres, notamment des limons argileux lacustres et des limons et argiles glacio-lacustres, dont la résistance à la compression varie entre 2 MPa et 10 MPa. Ces dépôts s'étendent du lit du lac jusqu'à une profondeur d'environ 260 mètres.

Pour l'illustration, voir le texte en anglais.

Fig. 1.37 : Géologie de la région de Genève.

Des données limitées existent pour les vallées de l'Arve et du Rhône, mais on s'attend à ce que les dépôts meubles, y compris les moraines alluviales et alluviales-glaciaires, atteignent des profondeurs allant jusqu'à 100 mètres. Afin d'atténuer les risques liés à la construction et de réduire les problèmes d'afflux d'eau, le tracé du tunnel a été implanté à une profondeur qui devrait rester entièrement sous les moraines.

La molasse est composée de couches horizontales de marne et de grès. Ces couches peuvent être plus ou moins résistantes, mais elles sont considérées comme essentiellement stables et sèches. La molasse est généralement considérée comme une couche géologique favorable à l'excavation par un tunnelier. Pour les cavernes de grande portée, il est préférable de construire dans des couches de grès plus résistantes. Tout au long de l'étude de faisabilité, l'objectif a été, dans la mesure du possible, d'implanter les infrastructures souterraines dans la molasse, comme on peut le voir sur la Figure 1.38.

Pour l'illustration, voir le texte en anglais.

Fig. 1.38 : Profil géologique en long du FCC.

1.4.2. Développement d'un modèle géologique en 3D

Dans le cadre de l'étude de faisabilité, l'un des objectifs principaux a été d'identifier et de localiser avec plus de précision les interfaces entre les moraines et la molasse, ainsi qu'entre la molasse et le calcaire. Bien qu'il existe des données sur les sous-couches individuelles de chaque strate, leur qualité est inégale et ne permet pas pour l'instant de distinguer clairement les moraines, la molasse et le calcaire en sous-couches distinctes.

En collaboration avec l'Université de Genève (UNIGE) et des consultants spécialisés des États membres du CERN, le CERN a développé un modèle géologique en 3D. Ce modèle est basé sur des données provenant de sondages antérieurs, d'études géophysiques dans la région étudiée et de la campagne SSI en cours. Les zones urbaines telles que Genève et sa banlieue bénéficient de nombreuses diagraphies de sondages, qui offrent un niveau de confiance élevé pour les 50 premiers mètres au-dessous de la surface. En revanche, les zones rurales disposent de moins de diagraphies et certains endroits, comme le pied des affleurements calcaires des Bornes et de la Mandallaz, s'étendent sur plusieurs kilomètres sans données géologiques pertinentes aux profondeurs où l'infrastructure souterraine du FCC est prévue.

Afin d'améliorer la compréhension des conditions géologiques le long du tunnel proposé pour le FCC, une campagne d'investigations souterraines ciblées a été mise au point et est en cours dans les zones où l'incertitude géologique est la plus grande. Cette campagne, qui a débuté en octobre 2024 et se poursuivra jusqu'en décembre 2025, combine relevés géophysiques et forages profonds. Les études géophysiques sont d'abord menées en utilisant la réfraction sismique pour examiner les strates peu profondes et la réflexion sismique pour explorer les couches plus profondes. Les données recueillies sont ensuite traitées et interprétées pour guider le forage ciblé à des profondeurs allant de 70 à 500 mètres. L'intégration de ces méthodes complémentaires permet d'améliorer considérablement la fiabilité du modèle géologique dans des zones auparavant incertaines. Cela permet d'accroître la confiance dans les coûts et les calendriers de construction estimés, de fournir des informations précieuses pour la phase de conception préliminaire du génie civil et d'établir des paramètres géologiques et géotechniques clés avant de mener des campagnes d'investigation plus ciblées.

Une fois que le modèle géologique mis à jour sera finalisé, il fera l'objet d'une publication, de même que toutes les diagraphies individuelles et les interprétations géophysiques. Ces données contribueront à une meilleure compréhension de la géologie de la région du FCC, serviront de base à la recherche universitaire et pourront éventuellement soutenir de futurs projets d'infrastructure au-delà du FCC.

1.4.3. Phase 1 de l'étude des sites souterrains

Trois critères principaux ont été pris en compte pour identifier l'étude de site à entreprendre au cours de la première phase :

1. Zones où il y a un risque que le tunnel traverse l'interface de la molasse avec les moraines ou les calcaires.
2. Zones où la traversée de calcaire est inévitable.
3. Zones où l'on manque totalement d'informations géologiques pertinentes.

Sur la base de ces trois critères, la première phase de la campagne SSI a été divisée en neuf sections distinctes : Jura 1, Jura 2, Lac, Arve, Bornes, Mandallaz, Usses, Vuache et Rhône.

Les différentes sections représentées à la Figure 1.39 présentent chacune des incertitudes et des difficultés uniques. Les sections suivantes décriront les incertitudes actuelles dans chaque zone, expliqueront les objectifs des investigations souterraines et présenteront les résultats préliminaires des études déjà réalisées.

Pour l'illustration, voir le texte en anglais.

Fig. 1.39 : Zones d'incertitude géologique.

Jura 1

La section Jura 1 est située au pied de la chaîne de montagnes du Jura, à dominante calcaire, qui s'étend sur environ huit kilomètres de Challex, en France, au sud, jusqu'à Satigny près du CERN, en Suisse, au nord. Le tracé proposé est situé à des profondeurs allant d'environ 140 mètres sous le vallon de l'Allondon, à son point le moins profond, à 250 mètres à son point le plus profond de chaque côté de la vallée.

La compréhension des conditions du sous-sol dans cette section a été améliorée par des études récentes menées par ailleurs. En 2021, une vaste campagne d'études géophysiques 2D et 3D a été menée par le Canton de Genève et les Services Industriels de Genève dans le cadre du programme GEothermies. En outre, les données de forage obtenues près de Satigny ont permis d'identifier clairement l'interface molasse-calcaire et ont mis en évidence des écoulements d'eau artésienne près de cette interface. Les données de cette campagne ont été intégrées dans un modèle géologique 3D développé en collaboration avec l'UNIGE, ce qui a permis de réduire l'étendue prévue pour les investigations ultérieures et de mettre à jour les prévisions selon lesquelles, dans la partie nord de la section, le calcaire se trouve à une profondeur plus importante que prévu.

Malgré ces progrès, des incertitudes résiduelles subsistent, notamment en ce qui concerne la définition précise de l'interface entre le calcaire et la molasse. Comme la confiance dans les données actualisées diminue vers la partie sud du tronçon, il est nécessaire de poursuivre les investigations souterraines. Ces études sont nécessaires pour confirmer les hypothèses actuelles et pour s'assurer que le tunnel et les infrastructures souterraines associées évitent le calcaire dans la mesure du possible, atténuant ainsi les risques liés aux pressions d'eau élevées imprévues et aux difficultés liées au creusement d'un tunnel dans le calcaire.

Les SSI dans la section Jura 1 devraient commencer à la mi-2025 et se poursuivront jusqu'à la fin de 2025. Il est prévu ce qui suit :

- treize sondages d’une profondeur comprise entre 230 et 270 m :
 - un sondage entièrement carotté ;
 - douze sondages destructifs et carottés ;
 - trois sondages sont facultatifs, en fonction des résultats obtenus par la géophysique et les sondages adjacents ;
- 13 profils de réflexion sismique à haute résolution d'une longueur totale de 23 510 m.

Les emplacements de l’étude SSI dans la section Jura 1 sont indiqués sur la Fig. 1.40.

Pour l'illustration, voir le texte en anglais.

Fig. 1.40 : Section Jura 1 montrant les emplacements des investigations.

Jura 2

La section Jura 2 est située entre le lac Léman et le pied du Jura. Elle s’étend sur environ trois kilomètres, de Meyrin en Suisse à Ferney-Voltaire en France. Il est prévu que les infrastructures de génie civil de cette zone soient implantées à environ 200 m sous la surface. À cette profondeur, les modèles géologiques 3D indiquent la possibilité de la présence de calcaire à proximité du tunnel et de l’infrastructure primaire, comme dans le cas des risques identifiés dans Jura 1.

L’intégration dans les modèles géologiques des données sismiques obtenues dans le cadre du programme GEothermies, qui concerne une zone voisine, a permis d’améliorer la compréhension du contexte. Ces informations actualisées suggèrent que le sommet du calcaire est plus profond que prévu.

Les investigations souterraines (SSI) ciblées permettront d'améliorer encore la compréhension de l'interface molasse-calcaire.

Il est prévu que l’étude SSI suivante commence à la mi-2025 et dure jusqu’à la fin de l’année 2025 :

- trois sondages d’une profondeur comprise entre 240 et 250 m :
 - un sondage destructif et partiellement carotté ;
 - un sondage entièrement carotté ;
 - une option de sondage destructif et partiellement carotté en fonction des résultats de la géophysique et des sondages adjacents ;
- 7300 m de réflexion sismique à haute résolution et de géophysique.

Les emplacements des investigations souterraines (SSI) proposées sont indiqués sur la Figure 1.41.

Pour l'illustration, voir le texte en anglais.

Fig. 1.41 : Section Jura 2 montrant les emplacements des investigations.

Lac

Sous le lac Léman, le tunnel FCC proposé se trouve à une profondeur d'environ 100 m sous le fond du lac. La géologie souterraine est caractérisée par des moraines aux propriétés mixtes. Cependant, l'absence de données de sondage préexistantes dans cette zone a conduit à une incertitude dans le modèle géologique.

L'intégration des données du programme Geothermies (collectées au sud du tracé proposé) dans le modèle géologique 3D a permis d'améliorer la compréhension du contexte. Bien que ces données ne définissent pas clairement l'interface entre les moraines et la molasse sous-jacente au nord, où le tunnel du FCC proposé est prévu, elles indiquent que l'interface est située à une profondeur plus élevée que ce qui avait été envisagé précédemment.

Le fait d'éviter des moraines est considéré comme une priorité essentielle de la conception, car le creusement d'un tunnel dans des moraines contenant de l'eau peut s'avérer difficile. Cela sera confirmé après la campagne SSI.

Il est prévu que l'étude SSI suivante commence à la mi-2025 et dure jusqu'à la fin de l'année 2025 :

- quatre sondages entièrement carottés allant de 130 à 180 m de profondeur ;
- 16340 m de réflexion sismique en mer.

Les emplacements des investigations souterraines (SSI) proposées sont indiqués sur la Fig. 1.42.

Pour l'illustration, voir le texte en anglais.

Fig. 1.42 : Section du lac montrant les emplacements des investigations.

Arve

La section de l'Arve, située à l'extrémité est du tunnel FCC proposé, s'étend sur une longueur d'environ 8 km, la profondeur du tunnel FCC proposé variant entre 140 et 170 mètres. Située dans la vallée de l'Arve et adjacente à la rivière L'Arve, la région est connue pour être constituée d'un mélange de molasse et de moraines glaciaires près de la surface, bien que les données géologiques aux profondeurs proposées pour le tunnel du FCC soient limitées.

D'autres investigations permettront de confirmer la profondeur de l'interface molasse-moraine et de s'assurer que le tunnel reste à l'intérieur de la molasse, évitant ainsi les moraines potentiellement aquifères.

Il est prévu que l'étude SSI suivante commence début 2025 et dure jusqu'à la mi-2025 :

- cinq sondages destructifs et carottés d'une profondeur totale de 990 m ;
 - Jusqu'à trois de ces sondages peuvent ne pas être entrepris en fonction des résultats de la géophysique ;
- trois lignes de réflexion sismique à haute résolution d'une longueur totale de 13150 m.

Les emplacements des investigations souterraines (SSI) proposées sont indiqués sur la Fig. 1.43.

Pour l'illustration, voir le texte en anglais.

Fig. 1.43 : Section de l'Arve montrant les emplacements des investigations.

Bornes

La zone adjacente au plateau des Bornes est la section la plus profonde du projet, avec des profondeurs allant de 500 à 560 m sur 5 km. Le puits d'accès le plus profond au site PF, d'une profondeur d'environ 400 m, est également situé dans cette section.

Le tunnel du FCC proposé restera dans la molasse, car le calcaire est situé beaucoup plus profondément, à près de 1000 m sous la surface. Cependant, les caractéristiques et la qualité de la molasse sont peu connues. En outre, des chevauchements de terrains, des failles et des matériaux tectoniques potentiels ont été identifiés dans la région.

Compte tenu de ces facteurs et de l'importance des surcharges, des investigations complémentaires sont nécessaires pour obtenir des informations détaillées sur la molasse et réduire les incertitudes géologiques dans ce secteur.

Il est prévu que l'étude SSI suivante commence début 2025 et dure jusqu'à la mi-2025 :

- un sondage entièrement carotté d'une profondeur totale de 425 m.

Les emplacements des investigations souterraines (SSI) sont indiqués à la Figure 1.44.

Pour l'illustration, voir le texte en anglais.

Fig. 1.44 : Section des Bornes montrant les emplacements des investigations.

Mandallaz

La Mandallaz est une chaîne calcaire anticlinale caractérisée par des failles et des chevauchements de terrains sur la molasse sous-jacente de son côté ouest. Peu d'informations géotechniques détaillées étaient disponibles avant le début de la campagne SSI. Il en résulte des incertitudes quant à l'étendue du calcaire et à la nature de sa structure.

Des études géophysiques menées dans le cadre des investigations souterraines sur les sites (SSI) ont permis d'améliorer la compréhension de cette structure. L'acquisition des données est terminée et des interprétations provisoires indiquent que le calcaire à la profondeur du tunnel du FCC proposé est plus étroit que ce qui avait été modélisé avant la campagne. Cette interprétation révisée suggère que la section nécessitant le creusement d'un tunnel dans le calcaire est plus courte qu'initialement prévu. En outre, les données des sondages préliminaires ont révélé la présence de petits karsts et de traces d'hydrocarbures, et des interprétations géophysiques provisoires ont identifié une faille de glissement est-ouest traversant les montagnes de la Mandallaz, bien que cela doive encore être confirmé par les sondages.

L'étude SSI suivante a été réalisée ou est en cours de réalisation :

- trois sondages entièrement carottés d'une profondeur totale de 1240 m ;
 - l'un de ces sondages est incliné de 30 ° par rapport à la verticale ;
 - l'un de ces sondages pourrait s'avérer superflu en fonction des résultats des deux

premiers sondages ;

- trois lignes de réflexion sismique à haute résolution d'une longueur totale de 5100 m.

Les emplacements des investigations souterraines (SSI) sont indiqués sur la Fig. 1.45.

Pour l'illustration, voir le texte en anglais.

Fig. 1.45 : Section de la Mandallaz montrant les emplacements des investigations.

Usses

La petite section des Usses, qui s'étend sur environ 1 km, est celle où le tunnel du FCC proposé est le plus proche de la surface, avec environ 50 m de couverture au-dessus du tunnel, au point le plus bas de la vallée des Usses.

Les investigations sur le terrain ont amélioré la compréhension des conditions du sous-sol dans ce secteur. Toutes les données recueillies ont été analysées et l'interprétation finale des données géophysiques est en cours. Les résultats des sondages indiquent que l'interface moraine-molasse est rencontrée à 15 m, à une profondeur moindre que celle qui avait été obtenue par le modèle, ce qui suggère que le tunnel proposé n'empiète pas sur les moraines aquifères situées sous la rivière Les Usses. Cela sera confirmé lorsque les interprétations géophysiques finales seront terminées et comparées à la diagrapie de sondage.

L'étude SSI suivante a été réalisée :

- un sondage entièrement carotté d'une profondeur de 70 m ;
- deux lignes de réfraction sismique d'une longueur totale de 780 m, la première réalisée à l'aide d'une source explosive et la seconde à l'aide d'une source de chute de poids ;
- une réflexion sismique à très haute résolution d'une longueur de 770 m.

Les emplacements des investigations souterraines (SSI) sont indiqués sur la Fig. 1.46.

Pour l'illustration, voir le texte en anglais.

Fig. 1.46 : Section des Usses montrant les emplacements des investigations.

Vuache

La section du Vuache, située à l'extrémité sud-ouest du tunnel du FCC proposé, s'étend sur environ 4 km, avec des profondeurs de tunnel allant de 190 à 300 m et une profondeur moyenne d'environ 250 m. La chaîne de montagnes du Vuache, structure essentiellement anticlinale délimitée par des failles de chevauchement de terrains, sous-tend cette section, avec la faille proéminente du Vuache située sur son versant sud-ouest. La géologie est dominée par les calcaires et les marnes du Jurassique et du Crétacé, recouverts par la molasse que l'on trouve habituellement ailleurs dans le bassin genevois.

Des investigations géophysiques réalisées dans le cadre des SSI ont permis de mieux comprendre les conditions du sous-sol. La réalisation d'un sondage a confirmé la présence de molasse à 30 m environ

sous le tunnel. L'analyse en cours des données géophysiques, ainsi que les résultats de sondages supplémentaires, permettront d'identifier si c'est également le cas pour le reste de la section.

L'étude SSI suivante a été réalisée ou est en cours de réalisation :

- cinq sondages destructifs et partiellement carottés d'une profondeur totale de 1270 m :
 - deux d'entre eux seront facultatifs, en fonction des conclusions géophysiques ;
- cinq lignes de réflexion sismique à haute résolution d'une longueur totale de 9370 m.

Les emplacements des investigations souterraines (SSI) sont indiqués sur la Fig. 1.49.

Rhône

Dans la vallée du Rhône, le tunnel du FCC proposé est situé à environ 50 mètres de profondeur, au-dessous du Rhône et du Marais de l'Étournal, qui est sensible sur le plan environnemental. Les sols sous-jacents sont principalement composés de sables, de graviers et de blocs morainiques ou alluviaux. Cette zone a été autrefois exploitée comme source de gravier. Ces couches sont saturées en raison de l'influence du Rhône.

Pour l'illustration, voir le texte en anglais.

Fig. 1.47 : Section du Vuache montrant les emplacements des investigations.

Le modèle géologique actuel prévoit que le tunnel est entièrement situé dans la molasse, bien que l'on estime que l'interface entre la molasse et la moraine qui la recouvre n'est pas loin. Bien que le peu de données disponibles aient permis cette première interprétation, la rareté des informations géotechniques détaillées en limite la précision.

Par conséquent, des études complémentaires sont nécessaires pour définir avec précision l'interface moraine-molasse et confirmer que le tunnel du FCC proposé reste entièrement dans la molasse, atténuant ainsi les risques potentiels associés aux couches aquifères supérieures.

L'étude SSI pourrait débuter à la mi-2025 et se terminer à la fin de l'année 2025 :

- six sondages destructifs et partiellement carottés d'une profondeur totale de 765 m :
 - quatre de ces sondages peuvent ne pas être nécessaires en fonction des résultats de la géophysique ;
- onze lignes sismiques géophysiques ;
 - quatre profils de réflexion sismique à haute résolution d'une longueur totale de 4920 m vers la partie supérieure de la vallée ;
 - quatre profils de réflexion sismique à très haute résolution d'une longueur totale de 2990 m vers le fond de la vallée ;
 - quatre profils de réfraction sismique au fond de la vallée, réalisés à l'aide d'une source de chute de poids, d'une longueur totale de 240 m ;
- cinq lignes de réflexion sismique à haute résolution d'une longueur totale de 9370 m.

Les emplacements des investigations souterraines (SSI) sont indiqués sur la Fig. 1.48.

Pour l'illustration, voir le texte en anglais.

Fig. 1.48 : Section du Rhône montrant l'emplacement des investigations.

1.4.4. Phase 2 de l'étude des sites souterrains

Après l'achèvement de la première phase des investigations souterraines (SSI) à la fin 2025, un spécialiste en géotechnique et en génie civil pourrait être engagé au début 2026, sous réserve du processus décisionnel, pour analyser les résultats de la campagne et le modèle géologique correspondant. En collaboration avec le CERN, ce spécialiste définira l'étendue et les spécifications techniques de la deuxième phase des investigations souterraines et supervisera les opérations sur site.

Cette deuxième phase se concentrera principalement sur l'acquisition des données géotechniques nécessaires à la conception détaillée de tous les travaux souterrains et en surface à entreprendre. En particulier, elle portera sur les sites nécessitant des cavernes d'expérimentation et de service, car ces structures nécessitent une connaissance très détaillée de la lithologie et des propriétés géomécaniques des roches pour réaliser les analyses numériques complexes indispensables à la définition des soutènements rocheux garantissant des structures souterraines stables.

Investigations détaillées autour des infrastructures clés

Des données géologiques, géotechniques et hydrogéologiques précises sont essentielles pour la conception efficace des cavernes d'expérimentation et de service, qui se situent généralement à plusieurs centaines de mètres de profondeur. Ces informations garantissent l'intégrité structurale et soutiennent le choix de méthodologies de construction appropriées. Un exemple indicatif d'une configuration de forage type peut être observé à la Figure 1.49.

Ces sondages permettront de caractériser avec précision la molasse à la profondeur de la caverne, en identifiant les caractéristiques structurales telles que les fractures et les zones de faiblesse qui pourraient affecter la stabilité de la caverne. Des carottes et des essais in situ détermineront la résistance, la déformabilité et l'état de contrainte de la molasse, ce qui permettra de réaliser des analyses structurales précises et de concevoir des systèmes d'excavation et de soutènement appropriés. En outre, les données sur les niveaux des eaux souterraines, la perméabilité et les pressions interstitielles permettront d'élaborer des plans d'assèchement et de gérer les infiltrations d'eau, facteurs essentiels pour garantir la sécurité et la stabilité pendant et après la construction. Par conséquent, les données de sondage de cette campagne seront essentielles pour optimiser les méthodes d'excavation, réduire les risques et estimer les coûts de construction avec précision.

Pour l'illustration, voir le texte en anglais.

Fig. 1.49 : Exemple d'investigations par sondages ciblés pour les complexes de cavernes.

1.4.5. Cartographie des failles et modélisation sismique

La zone géographique examinée pour le FCC est connue pour contenir des failles actives ou potentiellement actives, notamment la faille du Vuache. Les événements sismiques historiques ont fourni des informations précieuses sur le comportement sismique de la région.

Bien que l'étude détaillée de l'activité sismique et des failles structurales n'ait pas été l'objectif principal de la première phase de l'étude SSI, le CERN, en collaboration avec l'Université de Genève, a utilisé des données historiques pour identifier les principales zones de faille dans la région, comme le montre la Figure 1.50.

Il est prévu que le tunnel du FCC proposé traverse une zone de failles, comme l'illustre la Figure 1.51. Dans des zones telles que les sections de la Mandallaz et du Jura, où la présence de failles est avérée, il sera possible d'affiner la caractérisation des failles une fois que les résultats entièrement traités de la première phase de la campagne SSI seront disponibles. Cela continuera à être développé en collaboration avec des partenaires externes au cours des prochaines années.

Pour l'illustration, voir le texte en anglais.

Fig. 1.50 : Carte des failles de la zone d'étude du FCC.

1.4.6. Résumé de l'étude des sites souterrains

L'étude des sites souterrains qui a déjà été réalisée dans le cadre de la phase 1 a permis d'améliorer la fiabilité du modèle géologique 3D pour le tunnel du FCC proposé. Les résultats préliminaires des investigations menées dans les sections clés de la Mandallaz, des Usses, du Vuache et de l'Arve ont été intégrés dans le modèle et les premiers résultats montrent des signes prometteurs selon lesquels le tunnel du FCC pourrait être situé dans la molasse, sauf dans la section de la Mandallaz où il est inévitable de traverser la roche calcaire.

Les résultats du reste de la campagne devront être entièrement recueillis et analysés avant de pouvoir tirer des conclusions définitives sur l'altitude précise du tunnel. Toutefois, les indications actuelles montrent que le tunnel pourrait être moins profond que prévu initialement. Cela permettrait de réduire globalement la profondeur des puits, en diminuant ainsi l'impact avec, par conséquent, des implications positives sur les coûts et le calendrier.

Pour l'illustration, voir le texte en anglais.

Fig. 1.51 : Profil en long du FCC avec des défauts potentiels.

1.5. Gestion des matériaux excavés

1.5.1. Introduction

La construction des infrastructures souterraines du futur collisionneur circulaire (FCC) dans le bassin franco-genevois pourrait produire environ 6,3 millions de mètres cubes de matériaux excavés, principalement constitués de molasse, qui est une roche hétérogène tendre (96 %).

La gestion des matériaux excavés constitue un élément clé dans la réalisation du FCC au sein de la région locale. De plus, cela illustre un investissement visionnaire conçu pour réduire l'impact environnemental et offrir des avantages qui dépassent largement le cadre local. En conséquence, dès les premières étapes, une stratégie de gestion des matériaux excavés a été intégrée à l'étude de faisabilité dans le cadre du projet FCCIS, cofinancé par l'Union européenne dans le cadre du programme H2020 (accord de subvention n° 951754).

Le Centre d'études des tunnels (CETU), le Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (CEREMA) et la Montanuniversität Leoben (Autriche) ont collaboré à l'étude du FCC sur ce sujet, avec le soutien technique du Service de géologie, sols et déchets (GESDEC) de Genève.

Les réglementations actuelles considèrent toujours les matériaux excavés comme des déchets dès qu'ils sortent des limites du projet, mais la législation évolue dans de nombreux pays européens. Les matériaux excavés peuvent être réutilisés sur place (prévention de la production de déchets) ou récupérés hors site. L'élimination définitive en tant que déchet doit être la dernière option lorsqu'aucune valorisation raisonnable n'est possible (même après une préparation ou un traitement adéquat). Le succès de la gestion et de l'utilisation des matériaux excavés dépend fortement de la mise en œuvre précoce d'une stratégie de gestion partagée et approuvée avec les États hôtes par le maître d'ouvrage.

La présentation d'un plan de gestion des matériaux excavés est considérée comme relevant de la responsabilité du futur maître d'ouvrage, indépendamment de la personne qui réalise les tâches proprement dites. Pour répondre à cette exigence, un rapport décrivant la « stratégie de gestion et d'usage des matériaux excavés » [1] a été élaboré. Les aspects suivants sont abordés :

- Quantités de matériaux excavés et connaissances actuelles des caractéristiques géologiques ;
- Principes généraux de la gestion des matériaux excavés ;
- Identification des risques potentiels ;
- Cadre juridique dans les deux États hôtes ;
- Cas de réutilisation potentiels.

1.5.2. Les quantités de matériaux excavés

Les travaux d'excavation pour le FCC devraient générer environ 6,3 millions de mètres cubes de matériaux excavés, soit environ 8,2 millions de mètres cubes de matériaux sur près d'une décennie, compte tenu du foisonnement. Les quantités de matériaux excavés (voir Tableau 1.4) ont été calculées sur la base du plan des structures souterraines (puits, tunnels, cavernes, alcôves, etc.). Elles correspondent aux matériaux en place et aux matériaux foisonnés (en appliquant un facteur de foisonnement de 1,3).

1.5.3. Les caractéristiques des matériaux excavés

Le matériau extrait comprendra principalement différents types de roches tendres hétérogènes, appelées molasse (96 %), ainsi que du calcaire (2,5 %) et des dépôts quaternaires (1,5 %).

La molasse est formée d'une série de couches horizontales de grès cimentés et silteux, entrecoupées de couches de marnes et de roches argileuses. Des anomalies géogéniques telles que la présence d'hydrocarbures naturels ou une concentration accrue de métaux, notamment de nickel et de chrome, peuvent exister naturellement en quantités variables dans certaines parties des différentes couches de molasse.

Le bassin lémanique présente trois groupes géologiques principaux : les formations quaternaires (glacio-lacustres, fluvio-glaciaires et morainiques), la molasse et le substrat calcaire. L'emplacement de référence proposé pour le FCC a été optimisé pour placer l'infrastructure du tunnel dans le bassin molassique franco-genevois (Fig. 1.52). Les éléments calcaires du Jura et du Vuache, ainsi que les chaînes de la Mandallaz et du Salève, longent et recoupent les couches de molasse. Il est difficile d'extraire le calcaire dans la région en raison de ses caractéristiques karstiques dues à l'altération chimique de la roche. Ces karsts profonds sont probablement remplis d'eau et de matériaux non consolidés qui pourraient pénétrer dans l'excavation en raison de la forte pression de l'eau. Le CERN a expérimenté ces effets lors d'excavations pratiquées dans le calcaire de la région genevoise dans le cadre de projets antérieurs (par exemple, le LEP dans les années 80). En raison de ces difficultés, la conception du projet évite délibérément le Jura et les calcaires du Vuache. Cependant, malgré tous les efforts déployés pour réduire dans toute la mesure du possible le franchissement des strates calcaires, un segment du tunnel proposé traverse encore le calcaire de la Mandallaz.

Pour l'illustration, voir le texte en anglais.

Fig. 1.52 : Profil géologique le long du tracé du FCC. La partie du tunnel située sous le territoire français est représentée en bleu ; la partie située sous le territoire suisse est représentée en rouge.

La molasse de la région a généralement la composition suivante :

- 30 à 50 % d'argile ;
- 10 à 15 % de limon ;
- 10 à 15 % de sable, avec une granulométrie comprise entre 63 µm et 4 mm ;
- 15 à 20 % de particules de grès supérieures à 4 mm.

Les grès (roches sédimentaires détritiques formées de grains de sable cimentés par de la silice, de la calcite et de l'oxyde de fer) de la région lémanique sont principalement constitués de :

- 40 à 70 % de quartz ;
- 20 à 45 % de calcite ;
- 5 à 10 % de feldspath ;
- 5 à 20 % de phyllosilicates (micas, chlorites, serpentinite, etc.).

Les marnes (roches sédimentaires contenant de l'argile et du calcaire) présentes dans la région présentent une grande variété de compositions. Les marnes sont ductiles, microfissurées et sujettes à un gonflement au contact de l'air ou par suite de changements importants de l'humidité du sol.

La nature des matériaux excavés dépend du profil longitudinal des structures géologiques rencontrées. Différentes formations et différents faciès peuvent être rencontrés. L'homogénéité en termes de nature et de propriétés des matériaux excavés est un facteur clé, car elle déterminera leur utilisation future.

Une stratégie devra être élaborée pendant la phase de construction pour sélectionner les matériaux à réutiliser, sur la base des éléments suivants :

- Sélection visuelle initiale sur le front de taille ;
- Essais pratiqués sur les formations géologiques et mises à jour en cas de changements de propriétés pétrographiques ou d'indications de changements lithologiques ;
- Contrôle rapide et efficace de la qualité des matériaux dès que possible après l'extraction des matériaux, ou au plus tard lorsque les matériaux atteignent la surface.

Des études spécifiques seront nécessaires avant le début de l'excavation afin de déterminer les caractéristiques géologiques du sous-sol traversé par le FCC et d'évaluer les risques géologiques potentiels. Le CERN mène une première campagne d'investigation (2024 - 2025) dans le cadre des études de faisabilité du FCC. Ces premières investigations souterraines pourraient être complétées ultérieurement par des investigations souterraines approfondies, pour confirmer le modèle géologique et donc anticiper les risques éventuels et préparer des mesures d'atténuation adéquates. Des essais en laboratoire sont en cours sur les carottes extraites lors des investigations souterraines pour identifier et caractériser les roches en vue de déterminer leur potentiel de réutilisation et pour analyser la présence éventuelle d'anomalies géogéniques.

1.5.4. Approche de gestion des matériaux excavés et des risques associés

La définition de ce qui pourrait constituer la base d'une stratégie future de gestion et d'utilisation des matériaux excavés est un critère de faisabilité essentiel pour l'étude du FCC, reflétant à la fois l'alignement sur les réglementations des États hôtes et un engagement plus large en faveur de la durabilité et de la gestion de la protection de l'environnement. Le concept de base a été documenté dans un livrable spécifique de l'étude FCCIS [1]. Les grands principes, résumés dans cette stratégie, présentent les aspects de haut niveau, les contraintes associées et les possibilités identifiées pour traiter les matériaux comme une ressource au lieu de les éliminer comme un déchet.

L'approche de la gestion des matériaux excavés marque le premier pas vers une approche globale, menée conformément aux cadres réglementaires des deux États hôtes. Sa mise en œuvre, sous la forme d'un plan préliminaire de gestion opérationnelle, ne pourra commencer qu'après finalisation du premier lot d'investigations souterraines (fin 2025). Par la suite, ce plan préliminaire devra être révisé chaque fois que des informations substantielles seront recueillies, dans le cadre d'un processus itératif visant à définir un plan de gestion opérationnel final à partager et à convenir entre les États hôtes et qui devra être adopté avant le début de l'excavation.

Approche stratégique de la gestion des matériaux excavés

Les études réalisées pour développer une approche stratégique de la gestion des matériaux excavés ont été les suivantes :

- Développement itératif d'un modèle géologique de subsurface en 3D (voir Section 1.4.2) ;
- Inventaire des opportunités régionales de réutilisation en France et en Suisse ; – Examen de la possibilité de raccordement au réseau ferroviaire régional ;

- Examen de la possibilité de relier les embranchements ferroviaires aux sites d'extraction par des bandes transporteuses, afin d'éviter les nuisances locales dues au transport par camion.

Le projet FCC permet d'optimiser les possibilités de réutilisation potentielle. Ainsi, plutôt que de se concentrer sur des solutions fixes, la gestion des matériaux excavés met l'accent sur des approches flexibles et des principes directeurs qui peuvent être adaptés pour accueillir :

- les évolutions technologiques susceptibles d'améliorer les techniques appliquées à l'excavation, à la séparation et au traitement des matériaux excavés ;
- de nouvelles solutions de valorisation mieux adaptées aux caractéristiques des matériaux extraits et qui pourraient être disponibles à l'avenir ;
- l'évolution des réglementations régissant la gestion des matériaux excavés pour des applications spécifiques (par exemple, l'utilisation en tant qu'amendement des sols dans le domaine de l'agriculture).

Les principaux paramètres à prendre en considération lors de l'élaboration d'une stratégie de gestion des matériaux excavés sont les suivants :

- la cinématique du tunnelier (Fig. 1.4) et les aspects logistiques, qui déterminent le rendement et la disponibilité des matériaux excavés dans la zone, ainsi que les zones de stockage et de traitement nécessaires à proximité ;
- utilisations et flux identifiés : spécifications, demande (quantités et variation dans le temps), localisation, accessibilité et service, critères d'acceptation des matériaux ;
- les modes de transport et les distances, ainsi que la possibilité d'utiliser les infrastructures existantes ou la nécessité d'en construire de nouvelles.

Un aperçu schématique de l'approche de la gestion des matériaux excavés est illustré à la Fig. 1.53. L'expérience acquise lors des projets précédents du CERN montre que la proportion de matériaux affectés par des anomalies géogéniques (telles que des hydrocarbures ou des niveaux élevés de chrome et de nickel) peut varier, allant d'environ 15 % à 45 %, en partie en raison des différents seuils réglementaires différents entre les États hôtes. À titre d'exemple, des exemptions ont été accordées pour des matériaux spécifiques, notamment en 2019, pendant le projet HL-LHC, afin de faciliter des taux de récupération plus élevés dans divers circuits de valorisation.

Évaluation des risques dans la gestion des matériaux excavés

La fraction de matériaux excavés réutilisables dépend des propriétés géochimiques, minéralogiques et géotechniques des matériaux excavés du tunnel. Lors de l'élaboration d'un plan de gestion de ces matériaux, une attention particulière doit être accordée à la gestion des risques techniques et non techniques, qui ont un effet direct sur la limitation des coûts, l'optimisation du transport et les conditions évitant de compromettre le calendrier de réalisation. Les risques techniques types liés au contexte externe des matériaux excavés sont associés aux éléments suivants :

- La nature des matériaux, qui détermine leur classification en tant que type de matériau spécifique et leur réutilisation potentielle ;
- La proportion de faciès, dans le cas d'une formation hétérogène ou d'un faciès mixte avec plusieurs types de matériaux ;
- La position des contacts entre les formations géologiques, qui a un impact sur la répartition du volume de matériaux par formation.

Les risques techniques du contexte interne, considérés comme des points à garder à l'esprit par le maître d'ouvrage, sont associés :

- à l'impact des méthodes d'excavation, choisies d'après les caractéristiques des matériaux excavés et notamment des additifs nécessaires à l'excavation, qui peuvent potentiellement polluer les matériaux et gêner certains cas de réutilisation ;
- à l'équipement utilisé pour le transport et le traitement des matériaux excavés, pour le risque de mélange imprévu et de pollution éventuelle des matériaux excavés ;
- à la disponibilité et à l'étendue des zones de stockage temporaire et définitif des matériaux excavés.

Pour l'illustration, voir le texte en anglais.

Fig. 1.53 : Schéma des scénarios définis pour la stratégie relative aux matériaux excavés. (hors transport).

Outre les risques techniques, les difficultés non techniques, telles que les facteurs politiques ou administratifs, doivent également être prises en compte dans le plan de développement. Par exemple, des modifications des réglementations environnementales peuvent survenir. Ces difficultés non techniques doivent être envisagées dès la phase d'étude.

Les méthodes d'excavation peuvent avoir un impact sur l'utilisation potentielle de la molasse et des autres matériaux excavés, car elles peuvent modifier leurs propriétés et leur qualité. À ce stade de l'étude du FCC, l'utilisation de tunneliers à double bouclier est probablement possible pour la majeure partie du tunnel principal. Des études complémentaires devraient fournir plus de détails sur les informations fournies dans le Tableau 1.7 en précisant l'impact des techniques d'excavation choisies sur la qualité des matériaux excavés (type de tunnelier, d'explosifs ou de haveuse).

1.5.5. Cadres réglementaires

En France, la recommandation GT35R1F2 de l'AFTES sur la gestion et l'emploi des matériaux excavés [3] et le document d'information du CETU sur les matériaux géologiques naturels excavés en travaux souterrains [4] sont les principaux textes de référence pour la gestion des matériaux excavés.

En Suisse, l'ordonnance sur la limitation et l'élimination des déchets (OLED) [5], complétée par l'ordonnance sur les mouvements de déchets (OMoD) [6], l'aide à l'exécution relative à l'OLED et le guide pour la réutilisation des matériaux d'excavation non pollués (Office cantonal de l'environnement (OCEV)), fournissent le cadre pour les étapes suivantes.

Les principales réglementations en vigueur dans les deux États hôtes concernant l'application des accords internationaux sur l'exportation de matériaux excavés sont les suivantes :

- En Suisse, l'article 15, paragraphe 1 de l'ordonnance OMoD 814.610 exige que toute personne exportant des déchets (y compris des matériaux excavés non pollués) obtienne une autorisation de l'Office fédéral de l'environnement (OMoD 814.610, 2005).
- En France, depuis le 12 juillet 2007, les mouvements transfrontaliers de déchets sont soumis aux dispositions du règlement (CE) n° 1013/2006 du 14 juin 2006, qui reprend les dispositions de la convention de Bâle [7] :
- L'article 43 autorise l'importation de déchets à des fins de valorisation en provenance de pays parties à la convention de Bâle vers un pays européen.
- Les articles 40 et 41 interdisent l'importation de déchets à des fins d'élimination en provenance de pays parties à la convention de Bâle, sauf si l'un de ces pays (y compris la Suisse) présente une demande préalable dûment motivée (paragraphe 4).

L'article 4.2 de la convention de Bâle [7] précise que chaque pays doit prendre des mesures pour réduire la production de déchets et assurer la disponibilité d'installations d'élimination adéquates

situées, si possible, à l'intérieur du pays, en vue d'une gestion écologiquement rationnelle des déchets dangereux et des autres déchets, quel que soit le lieu de leur élimination.

Dans le secteur nord-ouest du FCC, son tracé traverse la frontière franco-suisse en plusieurs points. Si les matériaux excavés devaient être gérés par chaque État, cela conduirait à l'excavation de puits supplémentaires dans le but spécifique d'évacuer les matériaux, ce qui n'est pas réaliste et ne respecte pas l'approche « éviter, réduire et compenser » car cela augmenterait la quantité de matériaux à gérer et le nombre de zones de nuisance en surface dues aux points d'extraction. C'est pourquoi il serait souhaitable de proposer l'adoption du principe d'une gestion par chaque État de la masse équivalente de déblais excavés sur son territoire. Cet ajustement, qui reste à convenir entre les deux États hôtes et en association avec le CERN, permettrait de traiter les petites enclaves qui ne peuvent être gérées par les tunneliers sans modifier le principe de division posé par la convention de Bâle.

Un autre point pour lequel un accord entre le maître d'ouvrage et les États hôtes semble approprié concerne le pays dans lequel les matériaux sont extraits. En principe, selon la convention de Bâle, chaque pays est responsable de l'extraction et de la gestion de sa part de la masse sur son territoire et de la gestion des effets négatifs associés (poussière, bruit, trafic, etc.). La répartition des tunneliers ne correspond pas nécessairement à cette répartition de masse (par exemple, aucun tunnelier n'est lancé depuis le site PB) pour des raisons techniques. Dans un tel scénario, des mesures compensatoires devront être convenues et approuvées entre et par les États hôtes.

Tableau 1.7 : Quantité de matériaux excavés par méthode d'excavation.

	Using TBMs	Using conventional method	Shafts	Total
Collider infrastructure (m ³ , in situ)	2 689 500	2 828 500	652 600	6 170 600
Connecting infrastructure to existing tunnels (injection) (m ³ , in situ)	97 900	9800	14 600	122 300
Total (m ³ , in situ)	2 787 400	2 838 300	667 200	6 292 900
Percentage of Total	44%	45%	11%	100%

Différents outils devront être développés pour s'assurer que la gestion des matériaux respecte le plan de gestion établi et convenu, qui fait partie des dossiers d'autorisation du projet. Ces outils devront être élaborés suffisamment tôt, en consultation avec les États hôtes et les autorités compétentes, pour être correctement mis en œuvre le moment venu :

- Outils administratifs pour les procédures d'autorisation de transport et de stockage des déblais afin de permettre la récupération efficace des matériaux ;
- Des outils réglementaires permettant de valider les procédés innovants, notamment en termes de caractérisation, et d'assurer leur standardisation.
- Accords transfrontaliers : si des optimisations pertinentes sont identifiées, elles devront être explicitées, justifiées et soumises à l'approbation conjointe des deux États hôtes ;
- Des accords avec les preneurs de matériaux et les propriétaires des parcelles de terrain qui recevront les matériaux avant le début du processus d'excavation ;
- Outils logistiques : un système de traçabilité adéquat relève de la responsabilité du propriétaire et constitue un moyen utile d'améliorer la récupération des matériaux et de garantir que les déblais sont d'une qualité suffisante.

Les trois premiers points pourraient être régis par un accord international bilatéral.

Les matériaux excavés lors de travaux souterrains sont considérés comme des « déchets » dans les pays de l'Union européenne (UE) et en Suisse, à moins qu'ils ne puissent être réutilisés sur le site du projet. La définition du statut des sols excavés et leur classification en tant que « déchets » ou « non-déchets » sont des aspects fondamentaux qui conditionnent le cadre juridique auquel se conformer pour la gestion des matériaux excavés. Le statut des sols excavés doit être précisé en fonction des différents scénarios de gestion sur site et hors site avec les autorités françaises et suisses.

Afin de développer un plan intégré pour la gestion des matériaux excavés, faisant partie du processus d'autorisation, il serait souhaitable que le FCC soit traité comme un projet unique, indivisible et transnational au sens du point 1.c) de l'article 2 de la directive « déchets » 2008/98/CE du 19 novembre 2008 [8]. Cette approche intégrée facilite la mise en place des accords entre les maîtres d'ouvrage du projet et les clients pour les matériaux, lesquels devront être conclus avant le démarrage des travaux de construction. Elle permet également la réutilisation des matériaux de part et d'autre de la frontière, indépendamment de leur site d'extraction dans le cadre de ce projet unique et indivisible.

1.5.6. Scénarios envisagés pour la gestion des matériaux excavés

En tant que projet à long terme offrant un délai de préparation suffisant, le FCC pourrait représenter une opportunité de développer des approches innovantes pour la gestion des matériaux excavés. Pour cette raison, l'étude a déjà investi dans le lancement de recherches et de développements de nouvelles technologies et solutions ayant le potentiel de réduire la quantité de déchets devant être transportés vers des sites de dépôt.

L'identification des usages doit respecter la hiérarchie des déchets avancée par le Parlement européen (Directive « Déchets » 2008/98/CE, transposée dans les réglementations française et suisse). La politique nationale de prévention de la production de déchets et de réduction de leur impact, décrite dans le Code de l'environnement (Art. L-541-1), soutient la transition vers une gestion plus durable des matériaux excavés, en encourageant l'application de la hiérarchie des déchets : éviter la production de déchets (y compris leur réutilisation), assurer la préparation en vue de la réutilisation, la valorisation et l'élimination. Il s'agit également d'atteindre un taux global de valorisation de 70 % des « matériaux » des déchets issus du secteur du bâtiment et des travaux publics. Cet objectif est évalué au niveau régional.

Le principe général « éviter/réduire/compenser » sera également appliqué à la gestion des matériaux excavés du FCC : les principes d'« éviter » et de « réduire » sont appliqués principalement au moment de la planification de l'infrastructure souterraine (en évitant de produire des déblais inutiles et en réduisant les excavations globales grâce à l'optimisation de l'emplacement, de la conception et de la profondeur des infrastructures souterraines) et lors du choix des méthodes d'excavation (réduction des polluants à un minimum pendant l'excavation, réduisant ainsi les quantités de matériaux excavés qui auront besoin d'une mise en décharge spécifique).

Les différents types de réutilisation et de valorisation nécessitent des zones de stockage et de traitement des matériaux à proximité des sites d'extraction. Les surfaces nécessaires dépendent du concept technique détaillé des travaux de construction, du calendrier de construction et de la conception dimensionnelle de l'unité de traitement sur les sites. Ces éléments devront être développés ultérieurement.

Parmi les filières identifiées, les plus susceptibles d'être réalisées sont les suivantes :

- Utilisation pour des besoins de développement dans le cadre du projet (par exemple, pistes de chantier du FCC, aménagement paysager, etc.) ;
- Utilisation dans les travaux de terrassement (remblayage de carrières et de mines, et renaturation) et les projets de développement.

Ce cas de réutilisation concerne la plupart des matériaux, car il peut être appliqué à la fois aux matériaux inertes et aux matériaux excavés pollués, après une décontamination appropriée. Chaque carrière étant soumise à des restrictions spécifiques en matière d'impact sur l'environnement, des critères d'acceptation spécifiques pour les matériaux de remblai doivent être respectés. Au total, on estime que tous les matériaux qui ne seront pas mis en décharge en raison de leur pollution pourront en principe être réutilisés pour l'aménagement paysager de la carrière, après traitement. Toutefois, afin de ne pas saturer la région, d'autres cas de réutilisation seront étudiés en même temps ;

- Utilisation de la fraction calcaire dans la production de béton et la stabilisation des structures. Les gisements de calcaire, de marne et d'argile du Jura et des Alpes du Nord fournissent depuis l'Antiquité la matière première pour la fabrication de la chaux et du ciment. Issue de la calcination du calcaire, la chaux est utilisée pour améliorer les sols et badigeonner les murs. Mélangée à du sable et de l'eau, elle donne un mortier très facile à fabriquer et donc très courant. Tout le calcaire qui sera extrait pendant le projet de construction du FCC sera destiné à ces cas de réutilisation. En raison des coûts de production de ces matériaux de construction obtenus, on suppose que la réutilisation du calcaire est à gain et coût nuls pour le projet ;

- Utilisation de la fraction de sable dans la production de béton. La réutilisation directe du sable et du gravier pourrait être envisagée, éventuellement après un traitement de tamisage et/ou de lavage des matériaux excavés. L'utilisation de cyclones pour le lavage des matériaux excavés est une méthode de traitement bien établie, qui permet la séparation de l'argile et des autres matériaux, ainsi que l'obtention de matériaux de bonne qualité. L'étude de l'efficacité de cette méthode de séparation reste à faire ;

- Transformation de la molasse en terre fertile pour des applications d'aménagement de friches industrielles, de zones de loisirs urbaines et de zones forestières, ainsi que pour l'amélioration de la fertilité des terres acidifiées et/ou comme zones techniques le long des accotements des routes et autoroutes (filtration des polluants). L'utilisation de matériaux excavés transformés en sols reconstitués nécessite l'identification de zones de remblai dans les zones agricoles. Les emplacements souhaités sont les creux, les pentes, les zones de mauvaise qualité telles que les sols pollués ou acides, ou les zones de mauvaise qualité agronomique (par exemple, faible potentiel de rétention d'eau). L'application peut être différente selon le type de terrain et la topographie. Ce type de mesure peut être particulièrement adapté à certaines zones rurales de la région Auvergne-Rhône-Alpes et de plusieurs cantons de Suisse. Elle permet également d'effectuer des dépôts à proximité des sites de forage. En

raison de la topographie inconnue des zones choisies, il est actuellement difficile d'identifier l'emplacement et la superficie totale. On estime qu'environ 2 millions de mètres cubes (environ 4 millions de tonnes) de matériaux excavés pourraient être réutilisés de cette manière, à condition que les zones appropriées soient identifiées ;

- Utilisation d'une partie des molasses comme matériaux techniques : couverture de tranchées (routes, par exemple), écrans anti-bruit, chemins de ferme, sentiers forestiers, etc. Les paysages voisins français et suisses sont constitués de forêts de natures différentes ou de zones rurales. En particulier, la zone située à proximité d'Annecy compte environ 500 km de chemins et sentiers ruraux. Au total, la France compte environ 705000 km de chemins ruraux et forestiers. Ces chemins et sentiers doivent être entretenus régulièrement. Pour cela, des matériaux inertes sont nécessaires pour assurer leur stabilité. La molasse brute convient également à la mise en place de bandes dépourvues de végétation à proximité des routes.

Grâce à l'installation de gabions qui réduisent le bruit et protègent la vie privée, ce scénario peut générer des économies significatives dans l'aménagement et l'entretien des voies publiques. Le soutien des autorités compétentes est nécessaire pour identifier les routes et les emplacements adaptés près des sites d'extraction, établir les certifications et accorder les permis nécessaires pour ce type d'application. Une autre application dans l'aménagement des routes consiste à utiliser un sol reconstitué à base de molasse pour paysager les tranchées des rues couvertes ou des autoroutes.

- Réalisation d'éléments de construction par compression (briques ou terre comprimée à l'aide d'une technologie de type « sandwich ») pour une utilisation dans le cadre du projet, si possible, ou en dehors du projet (les possibilités dans la région doivent être étudiées) ;

- Développement de nouveaux matériaux de construction contenant une partie de la molasse (par exemple, composants de béton projeté, matériaux de support, panneaux isolants pour les bâtiments de surface), à utiliser dans le cadre du projet lorsque cela est techniquement possible ou en dehors du projet (possibilités dans la région à étudier). La littérature montre que la réutilisation des matériaux excavés comme granulats de béton recyclé (GBR) dans le béton structural du tunnel ou du radier du tunnel pourrait s'avérer non faisable sans études approfondies, en raison d'une diminution de la résistance. Par conséquent, des études approfondies supplémentaires sont nécessaires. Une approche prudente, jusqu'à ce que des études plus complètes soient réalisées, pourrait consister à utiliser les GBR dans le béton projeté avec des fibres de renforcement uniquement pour les parties non structurales.

Certaines de ces filières sont répertoriées dans les guides de gestion des matériaux excavés utilisés en France, par exemple ceux du Cerema/UMTM (publication en attente) et du Ministère de la transition écologique et solidaire [9], et en Suisse par l'OCEV [10], ainsi que dans la recommandation AFTES GT35R1F2 [3] (actuellement en révision). Les autres filières doivent encore être identifiées et un cadre pour une utilisation transfrontalière pourrait être proposé aux autorités respectives des deux États hôtes.

Les quatre premiers cas de la liste correspondent à des cas de réutilisation traditionnels déjà mis en œuvre dans d'autres projets de construction de tunnels. Ces cas sont pris en considération et seront appliqués en priorité lorsque les caractéristiques géomécaniques, minéralogiques et chimiques du matériau se prêtent à ces applications.

Outre ces cas de réutilisation traditionnels, des filières de réutilisation innovantes ont été identifiées lors de l'appel à projets international « Mining the Future® », qui s'est déroulé en 2021 et 2022. Cet appel à projets visait à identifier des filières innovantes pour la valorisation des matériaux excavés provenant de la construction de tunnels, qui pourraient être rentables non seulement pour le FCC mais aussi pour tout autre projet dans la région subalpine. L'appel à projets a été lancé dans le cadre du projet Horizon 2020 « étude sur un Futur collisionneur circulaire » (accord de subvention n° 951753) et a été organisé conjointement par le CERN et la Montanuniversität Leoben. Les candidatures ont été examinées par un jury composé d'experts internationaux. Les concepts des quatre finalistes vont de la

fabrication de substrats pour l'agriculture et la sylviculture à la production de matériaux de construction bruts tels que le béton et le béton projeté, de briques de terre comprimée et d'autres matériaux de construction à liant hydraulique. Ils doivent tous analyser et séparer les matériaux pendant le creusement du tunnel en temps réel, avec un prétraitement ultérieur sur place, directement sur les sites de surface de l'excavation. La contamination géogénique par les hydrocarbures et les métaux lourds doit être éliminée ou au moins ramenée à des niveaux compatibles avec les procédés proposés et les conditions d'utilisation finale. Le consortium dirigé par BG engineering a été sélectionné comme le concept le plus innovant et le plus complet, et a remporté le concours.

Certaines des solutions proposées sont actuellement intégrées dans un projet unique et évaluées sur le terrain, dans le cadre d'un projet destiné à atteindre sa maturité d'ici à 2030. Les objectifs des évaluations sont doubles. Premièrement, il s'agit de déterminer comment procéder à l'identification, au tri et au prétraitement en ligne des matériaux au cours du processus d'excavation. Deuxièmement, différentes filières de réutilisation doivent être préparées pour trier et prétraiter les matériaux, notamment en transformant la molasse en terre utilisable pour des applications forestières et de renaturation, conformément aux principes d'une économie circulaire. La création du sol reconstitué, dont la qualité est garantie, est un processus de longue haleine qui s'étend sur plusieurs années et qui a été choisi comme première expérience à grande échelle avec des essais sur le terrain à l'OpenSkyLab.

L'OpenSkyLab est un projet basé sur un terrain d'environ 10 000 m² situé près du point 5 du LHC (CMS, Cessy, France) et mis à disposition par le CERN. La molasse extraite lors des excavations du HL-LHC sera transportée dans ce champ pour être utilisée lors des essais. Des analyses initiales en laboratoire seront effectuées hors site afin d'identifier le mélange le plus approprié de molasse et d'autres additifs naturels (compost). Ces analyses seront suivies d'essais sur le terrain dans l'environnement contrôlé de l'OpenSkyLab (surveillance du champ, des conditions météorologiques et des conditions de croissance des plantes), à l'aide de protocoles scientifiques mis au point par une collaboration d'universités travaillant dans ce domaine.

Conformément à la longue tradition du CERN, ce projet repose sur une collaboration ouverte avec le monde universitaire et l'industrie. Actuellement, la collaboration comprend des experts universitaires et de recherche en agronomie, pédogenèse et géologie (HEPIA, BOKU, BRGM, Université Montan de Leoben) et des partenaires industriels en ingénierie des sols et phytoremédiation (Microhumus, Edaphos), en techniques de traitement des sols (WSP-BG) et en systèmes de surveillance et de contrôle (BECC).

Afin de faciliter l'acceptation des matériaux excavés dans les filières de réutilisation, il sera nécessaire de mettre en place des unités de séparation des matériaux pendant la phase de construction du tunnel, au point de départ de deux tunneliers au minimum. Ces unités pourraient combiner les opérations de criblage, de tri, de tamisage et de nettoyage des matériaux extraits.

Dans l'hypothèse d'une journée de travail de 24 heures en deux équipes et de 240 jours de travail par an, le consortium qui a remporté le concours « Mining the Future » a proposé une installation capable de traiter environ 750 000 tonnes par an au rythme de 200 tonnes par heure. Chaque installation emploierait une équipe de cinq personnes. Un projet pilote visant à tester l'efficacité de ces installations de tri et de traitement pourrait être envisagé au cours de la phase suivante.

L'hypothèse de travail suppose que les solutions énumérées précédemment représenteront une réutilisation globale d'environ 70 % de l'ensemble des matériaux excavés, parmi lesquels la filière de réutilisation des sols reconstitués pourrait représenter jusqu'à 2 millions de mètres cubes (ce qui correspond à environ 25 % du total). Le remblayage des carrières, ainsi que les filières de réutilisation plus traditionnelles (par exemple, l'utilisation directe du calcaire et du sable), devraient représenter au total environ 45 %. Ces quantités devront encore être confirmées au cours de la phase suivante.

Opportunités régionales

Le CERN a commandé une étude pour identifier les opportunités régionales disponibles en France et en Suisse pour l'évacuation des matériaux excavés. Il s'agit notamment :

- d'un inventaire des stockages définitifs et des possibilités d'aménagement paysager des carrières et mines en fin d'exploitation, mais disposant d'une autorisation préfectorale valable au-delà de 2033 ;
- d'une étude sur les embranchements ferroviaires industriels potentiels pour l'évacuation des matériaux.

Inventaire global des opportunités régionales

Cette étude a débuté par un inventaire préliminaire des opportunités régionales potentielles d'aménagement (carrières, mines) et de stockage, qui a été réalisé au début de l'étude de faisabilité (2021-2022) en France et en Suisse pour fournir des premières indications sur les sites d'accueil potentiels et les capacités d'accueil des matériaux d'excavation des différentes filières. Ces inventaires détaillés dressent la liste des installations existantes et prévues (horizon 2030) ayant une capacité suffisante pour recevoir et traiter les matériaux excavés du FCC. Ils devront être répétés une fois que le plan de gestion des matériaux excavés aura été défini, afin de tenir compte des flux définitifs d'extraction des matériaux et de la disponibilité éventuelle de nouveaux cas de réutilisation. Sous réserve d'actualisation et d'optimisation en matière de transport, ces études montrent qu'il est possible de trouver une filière pour l'ensemble des matériaux excavés dans le cadre du futur projet potentiel du FCC et fournissent une première estimation qui peut servir de base pour entamer le processus d'optimisation selon le principe « éviter, réduire, compenser ». Il convient de souligner que l'inventaire des destinataires potentiels des matériaux excavés a été réalisé dans le but d'évaluer l'enveloppe financière et d'identifier les obstacles potentiels à la faisabilité du FCC. Il n'est pas possible à ce stade d'identifier les bénéficiaires spécifiques sans s'engager dans des accords contractuels. Cette étape sera réalisée lors de l'établissement du plan final de gestion des matériaux.

Pour l'illustration, voir le texte en anglais.

Fig. 1.54 : Schéma de l'inventaire des opportunités régionales de réutilisation des matériaux (état en 2021).

Embranchements ferroviaires

L'étude a analysé l'option consistant à construire des embranchements ferroviaires industriels à proximité des sites de surface dans le but d'évacuer les matériaux excavés. Des emplacements potentiels à proximité des lignes ferroviaires existantes ont été identifiés et la faisabilité de la création d'embranchements a été examinée. Pour compléter cette étude, la faisabilité d'une liaison par bande transporteuse a été évaluée pour les deux sites jugés les plus appropriés pour l'installation d'embranchements ferroviaires : Vulbens (évacuation des matériaux du site PJ) et Charvonnex (évacuation des matériaux du site PG). Cette phase exploratoire a été complétée par une première évaluation des émissions de gaz à effet de serre liées au transport routier et/ou ferroviaire des matériaux excavés du site de production jusqu'au site d'élimination ou à l'emplacement des cas hypothétiques de réutilisation.

L'étude de faisabilité des embranchements ferroviaires n'a tenu compte que des facteurs techniques. La pondération de certains facteurs liés à l'acceptabilité de la création d'un embranchement ferroviaire (par exemple, les aspects environnementaux tels que le facteur de nuisance dans une zone densément peuplée) devra être effectuée avant la prise de toute décision.

La création ou la remise en état des accès ferroviaires, déjà considérés comme réduisant les nuisances dues au transport par camion, favoriserait encore l'utilisation des carrières et des cas de réutilisation qui ne se trouvent pas à proximité immédiate. Une étude technique pourra être menée pour analyser la possibilité d'un transport transfrontalier par bandes transporteuses de Challex (PL) vers le réseau ferroviaire de La Plaine en Suisse et de Ferney (PA) vers le réseau ferroviaire à l'aéroport de Genève, afin d'utiliser l'infrastructure ferroviaire existante pour le transport des matériaux jusqu'à leur destination finale.

1.5.7. Aperçu des études suivantes

Les scénarios de réutilisation des matériaux excavés sont basés sur des hypothèses préliminaires concernant la proportion de matériaux présentant des caractéristiques géogéniques ou anthropiques susceptibles de nécessiter une gestion spécifique. À ce stade précoce, et en l'absence d'analyses géochimiques plus détaillées, une hypothèse de travail estimant à 30 % la proportion de matériaux présentant des variations géogéniques naturelles semble la plus raisonnable.

Dans le cadre de l'étude de faisabilité du FCC, des idées supplémentaires pourront être formulées grâce à l'étude de projets récents relatifs à l'agrandissement de certaines cavernes de l'accélérateur LHC (projet HL-LHC). Les excavations souterraines réalisées dans le cadre de ce projet ont indiqué la présence d'hydrocarbures dans environ 15 % des matériaux en France et près de 50 % en Suisse. Cette différence s'explique non seulement par des variations réelles des conditions du sous-sol, mais également par des différences dans les réglementations environnementales entre les deux pays.

Pour l'illustration, voir le texte en anglais.

Fig. 1.55 : Étude des emplacements potentiels pour les embranchements ferroviaires.

Sur la base de ces premiers inventaires présentés dans la section 1.5.6, un scénario d'approche préliminaire de gestion des matériaux excavés a été élaboré et utilisé pour évaluer les coûts de transport depuis les sites d'extraction jusqu'aux installations de stockage et aux sites de remblayage. Les distances de transport moyennes sont estimées à 20 km en Suisse et 40 km en France pour les matériaux non pollués et à 100 km dans les deux pays pour les matériaux nécessitant un traitement spécifique. En effet, les sites de traitement sont généralement situés en dehors de la région du Lac Léman où le FCC sera installé.

La Figure 1.56 présente les résultats obtenus pour les matériaux non contaminés. Sur cette figure, les valeurs présentées sur fond noir désignent les quantités de matériaux qui devront être extraites par site, tandis que les couleurs des cercles correspondent aux carrières ou aux sites de remblayage désignés pour l'élimination des matériaux extrants. Il convient de noter que seules les carrières disposant d'une autorisation préfectorale valable au-delà de 2033 ont été prises en compte.

Ces scénarios devront être actualisés, car la capacité d'accueil annuelle de chaque site pourra être révisée en fonction des besoins régionaux. Les quantités extraites sont indiquées pour donner une idée de la capacité de remblayage de chaque carrière. Cependant, des études complémentaires seront nécessaires pour évaluer la faisabilité de cette opération et des accords avec les exploitants des carrières devront être établis en temps utile.

Sous réserve d'actualisation et d'optimisation en ce qui concerne le transport, ces études montrent qu'il serait possible de trouver une filière pour tous les matériaux excavés des sites potentiels du projet FCC. Elles donnent une première estimation financière qui pourra servir de base pour entamer le processus d'optimisation selon le principe « éviter, réduire, compenser ».

Pour l'illustration, voir le texte en anglais.

Fig. 1.56 : Exemple de répartition possible des matériaux excavés non pollués dans les carrières les plus proches des sites d'extraction de matériaux (les chiffres en noir correspondent à la valeur en tonnes). Les couleurs des cercles relient un site d'extraction donné à une ou plusieurs carrières ou sites de remblayage. Les chiffres en jaune représentent la quantité de matériaux pouvant être acceptée par les carrières pendant l'excavation. Les filières suisses sont représentées par un point rouge et les filières françaises par un point jaune.

La répartition des matériaux excavés devra intégrer les cas de réutilisation identifiés dès que les informations techniques sur leur faisabilité seront disponibles. Par conséquent, la répartition actuelle doit être considérée comme une évaluation préliminaire de référence, appelée à évoluer positivement à mesure que les études progressent. Une collaboration étroite entre le FCC et les autorités des États hôtes est essentielle pour affiner et mieux adapter les principes de la stratégie de gestion des matériaux excavés en adéquation avec le cadre régional.

Une phase préparatoire ultérieure du projet devrait inclure l'élaboration d'une feuille de route définie selon les points suivants :

- Confirmation des caractéristiques des matériaux excavés et corrélation avec les réutilisations potentielles grâce à l'analyse des études souterraines en cours et à venir ;
- Étude des méthodes techniques permettant une analyse en temps réel des matériaux et leur tri en fonction de leurs caractéristiques et de leur réutilisation potentielle ;
- Projets pilotes sur les cas de réutilisation potentielle : à l'exemple du projet OpenSkyLab en cours, qui vise à développer des processus pour l'utilisation des matériaux excavés dans l'aménagement paysager, d'autres projets pourraient être lancés pour tester, par exemple, une possibilité de réutilisation comme matériaux de construction ou d'isolation. Cette étude devra inclure une évaluation des impacts environnementaux, économiques et sociétaux dus à l'injection potentielle sur le marché de produits issus des matériaux excavés ;
- Définition du cadre réglementaire pour la gestion des matériaux excavés avec les États hôtes ;
- Mise à jour des opportunités régionales de traitement et d'élimination (par exemple, disponibilité des carrières, dépôts ultimes, installations de traitement) et de la réglementation associée ;
- Étude sur la logistique des matériaux excavés (traçabilité, flux, convoyeurs, etc.), y compris une évaluation des impacts environnementaux et sociétaux, ainsi que les éventuelles limitations.

Certaines activités peuvent être réalisées en parallèle, tandis que d'autres doivent suivre un processus séquentiel, conduisant à l'élaboration d'un plan préliminaire de gestion des matériaux excavés. Sur la base de ce plan, des discussions plus concrètes pourront être engagées avec les administrations des États hôtes et les propriétaires des sites potentiels de dépôt ultime et de réutilisation.

Futur collisionneur circulaire (FCC)

Rapport d'étude de faisabilité

Volume 3, chapitre 2

Implantation territoriale

Traduction française du chapitre 2, "Implantation territoriale"

La traduction de cette publication technique/scientifique a été réalisée à l'aide d'outils automatisés. Elle peut différer de la version originale en anglais à divers égards.

En cas de doute, la version anglaise fait foi.

31 mars 2025

Soumis à la revue European Physical Journal ST, publication conjointe de EDP Sciences, de Springer Science+Business Media, et de la Società Italiana di Fisica.

Note de la rédaction

L'une des recommandations de la mise à jour 2020 de la stratégie européenne pour la physique des particules était que « l'Europe et ses partenaires internationaux étudient la faisabilité technique et financière d'un futur collisionneur de hadrons au CERN avec une énergie au centre de masse d'au moins 100 TeV et avec une installation de productions d'électrons-positrons, d'interactions de Higgs et d'interactions électrofaibles dans une première étape ».

En juin 2021, le Conseil du CERN a lancé l'étude de faisabilité du FCC, qui doit être achevée d'ici 2025, à temps pour la prochaine mise à jour de la stratégie européenne pour la physique des particules. Les résultats de l'étude sont rendus publics dans le présent rapport d'étude de faisabilité du FCC, en tant que contribution au processus de mise à jour de la stratégie européenne pour la physique des particules, lancé par le Conseil du CERN en mars 2024. Les études présentées dans le présent rapport d'étude de faisabilité du FCC n'impliquent aucun engagement de la part des États membres ou membres associés du CERN en faveur de la construction du futur collisionneur circulaire.

Le présent rapport et les hypothèses qu'il contient ne préjugent pas des analyses de faisabilité territoriale qui seront menées par les États hôtes, la France et la Suisse, ni des résultats de leurs débats publics et processus de concertation respectifs, ni des décisions futures de leurs autorités compétentes.

Remerciements

Nous tenons à remercier les membres du Comité de pilotage international :

F. Gianotti (Président), CERN
R. Bello, CERN
P. Chomaz, CEA, France
M. Cobl, INFN et Université d'Udine, Italie
B. Heinemann, DESY, Allemagne
T. Koseki, KEK, Japon
M. Lamont, CERN
L. Merminia, FNAL, États-Unis
J. Mnich, CERN
M. Seidel, PSI et EPFL, Suisse
C. Warakaulle, CERN

et les membres du Comité consultatif scientifique :

A. Parker (Président), Université de Cambridge, Royaume-Uni
R. Bartolini, DESY, Allemagne
A. Chabert, SFTRF, France
H. Ehrbar, Heinz Ehrbar Partners LLC, Suisse
B. Gavela Legazpi, UAM Madrid, Espagne
G. Hiller, TU Dortmund, Allemagne
S. Krishnagopal, FNAL, États-Unis
P. Križan, Université de Ljubljana, Slovénie
P. Lebrun, ESI, France
P. McIntosh, STFC, ASTeC, UKRI, Royaume-Uni
M. Minty, BNL, États-Unis
R. Tenchini, INFN Sezione di Pisa, Italie

pour leurs conseils constants et leur révision minutieuse qui ont permis de mener à bien ce rapport.

Les recherches menées par la collaboration internationale pour le FCC, hébergée par le CERN, ont conduit à la présente publication et ont été financées par le programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne sous les numéros de subvention 951754 (FCCIS), 654305 (EuroCirCol), 764879 (EASITrain), 730871 (ARIES), 777563 (RI-Paths) et du FP7 sous le numéro 312453 (EuCARD-2).

Ce travail a également bénéficié du soutien de l'initiative CHART (Swiss Accelerator Research and Technology), fondée en 2016 en tant que collaboration faîtière pour les activités de recherche et de technologie portant sur les accélérateurs. Les partenaires actuels de CHART sont le CERN, l'Institut PSI, l'EPFL, l'ETH-Zurich et l'Université de Genève.

Avis concernant les marques : Toutes les marques commerciales figurant dans le présent rapport sont reconnues comme telles.

Le présent rapport a été édité avec le système collaboratif de rédaction et de publication Overleaf.com. La mise en page et la préparation finale de l'impression ont été réalisées avec pdfTeX 3.14159265-2.6-1.40.17.

Copyright CERN pour le bénéfice de la collaboration FCC 2024, Creative Commons Attribution 4.0

Le transfert de connaissances fait partie intégrante de la mission du CERN.

Le CERN publie ce volume en libre accès sous la licence Creative Commons Attribution 4.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) afin d'en permettre une large diffusion et utilisation. La soumission d'une contribution au serveur de documents du CERN est réputée valoir acceptation, de la part du contributeur, de la présente déclaration de droits d'auteur et de licence. Les contributeurs sont priés d'obtenir les autorisations éventuellement nécessaires à cette fin.

Le présent volume est indexé dans : Serveur de documents du CERN (CDS) :

CERN-FCC-ACC-2025-0003

DOI

10.17181/CERN.I26X.V4VF

<http://cds.cern.ch/record/2928194>

La présente édition du rapport doit être citée de la façon suivante :

Rapport d'étude de faisabilité du futur collisionneur circulaire, Volume 3 : Génie civil, implantation et durabilité, édition préliminaire publiée par M. Benedikt et al, Rapports sur les accélérateurs du CERN,

CERN-FCC-ACC-2025-0003, DOI 10.17181/CERN.I26X.V4VF, Genève, 2025. Disponible en ligne : <https://cds.cern.ch/record/2928194>

Liste des éditeurs au 31 mars 2025

M. Benedikt¹ (Chef d'étude), F. Zimmermann¹ (Chef d'étude adjoint), B. Auchmann^{1,2}, W. Bartmann¹, J.P. Burnet¹, C. Carli¹, A. Chancé³, P. Craievich², M. Giovannozzi¹, C. Grojean^{4,5}, J. Gutleber¹, K. Hanke¹, A. Henriques¹, P. Janot¹, C. Lourenço¹, M. Mangano¹, T. Otto¹, J. Poole¹, S. Rajagopalan⁶, T. Raubenheimer⁷, E. Todesco¹, L. Ulrici¹, T. Watson¹, G. Wilkinson^{1,8}.

Liste des contributeurs au 31 mars 2025

A. Abada^{9,10,11}, M. Abbrescia^{12,13}, H. Abdolmaleki^{14,15}, S.H. Abidi⁶, A. Abramov¹, C. Adam^{9,16,17}, M. Ady¹, P.R. Adzic¹⁸, I. Agapov⁴, D. Aguglia¹, I. Ahmed¹⁹, M. Aiba², G. Aielli^{20,21}, T. Akan²², N. Akchurin²³, D. Akturk²⁴, M. Al-Thakeel^{1,25,26}, G.L. Alberghi²⁵, J. Alcaraz Maestre²⁷, M. Aleksa¹, R. Aleksan³, F. Alharthi^{9,10,28}, J. Alimena⁴, A. Alimenti²⁹, S. Alioli^{30,31}, L. Alix^{1,9,16}, B.C. Allanach³², L. Allwicher⁴, A.A. Altintas³³, M. Altinli^{33,34}, M. Alviggi^{35,36}, G. Ambrosio³⁷, Y. Amhis^{9,10,11}, A. Amiri^{38,39}, G. Ammirabile⁴⁰, T. Andeen⁴¹, K.D.J. André¹, J. Andrea^{9,42,43}, A. Andreazza^{44,45}, M. Andreini¹, T. Andriollo⁴⁶, L. Angel⁴⁷, M. Angelucci⁴⁸, S. Antusch⁴⁹, M.N. Anwar^{12,50}, L. Apolinário⁵¹, G. Apollinari³⁷, R.B. Appleby^{52,53}, A. Apresyan³⁷, Aram Apyan⁵⁴, Armen Apyan⁵⁵, A. Arbey^{9,56,57}, B. Argiento^{35,36}, V. Ari⁵⁸, S. Arias⁵⁹, B. Arias Alonso¹, O. Arnaez^{9,16,17}, R. Arnaldi⁶⁰, F. Arneodo⁶¹, H. Arnold⁶², P. Arrutia Sota¹, K. Arundell⁶³, M.E. Ascioti^{64,65}, K.A. Assamagan⁶, S. Aumiller⁶⁶, G. Aydin⁶⁷, K. Azizi^{38,68}, P. Azzi⁶⁹, N. Bacchetta⁶⁹, A. Bacci⁴⁴, B. Bai⁷⁰, Y. Bai⁷¹, L. Balconi^{44,45}, G. Baldinelli^{64,65}, B. Balhan¹, A.H. Ball^{1,72}, A. Ballarino¹, S. Banerjee⁷³, S. Banik^{2,74}, D.P. Barber^{4,75}, M.B. Barbero^{9,76,77}, D. Barducci^{40,78}, D. Barna⁷⁹, G.G. Barnaföldi⁷⁹, M.J. Barnes¹, A.J. Barr⁸, R. Bartek⁸⁰, H. Bartosik¹, S.A. Bass⁸¹, U. Bassler^{9,82,83}, M.J. Basso^{84,85}, A. Bastianin^{45,86}, P. Bataillard⁸⁷, M. Battistini¹, J. Bauche¹, L. Baudin¹, J. Baudot^{9,42,43}, B. Baudouy³, L. Bauerdick³⁷, C. Bayindir^{88,89}, H.P. Beck⁹⁰, F. Bedeschi⁴⁰, C. Bee⁶², M. Begel⁶, M. Behtouei⁴⁸, L. Bellagamba²⁵, N. Bellegarde¹, E. Belli^{1,91}, E. Bellingeri⁹², S. Belomestnykh³⁷, A.D. Benaglia³⁰, G. Bencivenni⁴⁸, J. Bendavid¹, M. Benmergui⁹³, M. Benoit⁹⁴, D. Benvenuti^{1,40}, T. Bergauer⁹⁵, N. Bernachot⁹⁶, G. Bernardi^{9,97,98}, J. Bernardi⁹⁹, Q. Berthet^{100,101,102}, S. Bertoni¹⁰³, C. Bertulani¹⁰⁴, M.I. Besana², A. Besson^{9,42,43}, M. Bettelini¹⁰⁵, S. Bettoni², S. Beuvier¹⁰⁶, P.C. Bhat³⁷, S. Bhattacharya¹⁰⁷, J. Bhom¹⁰⁸, M.E. Biagini⁴⁸, A. Bibet-Chevalier¹⁰⁹, M. Bicarelli¹¹⁰, M. Biglietti¹¹¹, G.M. Bilei⁶⁴, B. Bilki^{112,113}, K. Bisgaard Christensen¹, T. Biswas¹¹⁴, F. Blanc¹¹⁵, F. Blekman^{4,116,117}, A. Blondel^{9,102,118}, J. Blümlein⁴, D. Boccanfuso^{35,119}, A. Bogomyagkov¹²⁰, P. Boillon¹⁰⁹, P. Boivin¹⁰¹, M.J. Boland¹²¹, S. Bologna¹²², O. Bolukbasi³³, R. Bonnet¹⁰³, J. Borburgh¹, F. Bordry¹, P. Borges de Sousa¹, G. Borghello¹, L. Borriello³⁵, D. Bortoletto⁸, M. Boscolo⁴⁸, L. Bottura¹, V. Boudry^{9,82,83}, R. Boughezal¹²³, D. Bourilkov¹²⁴, M. Boyd^{84,125}, D. Boye⁶, G. Bozzi^{126,127}, V. Braccini⁹², C. Bracco¹, B. Bradu¹, A. Braghieri¹²⁸, S. Braibant^{25,26}, J. Bramante¹²⁹, G.C. Branco¹³⁰, R. Brenner¹³¹, N. Brisa¹⁰³, D. Britzger¹³², G. Broggi^{1,91}, L. Bromiley¹, E. Brost⁶, Q. Bruant³, R. Bruce¹, E. Bründermann¹³³, L. Brunetti^{9,16,17}, O. Brüning¹, O. Brunner¹, X. Buffat¹, E. Bulyak¹³⁴, A. Burdyko^{44,135}, H. Burkhardt^{1,136}, P.N. Burrows¹³⁷, S. Busatto^{44,91}, S. Buschaert⁸⁷, D. Buttazzo⁴⁰, A. Butterworth¹, D. Butti¹, G. Cacciapaglia^{138,139,140}, Y. Cai⁷, B. Caiffi¹⁴¹, V. Cairo¹, O. Cakir⁵⁸, P. Calafiura¹⁴², R. Calaga¹, S. Calatroni¹, D.G. Caldwell¹⁴³, A. Çalişkan¹⁴⁴, C. Calpini¹⁴⁵, M. Calviani¹, E. Camacho-Pérez¹⁴⁶, P. Camarri^{20,21}, L. Caminada^{2,74}, M. Campajola^{35,36}, A.C. Canbay⁵⁸, K. Canderan¹, S. Candido¹, F. Canelli⁷⁴, A. Canepa³⁷, S. Cantarella⁴⁸, K.B. Cantún-Avila¹⁴⁶, L. Capriotti^{147,148}, A. Caram¹⁴⁹, A. Carbone⁴⁴, J.M. Carceller¹, G. Carini⁶, C. Carli¹, F. Carlier¹, C.M. Carloni Calame¹²⁸, C. Caron¹⁵⁰, F. Carra¹, C. Cartannaz⁸⁷, S. Casenove¹, G. Catalano¹⁵¹, V. Cavaliere⁶, C. Cazzaniga¹⁵², C. Cecchi^{64,65}, F.G. Celiberto¹⁵³, M. Cepeda²⁷, F. Cerutti¹, F. Cetorelli^{30,31}, G. Chachamis⁵¹, Y. Chae⁴, F. Chagnet¹⁵⁴, I. Chaikovska^{9,10,11}, M. Chalhoub⁸⁷, M. Chamizo-Llatas⁶, M. Champagne¹⁵⁵, H. Chanal^{9,156,157}, G. Chapelier¹⁰⁹, P. Charitos¹, C. Charles¹⁰⁶, T.K. Charles¹⁵⁸, C. Charlot^{9,82,83}, S. Chatterjee⁴, A. Chaudhuri¹⁵⁹, R. Chehab^{9,10,11}, S.V. Chekanov¹⁶⁰, H. Chen⁶, T. Chesne¹⁰⁶, F. Chiapponi^{25,26}, G. Chiarello^{161,162}, M. Chiesa¹²⁸, P. Chiggiato¹, Ph. Chomaz³, M. Chorowski¹⁶³, J.P. Chou¹⁶⁴, M. Chruszcz¹⁰⁸, W. Chung¹⁶⁵, S. Ciarlantini^{69,166}, A. Ciarma⁴⁸, D. Cieri¹³², A.K. Ciftci¹⁶⁷, R. Ciftci¹⁶⁸, R. Cimino⁴⁸, F. Ciotto^{35,36}, M. Ciuchini¹¹¹, M. Cobal^{169,170}, A. Coccaro¹⁴¹, R. Coelho Lopes De Sa¹⁷¹, J.A. Coleman-Smith¹, F. Collamati¹⁷², C. Coldelram¹⁷³, P. Collier¹, P. Collins¹, J. Collot^{9,174,175}, M. Colmenero¹, L. Colnot¹⁵¹, G. Coloretti⁷⁴, F.A. Conventi^{35,176}, A. Cook¹, L. Cooley^{177,178}, A.S. Cornell¹⁷⁹, C. Cornella¹, G. Cornette¹⁰⁶, I. Corredoira¹⁸⁰, P. Costa

Pinto¹, F. Couderc³, J. Coupard¹, S. Coussy⁸⁷, R. Crescenzi¹⁸¹, I. Crespo Garrido^{1,182}, T. Critchley^{1,102}, A. Crivellin⁷⁴, T. Croci⁶⁴, C. Cudré¹⁰⁶, G. Cummings³⁷, F. Cuna¹², R. Cunningham¹, B. Curé¹, E. Curtis¹⁸³, M. D'Alfonso¹⁸⁴, L. D'Aloia Schwartzentruber¹⁸⁵, G. D'Amen⁶, B. D'Anzi^{12,13}, A. D'Avanzo^{35,36}, D. d'Enterria¹, A. D'Onofrio³⁵, M. D'Onofrio¹⁸⁶, M. Da Col¹⁵¹, M. Da Rocha Rolo⁶⁰, C. Dachauer¹⁸⁷, B. Dagli²⁴, A. Dainese⁶⁹, B. Dalena³, W. Dallapiazza¹⁸⁸, M. Dam¹⁸⁹, H. Damerau¹, V. Dao⁶², A. Das¹⁹⁰, M.S. Dagaard¹, S. Dauphin¹⁰⁹, A. David¹, T. Davídek¹⁹¹, G.J. Davies¹⁸³, S. Dawson⁶, J. de Blas¹⁹², A. de Cosa¹⁵², S. De Curtis¹⁹³, N. De Filippis^{12,50}, E. De Lucia⁴⁸, R. De Maria¹, E. De Matteis⁴⁴, A. De Roeck¹, A. De Santis⁴⁸, A. De Vita^{1,69,166}, A. Deandrea^{9,56,57}, C.J. Debono¹⁹⁴, M. Deeb¹⁰¹, M.M. Defranchis¹, J. Degens¹⁸⁶, S. Deghaye¹, V. Del Duca⁴⁸, C.L. Del Pio⁶, A. Del Vecchio⁹¹, D. Delikaris¹, A. Dell'Acqua¹, M. Della Pietra^{35,36}, M. Delmastro^{9,16,17}, L. Delprat¹, E. Delugas¹⁵¹, Z. Demiragli¹⁹⁵, L. Deniau¹, D. Denisov⁶, H. Denizli¹⁹⁶, A. Denner¹⁹⁷, A. Denot¹⁰⁹, G. Deptuch⁶, A. Desai¹⁹⁸, H. Deveci¹, A. Di Canto⁶, A. Di Ciaccio^{20,21}, L. Di Ciaccio^{9,16,17}, D. Di Croce^{1,115}, C. Di Fraia^{35,36}, B. Di Micco^{29,111}, R. Di Nardo^{29,111}, T.B. Dingley⁸, F. Djama^{9,76,77}, F. Djurabekova¹⁹⁹, D. Dockery³⁷, S. Doeberth¹, D. Domange^{1,200}, M. Donegà¹⁵², U. Dosselli⁶⁹, H.A. Dostmann^{1,201}, J.A. Dragovich³⁷, I. Drebot⁴⁴, M. Drewes²⁰², T.A. du Pree²⁰³, Z. Duan²⁰⁴, C. Duarte-Galvan²⁰⁵, O. Duboc²⁰⁶, M. Duda², P. Duda¹⁶³, H. Duran Yildiz⁵⁸, H. Durand¹⁰⁶, P. Durand¹⁰⁶, G. Durieux²⁰², Y. Dutheil¹, I. Dutta³⁷, J.S. Dutta²⁰⁷, S. Dutta²⁰⁸, F. Duval¹, F. Eder¹, M. Eisterer⁹⁹, Z. El Bitar^{9,42,43}, A. El Saied²⁰⁹, M. Elisei⁴⁴, J. Ellis^{1,210}, W. Elmetenawee¹², J. Elmsheuser⁶, V. Daniel Elvira³⁷, S.C. Eno²¹¹, Y. Enomoto²¹², B.A. Erdelyi^{69,166}, O.E. Erutya^{102,213}, M. Escobar²¹⁴, O. Etisken²¹⁵, I. Eymard¹⁴⁵, J. Eysermans¹⁸⁴, D. Falchieri²⁵, C. Falkenberg²⁰⁶, F. Fallavollita^{1,132}, A. Afalou^{1,9,10}, J. Faltova¹⁹¹, J. Fanini¹, L. Fanò^{64,65}, K. Fanti¹⁰⁶, R. Farinelli²⁵, M. Farino¹⁶⁵, S. Farinon¹⁴¹, H. Fatehi³⁸, J. Fatterbert¹⁰⁶, A. Faure²¹⁶, A. Faus-Golfe^{9,10,11}, G. Favia¹, L. Favilla^{35,119}, W.J. Fawcett³², A. Federowicz³⁷, L. Feligion^{9,76,77}, L. Felsberger¹, Y. Feng²³, A. Fernández Téllez²¹⁷, R. Ferrari¹²⁸, L. Ferreira¹, F. Ferro¹⁴¹, M. Fiascaris¹, C. Fiorio⁴⁵, S.A. Fleury¹, L. Florez¹⁸⁸, M. Florio^{45,151}, A. Fondacci⁶⁴, B. Fontimpe²¹⁴, K. Foraz¹, R. Fortunati², M. Foudaidy^{9,10,11}, M. Fouaidy^{9,10,11}, A. Foussat¹, A. Fowler¹, J.D. Fox²¹⁸, M. Francesconi³⁵, B. Francois¹, R. Franqueira Ximenes¹, F. Fransesini⁴⁸, A. Frasca^{1,186}, A. Freitas²¹⁹, J.A. Frost⁸, K. Furukawa²¹², A. Gabrielli^{25,26}, A. Gaddi¹, F. Gaede⁴, A. Gallén¹³¹, R. Galler^{220,221}, E. Gallice¹⁰⁶, E. Gallo^{4,116}, H. Gamper¹, G. Ganis¹, S. Ganjour³, S. Gao⁶, A. Garand¹⁴⁹, C. Garaus²⁰⁶, D. Garcia¹, R. García Alía¹, R. García Gil²²², C.M. Garcia Jaimes^{1,115}, H. Garcia Rodrigues^{2,223}, C. Garion¹, M. Garlaschè¹, D. Garnier¹⁵⁴, M.V. Garzelli¹¹⁶, S. Gascon-Shotkin^{9,56,57}, M. Gasior¹, G. Gaudino^{35,119}, G. Gaudio¹²⁸, V. Gaur²²⁴, K. Gautam^{74,117}, V. Gawas¹, T. Gehrmann⁷⁴, A. Gehrmann-De Ridder^{74,152}, K. Geiger¹, M. Genco¹⁵¹, F. Gerigk¹, H. Gerwig¹, A. Ghribi^{1,9,225}, P. Giacomelli²⁵, S. Giagu^{91,172}, E. Gianfelice³⁷, S. Giappichini¹³³, D. Gibellieri^{1,226}, F. Giffoni¹⁵¹, G. Gil da Silveira²²⁷, S.S. Gilardoni¹, M. Giovannetti⁴⁸, T. Girardet¹⁰⁶, S. Girod^{1,106}, P. Giubellino⁶⁰, P. Giubilato^{69,166}, F. Giulio^{20,21}, M. Giuliani¹⁰³, E.L. Gkougkousis^{1,74}, S. Glukhov²²⁸, J. Gluza²²⁹, B. Goddard¹, C. Goffing^{1,133}, D. Goldsworthy¹, T. Golling¹⁰², R. Gonçalo^{51,230}, V.P. Gonçalves^{47,231}, T. Gonçalves Da Silva²¹⁴, J. Gonski⁷, R. Gonzalez Suarez¹³¹, S. Gorgi Zadeh¹, S. Gori²³², E. Gorini^{161,233}, L. Gouskos²³⁴, M. Gouzevitch^{9,56,57}, E. Granados¹, F. Grancagnolo¹⁶¹, S. Grancagnolo^{161,233}, A. Grassellino³⁷, A. Grau¹³³, E. Graverini^{40,78,115}, F.G. Gravili^{161,233}, H.M. Gray^{142,235}, M. Grazzini⁷⁴, Mario Greco^{29,111}, Michela Greco^{60,236}, A. Greljo⁴⁹, J-L. Grenard¹, A.V. Gritsan²³⁷, R. Gröber^{69,166}, A. Grudiev¹, E. Gschwendtner¹, J. Gu²³⁸, D. Guadagnoli^{17,138,239}, G. Guerrieri¹, A. Guiavarch²⁰⁹, G. Guillermo Canton^{1,240}, M. Guinchard¹, Y.O. Günaydin²⁴¹, K. Gurcel⁹³, L.X. Gutierrez Guerrero^{242,243}, D. Gutiérrez Rueda¹, A. Gutiérrez-Rodríguez²⁴⁴, V. Guzey^{199,245}, C. Haber¹⁴², T. Hacheney²⁴⁶, B. Hacıahinoglu³³, K. Hahn¹²³, J. Hajer¹³⁰, T. Hakulinen¹, J.C. Hammersley²⁴⁷, M. Hance²³², J.B. Hansen¹⁸⁹, B. Härer¹³³, E. Hauzinger²²⁰, M. Haviernik¹⁹¹, B. Hegner¹, C. Helsens¹¹⁵, Ana Henriques¹, C. Hernalsteens¹, H. Hernández-Arellano²¹⁷, R.J. Hernández-Pinto²⁰⁵, M.A. Hernández-Ruiz²⁴⁴, J. Hernández-Sánchez²¹⁷, J.W. Heron¹, L.M. Herrmann¹, R. Hirosky²⁴⁸, J.F. Hirschauer³⁷, J.D. Hobbs⁶², S. Höche³⁷, M. Hofer¹, G. Hoffstaetter^{6,249}, W. Höfle¹, M. Hohlmann²⁵⁰, F. Holdener²⁵¹, B. Holzer¹, C.G. Honorato²¹⁷, H. Hoorani²⁵², A. Houver¹⁰⁶, E. Howling^{1,8,137}, X. Huang⁷, F. Hug²⁵³, B. Humann¹, P. Hunchak¹²¹, Y. Husein¹, A. Hussain¹²⁵⁴, G. Iadarola¹, G. Iakovidis⁶, G. Iaselli^{12,50}, P. Iengo³⁵, A. Ilg⁷⁴, M. Iodice¹¹¹, A.O.M. Iorio^{35,36}, V. Ippolito¹⁷², U. Iriso¹⁷³, J. Isaacson³⁷, G. Isidori⁷⁴, R. Islam²⁵⁵, A. Istepanyan¹⁰⁶, S. Izquierdo Bermudez¹, V. Izzo³⁵, P.D. Jackson¹⁹⁸, R. Jafari^{1,38}, S.S. Jagabathuni^{1,102}, S. Jana^{256,257}, C. Järmyr Eriksson¹, P. Jausserand¹⁵⁴, M.

Jensen²⁵⁸, J.M. Jimenez¹, F.R. Joaquim¹³⁰, O.R. Jones¹, J. Joos¹⁰⁹, E. Jourd'huy^{9,259}, E. Jourdan²¹⁴, J.M. Jowett^{1,260}, A. Jueid²⁶¹, A.W. Jung²⁰⁷, M. Kagan⁷, I. Kahraman⁵⁸, V. Kaini¹, J. Kalinowski²⁶², J.F. Kamenik^{263,264}, A. Kanso²⁶⁵, T. Kar²⁶⁶, S.O. Kara²⁶⁷, H. Karadeniz²⁶⁸, S.R. Karmarkar²⁰⁷, V. Karpati²⁶⁹, I. Karpov¹, M. Karppinen¹, P. Karst^{9,76,77}, S. Kartal³³, V.V. Kashikhin³⁷, U. Kaya⁵⁸, A. Kehagias^{1,270}, J. Keintzel¹, M. Kennouche¹, M. Kenzie³², M. Kerréveur-Lavaud⁴⁶, R. Kersevan^{1,271}, V. Keus^{199,272}, H. Khanpour^{14,273,274}, V.V. Khoze²⁷⁵, V.A. Khoze²⁷⁵, P. Kicsiny¹, R. Kieffer¹, C. Kiel¹¹⁵, J. Kieseler¹³³, A. Kilic²⁷⁶, B. Kilminster⁷⁴, S. Kim²⁷⁷, Z. Kirca²⁷⁶, M. Klein¹⁸⁶, A. Klimentov⁶, M. Klute¹³³, V. Klyukhin^{120,278}, M. Knecht^{138,279,280}, B. Kniehl¹¹⁶, P. Ko²⁸¹, S. Ko¹, F. Kocak²⁷⁶, T. Koffas²⁸², C. Kokkinos^{283,284}, K. Kołodziej²²⁹, K. Kong²⁸⁵, P. Kontaxakis¹⁰², I.A. Koop¹²⁰, P. Kopciwicz¹, P. Koppenburg²⁰³, M. Koratzinos^{1,2}, K. Kordas²⁸⁶, A. Korsun^{9,10,11}, O. Kortner¹³², S. Kortner¹³², B. Korzh¹⁰², T. Koseki²¹², J. Kosse², P. Kostka^{1,186}, S. Kostoglou¹, A.V. Kotwal⁸¹, G. Kozlov^{1,278}, I. Kozsar¹, T. Kramer¹, P. Krkotic¹, H. Kroha¹³², K. Kröninger²⁴⁶, S. Kудay^{1,58}, G. Kuhlmann²⁸⁷, O. Kuhlmann^{1,288}, M. Kuhn²⁸⁹, A. Kulesza²⁹⁰, M. Kumar²⁹¹, F. Kurian⁶, A. Kurtulus^{1,152}, T.H. Kwok⁷⁴, S. La Mendola¹, M. Lackner^{99,292}, T. Ładziński¹, D. Lafarge¹, P. Laïdouni¹, G. Lamanna^{9,16,17}, N. Lamas¹⁹, G. Landsberg²³⁴, C. Lange², D.J. Lange¹⁶⁵, A. Langner¹, A.J. Lankford²⁹³, M.S. Larson²⁹⁴, K. Lasocha¹, A. Latina¹, S. Lauciani⁴⁸, M. Laufenberg¹⁰⁶, G. Lavezzari¹, L. Lavezzi⁶⁰, L. Lavezzo¹, M. Le Garrec^{1,9,16}, A. Le Jeune¹⁰³, Ph. Lebrun^{1,295}, Y. Léchevin¹, A. Lechner¹, E. Lecointe¹⁰⁶, J.S.H. Lee²⁹⁶, S.W. Lee²⁹⁷, S.J. Lee^{281,298}, T. Lefevre¹, C. Leggett¹⁴², T. Lehtinen²⁹⁹, S. Leone⁴⁰, C. Leonidopoulos³⁰⁰, S. Leontsinis⁷⁴, G. Leprince-Maillère³⁰¹, G. Lerner¹, O. Leroy^{9,76,77}, T. Lesiak¹⁰⁸, P. Levai⁷⁹, A. Leveratto⁹², R. Levi¹⁵⁴, A. Lié, S. Li^{302,303}, D. Liberati³⁰⁴, G.L. Lichtenstein⁴⁷, M. Liepe²⁴⁹, Z. Ligeti¹⁴², H. Lin³⁰⁵, S. Linda¹⁴⁵, E. Lipeles³⁰⁶, Z. Liu³⁰⁷, S.M. Liuzzo³⁰⁸, T. Loeliger²⁸⁹, A. Loeschcke Centeno³⁰⁹, A. Lorenzetti⁷⁴, C. Lorin³, R. Losito¹, M. Louka^{12,310}, M.L. Loureiro García¹⁸², I. Low^{123,160}, K. Lubonis¹⁵⁴, M.T. Lucchini^{30,31}, V. Lukashenko⁷⁴, G. Luminati⁴⁸, A.J.G. Lunt^{1,311}, A. Lusiani^{40,312}, M. Luzum³¹³, H. Ma⁶, A. Maas³¹⁴, E. Macchia^{1,91,172}, A. Macchiolo⁷⁴, G.E. Machinet²⁶⁵, R. Madar^{9,156,157}, T. Madlener⁴, C. Madrid²³, A. Magalotti²⁹, M. Maggiora^{60,236}, A.-M. Magnan¹⁸³, M.A. Mahmoud³¹⁵, Y. Mahmoud^{316,317}, F. Mahmoudi^{1,9,56}, H. Mainaud Durand¹, J. Maitre¹⁰⁹, Y. Makhouloufi¹⁰², B. Malaescu^{9,118,318}, A. Malagoli⁹², C.H. Malan¹⁰⁹, M. Malekhosseini³⁸, M. Malekhosseini³⁸, A. Maloizel^{1,97,98}, S. Malvezzi³⁰, A. Malzac¹⁴⁹, G. Manco¹²⁸, L.S. Mandacarú Guerra¹⁶⁵, P. Manfrinetti^{92,319}, E. Manoni⁶⁴, J. Mans³⁰⁷, L. Mantani³²⁰, S. Manzoni¹, L. Marafatto¹⁶⁹, C. Marcel¹, T. Marcel¹¹⁰, R. Marchevski¹¹⁵, G. Marchiori^{9,97,98}, F. Mariani^{44,91}, V. Mariani^{64,65}, S. Marin¹, C. Marinas³²⁰, V. Marinozzi³⁷, S. Mariotto^{44,45}, C. Marquis¹⁰⁶, J. Martelain³²¹, G. Martelli^{64,65}, A. Martens^{9,10,11}, I. Martin-Melero¹, V.I. Martinez Outschoorn¹⁷¹, F. Martinez²¹⁷, C.M. Jardim²⁷, L. Marzola^{322,323}, S. Masciocchi^{260,266}, A. Mashal¹⁴, A. Masi¹, I. Masina^{147,148}, P. Mastrapasqua²⁰², V. Mateu³²⁴, S. Mattiazzo^{69,166}, M. Maugis¹⁰³, D. Mauree¹⁴⁵, G.H.I. Maury-Cuna³²⁵, A. Mayoux¹, E. Mazzeo¹, S. Mazzoni¹, M. McCullough¹, M. Meena^{9,42,43}, E. Meftah¹⁰², Andrew Mehta¹⁸⁶, Ankita Mehta¹, B. Mele¹⁷², R. Mena-Andrade¹, M. Mentink¹, D. Mergelkuhl¹, V. Mertinger²⁶⁹, L. Mether¹, S. Meylan¹⁰⁶, T. Michel¹⁰³, T. Michlmayr², M. Migliorati^{91,172}, A. Milanese¹, C. Milardi⁴⁸, G. Milhano⁵¹, C. Mirabelli³²⁶, T. Miralles^{9,156,157}, L. Miralles Verge¹, D. Mirarchi¹, K. Mirbaghastan⁷⁴, N. Mirian^{4,327}, V.A. Mitsou³²⁰, D.S. Mitzel²⁴⁶, M. Mlynarikova¹, S. Möbius⁹⁰, M. Mohammadi Najafabadi^{1,14}, G.B. Mohanty³²⁸, R. N. Mohapatra²¹¹, S. Moneta⁶⁴, P.F. Monni¹, E. Monnier^{9,76,77}, S. Monteil^{9,156,157}, I. León Monzón²⁰⁵, F. Moortgat^{1,329}, N. Morange^{9,10,11}, M. Moretti^{147,148}, S. Moretti⁷², T. Mori^{1,212}, I. Morozov¹²⁰, A. Morozzi⁶⁴, M. Morrone¹, A. Moscariello¹⁰², F. Moscatelli^{64,330}, I. Moulin²¹⁶, N. Mounet¹, A. Mueller³³¹, A.-S. Müller¹³³, B.O. Müller²⁸⁷, J. Mundet²²², E. Musa^{1,4}, V. Musat^{1,8}, R. Musenich¹⁴¹, E. Musumeci³²⁰, M. Mylonai¹, V.V. Mytrochenko^{9,10,134}, B. Nachman¹⁴², T. Nakamoto²¹², M. Napsuciale³²⁵, M. Nardecchia^{91,172}, G. Nardini³³², G. Narváez-Arango³³³, S. Naseem⁶¹, A. Navascues Cornago¹, B. Naydenov¹, G. Nergiz¹, A.V. Nesterenko²⁷⁸, C. Neubüser³³⁴, H.B. Newman³³⁵, F. Niccoli^{1,336}, O. Nicrosini¹²⁸, U. Niedermayer²²⁸, G. Niehues¹³³, J. Nielsen¹, G. Nigrelli^{1,91,172}, S. Nikitin¹²⁰, I.B. Nikolaev¹²⁰, A. Nisati¹⁷², N. Nitika^{169,170}, J.M. No³³⁷, M. Nonis¹, Y. Nosochkov⁷, A. Novokhatski^{1,7}, J.M. O'Callaghan³³⁸, S.A. Ochoa-Oregon²⁰⁵, K. Ohmi^{204,212}, K. Oide^{1,102,212}, V.A. Okorokov¹²⁰, C. Oleari^{30,31}, D. Oliveira Damazio^{1,6}, Y. Onel¹¹³, A. Onofre^{339,340,341}, P. Osland³⁴², T. Otto¹, Y.M. Oviedo-Torres^{343,344,345}, A. Ozansoy⁵⁸, F. Ozaydin^{88,346}, K. Ozdemir³⁴⁷, A. Ozturk¹, M.A. Pérez de León²⁰⁵, S. Pacetti^{64,65}, H. Pacey⁸, J. Paciello¹⁰⁹, C.E. Pagliarone^{348,349}, A. Paillex¹⁰⁶, H.F. Pais da Silva¹, F. Palla⁴⁰,

A. Pampaloni¹⁴¹, C. Pancotti¹⁵¹, M. Pandurovic³⁵⁰, O. Panella⁶⁴, G. Panizzo^{169,170}, C. Pantouvakis^{69,166}, L. Panwar^{9,118,318}, P. Paolucci³⁵, Y. Papa¹⁰⁶, A. Papaefstathiou³⁵¹, Y. Papaphilippou¹, A. Paramonov¹⁶⁰, A. Pareti^{128,352}, B. Parker⁶, V. Parma¹, F. Parodi^{141,319}, M. Parodi¹, B. Paroli^{44,45}, J.A. Parsons³⁵³, D. Passarelli³⁷, D. Passeri^{64,65}, B. Pattnaik³²⁰, A. Patwa³⁵⁴, C. Paus¹⁸⁴, F. Pauss¹⁵², F. Peauger¹, I. Pedraza²¹⁷, R. Pedro⁵¹, J. Pekkanen¹, G. Peon¹, A. Perez¹¹⁰, E. Perez¹, F. Pérez¹⁷³, J.C. Perez¹, J.M. Pérez²⁷, R. Perez-Ramos^{138,139,355}, G. Pérez Segurana¹, A. Perillo Marcone¹, S. Perna^{35,36}, K. Peters⁴, S. Petracca^{35,356}, A.R. Petri⁴⁴, F. Petriello¹²³, A. Petrovic¹, L. Pezzotti²⁵, G. Piacquadio⁶², G. Piazza¹⁸¹, A. Piccini¹, F. Piccinini¹²⁸, A. Pich³²⁰, T. Pieloni¹¹⁵, J. Pierlot¹, A.D. Pilkington⁵², M. Pillet³²⁶, M. Pinamonti^{169,170}, N. Pinto²³⁷, L. Pintucci^{169,170}, F. Pinzauti¹, K. Piotrkowski²⁷³, C. Pira⁴⁸, M. Pitti¹, R. Pittau¹⁹², S. Pittet¹, P. Placidi^{64,65}, W. Płaczek³⁵⁷, S. Plätzer^{314,358}, M.-A. Pleier⁶, E. Ploerer^{74,117}, H. Podlech^{359,360}, F. Poirier^{9,16,17}, G. Polesello¹²⁸, M. Poli Lener⁴⁸, J. Polinski¹⁶³, Z. Polonsky⁷⁴, N. Pompeo²⁹, M. Pont¹⁷³, G. Alexandru-Popeneciu³⁶¹, W. Porod¹⁹⁷, L. Porta¹, L. Portales³, T. Portaluri³⁰⁹, M.A.C. Potenza⁴⁵, C. Prasse²⁸⁷, E. Premat¹⁸⁵, M. Presilla¹³³, S. Prestemon¹⁴², A. Price³⁵⁷, M. Primavera¹⁶¹, R. Principe¹, M. Prioli⁴⁴, F.M. Procacci¹², E. Proserpio^{44,135}, A. Provino^{92,319}, C. Pueyo¹, T. Puig¹⁹, N. Pukhaeva²⁷⁸, S. Pulawski²²⁹, G. Punzi^{40,78}, A. Pyarelal³⁶², J. Qian³⁰⁵, H. Quack³⁶³, F. S. Queiroz⁴⁷, G. Quintas-Neves³⁰¹, H. Rafique⁷², J.-Y. Raguin², J. Raidal³²², M. Raidal³²², P. Raimondi³⁷, A. Rajabi⁴, S. Ramírez-Urbe²⁰⁵, S. Randles¹⁸⁶, T. Rao⁶, C.Ø. Rasmussen⁶, A. Ratkus³⁶⁴, P.N. Ratoff^{53,365}, P. Razis^{366,367}, P. Rebello Teles^{1,368}, M.N. Rebelo¹³⁰, M. Reboud^{9,10,11}, S. Redaelli¹, C. Regazzoni¹⁰⁶, L. Reichenbach^{1,369}, M. Reissig¹³³, E. Renou¹⁰⁶, A. Rentería-Olivo³²⁰, J. Reuter⁴, S. Rey¹⁰⁶, A. Ribon¹, D. Ricci¹, M. Rignanese^{69,166}, S. Rimjaem³⁷⁰, R.A. Rimmer³⁷¹, R. Rinaldesi¹, L. Rinolfi^{1,295}, O. Rios¹, G. Ripellino¹³¹, B. Rivas³⁷², A. Rivetti⁶⁰, T. Robens³⁷³, F. Robert¹⁸⁵, E. Robutti¹⁴¹, C. Roderick¹, G. Rodrigo³²⁰, M. Rodríguez-Cahuantzi²¹⁷, L. Röhrig^{156,157,246}, M. Roig³⁷⁴, F. Rojati¹⁰⁹, J. Rojo^{203,375}, J. Roloff²³⁴, P. Roloff¹, A. Romanenko³⁷, A. Romero Francia¹, H. Romeyer³⁷⁶, N. Rompotis¹⁸⁶, N. Rongieras¹⁰³, G. Rosaz¹, K. Roslon³⁷⁷, M. Rossetti Conti⁴⁴, A. Rossi^{64,65}, E. Rossi^{35,36}, L. Rossi^{44,45}, A.N. Rossia^{69,166}, S. Rostami³⁸, G. Roy¹, B. Rubik³⁷, I. Ruehl¹, A. Ruiz-Jimeno³⁷⁸, R. Ruprecht¹³³, J.P. Rutherford³⁶², L. Rygaard⁴, M.S. Ryu²⁹⁷, L. Sabato^{1,115}, G. Sadowski^{9,42,43}, D. Saez de Jauregui^{133,379}, M. Sahin³⁸⁰, A. Sailer¹, M. Saito³⁸¹, P. Saiz¹, G.P. Salam^{382,383}, R. Salerno^{9,82,83}, T. Salmi²⁹⁹, B. Salvachua¹, J.P.T. Salvesen^{1,8,137}, B. Salvi³⁰¹, D. Sampsonidis²⁸⁶, Y. Villamizar^{138,139,140}, C. Sandoval³³³, S. Sanfilippo², E. Santopinto¹⁴¹, R. Santoro^{44,135}, X. Sarasola¹¹⁵, L. Sarperi²⁸⁹, I.H. Sarpün³⁸⁴, S. Sasikumar¹, M. Sauvain³⁸⁵, A. Savoy-Navarro^{3,9}, R. Sawada³⁸¹, G. Sborlini³⁸⁶, J. Scamardella^{35,36}, M. Schaer², M. Schumann^{1,4}, M. Schenk¹, C. Scheuerlein¹, C. Schiavi^{141,319}, A. Schloegelhofer¹, D. Schoerling¹, A. Schöning²⁶⁶, S. Schramm¹⁰², D. Schulte¹, P. Schwaller^{253,387}, A. Schwartzman⁷, Ph. Schwemling³, R. Schwienhorst³⁸⁸, A. Sciandra⁶, L. Scibile¹, I. Scimemi³⁸⁹, E. Scomparin⁶⁰, C. Sebastiani¹, B. Seeber³⁹⁰, J.T. Seeman⁷, F. Sefkow⁴, M. Seidel^{2,115}, S. Seidel⁷⁵, J. Seixas^{341,391,392}, N. Selimovic⁶⁹, M. Selvaggi¹, C. Senatore¹⁰², A. Senol¹⁹⁶, N. Serra⁷⁴, A. Seryi³⁷¹, A. Sfyrila¹⁰², Pramond Sharma³⁹³, Punit Sharma⁶, C.J. Sharp¹, L. Shchutska¹¹⁵, V. Shiltsev³⁹⁴, M. Siano^{44,45}, R. Sierra¹, E. Silva²⁹, R.C. Silva^{47,345}, L. Silvestrini¹⁷², F. Simon¹³³, G. Simonetti¹, R. Simoniello¹, B.K. Singh³⁹⁵, S. Singh⁶, B. Singhal⁸⁰, A. Siodmok^{1,357}, Y. Sirois^{59,82,83}, E. Sirtori¹⁵¹, B. Sitar³⁹⁶, D. Sittard¹, E. Sitti¹⁵², T. Sjöstrand⁵⁹, P. Skands³⁹⁷, L. Skinnari²⁹⁴, K. Skoufaris¹, K. Skovpen³²⁹, M. Skrzypek¹⁰⁸, P. Slavich^{138,139,140}, V. Slokenbergs²³, V. Smaluk⁶, J. Smiesko^{1,398}, S.S. Snyder⁶, E. Solano¹⁷³, P. Sollander¹, O.V. Solovyanov^{1,9,156}, M. Son³⁹⁹, F. Sonnemann¹, R. Soos^{1,9,10}, F. Sopkova¹⁹¹, T. Sorais⁴⁰⁰, M. Sorbi^{44,45}, S. Sorti^{44,45}, R. Soualah⁴⁰¹, M. Souayah¹, L. Spallino⁴⁸, S. Spanier⁴⁰², P. Spiller²⁶⁰, M. Spira², D. Stagnara¹⁰³, M. Stallmann¹⁸⁸, D. Standen¹, J.L. Stanyard¹, B. Stapf¹, G.H. Stark²³², M. Statera⁴⁴, C. Staudinger^{1,206}, G. Streicher⁴⁰³, N.P. Strohmaier², R. Stroynowski¹⁰⁷, S. Stucci⁶, G. Stupakov⁷, S. Su³⁶², A. Sublet¹, K. Sugita²⁶⁰, M.K. Sullivan⁷, S. Sultansoy²⁴, I. Syrathev¹, R. Szafron⁶, A. Sznajder⁴⁰⁴, W. Tachon⁴⁰⁵, N.D. Tagdulang^{37,173,338}, N.A. Tahir²⁶⁰, Y. Takahashi¹²⁴, J. Tamazirt^{9,10,11}, S. Tang⁶, Y. Tanimoto²¹², I. Tapan²⁷⁶, G.F. Tassielli^{12,406}, A.M. Teixeira^{9,156,157}, V.I. Telnov¹²⁰, H.H.J. Ten Kate^{1,407}, V. Teotia⁶, J. ter Hoeve³⁰⁰, A. Thabuis¹, G.T. Telles¹⁹, A. Tishelman-Charny⁶, S. Tissandier¹⁰⁹, S. Tizchang^{14,408}, J.-P. Tock¹, B. Todd¹, L. Toffolin^{1,169,409}, A. Tolosa-Delgado¹, R. Tomás García¹, T. Tomasini⁴¹⁰, G. Tonelli^{40,78}, T. Tong⁴¹¹, F. Toral²⁷, T. Torims^{1,364}, L. Torino¹⁷³, K. Torokhtii²⁹, R. Torre¹⁴¹, E. Torrence⁴¹², R. Torres^{53,186}, Toshiyuki Mitsuhashi²¹², A. Tracogna¹⁵¹, O. Traver¹⁷³, D. Treille¹, A. Tricoli⁶, P. Trubacova¹, E. Tsesmelis¹, G. Tsipolitis²⁷⁰, V. Tsulaia¹⁴², B. Tuchming³, C.G. Tully¹⁶⁵, I. Turk Cakir⁵⁸, C. Turrioni⁶⁴, J.

Tynan¹⁰⁶, F.P. Ucci^{128,352}, S. Udongwo⁴¹³, C.S. Ün²⁷⁶, A. Unnervik¹, A. Upegui^{100,101}, J.P. Uribe-Ramírez²⁰⁵, J. Uythoven¹, R. Vaglio^{36,92}, F. Valchkova-Georgieva⁴¹⁴, P. Valente¹⁷², R.U. Valente¹⁷², A.-M. Valente-Feliciano³⁷¹, G. Valentino^{1,194}, C.A. Valerio-Lizarraga^{205,325}, S. Valette¹, J.W.F. Valle³²⁰, L. Valle¹, N. Valle¹²⁸, N. Vallis^{1,2,115}, G. Vallone¹⁴², P. van Gemmeren¹⁶⁰, W. Van Goethem¹, P. van Hees⁵⁹, U. van Rienen⁴¹³, L. van Riesen-Haupt^{1,115}, P. Van Trappen¹, M. Vande Voorde^{415,416}, A.L. Vanel¹, E.W. Varnes³⁶², J.-L. Vay¹⁴², F. Veit²⁸⁷, I. Veliscek⁶, R. Veness¹, A. Ventura^{161,233}, M. Verducci^{40,78}, C.B. Verhaaren⁴¹⁷, C. Vernieri⁷, A.P. Verweij¹, J.-F. Vian⁴¹⁸, A. Vicini^{44,45}, N. Vignaroli^{161,233}, S. Vignetti¹⁵¹, M.C. Villeneuve²²⁰, I. Vivarelli^{25,26}, E. Voevodina^{1,132}, D.M. Vogt⁴¹⁹, B. Voirin⁴²⁰, S. Voiriot¹⁰⁶, J. Voiron¹⁴⁵, P. Vojtyla¹, V. Völk¹, L. von Freeden¹, Z. Vostrel^{1,421}, N. Voumard¹, E. Vryonidou⁵², V. Vysotsky¹²⁰, R. Wallny¹⁵², L.-T. Wang⁴²², Y. Wang^{9,10,11}, R. Wanzenberg⁴, B.F.L. Ward⁴²³, N. Wardle¹⁸³, Z. Wang⁵¹⁰⁸, L. Watrelot¹, A.T. Watson⁴²⁴, M.F. Watson⁴²⁴, M.S. Weber⁹⁰, C.P. Welsch^{53,186}, M. Wendt^{1,6}, J. Wenninger¹, B. Weyer¹, G. White⁴²⁵, S. White³⁰⁸, B. Wicki¹, M. Wadorski¹, U.A. Wiedemann¹, A.R. Wiederhold⁵², A. Wiedl¹³³, H.-U. Wienands¹⁶⁰, A. Wieser¹⁵², C. Wiesner¹, H. Wilkens¹, D. Willi⁴²⁶, P.H. Williams^{53,427}, S.L. Williams³², A. Winter⁴²⁴, R.B. Wittwer⁷⁴, D. Wollmann¹, Y. Wu¹¹⁵, Z. Wu^{9,16,17}, J. Xiao^{9,56,57}, K. Xie³⁸⁸, S. Xie^{37,335}, M. Yalvac²², F. Yaman^{427,428}, W.-M. Yao¹⁴², M. Yeresko^{9,156,157}, A. Yilmaz¹⁹⁶, H.D. Yoo²⁷⁷, T. You²¹⁰, F. Yu^{253,387}, S.S. Yu⁸⁰, T.-T. Yu⁴¹², S. Yue¹, A. Zaborowska¹, M. Zahnd¹⁰⁶, C. Zamantzas¹, G. Zanderighi^{66,132}, C. Zannini¹, R. Zanzottera^{44,45}, P. Zaro¹⁰³, R. Zennaro², M. Zerlauth¹, H. Zhang²⁰⁴, J. Zhang¹⁶⁰, Y. Zhang²⁰⁴, Z. Zhang^{9,10,204}, Y. Zhao¹, Y.-M. Zhong⁴²⁹, B. Zhou³⁰⁵, D. Zhou²¹², J. Zhu³⁰⁵, G. Zick³⁷⁴, M.A. Zielinski¹, E. Zimmermann¹⁰⁶, A. Zingaretti^{69,166}, J. Zinn-Justin³, A.V. Zlobin³⁷, M. Zobov⁴⁸, F. Zomer^{9,10,11}, S. Zorzetti³⁷, X. Zuo¹³³, J. Zurita³²⁰, V.V. Zutshi³⁹⁴, M. Zykova².

- 1 Suisse - CERN, European Organization for Nuclear Research
- 2 Suisse - PSI, Paul Scherrer Institute
- 3 France - CEA/Irfu, Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives, Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers
- 4 Allemagne - DESY, Deutsches Elektronen-Synchrotron
- 5 Allemagne - Humboldt-Universität zu Berlin
- 6 États Unis d'Amérique - BNL, Brookhaven National Laboratory
- 7 États Unis d'Amérique - SLAC National Accelerator Laboratory
- 8 Royaume Uni - University of Oxford
- 9 France - CNRS/IN2P3, Centre National de la Recherche Scientifique, Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules
- 10 France - IJCLab, Laboratoire de Physique des 2 Infinis Irène Joliot Curie
- 11 France - Université Paris-Saclay et Université Paris-Cité
- 12 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Bari
- 13 Italie - Università di Bari
- 14 Iran - IPM, Institute for Research in Fundamental Science
- 15 Iran - Malayer University
- 16 France - LAPP, Laboratoire d'Annecy de Physique des Particules
- 17 France - Université Savoie Mont Blanc
- 18 Serbie - University of Belgrade
- 19 Espagne - ICMAB/CISC, Institut de Ciència de Materials de Barcelona, Consejo Superior de Investigaciones Científicas
- 20 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Roma Tor Vergata

- 21 Italie - Università Roma Tor Vergata
- 22 Turquie - Yozgat Bozok Üniversitesi
- 23 États Unis d'Amérique - Texas Tech University
- 24 Turquie - TOBB ETU, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
- 25 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Bologna
- 26 Italie - Università di Bologna
- 27 Espagne - CIEMAT, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas
- 28 Arabie Saoudite - KACST, King Abdulaziz City for Science and Technology
- 29 Italie - Università Roma Tre
- 30 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Milano-Bicocca
- 31 Italie - Università di Milano-Bicocca
- 32 Royaume Uni - University of Cambridge
- 33 Turquie - İstanbul Üniversitesi
- 34 Turquie - Eskişehir Teknik Üniversitesi
- 35 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Napoli
- 36 Italie - Università di Napoli Federico II
- 37 États Unis d'Amérique - FNAL, Fermi National Accelerator Laboratory
- 38 Iran - University of Tehran
- 39 Iran- FUM, Ferdowsi University of Mashhad
- 40 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Pisa
- 41 États Unis d'Amérique - University of Texas Austin
- 42 France - IPHC, Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien
- 43 France - Université de Strasbourg
- 44 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Milano
- 45 Italie - Università di Milano
- 46 Suisse - PIBG, Pôle Invertébrés du Basin Genevois
- 47 Brésil - UFRN, Universidade Federal do Rio Grande do Norte
- 48 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Laboratori Nazionali di Frascati
- 49 Suisse - UNIBAS, University of Basel
- 50 Italie - Politecnico di Bari
- 51 Portugal - LIP, Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas
- 52 Royaume Uni - University of Manchester
- 53 Royaume Uni - CI, Cockcroft Institute
- 54 États Unis d'Amérique - Brandeis University
- 55 Arménie - A. Alikhanyan National Laboratory
- 56 France - IP2I, Institut de Physique des 2 Infinis de Lyon
- 57 France - Université Claude Bernard Lyon 1
- 58 Turquie - Ankara Üniversitesi

- 59 Suède - Lund University
- 60 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Torino
- 61 Émirats arabes unis - New York University Abu Dhabi
- 62 États Unis d'Amérique - Stony Brook University
- 63 Royaume Uni - Springer Nature
- 64 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Perugia
- 65 Italie - Università di Perugia
- 66 Allemagne - Technische Universität München
- 67 Turquie - Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi
- 68 Turquie - Dogus, Üniversitesi
- 69 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Padova
- 70 République Populaire de Chine - Harbin Institute of Technology
- 71 États Unis d'Amérique - University of Wisconsin-Madison
- 72 Royaume Uni - RAL, Rutherford Appleton Laboratory, Science and Technology Facilities Council
- 73 Inde - IMSc, Institute of Mathematical Sciences, Chennai
- 74 Suisse - Universität Zürich
- 75 États Unis d'Amérique - University of New Mexico
- 76 France - CPPM, Centre de Physique des Particules de Marseille
- 77 France - Aix-Marseille Université
- 78 Italie - Università di Pisa
- 79 Hongrie - HUN-REN Wigner Research Centre for Physics
- 80 États Unis d'Amérique - Catholic University of America
- 81 États Unis d'Amérique - Duke University
- 82 France - LLR, Laboratoire Leprince-Ringuet
- 83 France - École Polytechnique, Institut Polytechnique de Paris
- 84 Canada - TRIUMF, Canada's National Laboratory for Particle and Nuclear Physics
- 85 Canada - Simon Fraser University
- 86 Italie - FEEM, Fondazione Ente Nazionale Idrocarburi (ENI) Enrico Mattei
- 87 France - BRGM, Bureau de Recherches Géologiques et Minières
- 88 Turquie - Isik Üniversitesi
- 89 Turquie - Istanbul Teknik Üniversitesi
- 90 Suisse - UNIBE, University of Bern
- 91 Italie - Università di Roma la Sapienza
- 92 Italie - CNR-SPIN, Consiglio Nazionale delle Ricerche
- 93 France - Expert naturaliste et entomologiste
- 94 États Unis d'Amérique - ORNL, Oak Ridge National Laboratory
- 95 Autriche - HEPHY, Institut für Hochenergiephysik

- 96 Suisse - Geos, Bureau d'ingénieurs conseils en géotechnique, génie civil, hydraulique et environnement
- 97 France - APC, Laboratoire AstroParticule et Cosmologie
- 98 France - Université Paris Cité
- 99 Autriche - TUWIEN, Technische Universität Wien
- 100 Suisse - HEPIA, Haute École du Paysage, d'Ingénierie et d'Architecture de Genève
- 101 Suisse - HES-SO University of Applied Sciences and Arts Western Suisse
- 102 Suisse - UNIGE, Université de Genève
- 103 France - SETEC ALS, Société d'ingénierie conseil en infrastructures de transport, génie civil et environnement
- 104 États Unis d'Amérique - East Texas A&M University
- 105 Suisse - Amberg Engineering Ltd
- 106 Suisse - ECOTEC Environnement SA, Bureau d'études et de conseil en environnement
- 107 États Unis d'Amérique - Southern Methodist University
- 108 Pologne - IFJ PAN, Institute of Nuclear Physics, Polish Academy of Sciences
- 109 France - Cerema, établissement public pour l'élaboration, le déploiement et l'évaluation de politiques publiques d'aménagement et de transport
- 110 Royaume Uni - Rendel Ltd, Engineering design consultancy firm
- 111 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Roma Tre
- 112 Turquie - Istanbul Beykent Üniversitesi
- 113 États Unis d'Amérique - University of Iowa
- 114 Inde - Indian Institute of Technology Kanpur
- 115 Suisse - EPFL, École Polytechnique Fédérale de Lausanne
- 116 Allemagne - Universität Hamburg, Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften
- 117 Belgique - VUB, Vrije Universiteit Brussel
- 118 France - LPNHE, Laboratoire de Physique Nucléaire et de Hautes Énergies
- 119 Italie - Scuola Superiore Meridionale
- 120 Affiliated with an institute formerly covered by a cooperation agreement with CERN
- 121 Canada - University of Saskatchewan and the Canadian Light Source
- 122 Royaume Uni - University of Bristol
- 123 États Unis d'Amérique - Northwestern University
- 124 États Unis d'Amérique - University of Florida
- 125 Canada - York University
- 126 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Cagliari
- 127 Italie - Università di Cagliari
- 128 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Pavia
- 129 Canada - Queen's University
- 130 Portugal - CFTP-IST, Centro de Física Teórica de Partículas, Instituto Superior Tecnico,

Universidade de Lisboa

- 131 Suède - Uppsala University
- 132 Allemagne - MPP, Max-Planck-Institut für Physik Garching
- 133 Allemagne - KIT, Karlsruher Institut für Technologie
- 134 Ukraine - NSC KIPT, National Science Center Kharkiv Institute of Physics and Technology
- 135 Italie - Università degli Studi dell'Insubria
- 136 Allemagne - Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
- 137 Royaume Uni - JAI, John Adams Institute for Accelerator Science, University of Oxford
- 138 France - CNRS/INP, Centre National de la Recherche Scientifique, Institut de Physique
- 139 France - LPTHE, Laboratoire de Physique Théorique et Hautes Energies
- 140 France - Sorbonne Université
- 141 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Genova
- 142 États Unis d'Amérique - LBNL, Lawrence Berkeley National Laboratory
- 143 Italie - IIT, Istituto Italiano di Tecnologia
- 144 Turquie - Gümüşhane Üniversitesi
- 145 Suisse - WSP Ingénieurs Conseils SA
- 146 Mexique - UADY, Autonomous University of Yucatan
- 147 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Ferrara
- 148 Italie - Università di Ferrara
- 149 France - MARCELEON, Cabinet d'ingénierie juridique et foncière
- 150 Allemagne - Springer Nature
- 151 Italie - CSIL (Economic Research Institute)
- 152 Suisse - ETHZ, Swiss Federal Institute of Technology Zurich
- 153 Espagne - UAH, Universidad de Alcalá Madrid
- 154 France - CIA, Conseil Ingénierie Acoustique
- 155 France - Evinerude, Bureau d'études environnementales
- 156 France - LPCA, Laboratoire de Physique de Clermont Auvergne
- 157 France - Université Clermont Auvergne
- 158 Australie - ANSTO, Australien Synchrotron
- 159 Inde - Brahmananda Keshab Chandra College
- 160 États Unis d'Amérique - ANL, Argonne National Laboratory
- 161 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Lecce
- 162 Italie - Università di Palermo
- 163 Pologne - Wrocław University of Science and Technology
- 164 États Unis d'Amérique - Rutgers University
- 165 États Unis d'Amérique - Princeton University
- 166 Italie - Università di Padova

- 167 Turquie - IUE, Izmir Ekonomi Üniversitesi
- 168 Turquie - Ege Üniversitesi
- 169 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Gruppo Collegato di Udine
- 170 Italie - Università di Udine
- 171 États Unis d'Amérique - University of Massachusetts Amherst
- 172 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Roma
- 173 Espagne - CELLS/ALBA, Consortium for the Construction, Equipment and Exploitation of the Synchrotron Light Laboratory
- 174 France - LPSC, Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie
- 175 France - Université Grenoble Alpes
- 176 Italie - Università degli Studi di Napoli Parthenope
- 177 États Unis d'Amérique - National High Magnetic Field Laboratory
- 178 États Unis d'Amérique - Florida State University
- 179 Afrique du Sud - University of Johannesburg
- 180 Espagne - IGFAE, Instituto Galego de Fisica de Altas Enerxías, Universidade de Santiago de Compostela
- 181 Royaume Uni - LSE, London School of Economics
- 182 Espagne - Universidade de Santiago de Compostela
- 183 Royaume Uni - Imperial College London
- 184 États Unis d'Amérique - MIT, Massachusetts Institute of Technology
- 185 France - CETU, Centre d'Etude des Tunnels
- 186 Royaume Uni - University of Liverpool
- 187 Suisse - Linde Kryotechnik AG
- 188 Suisse - ILF Consulting Engineers
- 189 Danemark - NBI, Niels Bohr Institute
- 190 Japon - Hokkaido University
- 191 République Tchèque - CUNI, Charles University
- 192 Espagne - Universidad de Granada
- 193 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Firenze
- 194 Malte - University of Malta
- 195 États Unis d'Amérique - BU, Boston University
- 196 Turquie - IBU, Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi
- 197 Allemagne - Julius-Maximilians-Universität Würzburg
- 198 Australie - University of Adelaide
- 199 Finlande - HIP, Helsinki Institute of Physics, University of Helsinki
- 200 Belgique - ULB, Université Libre de Bruxelles
- 201 Allemagne - IMA, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart
- 202 Belgique - CP3, Centre de Cosmologie, de Physique des Particules et de Phénoménologie, Université Catholique de Louvain
- 203 Pays Bas - NIKHEF, Nationaal instituut voor subatomaire fysica

- 204 République Populaire de Chine - IHEP, Chinese Academy of Sciences
- 205 Mexique - UAS, Universidad Autónoma de Sinaloa
- 206 Autriche - BOKU, Universität für Bodenkultur Wien
- 207 États Unis d'Amérique - Purdue University
- 208 Inde - University of Delhi
- 209 France - Ginger BURGEAP, bureau d'études en environnement
- 210 Royaume Uni - King's College London
- 211 États Unis d'Amérique - University of Maryland
- 212 Japon - KEK, High Energy Accelerator Research Organization
- 213 Suisse - Geoenergy, Reservoir Geology and Basin Analysis Group
- 214 France - SETEC International, Société d'ingénierie en charge des transports et des infrastructures
- 215 Turquie - KÜLTÜR, Kırıkkale Üniversitesi
- 216 France - SETEC LERM, Société d'ingénierie conseil en matériaux de construction
- 217 Mexique - BUAP, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
- 218 États Unis d'Amérique - Stanford University
- 219 États Unis d'Amérique - University of Pittsburgh
- 220 Autriche - MUL, Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Subsurface Engineering, Geotechnik und unterirdisches Bauen
- 221 Autriche - MUL-ZaB, Underground Research Center, Zentrum am Berg
- 222 Espagne - IFAE, Institut de Física d'Altes Energies
- 223 Suisse - FHNW, University of Applied Sciences Northwestern Suisse
- 224 Inde - UPES, University of Petroleum and Energy Studies
- 225 France - GANIL, Grand Accélérateur National d'Ions Lourds
- 226 France - Université Caen Normandie
- 227 Brésil - UFRGS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul
- 228 Allemagne - Technische Universität Darmstadt
- 229 Pologne - University of Silesia in Katowice
- 230 Portugal - Universidade de Coimbra
- 231 Brésil - UFPel, Universidade Federal de Pelotas
- 232 États Unis d'Amérique - University of California Santa Cruz
- 233 Italie - Università del Salento
- 234 États Unis d'Amérique - Brown University
- 235 États Unis d'Amérique - University of California Berkeley
- 236 Italie - Università di Torino
- 237 États Unis d'Amérique - Johns Hopkins University
- 238 République Populaire de Chine - Fudan University
- 239 France - LAPTh, Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de Physique Théorique
- 240 République Populaire de Chine - Dongguan University of Technology

- 241 Turquie - Kahramanmaras, Sütçü Imam Üniversitesi
- 242 Mexique - UNACH, Universidad Autónoma de Chiapas
- 243 Mexique - MCTP, Mesoamerican Centre for Theoretical Physics
- 244 Mexique - UAZ, Universidad Autónoma de Zacatecas
- 245 Finlande - University of Jyväskylä
- 246 Allemagne - Technische Universität Dortmund
- 247 Royaume Uni - Overleaf
- 248 États Unis d'Amérique - University of Virginia
- 249 États Unis d'Amérique - Cornell University
- 250 États Unis d'Amérique - FIT, Florida Institute of Technology
- 251 Suisse - Shirokuma GmbH
- 252 Pakistan - National Centre for Physics
- 253 Allemagne - Johannes Gutenberg Universität Mainz
- 254 Pakistan - PAEC, Pakistan Atomic Energy Commission
- 255 Inde - Mathabhanga College
- 256 Inde - Harish-Chandra Research Institute
- 257 Allemagne - MPIK, Max-Planck-Institut für Kernphysik Heidelberg
- 258 Suède - European Spallation Source ERIC
- 259 France - Centre de calcul de l'IN2P3
- 260 Allemagne - GSI, Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH
- 261 République de Corée - IBS, Institute for Basic Science, Center for Theoretical Physics of the Universe
- 262 Pologne - University of Warsaw
- 263 Slovénie - University of Ljubljana
- 264 Slovénie - Jozef Stefan Institute
- 265 France - Microhumus, Bureau d'étude et d'ingénierie spécialisé dans la gestion des sols dégradés
- 266 Allemagne - Fakultät für Physik und Astronomie, Universität Heidelberg
- 267 Turquie - Nigde Ömer Halisdemir Üniversitesi
- 268 Turquie - Giresun Üniversitesi
- 269 Hongrie - University of Miskolc
- 270 Grèce - NTUA, National Technical University of Athens
- 271 Suisse - Transmutex SA
- 272 Irlande - DIAS, Dublin Institute for Advanced Studies, School of Theoretical Physics
- 273 Pologne - AGH, University of Science and Technology
- 274 Iran - University of Science and Technology of Mazandaran
- 275 Royaume Uni - IPPP, Institute for Particle Physics Phenomenology, Durham University
- 276 Turquie - Bursa Uludağ Üniversitesi

- 277 République de Corée - YU, Yonsei University
- 278 Affiliated with an international laboratory covered by a cooperation agreement with CERN
- 279 France - CPT, Centre de Physique Théorique
- 280 France - Aix-Marseille Université et Université du Sud Toulon Var
- 281 République de Corée - KIAS, Korea Institute for Advanced Study
- 282 Canada - Carleton University
- 283 Grèce - FEAC Engineering P.C.
- 284 Grèce - UPATRAS, University of Patras
- 285 États Unis d'Amérique - University of Kansas
- 286 Grèce - AUTH, Aristotle University of Thessaloniki
- 287 Allemagne - IML, Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik
- 288 Allemagne - RWTH Aachen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
- 289 Suisse - ZHAW, Zurich University of Applied Sciences
- 290 Allemagne - Universität Münster
- 291 Afrique du Sud - University of the Witwatersrand
- 292 Autriche - Fachhochschule Technikum Wien
- 293 États Unis d'Amérique - University of California Irvine
- 294 États Unis d'Amérique - Northeastern University
- 295 France - ESI, European Scientific Institute
- 296 République de Corée - UOS, University of Seoul
- 297 République de Corée - KNU Kyungpook National University
- 298 République de Corée - KU, Korea University
- 299 Finlande - Tampere University
- 300 Royaume Uni - University of Edinburgh
- 301 Suisse - BG Ingénieurs Conseils
- 302 République Populaire de Chine - T.-D. Lee Institute
- 303 République Populaire de Chine - Shanghai Jiao Tong University
- 304 Italie - CNR, Consiglio Nazionale delle Ricerche
- 305 États Unis d'Amérique - University of Michigan
- 306 États Unis d'Amérique - University of Pennsylvania
- 307 États Unis d'Amérique - University of Minnesota
- 308 France - ESRF, European Synchrotron Radiation Facility
- 309 Royaume Uni - SUSSEX, University of Sussex
- 310 Italie - Università di Bari Aldo Moro
- 311 Royaume Uni - University of Bath
- 312 Italie - Scuola Normale Superiore di Pisa
- 313 Brésil - Universidade de São Paulo

- 314 Autriche - Universität Graz
- 315 Egypte - Center for High Energy Physics, Fayoum University
- 316 Egypte - Center of theoretical physics, British University in Egypte
- 317 Egypte - Cairo University
- 318 France - Sorbonne Université et Université Paris Cité
- 319 Italie - Università di Genova
- 320 Espagne - IFIC-CSIC/UV, Instituto de Física Corpuscular, Consejo Superior de Investigaciones Científicas/Universidad de Valencia
- 321 Suisse - Service de géologie, sols et déchets du canton de Genève
- 322 Estonie - NICPB, National Institute for Chemical Physics and Biophysics
- 323 Estonie - UT, University of Tartu
- 324 Espagne - Universidad de Salamanca
- 325 Mexique - UGTO, Universidad de Guanajuato
- 326 Suisse - Edaphos engineering
- 327 Allemagne - Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf
- 328 Inde - Tata Institute of Fundamental Research Mumbai
- 329 Belgique - Universiteit Gent
- 330 Italie - CNR-IOM, Consiglio Nazionale delle Ricerche
- 331 Autriche - JKU, Johannes Kepler Universität Linz
- 332 Norvège - University of Stavanger
- 333 Colombie - Universidad Nacional de Colombia
- 334 Italie - Trento Institute for Fundamental Physics and Applications
- 335 États Unis d'Amérique - Caltech, California Institute of Technology
- 336 Italie - Università della Calabria
- 337 Espagne - IFT, Instituto de Física Teórica, Universidad Autónoma de Madrid
- 338 Espagne - UPC, Universitat Politècnica de Catalunya
- 339 Portugal - Departamento de Física, Universidade do Minho
- 340 Portugal - Centro de Física das Universidades do Minho e do Porto
- 341 Portugal - LaPMET, Laboratory of Physics for Materials and Emergent Technologies
- 342 Norvège - University of Bergen
- 343 Chili - SAPHIR, Instituto Milenio de Física Subatómica en la Frontera de Altas Energías
- 344 Chili - Universidad Andres Bello
- 345 Brésil - IIP, International Institute of Physics
- 346 Japon - Tokyo International University
- 347 Turquie - Izmir Bakırçay Üniversitesi
- 348 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Laboratori Nazionali del Gran Sasso
- 349 Italie - Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale
- 350 Serbie - Vincă Institute of Nuclear Sciences
- 351 États Unis d'Amérique - Kennesaw State University

- 352 Italie - Università di Pavia
- 353 États Unis d'Amérique - Columbia University
- 354 États Unis d'Amérique - DOE, Department of Energy of the États Unis d'Amérique of America
- 355 France - IPSA, Institut Polytechnique des Sciences Avancées
- 356 Italie - Università degli Studi del Sannio
- 357 Pologne - UJ, Université Jagellonne (Cracovie)
- 358 Autriche - Universität Wien
- 359 Allemagne - Goethe-Universität Frankfurt, Institut für Angewandte Physik
- 360 Allemagne - HFFH, Helmholtz Forschungsakademie Hessen für FAIR
- 361 Roumanie - INCDTIM, National Institute for Research and Development of Isotopic and Molecular Technologies
- 362 États Unis d'Amérique - University of Arizona
- 363 Allemagne - Technische Universität Dresden
- 364 Lettonie - RTU, Riga Technical University
- 365 Royaume Uni - Lancaster University
- 366 Chypre - University of Chypre
- 367 Chypre - Cosmos Open University
- 368 Brésil - CBPF, Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas
- 369 Allemagne - Universität Bonn
- 370 Thaïlande - CMU, Chiang Mai University
- 371 États Unis d'Amérique - JLAB, Thomas Jefferson National Accelerator Facility
- 372 Équateur - ESPOL, Escuela Superior Politécnica del Litoral
- 373 Croatie - IRB, Rudjer Boskovic Institute
- 374 France - Air Liquide Advanced Technologies
- 375 Pays Bas - VU Amsterdam
- 376 France - INGÉROP ,Groupe d'ingénierie et de conseil en mobilité durable, transition énergétique et cadre de vie
- 377 Pologne - Warsaw University of Technology
- 378 Espagne - IFCA, Instituto de Física de Cantabria
- 379 Allemagne - Institut für Beschleunigerphysik und Technologie
- 380 Turquie - Uşak Üniversitesi
- 381 Japon - ICEPP, International Center for Elementary Particle Physics, University of Tokyo
- 382 Royaume Uni - Rudolf Peierls Centre for Theoretical Physics, University of Oxford
- 383 Royaume Uni - All Souls College, University of Oxford
- 384 Turquie - Akdeniz Üniversitesi
- 385 Suisse - Latitude Durable SARL
- 386 Espagne - USAL, Universidad de Salamanca
- 387 Allemagne - PRISMA+ Cluster of Excellence
- 388 États Unis d'Amérique - Michigan State University

389 Espagne - Universidad Complutense Madrid

390 Suisse - scMetrology SARL

391 Portugal - IST, Instituto Superior Tecnico, Universidade de Lisboa

392 Portugal - CeFEMA, Center of Physics and Engineering of Advanced Materials

393 Inde - Indian Institute of Science Education and Research Mohali

394 États Unis d'Amérique - NIU, Northern Illinois University

395 Inde - Banaras Hindu University

396 Slovaquie - Comenius University

397 Australie - Monash University

398 Slovaquie - Slovak Academy of Sciences

399 République de Corée - KAIST, Korea Advanced Institute of Science and Technology

400 France - Amberg Engineering Chambéry

401 Émirats arabes unis - Khalifa University of Science and Technology

402 États Unis d'Amérique - University of Tennessee

403 Autriche - WIFO, Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung

404 Brésil - Universidade do Estado do Rio de Janeiro

405 France - Mélica, NATURA SCOP, Études et expertises environnementales

406 Italie - Università LUM, Casamassima

407 Pays Bas - University of Twente

408 Iran - Arak University

409 Italie - Università di Trieste

410 France - ForestAllia, Cabinet de gestion et d'expertise forestières

411 Allemagne - Universität Siegen

412 États Unis d'Amérique - University of Oregon

413 Allemagne - Universität Rostock

414 Suisse - CEGELEC SA

415 Suède - KTH, Royal Institute of Technology, Stockholm

416 Suède - OKC, Oskar Klein Centre for Cosmoparticle Physics

417 États Unis d'Amérique - Brigham Young University

418 France - Expert foncier et agricole

419 Allemagne - ITSM, Institut für Thermische Strömungsmaschinen und Maschinenlaboratorium, Universität Stuttgart

420 France - École Normale Supérieure de Lyon

421 République Tchèque - CTU, Czech Technical University

422 États Unis d'Amérique - University of Chicago

423 États Unis d'Amérique - Baylor University

424 Royaume Uni - University of Birmingham

425 Royaume Uni - University of Southampton

- 426 Suisse - Swisstopo, Federal Office of Topography
- 427 Royaume Uni - Daresbury Laboratory, Science and Technology Facilities Council
- 428 Turquie - IZTECH, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü
- 429 Hong Kong - City University of Hong Kong
- + décédé(e)

Résumé

Le Volume 3 du rapport de faisabilité du FCC présente des études relatives au génie civil, à l'élaboration d'un scénario d'implantation du projet, ainsi qu'aux aspects environnementaux et de durabilité. Le rapport détaille les améliorations itératives apportées aux concepts de génie civil depuis 2018, en tenant compte des conditions du sous-sol, des exigences en matière d'accélérateurs et d'expériences, ainsi que de considérations de nature territoriale. Il décrit une configuration de génie civil techniquement réalisable et économiquement viable qui sert de base aux études de sous-sol détaillées, à la conception de la construction, à l'estimation des coûts et à la planification de la mise en œuvre du projet. En outre, le rapport met en évidence les études de sous-sol en cours dans des zones clés afin de soutenir le développement d'un modèle souterrain 3D amélioré pour la région.

Le rapport décrit le développement du scénario de projet basé sur l'approche d'optimisation itérative « Éviter-Réduire-Compenser ». Le scénario de référence établit un équilibre entre les performances physiques optimales et la compatibilité territoriale, les risques de mise en œuvre et les coûts. Des études environnementales sur le terrain couvrant près de 600 hectares et portant sur de nombreux aspects urbains, économiques, sociaux et techniques ont confirmé la faisabilité technique du projet et ont contribué à la préparation des documents d'entrée essentiels pour la phase d'autorisation officielle du projet. Le résumé souligne également l'ouverture d'un dialogue public dans le cadre de la procédure d'autorisation. Les résultats d'une évaluation complète de l'impact socio-économique, qui comprend aussi les effets environnementaux significatifs, sont présentés. Même dans les conditions les plus prudentes et les plus strictes, on obtient un ratio coûts-bénéfices positif pour la phase FCC-ee. Enfin, le rapport donne un bref résumé des études menées pour documenter l'état actuel de l'environnement.

Préface de la Directrice générale du CERN

En 2021, en réponse à la mise à jour 2020 de la stratégie européenne pour la physique des particules, le Conseil du CERN a lancé l'étude de faisabilité du futur collisionneur circulaire (FCC).

Le présent rapport résume l'immense travail effectué par la collaboration internationale pour le FCC pendant plusieurs années. Il couvre, entre autres, les objectifs et le potentiel de la physique, la géologie, le génie civil, l'infrastructure technique, l'implantation territoriale, les aspects environnementaux, les besoins en R&D pour les accélérateurs et les détecteurs, les bénéfices socio-économiques et le coût. Il constitue une contribution importante à la mise à jour en cours de la stratégie européenne pour la physique des particules.

L'étude de faisabilité a nécessité la participation active d'un large éventail de parties prenantes. En particulier, tout au long de l'étude, le CERN a été accompagné par ses deux États hôtes, la France et la Suisse et a travaillé avec des entités aux niveaux local, régional et national. Je suis très reconnaissante aux autorités et aux équipes des États hôtes pour leur aide précieuse. En outre, des parties importantes de l'étude ont été soutenues par l'Union européenne dans le cadre des programmes-cadres Horizon 2020 et Horizon Europe. L'étude a également bénéficié des contributions de laboratoires d'accélérateurs et d'universités de toute l'Europe, comme l'initiative CHART (Swiss Accelerator Research and Technology), ainsi que des Amériques, de l'Asie, de l'Afrique et de l'Australie.

Le programme FCC intégré proposé comprend deux étapes possibles : un collisionneur électron-positron servant à la production de bosons de Higgs, d'interactions électrofaibles et de quarks top fonctionnant à différents niveaux d'énergie au centre de masse, suivi ultérieurement par un collisionneur proton-proton fonctionnant à un niveau d'énergie de collision sans précédent d'environ 100 TeV. Les programmes de physique complémentaires de chaque étape correspondent aux priorités dans le domaine de la physique, telles qu'elles sont exprimées dans la mise à jour 2020 de la stratégie européenne pour la physique des particules.

L'une des principales réalisations de l'étude de faisabilité est le choix de l'emplacement de l'anneau du collisionneur et de l'ensemble de l'infrastructure, y compris les sites de surface et les puits d'accès, qui a été développé et optimisé pendant plusieurs années selon le principe « éviter, réduire, compenser ». Des études de durabilité ont évalué l'efficacité énergétique, l'utilisation des sols, la gestion de l'eau et des ressources, ainsi que l'impact socio-économique, garantissant que le FCC soit conçu conformément aux normes environnementales et sociétales les plus actuelles.

Je tiens à remercier toutes celles et tous ceux qui ont contribué à ce rapport pour leur travail acharné et leur engagement, qui ont permis d'obtenir les résultats exceptionnels présentés ici.

Fabiola Gianotti CERN,
Directrice générale

Préface du Président du conseil de collaboration FCC

S'appuyant sur la précédente étude de conception du futur collisionneur circulaire (FCC) menée entre 2014 et 2018, l'étude de faisabilité du FCC (2021-2025) a été réalisée grâce à une solide collaboration internationale, qui comprend désormais plus de 160 instituts dans le monde entier. Le « programme intégré » du FCC, développé dans le cadre de l'étude de faisabilité, consiste en un premier collisionneur électrons-positrons, le FCC-ee, qui pourra être suivi d'un collisionneur protons-protons, le FCC-hh. Cet échelonnement dans le temps tient compte des priorités dans le domaine de la physique, telles que formulées dans les mises à jour de la stratégie européenne pour la physique des particules de 2012 et 2020, ainsi que de l'état de préparation technologique et des coûts relatifs des FCC-ee et FCC-hh.

Au fil des ans, j'ai suivi de près l'avancement régulier de l'étude, en représentant la collaboration FCC au sein du Comité directeur international et en participant aux réunions annuelles de la Semaine FCC, qui comprennent les sessions du Comité de collaboration internationale. L'engagement et l'enthousiasme des membres de la collaboration ont toujours été impressionnants. L'effort collectif est clairement visible. La participation des étudiants et des chercheurs en début de carrière est en augmentation. Il existe vraiment une détermination commune et un élan pour aller de l'avant.

La forte collaboration internationale autour du FCC et son réseau mondial constituent une base solide pour l'avenir de ce projet. La communauté FCC ne cesse de s'agrandir, avec l'engagement croissant de nouveaux instituts et partenaires dans le monde entier. Ce large soutien sera essentiel lorsque le projet entrera dans sa prochaine phase.

L'étude de faisabilité du FCC démontre non seulement la viabilité technique du projet, mais aussi la force de la communauté internationale qui le soutient. Alors que nous passons à l'étape suivante de la phase de prise de décision, cet effort collectif est essentiel pour montrer la voie à suivre. Le FCC promet des opportunités scientifiques de grande envergure et des avantages à long terme pour l'innovation, la formation et la collaboration mondiale dans le domaine de la science et de la technologie.

Philippe Chomaz CEA,

Président du comité de collaboration internationale FCC

Table des matières

2.	<i>Implantation territoriale</i>	26
2.1.	Introduction	26
2.2.	Méthodologie pour développer un projet durable	27
2.2.1.	Approche	27
2.2.2.	Processus itératif	29
2.2.3.	Évaluation des scénarios	32
2.3.	Exigences et invariants	37
2.3.1.	Exigences motivées par la science et la technologie	37
2.3.2.	Invariants initiaux	42
2.3.3.	Objectifs volontaires	43
2.4.	Contraintes territoriales	46
2.4.1.	Grille de sensibilité territoriale	46
2.4.2.	Contraintes souterraines	49
2.4.3.	Topographie, bathymétrie et autres caractéristiques de surface	50
2.4.4.	Souplesse d'élaboration d'un scénario	50
2.5.	Variantes initiales	54
2.5.1.	Introduction	54
2.5.2.	Scénarios à l'ouest du Jura	55
2.5.3.	Scénario de circuit de type « hippodrome » au bord du lac	57
2.5.4.	Scénarios à l'est du Jura	58
2.6.	Scénario de référence	60
2.6.1.	Introduction	60
2.6.2.	Caractéristiques du scénario	61
2.6.3.	Paramètres du scénario	63
2.6.4.	Performances multicritères du scénario de référence	63
2.6.5.	Site PA	64
2.6.6.	Site PB	67
2.6.7.	Site PD	69
2.6.8.	Site PF	70
2.6.9.	Site PG	74
2.6.10.	Site PH	76
2.6.11.	Site PJ	78
2.6.12.	Site PL	79
2.6.13.	Site de Prévessin	83
2.6.14.	Conclusion	84
2.7.	Besoins en infrastructures territoriales	87
2.7.1.	Introduction	87
2.7.2.	Accès routier	87
2.7.3.	Accès à l'autoroute	90
2.7.4.	Accès au réseau ferroviaire	90
2.7.5.	Liaisons par convoyeurs	93
2.7.6.	Électricité pour la phase de construction	93
2.7.7.	Électricité pour la phase d'exploitation	94
2.7.8.	Approvisionnement en eau non traitée	98
2.7.9.	Gestion des eaux usées	100
2.7.10.	Services d'urgence	100
2.7.11.	Aspects territoriaux de la gestion des matériaux excavés	102
2.7.12.	Transport et mobilité	105
2.7.13.	Intégration paysagère et stratégie architecturale	107

2. Implantation territoriale

2.1. Introduction

Pour pouvoir prendre une décision motivée concernant une future infrastructure de recherche basée sur un collisionneur de particules et entamer le processus d'autorisation de projet nécessaire auprès des autorités nationales, un scénario spécifique d'implantation du projet doit être élaboré. Un tel scénario géolocalisé doit être équilibré, en tenant compte des trois piliers suivants :

1. l'excellence scientifique ;
2. la compatibilité territoriale ;
3. les risques liés à la mise en œuvre qui affectent les coûts et les délais.

Alors que la phase exploratoire de l'étude du FCC entre 2014 et 2018 [11] s'est concentrée sur la faisabilité « de principe » de l'accélérateur et les contraintes territoriales, les études réalisées entre 2019 et 2024 ont porté sur le développement d'un scénario de projet équilibré en tenant compte des trois piliers cités ci-dessus.

Le présent chapitre résume la méthodologie adoptée pour réaliser ce travail, documenté en [12]. Il met en lumière les variantes considérées et l'évolution vers un scénario de référence. Le scénario présenté sert de référence pour concevoir les différents éléments de la future infrastructure de recherche basée sur un collisionneur circulaire si la communauté scientifique mondiale décide de faire de cette installation sa priorité.

Le scénario de référence présenté est le résultat d'un total de 10 années d'étude d'une grande variété d'aspects scientifiques, techniques, financiers, sociétaux et environnementaux. Il porte sur une infrastructure d'une circonférence d'environ 91 km, comprenant huit sites de surface. Ce scénario est prévu pour être en mesure d'accueillir deux collisionneurs de particules distincts, dans un premier temps un collisionneur de leptons à haute intensité, puis un collisionneur de hadrons à haute énergie dans les phases ultérieures. La deuxième machine et ses expérimentations bénéficient grandement des équipements mis en place pour la première phase en raison de la valeur résiduelle de cette infrastructure, ce qui contribue à la durabilité globale de ce programme scientifique à long terme. Le processus itératif utilisé pour élaborer le scénario d'implantation de référence est résumé dans les sections suivantes.

La présence d'une communauté d'utilisateurs suffisamment importante s'engageant à mener des recherches scientifiques à l'aide des collisionneurs de particules pendant plusieurs décennies est une condition préalable pour justifier la construction d'une infrastructure de recherche de cette importance. Les scénarios prévoyant un collisionneur beaucoup plus petit, d'une circonférence inférieure à 90 km, ne permettraient pas d'offrir des performances et un programme de recherche susceptibles d'attirer une masse critique de scientifiques pendant une période prolongée. Le doublement des régions concernées, qui passent de deux à quatre, reflète l'objectif d'attirer le plus grand nombre possible de scientifiques vers une telle infrastructure. La taille et les caractéristiques de l'infrastructure permettent également d'envisager des activités scientifiques supplémentaires avec l'injecteur et les collisionneurs de particules, comme c'est le cas aujourd'hui au CERN avec le programme LHC.

En termes de compatibilité avec les conditions géologiques ayant une incidence sur les risques et les coûts de construction, seuls deux types de configurations répondent à l'ensemble des exigences : une infrastructure d'une circonférence comprise entre 89 et 91 km comportant huit sites de surface et une configuration d'une circonférence comprise entre 97 et 98 km avec douze sites de surface. Cependant, en ce qui concerne la disponibilité d'emplacements appropriés pour les sites de surface, il s'est avéré que les dispositions et les emplacements adaptés aux scénarios prévoyant un collisionneur d'une circonférence largement supérieure à 91 km et comprenant plus de huit sites en surface comportent des risques inacceptables quant à leur réalisation.

À ce jour, seuls les scénarios d'environ 91 km de circonférence avec huit sites de surface semblent

pouvoir satisfaire aux trois exigences suivantes :

1. Bonnes performances scientifiques du collisionneur de particules et de quatre sites d'expérience ;
2. Compatibilité avec les contraintes territoriales en surface et dans le sous-sol ;
3. Compréhension des conditions d'implantation du point de vue des coûts et des risques.

L'un des scénarios, nommé PA31, se distingue de tous ceux qui ont été élaborés de manière itérative selon la méthodologie « Éviter-réduire-compenser » [13] et analysés selon une approche multicritères recommandée pour les installations industrielles[14,15]. Il a fait l'objet d'une étude approfondie et d'une optimisation impliquant des recherches bibliographiques, des travaux sur le terrain et des discussions continues avec les services de l'administration publique dans les deux pays concernés et avec les principales parties prenantes dans la zone d'implantation. Si la décision est prise de poursuivre la mise en œuvre d'un projet, les conditions de ce scénario devront être analysées plus en détail, le scénario devra être amélioré et des plans détaillés devront être élaborés avant de pouvoir commencer la mise en œuvre.

Les contraintes territoriales et les cadres juridiques dans les États hôtes et dans l'Union européenne sont en constante évolution. Entre 2014 et 2023, plusieurs scénarios d'aménagement et d'emplacement ont dû être écartés en raison de ces changements. Les informations contenues dans le présent document et l'hypothèse de travail décrite ici sont donc provisoires. Pour que le projet se concrétise, il convient de procéder le plus tôt possible à la validation et au gel définitif d'un scénario garantissant les surfaces et les volumes souterrains nécessaires.

2.2. Méthodologie pour développer un projet durable

2.2.1. Approche

Dès l'origine, l'étude visait à définir une infrastructure de recherche scientifique conciliant, dans une démarche d'éco-conception [16,17], i) l'excellence scientifique, ii) la compatibilité territoriale et iii) la prise en compte de risques acceptables liés à l'implantation du projet. Il a donc fallu mettre en place un processus systématique permettant d'élaborer des scénarios de manière itérative, en tenant compte à tout moment de ces trois aspects essentiels. La démarche d'éco-conception adopte la méthodologie « Éviter-réduire-compenser » (voir Fig. 2.1), qui prend en compte tant les contraintes que les opportunités.

Ce processus, conforme au Code de l'environnement (France), à la loi sur la protection de l'environnement et à l'Ordonnance fédérale relative à l'étude de l'impact sur l'environnement (Suisse), répond parfaitement au souhait et à l'objectif de parvenir à une proposition reposant sur un scénario équilibré.

Dans l'idéal, toutes les parties prenantes interviennent dans le processus dès le début. Cependant, une approche itérative a dû être adoptée étant donné que l'emplacement de l'infrastructure n'était pas défini initialement, que la connaissance de l'évolution des conditions territoriales était incomplète, que les possibilités d'impliquer efficacement les parties concernées à tous les niveaux de la société étaient limitées, que la connaissance des choix technologiques à faire pour des périodes de plus de vingt ans évoluait et que la disponibilité des ressources pour les études conceptuelles et le personnel à ce stade très précoce était limitée.

Malgré ces contraintes, la communauté scientifique internationale est attachée à la transparence et à la participation du public. L'objectif est d'obtenir une « licence sociale d'exploitation » [18] en développant une entreprise scientifique pacifique dans le cadre d'une procédure de consultation publique systématique et structurée. Dans ce but, la phase d'étude de faisabilité a jeté les bases de la mise en œuvre d'une approche conforme aux cadres réglementaires et aux bonnes pratiques en vigueur en France et en Suisse. L'approche ne se limite pas à l'information du public, elle implique les parties prenantes concernées dans la discussion des différents segments du projet et, dans la mesure du possible, les fait participer aux aspects de la conception ayant une incidence sur leur territoire. Une procédure de consultation sera donc menée de manière équitable de part et d'autre de la frontière, en respectant les approches et les méthodes propres à chaque pays.

Le processus de mise au point du scénario a donc, dans un premier temps, fait appel aux informations bibliographiques disponibles. Il a intégré progressivement d'autres aspects puisqu'ils se sont révélés déterminants, ainsi que d'autres parties prenantes à mesure qu'elles ont été identifiées. C'est le cas, par

Implementation/Implementation-Figs/ERC.pdf

Fig. 2.1 : L'approche « éviter-réduire-compenser » (ERC), connue en France et ancrée dans la loi française sur l'environnement qui détermine le processus d'autorisation des projets.

exemple, de la participation des élus locaux (communes, structures intercommunales, départements, régions). En fonction du tracé, du nombre de sites de surface et de leur localisation, entre douze et vingt communes se sont trouvées, à un moment donné, directement impliquées et ont dû être consultées. Une trentaine d'autres communes pourraient être indirectement concernées s'agissant des besoins en matière d'accès ou de raccordements d'infrastructures, ou tout simplement parce que le tunnel passe sous leur territoire. D'autres parties prenantes devront être ajoutées pour l'élaboration d'un scénario de conception détaillé. Ces acteurs supplémentaires comprennent les opérateurs d'infrastructures locales (par exemple, pour l'eau, les canaux ou les réseaux routiers), les représentants des autorités locales, responsables de certains domaines de compétence (par exemple, la circulation routière et la nature) et les associations (chasse, pêche, tourisme, protection de l'environnement, préservation du patrimoine, développement économique, etc.). Il est prudent de prendre contact avec ces représentants dès que la probabilité que leur communauté soit affectée, d'une manière ou d'une autre, est suffisamment élevée, c'est-à-dire dès qu'il existe un scénario spécifique et une intention de projet. De cette manière, il est possible de tenir compte de leur disponibilité à être informés de la vision portée par le projet, de désigner les contacts pertinents et de prendre en compte la disponibilité limitée des membres du groupe d'étude. Cette étude a impliqué la participation de représentants élus, sélectionnés dans les localités directement concernées. Une participation systématique d'un plus grand nombre de parties prenantes pourra se révéler pertinente lors d'une phase ultérieure, lorsque l'intention du projet sera formulée et qu'il existera un scénario de référence permettant une participation utile.

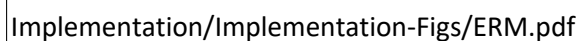
Les normes internationales applicables, NF EN ISO 14001 (management environnemental [19]) et (pour l'éco-conception) NF EN ISO 14006 [16] (voir Fig. 2.2) exigent une approche itérative.

Cette approche est également présentée de manière plus détaillée dans les bonnes pratiques pour les études d'impact sur l'environnement, établies par le ministère français de la Transition écologique, de la Biodiversité, de la Forêt, de la Mer et de la Pêche, ainsi que dans la norme NF EN ISO 31000 [20] sur le management du risque (page 8 de la norme ISO) (voir Fig. 2.3).



Implementation/Implementation-Figs/PDCA.pdf

Fig. 2.2 : L'approche Planifier-Développer-Contrôler-Ajuster en matière de management environnemental, définie dans la norme NF EN ISO 14001, section 0.4, page vii, est à la base d'une conception de type « éco-conception ».



Implementation/Implementation-Figs/ERM.pdf

Fig. 2.3 : Schéma de l'étude d'impact itérative, ministère français de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement, 2001, p. 27, voir note de bas de page 6). Bien que ce guide date de 2001 et que les réglementations spécifiques aient changé, les principes décrits dans le schéma sont toujours valables et recommandés aujourd'hui.

2.2.2. Processus itératif

Le processus d'élaboration de scénarios se fait suivant le schéma itératif Planifier-Développer-Contrôler, Ajuster (PDCA) et intègre l'approche Éviter-Réduire-Compenser (ERC).

Le processus commence au niveau macroscopique, par l'identification des principales contraintes et opportunités. Les contraintes sont enregistrées dans un système d'information géographique (SIG),

ce qui permet d'identifier rapidement, sur la base d'une carte, les zones à éviter et les zones dans lesquelles un site de surface ou un passage souterrain devrait être limité. Un tel système comprend de nombreuses couches de données. Aujourd'hui, le système d'information environnementale (SIE) du FCC, basé sur le SIG, comprend plus de 120 couches qui contiennent des informations détaillées et permettent également de construire des couches de synthèse avec des codes de couleur, comme le montre le Tableau 2.1. Les niveaux de la grille de sensibilité territoriale sont différents pour les territoires français et suisses [21]. Ils reposent sur les contraintes légales et réglementaires nationales et concernent des contraintes régionales et locales particulières résultant d'échanges avec des sociétés spécialisées dans les domaines des études d'impact environnemental et du développement de projets, ainsi qu'avec des services de l'administration publique. En règle générale, les contraintes prises en compte pour l'élaboration du scénario d'aménagement et d'emplacement du futur collisionneur sont très prudentes et dépassent parfois les contraintes légales et réglementaires requises dans plusieurs domaines afin de garantir une bonne compatibilité territoriale, dans le respect du patrimoine local et culturel connu.

Les scénarios ont été soigneusement vérifiés par rapport à ces différentes zones d'intérêt et une pondération a été effectuée pour déterminer s'il fallait continuer à prendre en considération les emplacements soumis à des contraintes connues, ou encore écarter le scénario d'emplacement en raison de sa nature locale particulière de grande valeur. La même contrainte stricte a été appliquée aux périmètres d'eau potable élargis, qui ont été exclus en tant que sites de surface, bien que, d'un point de vue réglementaire, les constructions de sites de surface seraient autorisées dans ces zones.

Tableau 2.1 : Définition des niveaux de sensibilité territoriale représentant des contraintes pour la détermination de la configuration et de l'emplacement. Chaque niveau, codé par une couleur, représente plusieurs couches de données qui peuvent être visualisées sur une carte d'un système d'informations géographiques (<http://cern.ch/fcc-sensitivity-grid>).

Niveau	Désignation	Description
4	Inacceptable	Le niveau de contrainte ne permet pas d'envisager la zone pour l'emplacement d'un site de surface. Ces zones sont considérées comme des zones d'exclusion à éviter.
3	Forte	La zone n'est pas recommandée pour l'emplacement d'un site de surface, mais elle peut être envisagée si elle est décisive pour la faisabilité du projet, avec des mesures de réduction, de compensation
2	Tolérable	La zone est acceptable pour l'emplacement d'un site de surface avec des mesures de réduction, de compensation ou d'atténuation
1	Faible	La zone peut être envisagée pour l'emplacement d'un site de surface sans autres mesures notables. Une compensation peut toujours être

Cette étape permet de définir des classes entières pour les candidats à l'aménagement et à l'emplacement du collisionneur de particules. La sélection d'un candidat représentatif d'une classe permet d'affiner progressivement le choix entre les configurations et les emplacements envisagés en introduisant des informations supplémentaires obtenues à partir de l'étude de variantes prometteuses et en écartant des variantes dès que des obstacles sont détectés. Si un scénario est écarté, les principaux motifs d'exclusion sont analysés et l'ensemble des scénarios est analysé par rapport à ces conditions. Dans de nombreux cas, cela permet d'éliminer une classe entière de scénarios et d'établir des critères et des contraintes d'exclusion majeurs au niveau macroscopique. Cette approche permet de réduire l'espace des solutions et d'éviter d'examiner des scénarios irréalisables au cours des étapes ultérieures.

Les scénarios considérés comme potentiellement réalisables font l'objet d'une analyse plus approfondie avec des informations plus détaillées et d'autres parties prenantes sont impliquées. Le même processus d'élimination que ci-dessus est appliqué. Cette approche conduit à une définition progressive de critères et de zones d'exclusion, ainsi qu'à une sélection d'aménagements et d'emplacements probables qui peuvent ensuite être optimisés.

Concernant l'analyse territoriale, le processus commence à un niveau qui tient compte de la topographie, de la bathymétrie, de la géologie, de l'hydrographie, des zones de protection et du développement urbanistique. Puis, il s'élargit progressivement, incluant des aspects supplémentaires tels que l'accessibilité, les transports, les nuisances, les développements prévus potentiellement conflictuels, la disponibilité des ressources techniques et naturelles (par exemple, l'électricité ou l'eau). Ensuite, il intègre encore des éléments supplémentaires, tels que les facteurs sociaux, les objectifs locaux de préservation et de développement, la visibilité, la covisibilité ou les nuisances pour les parties prenantes concernées directement (par exemple, le voisinage) et indirectement (par exemple, les communes touchées par la circulation du chantier).

Le processus d'élaboration des scénarios nécessite une phase d'analyse plus fine, visant la participation directe des parties prenantes et des acteurs locaux pour élaborer un scénario adapté au niveau de la parcelle, toujours en tenant compte des trois enjeux principaux (science, territoire, implantation) dans le cadre de l'approche de développement de projet « éviter-réduire-compenser », qui s'améliore de manière itérative.

Le choix d'un scénario de référence étant une condition préalable aux études de terrain, à l'évaluation de l'impact sur l'environnement et aux travaux de conception technique, le dialogue avec les parties prenantes publiques pourrait également être progressivement défini et entamé. Compte tenu de l'accompagnement précieux des deux États hôtes du CERN et de leurs conseils en matière d'implication du public dans les projets de développement territorial, la collaboration mobilisée pour l'étude a demandé au CERN de consulter la Commission nationale du débat public (CNDP) française en 2024. Une première analyse aboutissant à une liste de recommandations a été rendue publique le 6 mars 2025 [22]. Compte tenu de ces recommandations et du contexte transfrontalier du scénario du collisionneur de particules, il a été décidé d'étendre la collaboration avec la CNDP pour préparer les processus ultérieurs d'implication du public au cas où la collaboration scientifique internationale exprimerait l'intention de faire évoluer l'étude en direction d'un projet concret et d'entrer dans une phase préparatoire.

Les processus informels et formels d'implication du public sont idéalement menés le plus tôt possible, le gouvernement français rappelant régulièrement le principe et la nécessité de l'anticipation. Dans le même temps, il convient de veiller à ce que l'implication se fasse à un moment opportun. Cette approche vise à garantir que le scénario du projet pourra être adapté en fonction de l'implication des parties prenantes et en disposant d'informations techniques suffisantes pour informer les parties prenantes impliquées sur les contraintes et les besoins déterminants pour le projet et l'environnement dans lequel il sera finalement intégré.

Au fur et à mesure de l'intégration de nouvelles informations au cours de ce processus itératif, les recherches automatisées et cartographiques doivent être progressivement complétées, puis suivies de recherches manuelles, d'entretiens avec des personnes possédant une bonne connaissance du territoire, de visites sur le terrain et d'actions de concertation avec les parties prenantes (voir Fig. 2.4).

Implementation/Implementation-Figs/gradual_involvement.pdf

Fig. 2.4 : Au fur et à mesure de l'avancement des études d'aménagement et d'emplacement, des informations et des acteurs supplémentaires sont intégrés afin d'élaborer un scénario équilibré qui puisse répondre aux besoins de toutes les parties prenantes.

2.2.3. Évaluation des scénarios

Pour déterminer la valeur d'un scénario, pour évaluer s'il doit être optimisé ou écarté et pour pouvoir comparer les intérêts de différents scénarios les uns par rapport aux autres, un schéma d'analyse multicritères a été développé en s'inspirant d'une approche présentée par le Cerema, organisme français, dans ses lignes directrices pour l'analyse environnementale des infrastructures linéaires de transport [14]. Cette approche a été complétée en utilisant les Directives internationales pour les parcs industriels de l'ONUDI, publiées en novembre 2019 [15].

Comme l'exigent les cadres réglementaires français et suisses en matière d'autorisations environnementales, un projet d'aménagement doit être compris de manière large, en étendant l'analyse à différents aspects non techniques, tels que les parties prenantes indirectement concernées, les facteurs juridiques, réglementaires, sociaux et économiques, les réseaux (routes, voies ferrées, eau, électricité, canaux, infrastructures de service public et de sécurité), le patrimoine, l'aspect visuel, les nuisances (bruit, poussière, lumière, odeur, pollution) et les bénéfices potentiels. Comme le recommande le guide du Cerema, cette approche a été utilisée pour évaluer les intérêts relatifs de chaque variante et contribuer à l'élaboration de mesures de réduction, de compensation et de soutien dans le cadre d'un processus ouvert et transparent. En Suisse, plus spécifiquement dans le canton de Genève, un parallèle peut être établi avec le guide cantonal relatif à l'outil d'évaluation environnementale stratégique (EES) [23]. Lorsque des plans, des programmes ou des projets (PPP) sont élaborés, l'EES est parfois utilisée pour assurer une prise en compte systématique et précoce des enjeux environnementaux et de la santé humaine, comme le définit la loi sur la protection de l'environnement [24]. Elle constitue ainsi un outil d'aide à la décision et de pesée des intérêts selon plusieurs scénarios.

Les résultats d'analyse multicritères font appel à des indicateurs qualitatifs normalisés afin de comparer la pertinence des différents scénarios. Son application au cours du processus d'élaboration de scénarios permet de repérer rapidement les types de scénarios qui présentent des avantages ou des inconvénients notables et de déterminer si les différences entre les scénarios sont majeures ou mineures. Cette approche présente également l'avantage d'apporter des éclaircissements sur les éléments qui influent le plus ou le moins sur la valeur du scénario et guide donc l'élaboration de nouveaux types de scénarios. Cette approche est ensuite utilisée dans les étapes ultérieures d'optimisation, par exemple, en ce qui concerne le déplacement des puits et des sites de surface vers des endroits plus appropriés et la prise en compte de la disponibilité des infrastructures existantes (par exemple, routes, voies ferrées, fourniture et traitement de l'eau, électricité), des documents de planification urbaine (PLU, PLUi, PADD, SCoT, PDcn, PDcom) et des synergies et des opportunités (par exemple, fourniture de chaleur résiduelle, partage d'infrastructures techniques ou réduction des distances de transport).

La liste des critères est constituée de neuf thèmes, comprenant chacun plusieurs critères détaillés. Ces critères couvrent les différents thèmes pertinents pour une mise en œuvre. Il a été pris en compte 32 facteurs environnementaux, la configuration des scénarios déterminant les performances en matière de recherche scientifique, les coûts de mise en œuvre et les risques :

1. Statut du terrain
 - (a) Disponibilité des parcelles
 - (b) Propriété clairement définie
 - (c) Prix de la parcelle
 - (d) Temps d'acquisition et difficultés attendues pour obtenir les droits
 - (e) Coût de développement de la parcelle
2. Connectivité
 - (a) Distance par rapport aux infrastructures de transport, industrielles et autres
 - (b) Distance par rapport aux zones habitées
3. Matières premières et services
 - (a) Disponibilité des matières premières pour la construction et des ressources pour l'exploitation
 - (b) Proximité des prestataires de service

4. Caractéristiques physiques
 - (a) Taille et forme des parcelles
 - (b) Topographie
 - (c) Profondeur des puits
 - (d) Conditions de drainage et d'assainissement pour la construction
 - (e) État des sols en surface
 - (f) Ressources en eau
 - (g) Accessibilité
 - (h) Conditions du sous-sol (physiques)
 - (i) Conditions du sous-sol (réglementaires)
5. Infrastructures
 - (a) Accessibilité de l'énergie électrique
 - (b) Réseau de communication
 - (c) Eau à usage industriel
 - (d) Eau potable
 - (e) Points d'évacuation des eaux usées, de collecte des eaux pluviales, d'élimination et de traitement
 - (f) Zones de stockage et de traitement temporaires pendant la construction
6. Facteurs environnementaux et sociaux
 - (a) Contraintes environnementales existantes
 - (b) Faune et flore
 - (c) Existence de contraintes de construction
 - (d) Contraintes adjacentes
 - (e) Nuisances
 - (f) Disponibilité et accessibilité de la main-d'œuvre
 - (g) Implication des autorités locales
 - (h) Soutien de la société civile
7. Configuration
 - (a) Géométrie
 - (b) Taille
 - (c) Lignes de transfert
8. Coût de mise en œuvre
9. Risques liés à la mise en œuvre

Pour chaque scénario, six ensembles de critères ont été évalués individuellement pour chacun des emplacements candidats pour les sites de surface de ce scénario (statut du terrain, connectivité, matières premières et services, caractéristiques physiques, infrastructures, facteurs environnementaux et sociaux) et trois critères de haut niveau ont été pris en compte pour le scénario global (configuration, coûts et risque).

Des feuilles de calcul ont été créées pour chacun des scénarios, afin d'attribuer à chaque critère une note qualitative comprise entre -2 et +2, selon une grille d'évaluation prédéfinie, avec des conditions standardisées. La note « 0 » représente une évaluation neutre de l'indicateur. Pour chaque critère de haut niveau, les notes des sous-critères qui le composent ont été additionnées pour fournir un indicateur de ce critère. La feuille de calcul indique également les notes des macro-critères et présente, pour la totalité des critères, une note finale sous la forme d'un pourcentage compris entre 0 et 100. Enfin, les valeurs des critères sont synthétisées pour fournir des indicateurs pour 1) l'excellence scientifique, 2) les aspects territoriaux et 3) la pertinence de l'implantation du projet.

Cette approche permet non seulement d'estimer rapidement la valeur d'un scénario et de le comparer à d'autres, mais aussi de mettre en évidence les critères insuffisamment connus et nécessitant une étude approfondie.

Des valeurs ont été attribuées par l'équipe pluridisciplinaire aux indicateurs qualitatifs dans le cadre d'un processus collaboratif, sur la base d'études bibliographiques et cartographiques, d'analyses de bases de données, de requêtes de systèmes d'information géographique, de simulations et de modélisations. Des visites et des enquêtes sur le terrain ont également été organisées, ainsi que des entretiens sur les tracés les plus adaptés, effectués avec le personnel des services administratifs des deux États hôtes (par exemple, DT, GESDEC, OCEV, OCAN, OCT en Suisse, DDT 01 et DDT 74 en France), la consultation d'experts œuvrant dans différents domaines techniques (Cerema, Ecotec, HydroGéo, ILF, GADZ, concepteurs d'accélérateurs de particules travaillant dans de nombreux instituts partenaires, géologues employés dans de nombreuses universités partenaires) et les retours des acteurs locaux pendant les réunions de travail avec les municipalités, les structures intercommunales et les élus.

L'inconvénient de cette approche est qu'elle se borne à additionner toutes les valeurs et d'en faire la moyenne. Dans certains cas, il peut y avoir un obstacle lié à des aspects territoriaux ou scientifiques ou à l'implantation du projet. Cependant, le calcul de la moyenne fait qu'une seule valeur faible ne fera que dégrader le classement général, mais ne fera pas nécessairement apparaître le point de blocage dans la synthèse. L'analyse multicritères a donc été complétée par une évaluation globale du scénario, qui a permis de mettre en évidence l'intérêt potentiel d'un scénario le rendant particulièrement préférable aux autres ou indiquant si le scénario est compliqué ou irréalisable. Ainsi, les scénarios présentant des obstacles continuent d'être analysés et enregistrés, mais ils sont rejetés même si la valeur d'un indicateur thématique (performance scientifique, compatibilité territoriale ou mise en œuvre du projet) est supérieure à la valeur de seuil acceptable pour cet élément. On peut citer comme exemple de telles situations la forte probabilité de faire face à des caractéristiques géologiques qui exposeraient le projet à un risque élevé inacceptable (rencontre de karst, conflit éventuel avec la présence de nappes phréatiques, traversée d'une faille majeure, présence d'aquifères à haute pression), des sites patrimoniaux présentant des incompatibilités avec une installation technique, des zones résidentielles trop denses, des incompatibilités avec les politiques de développement locales ou régionales, une circonférence de collisionneur qui ne permettrait pas de mener le programme de recherche scientifique pour des raisons techniques ou qui ne permettrait pas la viabilité de son exploitation (par exemple, une circonférence de collisionneur nettement inférieure à 90 km). Le classement est mis en évidence dans des diagrammes de synthèse, tels que celui qui est présenté à titre d'exemple à la Fig. 2.5. L'illustration montre également les limites de l'analyse multicritères : par exemple, deux emplacements de sites de surface du scénario PA0 avec douze sites envisagés lors de la première phase exploratoire sont situés dans des zones considérées comme des points de blocage, mais cela est seulement visible sur la fiche individuelle de chaque site. La seule approche synthétique en trois colonnes ne permet, cependant, pas de visualiser ces critères d'exclusion et doit, par conséquent, être complétée par une brève description textuelle.

En fait, les enjeux territoriaux (T), d'implantation (I) et scientifiques (S) peuvent être facilement visualisés et comparés grâce à cette approche qualitative standardisée. La Figure 2.6 met en évidence l'intérêt de l'hypothèse de travail du scénario actuel PA31, qui en fait un scénario privilégié pour l'analyse territoriale et technique détaillée. Ces vues d'ensemble ont permis de comprendre que les scénarios comprenant douze sites ne répondent pas aux conditions requises pour être soumis à une étude approfondie. Cette approche a permis de poursuivre l'optimisation en comprenant comment l'amélioration d'un site pouvait éventuellement diminuer les performances d'un autre site, et donc de retenir des scénarios en vue d'une optimisation ultérieure, à même d'améliorer tous les sites individuellement, mais aussi le scénario dans son ensemble.

À mesure que des informations supplémentaires sont disponibles, l'évaluation change et il faudra donc optimiser le scénario jusqu'à ce qu'une décision de poursuite d'un projet de construction puisse être prise. L'avantage de l'approche systématique est qu'elle permet de démontrer l'existence d'une amélioration continue du scénario du projet, sur la base de la compréhension croissante des conditions limites et de la prise en compte des contributions des parties prenantes, au cours d'une évaluation environnementale et du processus d'autorisation du projet.

Une centaine de scénarios différents environ ont été élaborés et analysés individuellement (voir Fig. 2.7).



Implementation/Implementation-Figs/PA0-0.1-TIS.pdf

Fig. 2.5 : Exemple de visualisation de la synthèse de l'analyse multicritères d'un scénario (PA0-0.1). Le scénario semble faisable, même si la faisabilité territoriale serait faible. Cependant, en examinant chaque site, on peut constater de nombreux points de blocage.



Implementation/Implementation-Figs/PA31-4.0-TIS.pdf

Fig. 2.6 : : Synthèse de l'analyse multicritères du scénario de référence PA31-4.0.

Finalement, les dix scénarios les plus prometteurs (PA0-0.1, le scénario élaboré pour le rapport d'étude conceptuelle, s'est révélé non réalisable et sert uniquement de base de référence en matière de performances) ont été retenus pour un examen avec des experts de différents domaines de développement de projets. Les scénarios ont été classés à l'aide de la méthode quantitative VIKOR [25] qui a été appliquée à l'analyse multicritères effectuée (voir Fig. 2.8). L'algorithme permet d'évaluer différents facteurs multicritères avec différentes unités et échelles, ainsi qu'avec des objectifs de valeurs minimales et maximales différents, voire contradictoires. Les critères VIKOR suivants ont été définis pour l'établissement du classement :

1. Nombre de sites : Une configuration à huit sites offre quatre points d'interaction pour le collisionneur de leptons, contre seulement deux points d'interaction pour la configuration à douze sites. L'objectif a donc consisté

Implementation/Implementation-Figs/100-scenarios.pdf

Fig. 2.7 : : Une centaine de scénarios d'emplacement différents environ ont été étudiés et analysés individuellement.

à réduire au maximum le nombre de sites, avec une contribution pondérée de 5 %.

2. Longueur totale des sections courbes : Une longueur de circonférence plus grande débouche sur une performance scientifique plus élevée ou une plus grande simplicité de réalisation. L'objectif a donc consisté à augmenter au maximum la circonférence, avec une contribution pondérée de 5 %.
3. Compatibilité territoriale : La compatibilité territoriale, la facilité de mise en œuvre et la performance scientifique reçoivent la même pondération, à savoir 30 % chacune. Chacun de ces trois piliers doit être maximisé et ceux-ci doivent être équilibrés pour garantir la faisabilité du scénario. La faisabilité de chaque scénario ne peut être déterminée qu'au moyen d'une analyse détaillée.
4. Compatibilité de la mise en œuvre technique et de la construction avec les contraintes géologiques, la configuration et l'aménagement : Maximiser avec une pondération de 30 %.

5. Performance scientifique prenant en considération la configuration et les difficultés techniques du scénario : Maximiser avec une pondération de 30 %.

Il en a résulté que le scénario le plus prometteur est une configuration à 8 sites avec une circonférence totale de l'ordre de 91 km. Ce scénario a permis de dégager des marges résiduelles suffisantes pour procéder à d'autres optimisations. Parallèlement, tous les autres scénarios élaborés ne sont plus considérés comme faisables, soit en raison de la perte d'emplacements durant les années de réalisation des études ou d'incompatibilités inacceptables avec les conditions territoriales ou avec les conditions géologiques, soit du fait d'une performance scientifique trop faible qui ne permet pas d'attirer durablement des chercheurs du monde entier. C'est pourquoi le scénario PA31 a été considéré comme devant faire l'objet d'études plus approfondies, comprenant notamment des études du sous-sol et des études détaillées sur le terrain pour couvrir les aspects environnementaux. Les optimisations ont conduit aux versions 3.0 et 4.0 pour lesquelles les performances sont également présentées.



Fig. 2.8 : Classement basé sur une analyse multicritères des scénarios de mise en œuvre les plus prometteurs en 2022 avec les performances des améliorations progressives de la classe de scénario de référence PA31.

2.3. Exigences et invariants

2.3.1. Exigences motivées par la science et la technologie

Configuration

Un ensemble de paramètres fondamentaux pour la conception de l'accélérateur de particules constituent les exigences de départ pour l'élaboration d'un scénario. Les paramètres de conception déterminant la taille globale de la configuration ne peuvent pas être choisis arbitrairement. Ces paramètres comprennent notamment la géométrie de la configuration (par exemple, une symétrie ou une périodicité des secteurs impliquant un nombre spécifique de sites de surface), la longueur des cellules curvilignes de base,

appelées « arcs » (qui se répètent comme les différents éléments d'une chaîne pour construire les secteurs curvilignes), le nombre de cellules d'arc de l'accélérateur à répéter et les longueurs des différents types de sections droites entre les arcs. La Figure 2.9 montre deux géométries fondamentales de configuration utilisées dans les études de configuration et d'emplacement. La première géométrie (image de gauche) sert de point de départ : elle regroupe trois sites d'expérience dans la partie supérieure de la géométrie. Elle offre plus de liberté quant au déplacement des différents sites de surface, mais elle nécessite douze sites de surface. La deuxième géométrie (image de droite) représente l'évolution actuelle : les quatre sites d'expérience sont répartis de manière égale (en haut, à droite, en bas, à gauche) et seuls huit sites de surface sont nécessaires. Cependant, la liberté de déplacement des sites est plus faible qu'avec la première géométrie.

Les exigences suivantes ont été initialement fixées et ont dû être adaptées au cours de l'élaboration d'un scénario visant à satisfaire les contraintes d'implantation territoriale.

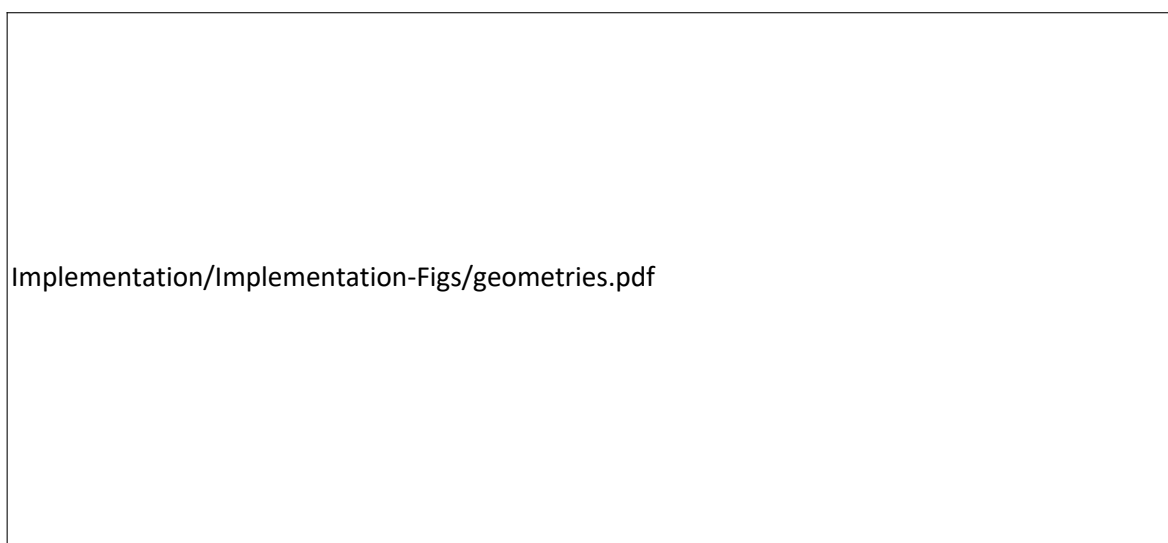


Fig. 2.9 : Deux configurations différentes pour le collisionneur. L'image de gauche montre une configuration comprenant douze sites, basée sur une géométrie en symétrie miroir. L'image de droite montre une configuration comprenant huit sites, basée sur la répétition d'un module de secteur de base. Les arcs (bleus) sont séparés par des sections droites (segments verts et rouges).

La simple symétrie miroir initiale a été abandonnée au profit d'une quadruple répétition d'un secteur de 90° , autrement dit, une symétrie d'ordre quatre. La configuration initiale (12 sites) permettait de regrouper 3 sites d'expérience proches les uns des autres à proximité du site principal du CERN, conduisant à des distances plus courtes entre les sites de surface et à une plus grande flexibilité pour rallonger et réduire les côtés Nord et Sud. La géométrie actuelle (8 sites) permet une conception plus régulière et facilite donc les processus d'optimisation des performances. Le collisionneur de leptons peut également avoir quatre points d'interaction.

Circonférence totale

L'objectif initial était de concevoir une infrastructure de collisionneur de particules d'une circonférence d'environ 100 km. Une réduction de 10 %, soit une circonférence de 90 km, est considérée comme la limite inférieure acceptable, en deçà de laquelle les performances obtenues pour la recherche scientifique deviendraient trop limitées. En effet, plus la circonférence est petite, plus le rayon des sections courbes diminue et plus la courbure est prononcée, ce qui entraîne des pertes d'énergie plus importantes, conduisant finalement à un scénario intenable du point de vue de l'efficacité énergétique et à la nécessité de disposer d'aimants plus puissants pour le collisionneur de hadrons, qui pourraient dès lors devenir irréalisable technologiquement.

Nombre de sites de surface

Les 12 sites initiaux ont été réduits à 8 sites avec l'adoption de la symétrie d'ordre quatre. En effet, il s'est avéré trop difficile de trouver un scénario d'emplacement approprié avec 12 sites offrant des accès intermédiaires, tout en restant compatible avec les contraintes territoriales et compte tenu des risques liés à la mise en œuvre du projet. Un scénario comprenant huit sites offre moins de souplesse pour l'étude d'emplacement, puisque les sites d'interaction fixes sont géographiquement opposés. Le nombre d'emplacements nécessaires appropriés à trouver est toutefois moins élevé.

Nombre de points d'interaction

Pour le collisionneur de hadrons, les deux géométries offrent la possibilité de quatre points d'interaction. Cependant, seul le schéma de symétrie d'ordre quatre offre la possibilité d'avoir quatre points d'interaction avec le collisionneur de leptons. Le scénario à 12 sites s'est également révélé difficile, en raison de la nécessité de combiner des expériences et des injections en deux points (PL et PB).

Longueur de la cellule d'arc

La longueur de la cellule d'arc du collisionneur de hadrons détermine la circonférence totale de la configuration. Dans un premier temps, une longueur de cellule de 213,03 m a été envisagée, Elle a finalement été prolongée jusqu'à 275,79 m. La circonférence totale dépend des multiples de cette longueur de cellule d'arc et ne peut donc pas être choisie arbitrairement. De cette manière, le collisionneur de leptons s'adapte aux exigences plus strictes du collisionneur de hadrons.

Nombre total de cellules d'arc

La taille des courbures du collisionneur de hadrons ne peut être augmentée ou diminuée qu'en insérant ou en retirant une cellule d'arc dans chaque courbure. La configuration générale doit rester symétrique. La configuration initiale avec 12 sites nécessitait 4 secteurs de 19 cellules courtes et 4 secteurs de 73 cellules longues. La configuration actuelle avec 8 sites nécessite 8 secteurs de 26 cellules, soit un total de 208 cellules. Cette exigence détermine la circonférence totale de l'infrastructure. De cette manière, le collisionneur de leptons s'adapte aux exigences plus strictes du collisionneur de hadrons.

Longueur totale des arcs

La configuration comprenant 12 sites comportait quatre arcs courts et quatre arcs longs. Les arcs longs étaient trop longs pour rester sans points d'accès intermédiaires, pour des raisons techniques et de sécurité du personnel. Il fallait donc placer un site supplémentaire à mi-chemin, à une distance d'environ 8 à 10 km de chaque extrémité. La configuration à 8 sites n'est plus tributaire de cette exigence. La longueur totale des arcs doit cependant permettre un fonctionnement sûr et la possibilité d'évacuer efficacement le personnel en cas d'urgence. La distance actuelle entre les sites d'accès, qui est d'environ 11,5 km, est considérée comme acceptable.

Harmoniques du système de radiofréquences

La stabilité et les performances du système de radiofréquences servant à l'accélération des particules subatomiques dépendent de la circonférence du collisionneur. Il faut également tenir compte du transfert des faisceaux de particules venant des tunnels SPS et LHC existants. Pour un collisionneur de 91 km de longueur, 3 possibilités ont été identifiées, offrant une flexibilité suffisante pour la conception du système de radiofréquences. Un collisionneur d'une circonférence comprise entre 90,7 et 90,8 km représente la meilleure option. Une longueur de 90,6 km est réalisable, mais réduit les fréquences des cavités du système radiofréquence plus que les autres. De cette manière, le collisionneur de leptons s'adapte aux exigences plus strictes du collisionneur de hadrons.

Longueur de la section droite aux points d'interaction

Il faut au moins 700 m de part et d'autre du point d'interaction pour concentrer les faisceaux du collisionneur afin d'atteindre les densités de faisceaux élevées nécessaires à l'obtention de fortes valeurs de luminosité. Les deux collisionneurs (lepton et hadron) ont des besoins en espace différents pour croiser les deux faisceaux,

donc le tunnel nécessite un élargissement d'environ 10 m, jusqu'à une distance de 1 400 m de chaque côté du point d'interaction.

Longueur de section droite aux sites radiofréquences

Une distance de 2 800 m entre 2 sections droites était initialement jugée adéquate pour accueillir les équipements radiofréquences qui accélèrent les faisceaux. Après diverses études d'intégration des équipements, on a constaté que cette valeur pouvait être réduite. Une distance de 2 030 m est désormais considérée comme la limite inférieure acceptable pour les systèmes et l'intégration des équipements auxiliaires.

Besoins en eau de refroidissement

Dans le but de préserver les ressources de manière responsable, les études en cours ont déjà permis de réduire les besoins d'un montant initial de 4,9 millions de m³ par an, à une fourchette comprise entre 1,6 million de m³ (mode Z) et 3,0 millions de m³ par an (mode tt). On peut s'attendre à des réductions supplémentaires grâce à l'inclusion du concept de la réutilisation de la chaleur, à la prise en compte des évolutions technologiques et au développement des synergies en matière de réutilisation de l'eau.

Besoins en électricité

Les besoins initiaux en énergie du collisionneur de leptons étaient compris entre 1,2 et 2,0 TWh par an, en fonction du mode d'exploitation. Les avancées progressives du développement du concept ont réduit ces valeurs à une fourchette comprise entre 1,0 et 1,77 TWh par an. Comme le scénario actuel comporte quatre points d'interaction au lieu de deux, des réductions supplémentaires sont possibles en limitant la puissance des radiofréquences, si une réduction de la luminosité intégrée annuelle est acceptable pour le programme de recherche scientifique. D'autres optimisations sont à attendre d'un concept de fonctionnement adaptatif et d'une réduction de la consommation d'énergie des systèmes qui sont mis hors tension ou réglés sur un mode d'économie d'énergie, lorsqu'ils ne sont pas nécessaires au fonctionnement et à la maintenance.

Pour le collisionneur de hadrons, une première estimation de la consommation annuelle d'énergie a été réalisée sur la base de la technologie actuelle des aimants supraconducteurs à des températures cryogéniques très basses. Cette estimation a été révisée en développant une solution qui fonctionne à des températures cryogéniques plus élevées pour permettre une consommation d'énergie nettement plus faible. L'utilisation d'un aimant supraconducteur à haute température permettrait d'augmenter encore la température de fonctionnement cryogénique. L'adaptation du plan opérationnel et l'introduction d'un plafond annuel de consommation d'énergie ramèneraient la consommation électrique annuelle à l'ordre de grandeur de celle du collisionneur de leptons. Un programme de R&D ciblé est cependant nécessaire pour développer la technologie. On dispose d'une fenêtre d'opportunité de l'ordre de plus de 35 ans pour atteindre cet objectif, si la décision de poursuivre est prise.

Besoins en espace pour les sites de surface techniques

Les besoins en espace des sites techniques de surface sont déterminés par les infrastructures techniques, dont les deux collisionneurs de particules auront besoin. Bien que le collisionneur de leptons nécessite beaucoup moins d'exigences que le collisionneur de hadrons qui suivra, les sites de surface doivent être en mesure d'accueillir les équipements supplémentaires, qui ne seront mis en place que pour la deuxième phase.

L'équipement minimal requis sur chaque site comprend une sous-station électrique, des convertisseurs de puissance pour alimenter les équipements de l'accélérateur de particules pour les secteurs dans les deux directions du site, des amplificateurs de puissance lorsqu'il existe un système de radiofréquences, une ventilation des tunnels et des cavernes, des systèmes de refroidissement de l'accélérateur à base d'eau non traitée, des systèmes de traitement de l'eau brute, des échangeurs de chaleur et des tours de réfrigération. La conception de l'accélérateur de particules n'étant pas encore arrêtée, il est difficile d'estimer l'espace nécessaire à ces systèmes. Par conséquent, les systèmes les plus avancés sont utilisés comme référence pour estimer les besoins en espace.

Outre les systèmes techniques, un espace est nécessaire pour le stockage temporaire des systèmes d'accélérateurs de particules qui seront installés sous terre et pour la manipulation des systèmes techniques à la surface. Dans le cas des sites dotés d'un système de réfrigération cryogénique, un espace est nécessaire pour stocker les cryogènes (hélium liquide, hélium gazeux et azote). Alors que le collisionneur de leptons ne nécessitera que deux sites dotés de systèmes de réfrigération cryogénique pour les systèmes de radiofréquences, chaque site accueillera une installation de réfrigération cryogénique pour le collisionneur de hadrons. D'autres besoins en espace moins importants sont liés aux routes du site, comme la nécessité de prévoir un espace de bureau de superficie limitée et de la place pour stocker des pièces détachées, des grues et du matériel de manutention.

L'hypothèse de travail est qu'une centaine de techniciens et d'ingénieurs par jour peuvent être présents lors des interventions d'installation, de maintenance majeure et de mise à niveau. Pendant la phase d'exploitation, la présence de personnel est limitée au strict minimum, en tirant parti au maximum des possibilités d'exploitation et d'intervention à distance. Aucune présence permanente de personnel n'est prévue pendant les opérations ordinaires.

Les besoins de surface nets du collisionneur de leptons actuel, pour les éléments de construction sur les sites techniques, sont les suivants : 2,2 ha pour PB, 2 ha pour PF, 4,4 ha pour PH et 2,6 ha pour PL. Un espace supplémentaire est nécessaire pour les installations de réfrigération cryogénique du collisionneur de hadrons et le stockage du cryogène, ainsi que pour des équipements techniques supplémentaires. La prise en compte des exigences relatives aux zones tampons vertes et à l'intégration paysagère porte les exigences à environ 3,5 à 4 hectares pour les sites techniques PB, PF, PL. Environ 8 ha sont nécessaires pour le site PH en raison de la taille initiale du système de réfrigération cryogénique et des difficultés topographiques qui nécessitent une intégration paysagère basée sur des terrasses. Les besoins en espace indiqués ne comprennent pas les exigences liées à la nécessité de s'adapter aux différentes contraintes topographiques, des besoins en espaces verts tampons et de l'intégration paysagère. Les exigences locales spécifiques sont donc plus élevées.

Les conceptions architecturales et l'intégration paysagère ultérieures viseront à réduire autant que possible la consommation d'espace.

Besoins en espace des sites d'expérience en surface

Outre les exigences des sites techniques, chaque site d'expérience a également besoin d'un hall de prémontage pour le détecteur de l'expérience. Pour limiter les besoins en surface, l'hypothèse de travail envisage que le détecteur sera assemblé sous terre. Les éléments devront cependant être contrôlés au niveau de la qualité, préassemblés et testés en surface dans un hall d'environ 1250 m². Il faut également prévoir un espace suffisant d'environ 1000 m² pour la manipulation des pièces et une zone tampon temporaire pour l'installation des aimants.

Un site d'expérimentation abrite généralement un centre de données, un espace de travail pour un groupe d'environ 50 scientifiques et ingénieurs, des salles de réunion et quelques bureaux, de petits ateliers, un centre informatique et des installations pour les visiteurs.

Pour le collisionneur de hadrons, la plus grande partie du détecteur, une bobine magnétique supraconductrice, ne peut pas être transportée directement sur les sites. Elle doit être fabriquée sur place. Pour cela, environ 7500 m² sont nécessaires en plus sur chaque site de surface. L'espace restera libre de toute construction pendant la première phase, celle du collisionneur de leptons, et sera réaménagé après l'assemblage et la descente de la bobine magnétique à la fin de la phase d'installation du collisionneur de hadrons.

L'hypothèse de travail est que jusqu'à 300 scientifiques, techniciens et ingénieurs peuvent être présents par jour pendant l'installation et les interventions majeures de maintenance et de mise à niveau. En phase d'exploitation, seule une petite équipe de moins de 20 personnes sera présente sur site. Du personnel supplémentaire sera présent pour gérer les installations destinées aux visiteurs.

Les besoins actuels en espace net du collisionneur de leptons pour les éléments de construction sur les sites scientifiques sont énumérés ci-après. Une superficie de 3 ha pour le site PA en raison de la possibilité d'exploiter l'espace du site de surface LHC existant Pt8. Si l'on inclut l'espace temporaire nécessaire à la production de la bobine de l'aimant supraconducteur de l'expérience du collisionneur de hadrons, l'espace requis passe à environ 4 ha. Les sites PD, PH et PJ requièrent environ 4 ha pour la phase du collisionneur de leptons et 5 ha pour la phase du collisionneur de hadrons. Les besoins en espace indiqués ne comprennent pas les exigences liées à la nécessité de s'adapter à différentes contraintes topographiques, des besoins en espaces verts tampons et à l'intégration paysagère.

Les exigences locales spécifiques sont donc plus élevées.

Les conceptions architecturales et l'intégration paysagère ultérieures viseront à réduire autant que possible la consommation d'espace.

2.3.2. Invariants initiaux

Un ensemble d'invariants a été défini au départ pour guider l'élaboration d'un scénario d'implantation visant à garantir qu'un ensemble minimum de critères concernant l'excellence scientifique, la compatibilité territoriale et le contrôle des risques du projet pourra être satisfait. Il s'agit d'une combinaison de contraintes d'évitement et de réduction, d'objectifs et d'exigences de haut niveau.

- Éviter les formations calcaires karstiques, les risques de pénétration d'eau à haute pression, les failles majeures connues et les zones d'instabilité sismique, ainsi que les déblais importants.
- Placer les structures souterraines dans la couche de molasse, dans toute la mesure du possible.
- Permettre une liaison techniquement réalisable avec l'infrastructure souterraine SPS du CERN et, si possible, avec les infrastructures du LHC.
- Creuser le tunnel à une profondeur suffisante sous le lit du lac pour garantir la stabilité du tunnel et de faibles coûts de maintenance à long terme. Le tracé peut être optimisé en déterminant la profondeur minimale sur la base d'études géophysiques et géotechniques du sous-sol pour un scénario privilégié. L'hypothèse actuelle est que le tracé du tunnel traversant le lac Léman se trouve à 100 m sous le lit du lac.
- Creuser le tunnel à une profondeur suffisante sous l'Arve, le Rhône et les Ussets pour garantir la micro-stabilité du tunnel, nécessaire pour un alignement précis de l'accélérateur et éviter les effets néfastes avec les éventuelles constructions de surface existantes.
- Limiter les surcharges sous les zones de la Mandallaz, de la Fillière et des Bornes (la profondeur minimale doit être précisée par des études de sous-sol spécifiques).
- Éviter les altitudes supérieures à 750 m pour les sites de surface afin de limiter la profondeur des puits et d'assurer une bonne accessibilité aux sites.
- Viser des profondeurs de puits inférieures à 250 m pour les sites scientifiques et à 400 m pour les sites techniques afin d'éviter des difficultés excessives pour l'installation des équipements de l'accélérateur et des détecteurs pour les expériences.
- Éviter les zones considérées comme des « zones d'exclusion » dans une grille de sensibilité territoriale établie avec l'organisme contractuel Cerema, Direction Départementale du Territoire en France, en recueillant des informations auprès de la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement et avec l'entreprise contractuelle Ecotec en Suisse, avec des informations supplémentaires recueillies auprès des services cantonaux du DT. Cette grille énumère les contraintes environnementales, d'aménagement du territoire, de zonage et stratégiques, ainsi que les contraintes de santé et de sécurité publiques avec différents niveaux de pertinence qui conduisent à la définition de zones à éviter et de zones où les constructions de surface et souterraines devront être limitées si elles ne peuvent être évitées.
- Privilégier la proximité des infrastructures stratégiques pour le projet (par exemple : lignes électriques du réseau, certains types de routes, stations-service d'autoroute, lignes ferroviaires) et se tenir à l'écart d'autres infrastructures (par exemple : sondes géothermiques, gazoducs, oléoducs).
- Rester en dehors des centres-villes, des villages et des hameaux afin de limiter les nuisances potentielles liées aux activités de construction et d'exploitation.
- Éviter autant que possible les zones soumises à des contraintes territoriales moins critiques et, s'il n'est pas possible de les éviter, réduire les superficies dans ces zones.
- Respecter l'impossibilité de déplacer individuellement les emplacements prévus pour les sites scientifiques où se croisent les faisceaux de particules et où se trouvent les détecteurs pour les expériences.
- Respecter les limites de déplacement des sites techniques le long des sections en alignement de l'anneau, à l'intérieur de ces sections, en fonction des possibilités offertes par les différents systèmes techniques nécessaires sur les sites techniques pour le fonctionnement des accélérateurs.

- Tenir compte de la contrainte de positionnement des puits à l'intérieur de l'anneau pour faciliter l'accès à la zone de transport dans le tunnel.
- Limiter à environ 400 m la longueur des tunnels de raccordement horizontaux allant des sites techniques vers les puits situés à l'intérieur de l'anneau. Il n'est pas exclu de construire un tunnel plus long mais cela entraînerait des surcoûts et des difficultés supplémentaires.
- Si c'est techniquement possible, limiter la superficie totale occupée des sites techniques à 5 ha et celle des sites d'expérience à 8 ha. Ces superficies comprennent les zones tampons, les aires de stockage et de transport, et tiennent compte des mesures de renaturation, de reconstitution, de remplacement ou de compensation. Dans la mesure du possible, rechercher des synergies avec les infrastructures existantes afin de réduire les superficies.
- Éviter les zones à topographie difficile (pentes raides et potentiellement instables, sols instables, zones présentant des risques d'inondation, terrains discontinus).

Assurer une connectivité routière adéquate (7 m de large, 2 voies, rayon de courbure de 20 m, pente nettement inférieure à 10 %, hauteur libre minimale de 4,4 m, compatibilité avec des poids lourds de 44 t jusqu'au réseau structurant conformément à l'article R312 du code de la route français).

- Maintenir une distance minimale de 100 m entre les zones résidentielles et les sites. En fonction des conditions topographiques et des éléments atténuant le bruit et la visibilité du site, cette distance peut atteindre 250 à 300 m.
- Éviter les zones agricoles protégées, sauf si elles sont essentielles à la faisabilité technique. – Se tenir à l'écart des sites du patrimoine naturel et humain, en évitant ainsi la covisibilité.
- Préserver autant que possible les vues et les zones de protection du paysage.
- Se tenir à l'écart des rivières et des ruisseaux (éviter d'avoir à modifier ou à stabiliser les berges). – Éviter les zones humides et éviter impérativement les zones protégées.
- Éviter les forêts protégées en raison de la nécessité de les défricher et de préserver la biodiversité existante, de leur inaccessibilité et de la topographie, sauf si ces zones sont essentielles à la faisabilité. Dans ce dernier cas, l'occupation des terres doit être limitée.
- Préférer des zones à proximité de lignes électriques de haute capacité (225 kV et 400 kV). – Rechercher les possibilités de connexion ou d'accès au système autoroutier.
- Rechercher les possibilités de connexion ou d'accès au système ferroviaire.
- Envisager l'utilisation de friches connues pour l'installation d'infrastructures techniques qui peuvent être à distance des sites (par exemple : sous-stations électriques, stations de pompage, tours de refroidissement) et pour l'aménagement de zones de compensation.
- Rechercher des scénarios qui permettent d'atteindre tous les sites de surface dans un délai raisonnable (30 minutes en voiture) à partir de points stratégiques de service et de fourniture (par exemple, CERN et CNRS/LAPP).
- Éviter la création de nouveaux postes de frontière et ne pas envisager de sites à cheval sur la frontière. – Éviter les vignes et les zones plantées d'arbres fruitiers.
- Préférer les terrains publics aux terrains privés, les terrains non bâtis aux terrains bâtis, les terrains inutilisés aux terrains utilisés (utilisations agricoles particulières telles que vignobles et cultures fruitières protégées) et les friches.

2.3.3. Objectifs volontaires

L'étude pluriannuelle a également permis de définir des objectifs volontaires susceptibles de contribuer à améliorer la compatibilité du projet au plan territorial. Ils ont été pris en compte dans les évolutions des scénarios et dans la mise au point d'un scénario d'emplacement préférentiel, à même de servir de référence et présenté dans les sections ultérieures du présent document.

Exploitation et maintenance durables

S'assurer que le scénario pourra être exploité et maintenu de manière durable. Pour cela, les installations techniques pertinentes (ateliers de haute technologie, bureaux) doivent être à proximité des sites. Par conséquent, il y a lieu de privilégier les scénarios qui tirent parti des synergies avec les sites existants du CERN et qui sont proches du LAPP du CNRS/IN2P3.

Protection des terres agricoles

Réduire au maximum l'utilisation de terres agricoles dans les deux États hôtes. Éviter les zones agricoles protégées, sauf si elles sont essentielles à la faisabilité.

Accessibilité des sites de surface par la route

Afin de limiter les besoins en construction de nouvelles routes et d'éviter d'utiliser trop de terrains, les sites de surface doivent soit se trouver directement sur les routes départementales existantes, soit ne nécessiter qu'une amélioration des routes d'accès existantes. Si de nouvelles routes sont indispensables, les besoins doivent être réduits au maximum.

Nuisances

Limiter les nuisances directes pour les habitants. Éviter le voisinage des zones résidentielles, la visibilité et la covisibilité. Éviter les emplacements sur des routes traversant des zones résidentielles. Éviter la proximité des sites du patrimoine naturel et du patrimoine humain. Prévoir des moyens d'évacuation des déblais par convoyeur en évitant les passages de camions dans toute la mesure du possible.

Intégration paysagère

Viser, autant que possible, à la préservation des vues et des zones de protection du paysage. Des études spécifiques réalisées par des architectes paysagistes sont nécessaires en vue d'un scénario privilégié durant une phase d'étude ultérieure.

Protection des eaux

Se tenir à l'écart des zones de protection des eaux, des rivières et des ruisseaux. Ne pas prélever d'eau dans les couches aquifères et éviter d'utiliser de l'eau potable pour les systèmes nécessitant de l'eau non traitée. Éviter d'avoir à stabiliser ou à modifier les berges. Des études spécifiques sont nécessaires en vue d'un scénario privilégié au cours d'une phase d'étude ultérieure.

Forêts

Respecter les zones forestières protégées et les arbres. Limiter le défrichement des forêts et l'abattage des arbres dans les deux États hôtes pour préserver la biodiversité. Éviter les zones forestières luxuriantes, dans la mesure du possible. Améliorer la résistance climatique par reconstitution des forêts faibles.

Synergies

Privilégier les emplacements susceptibles de créer des synergies avec les installations et infrastructures privées et publiques voisines. Il s'agit par exemple, de la disponibilité de postes de secours d'urgence et de brigades de pompiers, d'hôpitaux, de zones de développement commercial et industriel, d'entreprises de transformation alimentaire, d'infrastructures de travaux publics, de lignes électriques, d'axes de transport majeurs, de stations-service d'autoroute, de lignes ferroviaires et de projets de développement scolaire. Identifier la possibilité de fournir de la chaleur résiduelle dans un rayon de 5 km, de préférence aux équipements publics, aux grandes entreprises et aux logements résidentiels. Cette approche a déjà été mise en place par le CERN à Ferney-Voltaire et une telle infrastructure sert de démonstrateur pour la faisabilité (voir Fig. 2.10). Les exemples incluent notamment les entreprises de transformation du lait (production de fromage), les hôpitaux et les infrastructures de services de santé, les écoles, les casernes de pompiers, les prisons, les bureaux, les aéroports, les gares, les installations de loisirs (piscines et spas). La localisation des sites de surface à proximité

des services publics peut apporter une valeur ajoutée tangible à la région. Par exemple, l'élargissement considérable de l'étendue géographique a entraîné la nécessité de développer un concept d'intervention d'urgence basé sur la coopération avec les services régionaux de lutte contre l'incendie et les services de premiers secours. D'autres sites se prêtent particulièrement bien à l'organisation d'activités de loisirs supplémentaires autour de sites d'expérience de surface dotés de centres d'accueil des visiteurs. Des services supplémentaires, tels que des expositions, des restaurants et des salles de réunion, peuvent générer une valeur économique indirecte et induite, mais ils doivent être coordonnés avec les acteurs locaux afin de s'intégrer dans les stratégies et les plans de développement économique et touristique locaux.



Fig. 2.10 : Réseau de chaleur alimenté par le CERN en cours de construction à Ferney-Voltaire, France.

Réduction des besoins en infrastructures électriques

Pour limiter les effets et les impacts du développement d'infrastructures électriques, privilégier les scénarios situés à proximité de sous-stations et de lignes électriques à haute capacité.

Matériaux excavés

Limiter les volumes de matériaux excavés annuellement et réduire les transports routiers dans la mesure de la faisabilité technique et économique. Favoriser la réutilisation locale. L'objectif est de maintenir le volume de matériaux excavés annuellement à moins de 10 % des volumes générés dans chaque territoire (Région Auvergne-Rhône-Alpes en France : 24,2 Mt en 2021 [26], cantons de Genève [27] et de Vaud [28] en Suisse : 3,071 Mt en 2022).

Utilisation des sols

L'objectif de l'élaboration du scénario est de développer un scénario qui maintient la consommation foncière aussi basse que possible tout en répondant aux besoins des installations de surface requises. Le processus d'élaboration des scénarios évite les espaces agricoles protégés et limite les interactions avec de multiples propriétaires privés pour l'acquisition de parcelles, car une multitude de négociations et des situations de propriété compliquées peuvent avoir un impact significatif sur la préparation de la mise en œuvre du projet et conduire à des résultats insatisfaisants pour eux. En conséquence, privilégier l'utilisation des terrains publics par rapport aux propriétés privées, éviter les

zones où des projets de développement sont prévus et préférer les espaces agricoles non protégés aux espaces protégés.

Les sites candidats en Suisse sont principalement situés sur des terrains publics. Les sites candidats en France concernent principalement des terrains privés, soumis à une évolution caractéristique de l'urbanisme. Après des échanges avec les municipalités pour déterminer les conditions et contraintes territoriales associées aux sites de surface possibles, le CERN a demandé au Préfet de la Région Auvergne-Rhône-Alpes (France) de réserver les parcelles de terrain afin d'assurer leur disponibilité pour les études de terrain. Ce processus et les arrêtés signés par le Préfet de la région atténuent le risque d'une utilisation imprévue des terrains pour d'autres aménagements territoriaux pendant la durée visée par l'étude, ce qui permet une enquête complète et exhaustive sur les conditions environnementales. Par conséquent, les terrains envisagés pour les sites de surface n'entreront pas en concurrence avec d'autres projets émergents. La solution a été rendue possible grâce au soutien de la France, qui contribue à sécuriser les études tout en garantissant le respect des cadres législatifs nationaux.

Biodiversité et nature

Privilégier des lieux présentant des caractéristiques naturelles de faible qualité. Grâce à la démarche ERC, préserver au maximum les éléments d'intérêt en ce qui concerne la biodiversité et la nature à l'intérieur du périmètre. Étudier avec des bureaux d'études l'état existant et projeté des sites concernés et réaliser sur le site envisagé des relevés des milieux, de la flore et de la faune pour identifier les éléments de valeur et le rôle du site dans l'infrastructure écologique. Proposer des mesures de reconstitution, de remplacement et de compensation adéquates en fonction des impacts identifiés par des mandataires spécialisés. Maintenir ou renforcer le fonctionnement de l'infrastructure écologique, notamment des corridors à faune.

Le travail sur ces objectifs volontaires a également été pris en compte lors de l'élaboration de la stratégie et des lignes directrices en matière d'éco-conception [29], que tous les participants au projet sont tenus de prendre en compte lors de la phase de conception ultérieure et qui sont également publiées dans le rapport sur l'état actuel de l'environnement [30].

2.4. Contraintes territoriales

2.4.1. Grille de sensibilité territoriale

L'élaboration d'une grille de sensibilité territoriale avec ses quatre niveaux (inacceptable en « rouge », élevé en « orange », acceptable en « jaune » et faible en « vert ») a servi de point de départ à l'intégration des contraintes territoriales dans l'élaboration du scénario de mise en œuvre dès le départ.

En appliquant l'approche « Éviter », l'analyse a écarté toutes les zones inacceptables indiquées en rouge (voir Fig. 2.11), et cela dès les premiers stades de l'élaboration du scénario initial au niveau macroscopique. Il convient de souligner que, dans tous les cas, le processus d'élaboration de scénarios visait également à éviter les surfaces déjà bâties si elles étaient considérées comme activement utilisées (par exemple, résidences, fermes, parkings, constructions industrielles et infrastructures publiques). Seules les friches ou les constructions qui pouvaient être qualifiées à coup sûr d'inutilisées (maisons en ruine, hangars industriels abandonnés, etc.) ont été examinées au cas par cas. En outre, pour tous les sites de surface pris en considération, les choix ont été opérés en s'efforçant d'éviter le défrichement de forêts protégées ainsi qu'en évitant de détruire des zones humides et des haies en zones agricoles.

Les zones classées comme exposées à des contraintes importantes, présentées en « orange », ont généralement été évitées (voir Fig. 2.12), mais une analyse manuelle plus détaillée de la justification sous-jacente de cette classification a été systématiquement effectuée pour comprendre si et dans quelles conditions une telle zone pouvait être envisagée pour certaines parties des infrastructures de recherche. Cette étape a nécessité une étude plus détaillée des différentes couches de contraintes qui composent les couches de synthèse. Elle a également nécessité des informations complémentaires que les autorités régionales et locales de planification des deux États hôtes sont les plus à même de fournir (par exemple, les différents Offices du Département du territoire et du Département des infrastructures à Genève, la DREAL, la DDT 74 et la DDT 01 en France)

Implementation/Implementation-Figs/RED.pdf

Fig. 2.11 : : Zones du périmètre d'élaboration des scénarios classées comme devant être évitées (« rouges »). Il faut noter que cette carte ne prend pas en compte les nombreux autres critères d'exclusion tels que les pentes et les altitudes élevées (voir également en ligne à l'adresse <http://cern.ch/fcc-sensitivity-grid>).

En France, la loi du 22 août 2021 portant sur la lutte contre le dérèglement climatique et le renforcement de la résilience face à ses effets, fixe un objectif de zéro artificialisation nette des sols (loi « ZAN »). La démarche ZAN est un objectif fixé pour 2050. Elle demande aux autorités locales, aux communes, aux départements et aux régions de réduire de 50 % le rythme d'artificialisation et de consommation des espaces naturels, agricoles et forestiers d'ici à 2030 par rapport à la consommation mesurée entre 2011 et 2020. Il existe un instrument similaire pour les « surfaces d'assolement » en Suisse, connues sous le nom de « SDA ».

L'élaboration du scénario suit les cadres réglementaires des deux États hôtes en ce qui concerne l'efficacité de l'utilisation des sols. Cela concerne en particulier la prise en compte du principe de « zéro artificialisation nette (ZAN) » en France et le principe des « Surfaces d'Assolement (SDA) » en Suisse. En tenant compte de ces contraintes dans le cycle de développement basé sur le principe « éviter-réduire-compenser », ces principes soutiennent le développement de projets qui présentent un degré élevé de responsabilité territoriale. La contrainte imposée en matière de SDA a été résolue par l'élaboration d'une procédure d'autorisation pour le développement territorial du CERN au niveau fédéral. En ce qui concerne le ZAN, il convient de noter que, sur recommandation du Préfet de la région Auvergne-Rhône-Alpes, le segment du FCC situé sur le territoire français est

Implementation/Implementation-Figs/ORANGE.pdf

Fig. 2.12 : : Zones du périmètre d'élaboration du scénario classées comme devant être évitées (en « rouge ») et comme étant soumises à de fortes contraintes (en « orange »). Il faut noter que cette carte ne prend pas en compte les nombreux autres critères d'exclusion tels que les pentes et les altitudes élevées (voir également en ligne à l'adresse <http://cern.ch/fcc-sensitivity-grid>).

reconnu parmi les projets européens et nationaux d'envergure (PENE) [31]. En conséquence, les zones susceptibles d'être occupées par des sites en surface seraient hors quota régional, conformément au décret du 31 mai 2024 [32] relatif à la mutualisation nationale de la consommation d'espaces naturels, agricoles et forestiers pour des projets d'intérêt général majeur. Cette exclusion du quota régional ne dispense cependant pas le FCC de respecter les principes d'efficacité de l'utilisation des sols et de compensation. Par son approche transverse et éco-responsable, l'étude démontre son engagement dans ce domaine, affirmant ainsi sa volonté d'inscrire le projet dans une dynamique responsable et équilibrée.

Dès le début des études, il est apparu clairement qu'il n'y avait pas de zones à faibles contraintes représentées de couleur « verte » dans les deux pays hôtes. Le nombre minimal de contraintes dans les deux pays correspond à la classe « jaune », c'est-à-dire aux zones acceptables. En outre, des restrictions particulières existent en Suisse, imposées au niveau fédéral pour un certain type de terrains agricoles appelés surfaces d'assolement (SDA). Il s'agit des meilleures terres cultivables à l'échelle du pays. Un plan sectoriel fédéral fixe une surface minimale

à maintenir par canton (répartie entre les cantons par quota). La Confédération surveille le maintien de la surface SDA minimale. Des SDA peuvent être affectées, dans certaines conditions, à des projets spécifiques, à condition que toutes les parties prenantes aux niveaux fédéral et cantonal se mettent d'accord et que le minimum soit maintenu. Cette contrainte est forte, mais les espaces SDA ont été classés en zones « orange » afin de laisser ouverte la possibilité d'un déclassement et d'offrir une option pour l'élaboration d'un scénario d'aménagement et d'implantation. Une coordination spécifique aux niveaux fédéral et cantonal est néanmoins nécessaire pour pouvoir libérer ces terrains pour un projet de développement. Les espaces SDA devront être compensés sur une base 1:1 par l'enlèvement de la terre arable et la reconstitution de l'espace agricole sur des parcelles de moindre qualité ou des friches. Les zones agricoles du canton de Genève situées en dehors des SDA ont été classées comme zones « jaunes » acceptables.

La classification initiale des couches de sensibilité n'est pas figée mais change constamment en fonction de l'évolution du territoire. Entre 2014 et 2022, plus de 1 000 ha sont devenus des zones d'exclusion dites « rouges » (contraintes inacceptables) dans le département de la Haute-Savoie. Dans le canton de Genève, environ 100 ha ont été touchés par de nouvelles restrictions et font désormais partie des zones d'exclusion, principalement en raison de la plus grande sévérité des règles de protection des eaux de surface et des eaux souterraines, résultant d'une meilleure connaissance du sous-sol. Cette évolution a conduit au rejet de la candidature de plusieurs sites proposant une configuration et un emplacement initialement considérés comme possibles. Une telle évolution a rendu encore plus difficile la poursuite de l'élaboration de scénarios tout en mettant en évidence l'aspect itératif du processus.

La Figure 2.13 présente deux exemples de ces « espaces perdus pour les scénarios d'aménagement ». Le premier concerne des secteurs de Ferney-Voltaire qui sont désormais dédiés à un projet de développement (un projet d'hôpital au nord de la D35, route de Meyrin) et le classement d'un secteur en zone de compensation (au sud de la D35), qui ne peut donc pas être à nouveau compensé. Le deuxième concerne une vaste zone située au nord du Rhône, en France, qui a été qualifiée d'« inventaire des tourbières ».

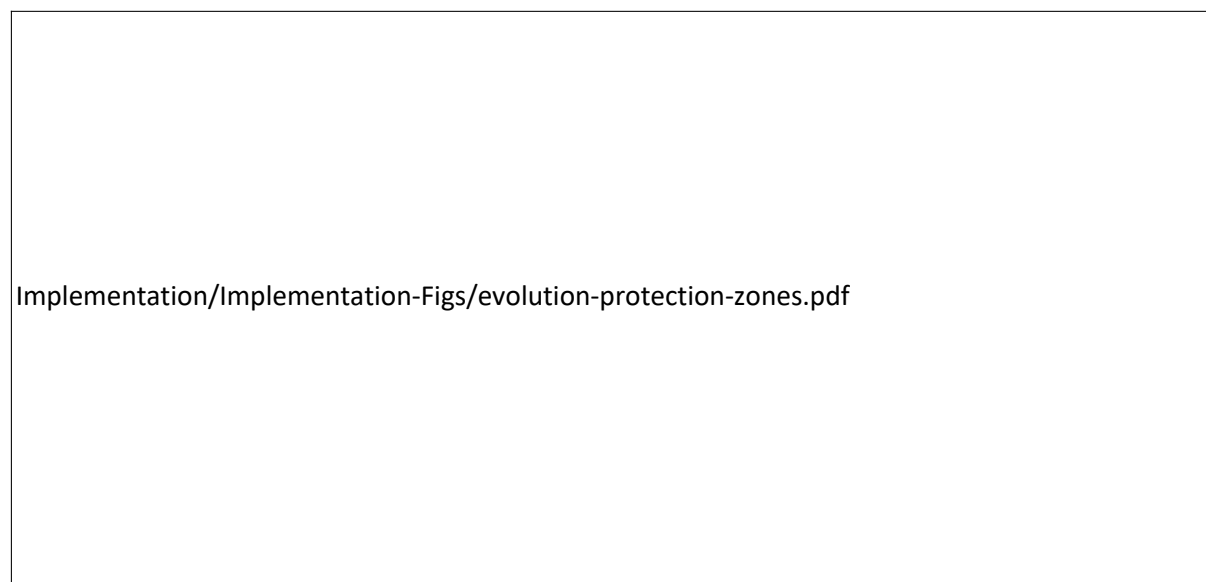


Fig. 2.13 : : Exemples d'évolution du territoire. À gauche : 17 ha de nouvelles zones d'exclusion à Ferney-Voltaire (Ain, France). À droite : 790 ha d'inventaire des tourbières au bord du Rhône en France, en rouge clair les zones précédemment en orange et devenues des zones rouges.

2.4.2. Contraintes souterraines

Les contraintes souterraines, telles qu'une géologie défavorable, des failles majeures, la présence d'aquifères stratégiques, des zones de captage d'eau potable et des zones tampons, des oléoducs, des lignes électriques et des conduites de gaz, ainsi que les zones d'intérêt public réservées, telles que les zones d'exploration géothermique ou les zones interdites au forage en raison de la superposition d'aquifères ou d'autres informations, ont été prises en compte dès le départ.

Des zones d'exclusion géologiques ont été définies par les entreprises de conseil en géologie GADZ et ILF, et par l'Université de Genève, afin de bien tenir compte des conditions géologiques. Ces partenaires ont également examiné la situation géologique et hydrologique, en s'appuyant sur les éléments suivants :

1. les lignes de faille représentant un risque élevé d'activité sismique et pouvant poser des problèmes de creusement de tunnels ;
2. l'interface entre le calcaire et la molasse ;
3. les éventuelles pénétrations d'eau à haute pression ou formations karstiques susceptibles d'exposer le projet à un risque inacceptable.

Par conséquent, entre 2014 et 2020, le périmètre d'étude initial du projet a dû être considérablement réduit (voir Fig. 2.14) au fur et à mesure que des connaissances supplémentaires étaient acquises et intégrées dans un modèle 3D du sous-sol. La Figure 2.15 montre deux exemples d'images du modèle 3D du sous-sol qui a été établi pour soutenir l'analyse des contraintes souterraines, afin d'identifier les zones à exclure définitivement, les emplacements préférés pour les structures souterraines et pour identifier les zones présentant des difficultés particulières ou des données insuffisantes qui nécessitent des investigations souterraines spécifiques.

Étant donné l'expérience acquise lors de la construction des structures souterraines du Grand collisionneur électrons-positons (LEP) et de la construction d'ouvrages souterrains de transport dans la région (par exemple, le tunnel routier du Vuache), les risques que présenteraient la construction d'un tunnel et de cavernes de grande taille, qui pourraient être instables, bouger, s'effondrer, ou dans lesquels les ouvriers de construction pourraient être exposés à des pénétrations d'eau à haute pression susceptibles d'entraîner des accidents mortels, sont considérés comme inacceptables et doivent être évités. Toutes les structures souterraines doivent se trouver dans la mesure du possible dans la couche de molasse, molle et stable, qui constitue une barrière fiable contre les aquifères.

Même si les cartes et les travaux de modélisation ont fourni des informations complémentaires, il manque encore aujourd'hui des informations fiables sur la profondeur des interfaces des différentes couches géologiques dans les zones du Vuache et du Jura. Les zones calcaires inévitables de la Mandallaz doivent encore être étudiées. De plus, on sait peu de choses sur les conditions auxquelles il faut s'attendre au-dessous du lac, sous l'Arve et sous le Rhône. Ces conditions ayant un impact majeur sur le coût et le calendrier du percement du tunnel, des informations supplémentaires sur le sous-sol dans les zones clés sont actuellement rassemblées à la faveur d'explorations géophysiques et géotechniques réalisées en 2024 et 2025.

2.4.3. Topographie, bathymétrie et autres caractéristiques de surface

Des informations concernant les conditions topographiques de surface ont également été prises en compte dès le début de l'étude. Les pentes raides (Fig. 2.16) supérieures à 30 % et présentant des risques de terrain instable et de mouvement de terrain sont exclues, de même que les falaises, les vallées étroites et les formations de type « canyon ». Étant donné que le tunnel doit être placé à une profondeur suffisante sous le lit du lac, les altitudes supérieures à 750 m constituent des obstacles du fait de la profondeur des puits et de surcharges inacceptables (Fig. 2.17). Les altitudes élevées ont également entraîné des surcharges importantes, qui peuvent constituer un défi pour les activités de forage des tunnels, ce qui rend la construction plus coûteuse et ralentit l'avancement.

La bathymétrie du lac doit être prise en compte pour s'assurer que le tunnel peut être placé suffisamment en dessous du lit du lac avec une traversée aussi courte que possible. La profondeur du lac Léman est supérieure à 50 m au-delà de la ligne Versoix-Corsier (voir Fig. 2.18). Pour éviter que le tunnel ne devienne trop profond sur l'ensemble de ses emprises, il est nécessaire de rester en dessous de cette ligne. La traversée du lac là où il est étroit permet d'éviter les zones d'instabilité et de limiter le plus possible les risques liés à la présence d'eau. Dans le même temps, d'autres secteurs du tunnel ne doivent pas être situés trop profondément sous des zones montagneuses.

2.4.4. Souplesse d'élaboration d'un scénario

Les contraintes initiales de surface et souterraines et de nombreuses autres contraintes documentées en détail dans un rapport spécifique [12] ont fourni un point de départ pour une recherche semi-automatique visant à déterminer approximativement les zones d'exclusion et les zones candidates

Implementation/Implementation-Figs/Subsurface_limits.pdf

Fig. 2.14 : : Après plusieurs années d'analyse des conditions du sous-sol à partir de données bibliographiques et de modélisations, le périmètre de développement du scénario initial (jaune) a dû être restreint (rouge) pour assurer la compatibilité avec les conditions du sous-sol déjà connues.

Cependant, les zones marquées en orange (zones indésirables) et les zones marquées en jaune (zones acceptables), qui semblent à première vue compatibles avec l'emplacement d'un site de surface, se sont révélées inacceptables en raison de restrictions qui ne sont pas « encodées » sur les cartes et les documents disponibles accessibles au public. Ces informations supplémentaires ont été obtenues en partie par l'étude de cartes à haute résolution, d'orthophotographies et de données, en interrogeant les services de l'administration publique régionale et locale et les parties prenantes locales, les experts du domaine et au moyen de visites pédestres (inspection visuelle de la zone environnante).

Ces contraintes supplémentaires ont notamment porté sur les éléments suivants : zones à la forme défavorable (surface disponible trop faible, trop étroite, non monolithique ou de forme trop irrégulière), présence de contraintes adjacentes (zones de protection de la nature nécessitant des zones tampons, zones de risques naturels telles que des zones inondables ou des berges instables, zones résidentielles, zones sensibles), accès limité (pas de route ou pas de possibilité d'en créer une en raison des conditions topographiques ou d'autres restrictions, route rudimentaire non adaptée à une circulation régulière et ne pouvant être améliorée pour répondre aux exigences), opposition probable ou politiques de développement conflictuelles connues, projets conflictuels connus

Implementation/Implementation-Figs/3D_molasse_and_cretaceous.pdf

Fig. 2.15 : : Exemples d'images du modèle 3D (ici molasse et formations crétacées) utilisées pour déterminer les contraintes géologiques.

Les contraintes et les limites de la situation géologique et topographique actuellement connues limitent la circonférence d'un futur collisionneur circulaire à moins de 100 km. Les études d'implantation menées entre 2017 et 2021 ont conclu que, pour obtenir une circonférence de plus de 90 km permettant d'obtenir de bonnes performances, et donc d'atteindre une excellente infrastructure de recherche, et compte tenu des différentes contraintes auxquelles la configuration doit répondre simultanément en différents endroits, le tracé disponible pour l'anneau est limité à une bande dont la largeur est progressivement réduite de 3 000 m à 300 m selon la zone concernée (voir Fig. 2.19).

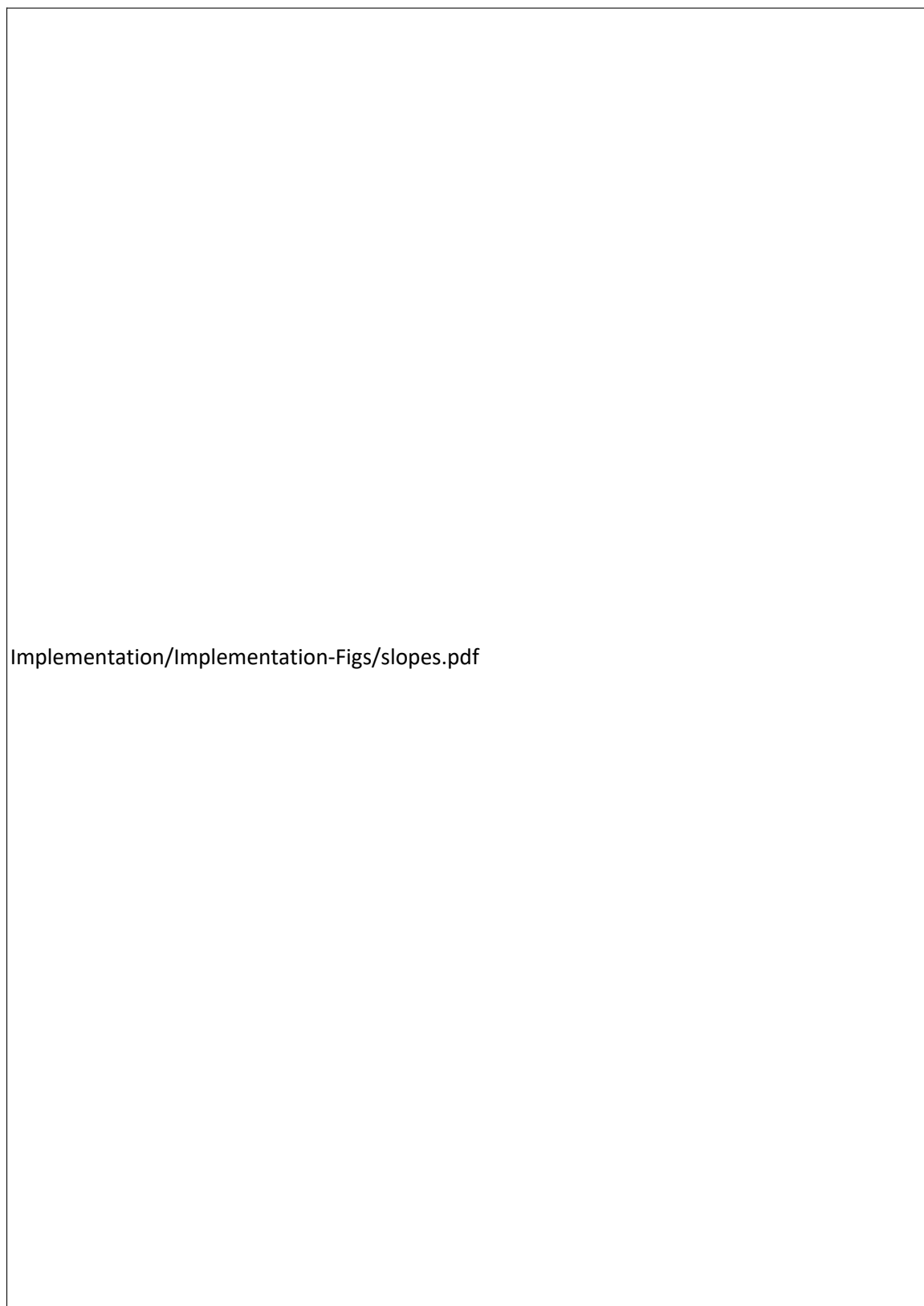


Fig. 2.16 : : Topographie de la région. Les couleurs rouge et orange indiquent les pentes raides.

Implementation/Implementation-Figs/elevation.pdf

Fig. 2.17 : : Relief de la région. Les couleurs blanche et rouge indiquent les hautes altitudes.

Implementation/Implementation-Figs/bathymetry.pdf

Fig. 2.18 : : Bathymétrie du lac Léman.

2.5. Variantes initiales

2.5.1. Introduction

Ce paragraphe donne les éléments de contexte qui expliquent la façon dont le scénario d'emplacement a été élaboré dans la région frontalière franco-suisse. Il explique pourquoi des scénarios alternatifs à l'ouest du Jura ont été examinés, puis écartés au profit de scénarios à l'est du Jura. Il examine comment la disposition et l'emplacement envisagés lors de la phase exploratoire de l'étude FCC (2014-2018) ont démontré

Implementation/Implementation-Figs/geoconstraints.pdf

Fig. 2.19 : : Combinaison de contraintes souterraines et topographiques qui ont conduit à une bande de développement de scénario d'environ 300 m de large et à un diamètre d'environ 28 km.

la faisabilité de principe d'une nouvelle infrastructure de recherche à grande échelle et la manière dont le scénario spécifique examiné présentait des obstacles prohibitifs en certains endroits. Enfin, il évoque la variante relative à un collisionneur linéaire qui n'a pas été retenue pour les études ultérieures.

L'élaboration d'un scénario de configuration dans la région de Genève était fondée sur la motivation consistant à tirer parti, pour un nouveau projet, de l'existence d'infrastructures et d'équipements du CERN, construits depuis plus de 70 ans. La construction d'un collisionneur circulaire requiert l'existence d'accélérateurs de particules en fonctionnement avec les infrastructures techniques qui peuvent servir d'injecteurs, la disponibilité d'un espace de travail, d'ateliers, d'équipements et d'une main-d'œuvre qualifiée, ainsi que de cadres juridiques, administratifs et de gestion de projet favorables. Il est donc fondamental que l'emplacement choisi reste à proximité raisonnable d'un site existant du CERN.

En outre, le collisionneur de particules devra avoir une circonférence supérieure à 90 km pour pouvoir accueillir ultérieurement deux collisionneurs de particules différents (un collisionneur électron-positon et un collisionneur de hadrons) et chacun d'eux devra fournir les performances nécessaires pour mener à bien le programme de recherche scientifique souhaité. La zone de recherche immédiate se situerait au sud des sites de Meyrin et de Prévessin du CERN, éloignée du massif du Jura. En effet, dès la phase de construction du Grand collisionneur électrons-positons (LEP), des obstacles majeurs avaient déjà été rencontrés en raison de la présence de formations karstiques et de pénétrations d'eau à haute pression, dues à la proximité de la chaîne du Jura.

Néanmoins, comme le souligne la section suivante, un examen sans *a priori* de la situation a été mené afin de ne négliger aucun autre scénario possible.

2.5.2. Scénarios à l'ouest du Jura

Une étude [33] s'est intéressée à un emplacement dans la plaine de la Bresse (pays dolois), à l'ouest du massif du Jura (voir Fig. 2.20). Ces options avaient déjà été étudiées en 1997 et en 2001 et elles ont été à nouveau vérifiées entre 2014 et 2019. L'anneau aurait été situé à l'extérieur des formations

jurassiques, à une profondeur d'environ 40 mètres. En tout état de cause, l'infrastructure aurait empiété sur les parcs nationaux et régionaux existants et sur de vastes zones de conservation de la nature. En outre, la liaison requise avec le complexe d'accélérateurs de particules du CERN aurait nécessité un long tunnel d'environ 60 km pour les lignes de transfert. Ce tunnel traversant la chaîne montagneuse du Jura serait passé par des formations géologiques très défavorables, avec d'importantes surcharges. Étant donné que la distance entre le Jura et la Petite Montagne du Jura est inférieure à 20 km, il paraît infaisable de placer un collisionneur circulaire de particules suffisamment grand dans cette zone.



Fig. 2.20 : Comparaison des superficies et des zones de protection à l'ouest et à l'est de la chaîne du Jura.

Cette variante a été définitivement écartée de la suite des études pour les raisons suivantes :

- Un long tunnel pour la ligne de transfert du faisceau traversant la chaîne montagneuse du Jura poserait trop de difficultés, tant du point de vue du génie civil que du point de vue technique. La durée et le coût global de la construction augmenteraient considérablement, d'au moins 30 %.
- Ce scénario nécessiterait des puits d'accès profonds dans des régions montagneuses et difficiles d'accès du massif du Jura qui sont, en grande partie, des zones de protection de la nature. La roche y est très instable et la pénétration d'eau à haute pression certaine.
- Le sol meuble de la région de la Bresse nécessiterait des mesures de stabilisation et de protection. Le gypse hydrophile gonfle considérablement (mouvements du sol de l'ordre du mètre relevés dans le tunnel routier du Chienberg), ce qui n'est pas compatible avec la construction de cavernes à grande échelle, ni avec l'exigence d'un tunnel très stable. Les coûts de maintenance seraient beaucoup plus élevés que sur un terrain stable.
- L'installation interférerait très probablement avec les contraintes de protection de la nature et engendrerait des nuisances importantes pour les habitants pendant la phase de construction.
- L'espace disponible entre le massif du Jura, son parc national et la zone de la Petite Montagne du Jura, plus au nord-ouest, est trop restreint pour accueillir un accélérateur circulaire de particules de taille suffisante.

Il n'existe aucune possibilité raisonnable d'exploiter et de maintenir l'infrastructure à partir du CERN ou de toute autre organisation partenaire appropriée à proximité.

2.5.3. Scénario de circuit de type « hippodrome » au bord du lac

Les études de faisabilité conceptuelle ont également comporté une analyse des possibilités et des contraintes liées à un circuit avec un emplacement au bord du lac pour l'anneau du collisionneur de particules qui permet de raccorder l'infrastructure au complexe d'accélérateurs de particules du CERN [34].

Le concept reposait sur des sections droites d'environ 11 km de longueur qui pourraient également abriter un accélérateur ou un collisionneur linéaire. La motivation était de combiner les possibilités d'un collisionneur linéaire d'électrons-positrons dans un premier temps et d'un collisionneur circulaire de hadrons dans un second temps. Un autre concept d'accélération des particules avec des accélérateurs linéaires pour un premier étage de collisionneur circulaire électrons-positrons aurait également pu être imaginé.

La disponibilité de longues sections droites présente des avantages pour les systèmes d'accélération par radiofréquences en termes d'espace disponible et d'absence de champs de courbure. Un angle de croisement minimal, de 20 mrad dans le cas du CLIC, est toutefois nécessaire pour éviter que des débris de collision ne traversent le bras de l'accélérateur linéaire opposé. De manière réaliste, une section de distribution du faisceau courbée serait nécessaire pour la suppression de la dispersion, la collimation et les corrections chromatiques. Un tel tracé conduirait à un circuit d'une circonférence totale de 90 km, permettant à la fois de loger des accélérateurs linéaires et circulaires (Fig. 2.21).

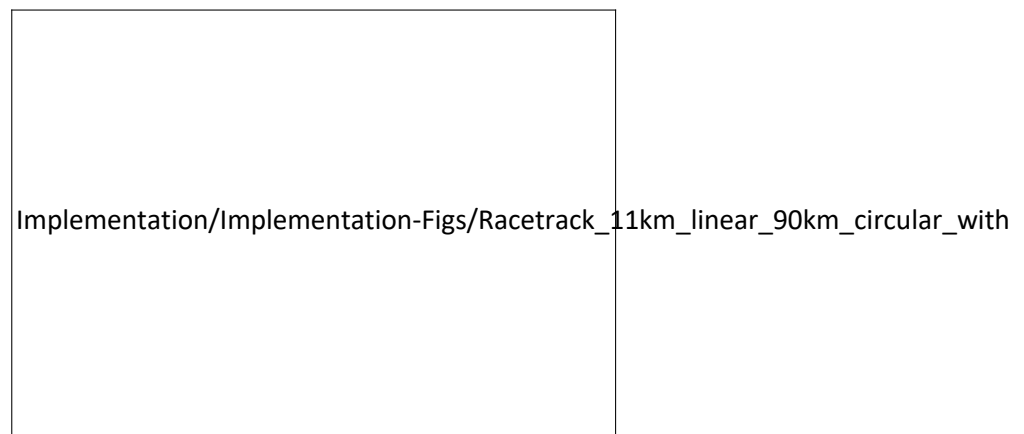


Fig. 2.21 : Scénario de circuit en forme d'hippodrome avec deux sections droites de 11 km de longueur, soit une circonférence totale de 90 km.

Cette disposition s'accompagne toutefois de quelques inconvénients importants : Elle n'autorise que deux expériences au maximum pour le collisionneur circulaire et nécessite également l'inclusion de sections de collimation, de décharges et de transfert de faisceau dans les deux sections droites.

Les options d'implantation (Fig. 2.22) d'un tel tracé se heurtent à de nombreuses contraintes géologiques et environnementales : comme tous les scénarios circulaires, celui-ci doit également traverser le secteur calcaire de la Mandallaz. Certains puits pourraient être très profonds à leur emplacement nominal (Fig. 2.23), c'est-à-dire plus de 500 m. Toutefois, avec un processus d'optimisation systématique, il est probable que des alternatives acceptables pour les puits déplacés pourront être trouvées. En ce qui concerne la traversée du lac, la bathymétrie commence à imposer des contraintes à partir de 65 m de profondeur, ce qui devrait être soigneusement évalué.

Les limites les plus importantes découlent de la nécessité très délicate d'intégrer 12 sites de surface dans une zone fortement urbanisée, d'une part et dans une zone fortement montagneuse, d'autre part (Fig. 2.24). Par exemple, un site PJ en Suisse se trouverait dans la zone entièrement protégée de l'Allondon, où toute activité de construction en surface et en sous-sol est strictement interdite. On ne sait toujours pas où et comment un site d'expérience réalisable couvrant potentiellement jusqu'à 9 ha pourrait être identifié et rendu acceptable, compte tenu du fait que d'importantes infrastructures de transport et d'électricité devraient également être créées dans cette zone qui est entièrement naturelle. Il s'agit en effet d'une zone naturelle hautement protégée. Les sites situés autour de PI en France, à proximité immédiate du Rhône, sont confrontés à des contraintes similaires. Les sites d'implantation d'un site PK dans le secteur de Prévessin en France se situeraient dans des zones fortement urbanisées. Les sites PL à Versoix en Suisse se trouvent dans des zones lacustres entièrement protégées avec

Implementation/Implementation-Figs/Racetrack_11km_linear_90km_circular_placement.p

Fig. 2.22 : Option d'emplacement pour un scénario de circuit circulaire de 90 km/linéaire de 11 km.

Implementation/Implementation-Figs/racetrack_alignment.pdf

Fig. 2.23 : Exemple de scénario d'alignement de type « hippodrome ».

des interdictions absolues d'activités souterraines, ainsi que dans des endroits très urbanisés. Les sites PB en Suisse se trouvent dans une vaste zone de préservation de la nature, en particulier pour les amphibiens, qui sont très protégés. Pour d'autres sites, les emplacements potentiels pourraient très probablement être identifiés en utilisant la séquence Éviter-Réduire-Compenser. En termes de coûts, le scénario conduirait à des augmentations significatives pour le scénario du collisionneur circulaire, puisqu'il n'est pas optimisé pour une configuration de collisionneur circulaire. Les différences sont au moins de l'ordre de 200 à 400 millions de francs suisses. Enfin, la perte d'au moins 20 % des sections d'arc entraîne directement une perte correspondante de l'énergie maximale réalisable ou, dans le cas d'un rayon plus petit dans les sections courbes, des pertes de rayonnement synchrotron sensiblement plus élevées.

L'agencement d'un circuit en forme d'hippodrome n'est optimisé ni pour un collisionneur linéaire, ni pour un collisionneur circulaire. Ce scénario entraîne donc des complications et des coûts supplémentaires, ainsi qu'une baisse des performances. L'intégration dans le territoire est extrêmement difficile, beaucoup plus compliquée que la disposition circulaire finalement adoptée avec huit sites de surface. Elle entraînera des impacts environnementaux plus importants et des besoins accrus en matière d'aménagement du territoire (par exemple, des routes d'accès) et nécessitera des puits plus nombreux et plus profonds. Par conséquent, les études sur ce scénario ont été interrompues.

2.5.4. Scénarios à l'est du Jura

En ce qui concerne la zone située à l'est du Jura, un premier grand périmètre de recherche a été initialement défini en 2014 sur la base des conditions géologiques suivantes [35–37] :

- Afin que la stabilité du tunnel soit assurée, le tunnel doit traverser le lac Léman suffisamment en dessous de son lit.

Implementation/Implementation-Figs/Racetrack_placement_example.pdf

Fig. 2.24 : Exemple d'emplacement du circuit avec les contraintes environnementales indiquées. Les sites I, J, L et B se trouvent dans des zones fortement contraintes, ce qui rend très problématique l'identification d'un scénario réalisable et acceptable sur le plan sociétal. La profondeur du lac au croisement entre L et A est d'environ 65 mètres.

Les idées initiales consistant à placer le tunnel dans un sol instable (moraines, dépôts glaciaires quaternaires) ou encore dans une construction sur le lit du lac ont dû être écartées en raison a) d'une stabilité insuffisante et b) de l'impossibilité de créer des interfaces appropriées entre le tunnel de chaque côté du lac et la construction dans le lac.

- Afin d'être situées à une profondeur acceptable sous le lit du lac et de rester autant que possible dans la couche de molasse imperméable, les structures souterraines doivent se trouver à environ 250 m au-dessus du niveau de la mer en évitant, idéalement, de traverser les interfaces calcaire/molasse.
- Une ligne de délimitation a été tracée au nord-ouest (zone du Jura) et à l'ouest (zone du Vuache) afin de garantir un éloignement suffisant des hautes altitudes entraînant des surcharges inacceptables, des zones inaccessibles et protégées, des roches instables, des failles, des zones sismiques actives et des formations karstiques instables où la pénétration d'eau à haute pression est certaine.
- Au sud-ouest, la zone montagneuse de la Mandallaz forme une frontière naturelle. Sa traversée ne peut être évitée. Par conséquent, les scénarios privilégiés sont ceux pour lesquels la surcharge et la longueur de traversée sont faibles.
- Au sud, une ligne de délimitation a été établie au nord-ouest de la réserve naturelle de la montagne des Frêtes afin d'éviter les altitudes supérieures à 750 m (inacceptables, car elles conduiraient à des puits trop profonds), les zones inaccessibles et topographiquement inacceptables ainsi que les zones de protection au sud. Cette ligne traverse la vallée de la Fillière au niveau de Thorens-Glières et enjambe les altitudes acceptables du plateau des Bornes jusqu'à La Roche-sur-Foron.
- À l'est, une ligne de délimitation a été établie pour éviter les zones montagneuses et rester ainsi dans la vallée de l'Arve

Implementation/Implementation-Figs/east-Jura.pdf

Fig. 2.25 : : Périmètre d'étude établi (ligne rouge). Les zones d'exclusion et les zones présentant trop de difficultés pour les sites de surface sont indiquées en rouge ; les zones favorables sont indiquées en bleu.

Le périmètre obtenu lors de l'étude initiale s'est révélé compatible avec une infrastructure circulaire de 90 à 100 km de circonférence et peut supporter les contraintes géologiques, topographiques, environnementales et urbanistiques (voir Fig. 2.25). La distance maximale réellement exploitable est de 29 km entre le nord et le sud et de 30 km entre l'ouest et l'est. On obtient ainsi une zone permettant d'intégrer un collisionneur circulaire d'une circonférence de 92 km au maximum avec une configuration comprenant huit sites ou de 98 km au maximum avec une configuration comprenant douze sites.

2.6. Scénario de référence

2.6.1. Introduction

Parmi la centaine de scénarios analysés [12] sur la base de données principalement bibliographiques et de visites de terrain, c'est le scénario PA31 qui a semblé le plus intéressant à retenir pour conduire la réalisation ultérieure d'études approfondies et procéder à des optimisations. Le tracé de la version 1.0 (PA31-1.0) se distingue des autres tracés. Il propose un équilibre entre l'implantation territoriale, les performances scientifiques que le collisionneur de particules et les quatre régions d'interaction peuvent offrir et la faisabilité technique en termes de risques et de coûts gérables. Cette hypothèse de travail, élaborée sur la base du processus Éviter-Réduire-Compenser (ERC) décrit plus haut, a permis d'acquérir une connaissance approfondie de la région, jetant ainsi les bases d'une amélioration continue du projet, en tenant compte des exigences et des contraintes territoriales, ainsi que des avancées technologiques.

Le scénario version 4.0 (PA31-4.0), présenté dans ce chapitre (voir Fig. 2.26, est retenu comme scénario de référence pour un projet de mise en œuvre potentiel. C'est le résultat d'un processus d'optimisation appliqué à l'hypothèse de travail PA31-1.0. Il prend en considération l'avancement des études de conception des deux collisionneurs FCC-ee et FCC-hh, les études des infrastructures et de génie civil, ainsi que les informations territoriales recueillies auprès des acteurs locaux (municipalités concernées, Directions départementales des territoires et Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement, en France et services du canton de Genève). Il est encore possible de procéder à des ajustements mineurs pour certains sites techniques de surface et pour la disposition des puits des sites d'expérience.

La faisabilité technique du projet fondée sur le scénario de référence PA31-4.0 a pu être

Implementation/Implementation-Figs/EPCI_Communes_PA31-4.pdf

Fig. 2.26 : Le scénario de référence PA31-4.0 qui a servi de référence pour les investigations souterraines, l'analyse de l'état de l'environnement et les études concernant les projets d'infrastructures connexes. Une version interactive peut être consultée à l'adresse suivante <https://cern.ch/fcc-overview>.

confirmée à l'aide d'un ensemble d'études varié. Cependant, il convient de souligner que le territoire et les cadres juridiques en France, en Suisse et en Europe sont en évolution permanente. Depuis 2014, un certain nombre de candidats à la localisation de sites de surface et de scénarios de tracés ne sont plus réalisables en raison de ces évolutions. Par conséquent, la situation est encore susceptible d'évoluer et les conditions de mise en œuvre du scénario de référence PA31-4.0 peuvent également changer. Afin de faciliter le processus d'autorisation du projet et d'éviter toute interférence potentielle avec les développements futurs et l'aménagement du territoire, il convient d'obtenir les droits sur les parcelles nécessaires le plus tôt possible.

2.6.2. Caractéristiques du scénario

La disposition et les fonctions du scénario de référence PA31-4.0 sont présentées à la Fig. 2.27. Les deux puits du site de surface PA (Ferney-Voltaire, France) ont été décalés de la route de Meyrin, au nord, pour respecter une distance de sécurité, assurer l'espace nécessaire à la circulation sur le site de surface autour du hangar d'assemblage de l'expérience et des puits et garantir une protection contre la visibilité directe. Un décalage vers le nord, qui serait favorable pour l'emplacement des points PD et PJ, est exclu en raison de la présence de la route départementale à la limite nord du site PA. Leur déplacement vers l'est est également exclu en raison de la présence d'une zone de compensation qui doit être évitée et qui sera transformée en une zone humide et un habitat naturel pleinement fonctionnels si le projet est mis en œuvre. De tels déplacements transporteraient également le site de surface PG à Groisy et Charvonnex, plus profondément dans la forêt et sur une pente forte. Il s'agit dans les deux cas d'évolutions qu'il vaut mieux éviter. Les puits du site de surface PD (Nangy, France) ont été éloignés de l'autoroute par rotation du scénario pour assurer la compatibilité avec le projet d'élargissement de la route départementale RD 903 et d'intégration avec



Implementation/Implementation-Figs/PA31-4.0_Schema_Clean_functions.pdf

Fig. 2.27 : Les fonctions des différents sites dans la configuration du scénario PA31-4.0.

le développement de l'autoroute A40, ainsi que la faisabilité technique de la création d'un puits de service sur le site sans installation d'une caverne supplémentaire entre les cavernes de service et d'expérimentation. Un décalage du site PA davantage en direction du sud est exclu, car cela créerait une incompatibilité du fait de la présence de l'autoroute A40 et de la RD903 sur le site de surface PD, ainsi que des difficultés d'ordre topographique (pente raide) par rapport à la route départementale 1203 vers Annecy sur le site PG à Charvonnex.

Le décalage et la rotation du scénario ont tenu compte de l'objectif de placer le site de surface PG à cheval entre la partie de la forêt concernée de moindre qualité et le plateau de prairies existant, dont il s'avère que le sol présente une faible qualité pour l'agriculture. En outre, les puits doivent être maintenus à l'écart de la pente raide vers le sud afin de contrôler les risques et les coûts de construction des puits et des bâtiments. Il n'a pas été possible de déplacer les puits plus loin de la forêt, vers le plateau, sans créer un conflit avec l'autoroute pour le site d'expérience PD (Nangy) et pour le site d'expérience PJ (Dingy-en-Vuache et Vulbens), du fait de la présence d'un ruisseau et de l'existence de contraintes topographiques. Le site d'expérience PJ est donc maintenu à distance de l'autoroute A40 au sud, et du ruisseau et des contraintes topographiques à l'ouest. Le corridor de faune peut être conservé. L'emplacement du site technique PB (Presinge, Suisse) a été optimisé en tenant compte de cartes relatives à la biodiversité et d'indicateurs de valeur écologique, mis à disposition par les services cantonaux. Mais aussi des résultats d'une étude concernant les accès possibles, réalisée par une entreprise spécialisée dans le canton de Genève. Le site serait situé à Presinge, directement le long de la Route de Jussy. Il est nécessaire de prévoir la réalisation d'une connexion d'une longueur de 98 m au niveau du tunnel entre le puits et la caverne de service.

L'hypothèse de travail pour la localisation du site technique PF se situe à Éteaux (France), directement en bordure de la route nationale RN203. Cette hypothèse comporte un tunnel de raccordement entre le puits, d'une profondeur de 400 m, et

la caverne de service au niveau du tunnel du collisionneur. Une variante plus au sud n'est actuellement pas envisagée car la création d'une installation de stockage de dépôts inertes (ISDI) crée des contraintes supplémentaires. Toutefois, en cas de réduction de l'empreinte du site principal, certaines infrastructures techniques limitées aux constructions en surface (par exemple, ventilateurs, tours de refroidissement, sous-stations électriques) pourraient être déplacées vers cette zone. L'hypothèse de travail concernant l'emplacement du site technique PH se situe de l'autre côté de la frontière entre les deux communes de Cercier et Marlioz (France), à proximité immédiate de la route départementale D 203 (Route de Choisy). En tenant compte de l'analyse de la faune, de la flore et de la biodiversité, de l'état de la forêt, des contraintes topographiques et des risques techniques (gazoduc au nord du site), le site suit de près la Route de Choisy vers le nord et s'étend dans la forêt sur une pente à l'ouest. Si un ajustement s'avérait nécessaire, un site alternatif existe à 900 m dans le sens des aiguilles d'une montre, directement sur la route départementale D2, sur un ensemble de parcelles agricoles. Le déplacement important par rapport au point médian de la section technique en alignement nécessiterait l'élaboration d'un projet pour l'installation des systèmes auxiliaires de radiofréquences (réfrigération cryogénique, alimentation électrique). L'emplacement préféré du site technique PL (Challex, France) est situé sur le point médian nominal de la section technique en alignement, à l'est de la commune, sur un champ et un terrain où se trouvent deux maisons individuelles. Un autre emplacement possible, à 600 m à l'ouest du point nominal, a été étudié et discuté avec la municipalité. Il est légèrement moins intéressant en raison de sa plus grande visibilité depuis les zones résidentielles de la commune. Cette option se caractérise également par des difficultés techniques supplémentaires qui entraîneraient des coûts supplémentaires en raison de la nécessité de construire un puits à environ 150 m à l'extérieur du tunnel, avec des besoins supplémentaires en génie civil et un accès plus difficile à la machine.

2.6.3. Paramètres du scénario

Les coordonnées géographiques du scénario de référence PA31-4.0 résultant de cette optimisation sont indiquées dans le Tableau 2.2 pour les sites scientifiques et dans le Tableau 2.3 pour les sites techniques.

Tableau 2.2 : Coordonnées WGS84 des points théoriques d'interaction des faisceaux pour les sites scientifiques.

Site	Emplacement	Latitude	Longitude
PA	Ferney-Voltaire, Ain, France	46,2480475 °N	6,0986019 °E
PD	Nangy, Haute-Savoie, France	46,1453657 °N	6,3169260 °E
PG	Charvonnex et Groisy, Haute-Savoie, France	45,9938019 °N	6,1693009 °E
PJ	Dingy-en-Vuache et Vulbens, Haute-Savoie, France	46,0962036 °N	5,9513024 °E

Tableau 2.3 : Coordonnées WGS84 des points théoriques d'interaction des faisceaux pour les sites techniques.

Site	Emplacement	Latitude	Longitude
PB	Presinge, Genève, Suisse	46,2271027 °N	6,2374818 °E
PF	Éteaux, Haute-Savoie, France	46,0490317 °N	6,2865850 °E
PH	Cercier et Marlioz, Haute-Savoie, France	46,0146646 °N	6,0309816 °E
PL	Challex, Ain, France	46,1926255 °N	5,9810829 °E

Le Tableau 2.4 résume les paramètres d'aménagement des collisionneurs de particules. Les fonctions de chaque site de surface sont présentées dans le Tableau 2.5.

2.6.4. Performances multicritères du scénario de référence

La Figure 2.8 montre les performances d'un certain nombre de scénarios présélectionnés qui ont été étudiés plus en détail avant que le scénario PA31 ne soit choisi comme référence pour une optimisation plus poussée. La Figure 2.28 présente les résultats de l'analyse multicritères pour ce scénario en termes de compatibilité territoriale (T), de mise en œuvre et de gestion des risques (I) et de valeur scientifique (S) pour chaque emplacement de site et pour l'ensemble du tracé.

Tableau 2.4 : Paramètres de présentation du collisionneur de particules.

Paramètre	Valeur	Commentaire
Altitude du tunnel au-dessous du puits du site PA	202 m au-dessus du niveau de la mer	L'altitude est sujette à une optimisation plus poussée après la mise à disposition des résultats des investigations géophysiques et géotechniques.
Longueur des sections droites aux sites PA, PD, PG et PJ	1400 m	Ces sections comportent des élargissements du tunnel. Les machines ee et hh peuvent avoir des longueurs de section droite de machine différentes dans ces secteurs, en fonction de l'optique du faisceau.
Longueur des sections droites aux sites PB, PF, PH et PL	2032 m	Il s'agit de l'espace minimum requis pour garantir que tous les systèmes de radiofréquences pourront être installés de manière fiable. Sous réserve d'optimisation, il se peut que tout l'espace disponible ne soit pas utilisé après l'optimisation.
Rotation est-ouest du collisionneur autour du site PA	10,97 degrés	
Longueur d'une cellule d'arc du collisionneur de hadrons dans les arcs	275,792 m	
Nombre de cellules dans une section courbe (arc) par octant	26	
Longueur totale des arcs	78684,476 m	La somme des segments courbes de la machine ee et de la machine hh peut être différente.
Circonférence totale du tracé	90658,745 m	La machine hh peut être légèrement plus courte dans le même tunnel (90,6574 m)

2.6.5. Site PA

Description de l'emplacement du site

Le site principal se trouve à Ferney-Voltaire, Ain, France, au sud de la Route de Meyrin, à l'est de l'Espace Candide (centre commercial) (voir Fig. 2.29 et Fig. 2.30). Le site serait relié au point 8 du LHC par le chemin des Prés Jins, une voie publique. Une extension au sud du point 8 du LHC, déjà prévue dans le cadre du projet HL-LHC, permettrait d'accueillir des infrastructures techniques et de réduire l'emprise du site principal. La surface du site indiqué en bordure de la Route de Meyrin est de 5,2 ha et la surface de l'extension du site du point 8 du LHC est de 2,7 ha.

Contraintes connues

Le site se trouve en zone agricole protégée (Ap), à proximité d'une zone de compensation environnementale classée zone naturelle protégée (Np). Le réseau d'alimentation en eau passe à proximité du point 8 du LHC. Un gazoduc longe la limite du site de surface principal, avant de franchir la frontière entre la France et la Suisse. Il existe un réseau le long de la Route de Meyrin, qui fournit de la chaleur fatale provenant du point 8 du LHC aux habitations et à la zone commerciale (ZAC, zon

Tableau 2.5 : Paramètres de présentation du collisionneur de particules.

Site	Fonction
PA	Site scientifique avec une expérience, injection du faisceau d'un accélérateur linéaire au site de Prévessin du CERN dans le pré-accélérateur (booster) qui se trouve dans le même tunnel que le collisionneur.
PB	Site technique avec injection du faisceau « booster » dans le collisionneur, extraction du faisceau du collisionneur.
PD	Site scientifique, avec une expérience.
PF	Site technique avec collimation bêtatron et quantité de mouvement.
PG	Site scientifique, avec une expérience.
PH	Site technique avec système d'accélération des particules par radiofréquences pour le collisionneur.
PJ	Site scientifique, avec une expérience.
PL	Site technique avec système d'accélération des particules par radiofréquences pour le pré-accélérateur « booster ».

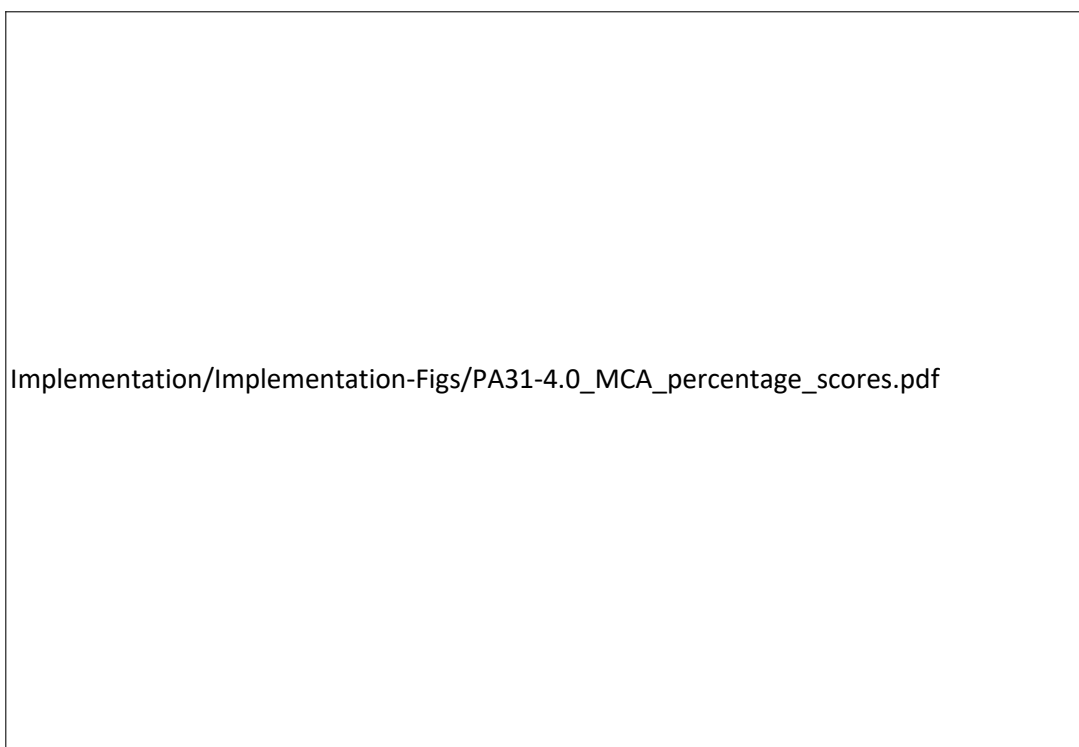


Fig. 2.28 : Analyse multicritères des scores en pourcentage de chaque site de surface et de l'ensemble du tracé du collisionneur pour le scénario PA31-4.0. Il faut noter que les sites PC, PE, PI et PK n'existent pas dans les scénarios à 8 sites. Les lignes bleues indiquent les seuils de performance individuels (vert, jaune, orange, rouge). Les barres vertes indiquent une très bonne performance et les emplacements jaunes correspondent à une bonne performance.

d'aménagement concerté). Une bonne intégration urbanistique et paysagère est nécessaire afin de préserver la vue vers les Alpes. La densité du trafic dans le secteur nécessite l'élaboration d'un concept d'accès efficace au site, en concertation avec les services techniques de la commune. Il n'est toutefois pas nécessaire de prévoir une route d'accès dédiée.

Implementation/Photos/FCC-2409171650-SEM-PA-Picture-2-V0002.jpg



Fig. 2.29 : Vue aérienne de l'emplacement candidat pour le site de surface PA.

Synergies et potentiels territoriaux

La chaleur fatale provenant du refroidissement du collisionneur de particules et du centre informatique peut être récupérée et fournie aux habitations et aux zones d'activité situées autour du site, y compris l'aéroport de Genève et la zone industrielle, en s'appuyant sur le réseau actuel d'approvisionnement en chaleur qui a été mis en place pour le programme LHC. La zone de compensation environnementale existante, mais qui n'est pas fonctionnelle, peut être transformée en un habitat naturel et une zone humide pleinement fonctionnels, ce qui permet d'améliorer considérablement la qualité de l'environnement dans cette zone. Les eaux résiduelles traitées du système de refroidissement peuvent être utilisées pour cette zone (la zone Poirier de l'Épine) et potentiellement pour des utilisations agricoles à proximité du site. Une synergie avec le point 8 du LHC permettrait de réduire considérablement l'empreinte du site PA. Cela nécessite une bonne planification et un bon enchaînement du projet de nouveau collisionneur en coordination avec le programme HL-LHC. La synergie avec le site du CERN à Préveressin et la sous-station de Bois-Tollet assure l'alimentation électrique (ligne existante de 400 kV vers Préveressin et liaison spécialisée de 63 kV de Préveressin vers le point 8 du LHC). Un centre d'accueil des visiteurs pourrait être créé en synergie avec le point 8 du LHC pour exploiter pleinement l'emplacement.



Fig. 2.30 : Emplacement du site de surface PA à Ferney-Voltaire, Ain, France. L'espace hachuré au sud représente une annexe qui est une extension du site LHC P8 existant.

2.6.6. Site PB

Description de l'emplacement du site

Le site se trouve à Presinge, dans le canton de Genève, en Suisse, au sud du Nant du Paradis, sur un champ classé comme surface d'assolement protégée, en bordure de la Route de Jussy (voir Fig. 2.31 et Fig. 2.32). La surface indiquée sur la carte indique que la zone du site couvre 4,5 ha. Le site est déplacé au sud de la route, ce qui évite les conflits avec les zones de protection de la nature et permet d'améliorer l'accès. Un tunnel de raccordement souterrain d'environ 100 m de longueur est nécessaire pour assurer la liaison avec la caverne de service située à l'intérieur du tunnel du collisionneur.

Contraintes connues

Les distances de protection préconisées entre la forêt et le ruisseau du Nant du Paradis, qui abrite une zone de reproduction d'amphibiens, sont respectées. L'analyse de l'état de l'environnement n'a pas détecté d'interférence avec des environnements protégés à proximité du site, en particulier le site de reproduction des amphibiens. L'impact sur la surface d'assolement (« SDA ») doit être réduit le plus possible. L'espace consommé par la SDA doit être compensé à hauteur de 1:1 par le transport de la terre arable vers un autre endroit qui devra être identifié avec l'aide des services cantonaux notifiés. Une bonne intégration paysagère nécessite dans toute la mesure du possible un site compact de taille réduite, idéalement semi-enterré. La réalisation d'une étude relative au système de refroidissement est nécessaire pour réduire les nuisances sonores et visuelles. Il est également nécessaire d'élaborer un concept pour réduire la pollution lumineuse pendant la phase de chantier. L'accès routier a été étudié par une entreprise spécialisée, connaissant bien le secteur. Il n'est pas nécessaire de construire une nouvelle route, mais il y aurait lieu de créer une jonction au niveau de la Route de Jussy. La conception détaillée et l'emplacement de l'option d'accès recommandée doivent être validés par les organismes notifiés du canton de Genève lorsqu'un projet de construction sera proposé. Un plan technique détaillé d'accès devra être établi à cet effet dans une phase ultérieure.

Implementation/Photos/FCC-2411151700-SEM-PB-Picture-2-V0002.jpg



Fig. 2.31 : Vue aérienne de l'emplacement candidat pour le site de surface PB.

Synergies et potentiels territoriaux

D'après l'étude d'accès routier réalisée par l'entreprise, un accès direct au site depuis la Route de Jussy est techniquement faisable et préférable du point de vue du projet. Ce scénario éviterait la nécessité de créer une nouvelle route d'accès. La zone tampon verte autour du site renforcerait et étendrait l'environnement naturel à proximité du cours d'eau du Nant du Paradis. Les sites de surface semi-enterrés amélioreraient non seulement l'intégration dans le paysage, mais aussi la valeur écologique et la biodiversité globales d'un habitat non agricole. Le renforcement du réseau électrique local, nécessaire durant la phase de construction, est considéré comme une occasion d'améliorer l'infrastructure pour les habitants de la zone entière. L'amélioration des transports publics, y compris du transport transfrontalier dans le cadre du chantier du FCC, représente également une opportunité pour la zone. Il existe plusieurs opportunités et une demande de fourniture de chaleur, récupérée de l'accélérateur de particules situé à proximité, par exemple, avec l'HEPIA et le projet de construction d'un nouveau site pénitentiaire d'ici à 2030 sur le site de Champ-Dollon.



Fig. 2.32 : Emplacement du site de surface PB à Presinge, canton de Genève, Suisse.

2.6.7. Site PD

Description de l'emplacement du site

Le site est situé à Nangy, Haute-Savoie, France (voir Fig. 2.33 et Fig. 2.34) entre l'autoroute A40 et la route départementale RD903 sur un terrain agricole classé en zone « A » dans le plan local d'urbanisme (« PLU »). La surface du site est d'environ 4,9 ha.

Contraintes connues

Le site est soumis à des contraintes d'espace à l'ouest, à l'est et au sud en raison des routes existantes et du projet de création d'une nouvelle liaison entre les routes. Le trafic routier est généralement élevé, ce qui explique le projet d'aménagement routier qui devrait intégrer la route départementale à l'autoroute. Une étude pour le développement de différents scénarios d'accès a été réalisée par une entreprise spécialisée. Les scénarios ont été discutés avec le département de la Haute-Savoie et le maire de la commune. Le scénario généralement privilégié, qui a le moins d'impact, est celui qui comprend une route d'accès réservée au site de surface. L'accès au site se ferait par un rond-point, qui serait construit au nord de la route départementale D 1205 à Fillinges.

Synergies et potentiels territoriaux

Le site n'est accessible que par la route d'accès dédiée, d'une longueur d'environ 250 mètres. Le site n'est pas visible depuis les habitations, ce qui facilite son intégration paysagère. Il existe plusieurs possibilités de fourniture de la chaleur résiduelle provenant du système de refroidissement, par exemple, pour une fromagerie située aux alentours, pour une zone d'activités industrielles et commerciales, des hôtels, des centres de soins, des communes riveraines telles que Fillinges, Boringes, Scientrier, Contamine-sur-Arve et le Centre hospitalier Alpes-Léman. La chaleur peut également être utilisée pour la production de biogaz dans la station d'épuration des eaux de Scientrier. Actuellement, une étude est en cours pour obtenir de l'eau de la station d'épuration « SRB » de Scientrier afin de l'utiliser dans le système de refroidissement de l'accélérateur. Si l'eau épurée n'est pas utilisée pour l'accélérateur de particules, elle pourrait être mise à la disposition de l'agriculture et de l'industrie. Une connexion directe à l'autoroute par bande transporteuse

Implementation/Photos/FCC-2409171700-SEM-PD-Picture-1-V0003.jpg



Fig. 2.33 : Vue aérienne de l'emplacement candidat pour le site de surface PD.

pendant la phase de construction a été étudiée. Elle faciliterait l'enlèvement et éventuellement la fourniture de matériaux, ce qui éviterait dans une large mesure le recours aux camions. Il est probable qu'il existe des zones dans les environs où les matériaux excavés peuvent être réutilisés, par exemple, des haies surélevées, des séparateurs anti-bruit, la création de tranchées couvertes, la mise en décharge et le transport vers des carrières à des fins de renaturation. Pour pouvoir élaborer un plan de gestion des matériaux excavés robuste, ces opportunités doivent être identifiées avec l'aide des autorités locales et des organismes notifiés (par exemple, la SAFER, la DDT, la DREAL).

2.6.8. Site PF

Description de l'emplacement du site

Un site technique de surface au point nominal PF à La Roche-sur-Foron, Haute-Savoie, France (voir Fig. 2.35 et Fig. 2.36) n'est pas réalisable pour les raisons suivantes :

- le site se trouverait au milieu d'un hameau de maisons individuelles ;
- la présence de la route de Lavillat vers La Roche-sur-Foron est incompatible avec la construction et l'installation du site et des équipements de l'accélérateur ;



Fig. 2.34 : Emplacement du site de la surface PD à Nangy, Haute-Savoie, France.

- le point nominal est situé sur un terrain élevé (755 m) menant à un puits trop profond, avec une topographie défavorable ;
- un léger déplacement vers l'intérieur de l'anneau est exclu en raison de la présence de pentes fortes et de risques de glissement de terrain.

La variante préférée retenue pour un site technique de surface PF est un emplacement situé à Éteaux, en Haute-Savoie (France) (voir Fig. 2.37), en bordure de la route départementale RD 1203, d'une superficie de 4 ha. Un tunnel de raccordement souterrain est nécessaire entre le puits situé dans le périmètre du site de surface indiqué et la caverne de service à l'intérieur du tunnel du collisionneur.

Si la surface du site doit être réduite, rendue plus compacte ou si certaines constructions ne peuvent être rendues compatibles avec l'intégration paysagère requise, une annexe au sud du site, le long de l'autoroute à La Roche-sur-Foron, pourra être envisagée. Le terrain se trouve sur le périmètre d'une installation de stockage de déchets inertes (ISDI). Dès lors que l'installation de stockage de déchets inertes est pleine et n'est plus en service, elle peut accueillir des constructions limitées à la surface telles que des systèmes de ventilation, des tours de refroidissement et une sous-station électrique.

Contraintes connues

Site principal à Éteaux :

Le puits du site et le tunnel de l'accélérateur sont distants de 558,5 m selon le positionnement du puits. Les zones humides à l'est du site doivent être préservées et pourraient être intégrées au site. Il faut maintenir une certaine distance entre le site et le hameau situé à l'est. Par conséquent, il reste peu d'espace pour le site de surface et la taille du site devrait être réduite. Il conviendrait d'entreprendre un travail avec la commune et les services de l'État (DDT, DREAL) pour définir des zones de valorisation des matériaux excavés à proximité du site. La surface disponible pour le site de surface est très limitée (4 ha). Il pourrait donc être nécessaire de déplacer certains éléments, par exemple, une sous-station électrique ou des tours de refroidissement, vers un emplacement situé sur l'option sud du site à La Roche-sur-Foron ou vers un autre lieu à proximité.

Implementation/Photos/FCC-2411151700-SEM-PF-Picture-1-V0002.jpg



Fig. 2.35 : [Vue aérienne de l'emplacement candidat pour le site de surface PF.](#)

Option d'une annexe à La Roche-sur-Foron :

Le site technique est situé sur le site d'une installation de stockage de déchets inertes (« ISDI »), en cours de construction, avec le statut d'installation classée de protection de l'environnement (« ICPE »), c'est-à-dire soumise à des contraintes particulières de construction, d'exploitation et de surveillance. À la suite d'une analyse effectuée par des prestataires de génie civil, il a été estimé que l'emplacement était, en principe, compatible avec la construction d'un site de surface. Cependant, ce choix entraînerait des surcoûts importants et poserait des difficultés techniques supplémentaires. Par exemple, il faudrait utiliser des piliers pour les constructions sur les dépôts de déchets inertes afin d'assurer la stabilité des travaux de terrassement et de la construction du puits. Il serait nécessaire de créer une route d'accès d'une longueur de 2,4 km, traversant la voie ferrée existante, et d'aménager un passage souterrain sous l'autoroute. Enfin, cette option est située à proximité immédiate d'une zone de protection de l'environnement (« ZNIEFF »), riche en biodiversité et comprenant un corridor pour la faune qu'il convient de préserver. La surface disponible est à peu près la même que pour l'emplacement d'Éteaux (4,1 ha, contre 4,0 ha). Cependant, si nécessaire, cet emplacement pourrait accueillir certaines infrastructures techniques compatibles avec les dépôts de déchets inertes, telles qu'une sous-station électrique ou des tours de refroidissement. Une autre analyse devra être effectuée lors de la phase de conception technique détaillée.



Fig. 2.36 : Emplacement nominal du site PF indiqué par un point sur le tracé du collisionneur. Deux sites de surface candidats nécessitant des tunnels d'accès horizontaux sont indiqués par des flèches noires.



Fig. 2.37 : Localisation du site de surface PF à Éteaux, Haute-Savoie, France.

Synergies et potentiels territoriaux

Pour le site d'Éteaux, il est possible de fournir la chaleur résiduelle du système de refroidissement à des installations publiques et à des entreprises dans un rayon allant jusqu'à 3 km. Une zone qualifiée de zone humide, mais aujourd'hui mal préservée, pourra être renaturalisée, protégée et bien préservée avec l'habitat situé à proximité du ruisseau du Vuaz. Enfin, un accès direct depuis la route

nationale est possible et éviterait la création d'une nouvelle route d'accès. Des sous-stations électriques pour la phase de construction existent dans les environs. Si nécessaire, une connexion à la station-service de l'autoroute voisine pourrait être mise en place pour faciliter le transport des matériaux excavés et l'approvisionnement en matériaux de construction.

2.6.9. Site PG

Description de l'emplacement du site



Fig. 2.38 : [Vue aérienne de l'emplacement candidat pour le site de surface PG.](#)

Le site d'expérimentation PG se trouve au nord de la Route d'Annecy sur un plateau, à la limite des communes de Charvonnex et de Groisy, en Haute-Savoie, France (voir Fig. 2.38 et Fig. 2.39). Le site principal se trouve en partie dans une forêt et en partie dans des prairies. Il se trouve à environ 800 m au sud de l'aire d'autoroute A410 de Groisy. À cet endroit, près de la station-service de l'autoroute, deux parcelles plus petites ont été identifiées pour accueillir des infrastructures techniques qui n'ont pas besoin d'être proches du puits. Toutes les parcelles sont éloignées des habitations. La superficie délimitée du site principal est de 6,9 ha. Toutefois, seule une fraction de cette surface serait construite. Des annexes de 1,9 ha et de 1,7 ha pour le stockage de matériel, une sous-station électrique et des tours de refroidissement à proximité de l'autoroute sont également indiquées. Un chemin forestier existant, large et d'une longueur de 800 mètres, doit être réaménagé pour servir de route d'accès au site principal.

Implementation/Implementation-Figs/PG_perimeter.pdf

Fig. 2.39 : Localisation du site de surface PG à Charvonnex et Groisy, Haute-Savoie, France. Le site principal croise l'alignement du collisionneur, représenté en bleu. Les deux parcelles situées au nord de l'autoroute servent à accueillir des équipements qui ne doivent pas nécessairement être situés à proximité immédiate des puits. Ces zones servent également à la remise des matériaux de construction entrants et à l'évacuation des matériaux d'excavation.

Contraintes connues

La forêt constitue un espace boisé classé (en France : « EBC »), hétérogène et apprécié pour sa biodiversité dans certaines de ses parties. L'utilisation de la forêt pour le site sera réduite et limitée à la partie présentant un milieu naturel de moindre qualité. Le défrichement sera compensé, par exemple, en reboisant la partie sud du plateau ou des friches existantes dans la forêt. Le site se trouve à la limite d'une forte pente vers la Route d'Annecy, au sud, et doit donc rester sur le haut du plateau. Il s'agit d'un espace tranquille et naturel avec des vues exceptionnelles sur la chaîne des Aravis au sud. Le site est exceptionnellement bien adapté à une installation destinée à l'accueil de visiteurs, avec des installations de loisirs sur place. Il sera nécessaire d'adopter des mesures pour réduire les nuisances sonores et lumineuses pendant les phases de chantier et d'exploitation.

Synergies et potentiels territoriaux

La possibilité de reboisement permet de compenser le défrichement d'environ 1,5 ha de forêt. Un accès en terrain plat, sous la forme d'un chemin forestier, permet l'aménagement d'une voie d'environ 800 m vers l'aire d'autoroute de Groisy et une large route qui longe l'autoroute. L'accès à l'autoroute pendant la phase de chantier pour l'évacuation des matériaux excavés et l'approvisionnement a été étudié et semble faisable. L'utilisation d'un convoyeur à bande élimine le besoin de camions. Il existe deux zones de stockage temporaire des déchets inertes et d'autres matériaux à proximité directe de l'aire et du chemin forestier. Les annexes telles que tours de refroidissement et sous-station électrique, proches de l'autoroute, pourraient accueillir des éléments davantage susceptibles d'entraîner des nuisances éventuelles. La fourniture de la chaleur résiduelle provenant du système de refroidissement semble possible. Plusieurs clients potentiels ont été identifiés dans les alentours, par exemple, des infrastructures publiques (école, collège, caserne de pompiers), un centre commercial et une clinique vétérinaire. Il y a également la possibilité de création d'un réseau de chauffage urbain à Charvonnex et à Groisy. La caserne de pompiers peut servir de base aux services d'urgence dans les environs immédiats du site. La valorisation de l'eau résiduelle du système de refroidissement semble possible pour l'alimentation du ruisseau des Fattes.

et des zones humides dans la forêt. Il y a assez d'espace disponible sur le site pour construire un centre d'accueil des visiteurs, auquel il serait possible de se rendre par l'aire d'autoroute de Groisy ou la Route d'Annecy. Le site se trouve à proximité d'Annecy, très facile d'accès pour le personnel du CNRS/LAPP. Des lieux de réutilisation des matériaux excavés pour l'agriculture et la sylviculture doivent encore être identifiés avec l'aide des communes et des services de l'État compétents (par exemple, SAFER, DDT, DREAL).

2.6.10. Site PH

Description de l'emplacement du site

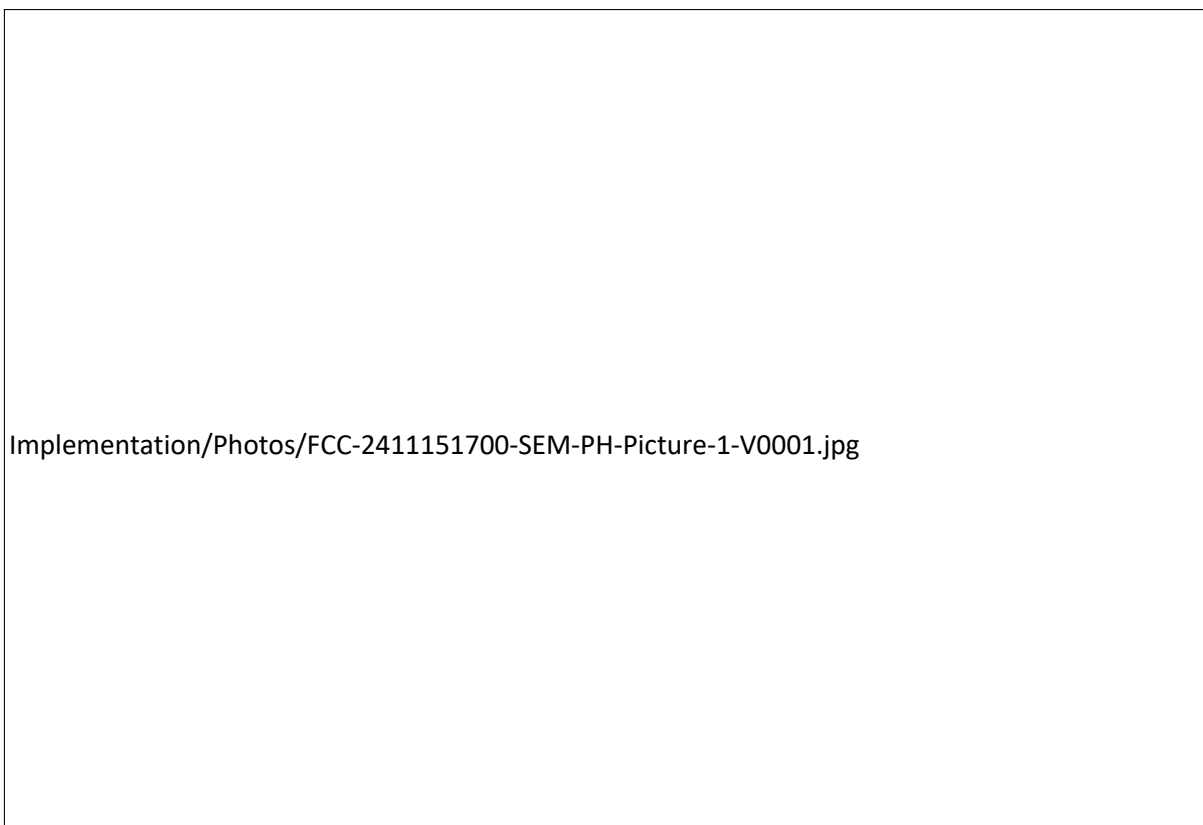


Fig. 2.40 : [Vue aérienne de l'emplacement candidat pour le site de surface PH.](#)

Le site technique PH est situé le long de la route D203 à Cercier, en Haute-Savoie, France (voir Fig. 2.40 et Fig. 2.41). Le site se trouverait dans la forêt, à cheval sur les communes de Cercier et de Marlioz, s'étendant dans la forêt sur une pente à l'ouest. Il est éloigné des habitations et n'est pas visible. C'est un emplacement naturel. La surface définie, située dans une zone moins riche en biodiversité, est de 8,2 ha.

Contraintes connues

Les études environnementales sur le terrain ont révélé que la partie du secteur forestier au nord du site est d'une grande valeur (riche biodiversité, environnement naturel). Par conséquent, l'utilisation de la forêt doit être réduite au maximum

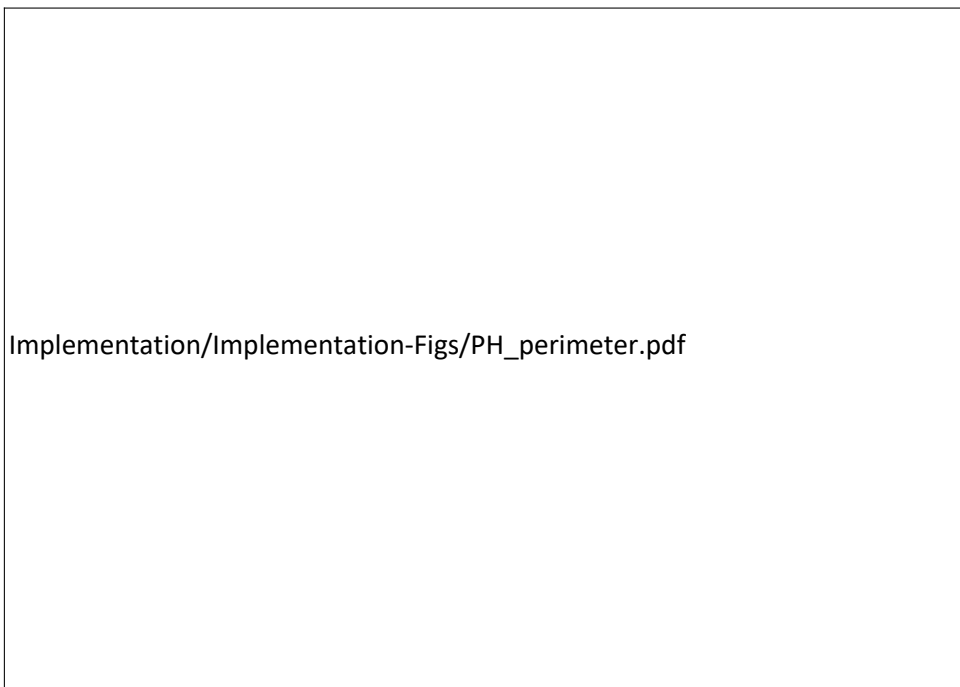


Fig. 2.41 : Localisation du site de surface PH à Cercier et Marlioz, Haute-Savoie, France.

et l'emplacement spécifique des bâtiments et des accès dans la forêt doit être soigneusement défini au cours d'une phase de conception ultérieure. Le site respectera la zone tampon du gazoduc, côté nord. En raison du calme et de l'aspect naturel, il est nécessaire de veiller aux nuisances sonores et lumineuses. Une habitation est située à environ 200 m au sud. Il n'y a pas de co-visibilité entre le site et l'habitation. Étant donné que la route est petite, il est nécessaire de définir des lieux de recyclage des matériaux excavés à proximité, permettant leur utilisation en agriculture ou pour le reboisement. Les matériaux seraient principalement transportés vers le nord ou l'ouest par bande transporteuse afin d'éviter les contraintes routières. Le site est bien adapté pour accueillir le système de radiofréquences, puisqu'une ligne réseau de 400 kV passe à moins de 2 km au nord. RTE, l'opérateur national du réseau de transport d'électricité, devra tenir compte de l'alimentation en électricité par câbles enterrés lors de la réalisation de l'étude relative à la création d'un poste d'accès à la ligne de 400 kV.

Si, pour une raison quelconque, l'emplacement privilégié du site au point nominal n'est pas considéré comme réalisable, un autre emplacement à environ 900 m dans le sens des aiguilles d'une montre du collisionneur a été identifié comme alternative possible. Ce site est situé sur des champs agricoles à côté de la route départementale D2. Il conviendrait comme emplacement pour la sous-station électrique en cas de placement sur le point nominal ou en cas de déplacement, étant donné que la sous-station électrique ne doit pas nécessairement se trouver à proximité immédiate du puits.

Synergies et potentiels territoriaux

La valorisation de l'eau provenant des infrastructures du collisionneur de particules suscite beaucoup d'intérêt pour les activités agricoles autour du site (pommiers et poiriers, par exemple). Un bassin d'eau existe à proximité, au nord-est. Si d'autres évolutions du scénario plus détaillées sont envisagées, une étude devra être réalisée pour trouver un moyen d'intégrer ces opportunités au site. Il est conseillé de travailler avec les acteurs locaux pour identifier les consommateurs potentiels de la chaleur résiduelle, par exemple, dans le secteur des fruits et légumes.

Implementation/Photos/FCC-2411151700-SEM-PJ-Picture-2-V0001.jpg



Fig. 2.42 : Vue aérienne de l'emplacement candidat pour le site de surface PJ.

2.6.11. Site PJ

Description de l'emplacement du site

Le site d'expérience PJ est situé dans un champ sur une pente au nord de l'autoroute A40 et à l'ouest de l'aire d'autoroute de Valleiry, à la jonction du Chemin des Tattes et du Chemin de Maigy sur les communes de Dingy-en-Vuache et de Vulbens, en Haute-Savoie, France (voir Fig. 2.42 et Fig. 2.43). Un petit ruisseau se trouve à l'ouest. Le site est éloigné de toute habitation. La superficie du site est de 6,1 ha.

Le site est accessible par le chemin rural revêtu existant « Chemin des Tattes » en direction du nord vers Vulbens. Ce chemin devra être élargi et rénové.

Contraintes connues

Il existe un corridor pour la faune qui doit être respecté dans le cadre du développement du site de surface. Dans la mesure du possible, ce corridor devra être amélioré, car il fonctionne mal à l'heure actuelle. Une zone plus riche en biodiversité au milieu du site devra être recréée en bordure du site, en liaison avec le corridor pour la faune. La conception du site devra également prendre en compte les projets de renforcement de la mobilité douce entre Dingy-en-Vuache et Vulbens.



Fig. 2.43 : Localisation du site de surface PJ à Dingy-en-Vuache et Vulbens, Haute-Savoie, France.

Synergies et potentiels territoriaux

Aux alentours du site se trouvent de nombreux champs agricoles en pente. Il sera nécessaire de collaborer avec les communes et les services de l'État (par exemple, SAFER, Chambre d'agriculture, DDT, DREAL) pour déterminer les lieux où l'agriculture peut bénéficier du recyclage des matériaux excavés. Le site peut également tirer profit des aménagements prévus à proximité, au sud, sur le même horizon temporel (par exemple, nouveau poste de gendarmerie). La mise à disposition de la chaleur résiduelle pour les établissements publics et les zones de commerce proches, à Vulbens et à Valleiry, semble faisable. En particulier, il serait souhaitable de travailler avec le département sur l'intégration des infrastructures d'éducation et de formation avec les activités liées au site de surface afin de générer une valeur ajoutée locale. La création d'un centre de visite permettrait de développer un tourisme durable de qualité. La connexion à l'aire d'autoroute de Valleiry pour l'évacuation des matériaux et pour l'approvisionnement par autoroute a fait l'objet d'une analyse et est faisable. Pour éviter l'utilisation de camions, un convoyeur serait utilisé pour transporter les matériaux jusqu'à l'aire d'autoroute. Les matériaux entrants pourraient être transportés par une route temporaire de 700 m de long jusqu'au site. Le développement de synergies s'agissant de la réutilisation des eaux rejetées pour l'alimentation des ruisseaux et pour l'irrigation des cultures suscite de l'intérêt.

2.6.12. Site PL

Description de l'emplacement du site

L'hypothèse de travail pour l'emplacement du site technique PL à Challex, Ain, France, a été déterminée par plusieurs étapes de travail avec la municipalité en 2023 et 2024. L'emplacement du site de référence au point nominal est indiqué sur les Fig. 2.44 et 2.45.

Le site se trouve au point nominal au milieu de la section technique en alignement, près de la frontière entre la France et la Suisse, dans un champ agricole. Le périmètre comprend deux maisons qui devront être intégrées dans le projet de site de surface. L'emplacement doit encore être optimisé en étroite coopération avec la commune et les architectes. Cette option, située à l'écart du village, nécessite la création d'une route d'accès d'environ 1,3 km à la route départementale D89. Le tracé de cette route sera élaboré par une société spécialisée, en étroite collaboration avec la commune,

Implementation/Photos/FCC-2411151700-SEM-PL-Picture-2-V0002.jpg



Fig. 2.44 : Vue aérienne de l'emplacement candidat pour le site de surface PL.

dans le respect des contraintes environnementales existantes. La superficie du site est de 5,5 ha. Une grande partie de cet espace est prévue pour la renaturation.

Si, pour une raison quelconque, la mise en œuvre au point nominal se révélait irréalisable, un autre emplacement a été identifié à une distance de 800 m dans le sens inverse des aiguilles d'une montre le long de la section droite. Cet emplacement nécessiterait la création d'un puits d'accès à environ 150 m à l'extérieur de la ligne du collisionneur et entraînerait donc des coûts sensiblement plus élevés (Fig. 2.46).

Contraintes connues

Option d'emplacement au point nominal

La proximité de la frontière franco-suisse, proche des vignes, représente un défi, car il n'existe pas de voirie ou d'autres infrastructures. Cependant, une habitation isolée se trouvant à proximité subirait des nuisances et serait donc à acquérir. Cette parcelle serait intégrée au site de surface et servirait à la renaturation et à la protection de la visibilité. L'accès au site en passant par le village est à exclure. Les routes sont trop étroites et les nuisances seraient inacceptables. La création d'un nouveau accès à travers les champs, au nord du village, est complexe mais faisable. Le point théorique est séparé



Fig. 2.45 : Études d'options pour les sites de surface PL à Challex, Ain, France.



Fig. 2.46 : Emplacement alternatif pour le site PL à Challex, Ain, France. Le terrain est situé à l'extérieur du tunnel du collisionneur, ce qui requiert un tunnel de raccordement et un accès plus compliqué à la galerie des radiofréquences et au tunnel du collisionneur pour l'installation et la maintenance des équipements.

des axes principaux (Route de Greny et Route de la Craz) à l'entrée de la commune par des zones naturelles. La forêt au nord de Challex est une zone de riche biodiversité. Du côté suisse, la forêt est une zone de protection absolue (site Ramsar), les vignobles sont protégés, les zones naturelles sont protégées, le village est une zone classée patrimoine culturel et la pente est trop forte pour une construction en surface. A

Une nappe d'eau présumée, temporaire et peu profonde, a été ajoutée aux cartes suisses en 2023. Les études géotechniques en cours permettront de confirmer l'existence de cette nappe. Techniquement, la création d'un puits est faisable, même en présence d'une nappe temporaire à l'emplacement concerné. Dans l'immédiat, les enquêtes permettront également de déterminer son caractère saisonnier et la possibilité de connexions transfrontalières. Le positionnement du puits et de la totalité du site peut être optimisé en fonction des résultats de ces investigations du sous-sol. À la suite d'une analyse menée avec la municipalité locale, il a été déterminé que cette option d'emplacement était préférable.

Option d'emplacement à 800 m à l'est du point nominal (non retenue)

Un emplacement situé à 800 m à l'est du point nominal ne permettrait pas de réaliser un accès à l'intérieur de l'anneau (voir Fig. 2.46).

Le site se trouverait à environ 150 m des habitations, 5 m à 10 m plus bas que la commune, sur une faible pente d'environ 3 %. Il serait visible depuis certaines habitations. Le site affecterait partiellement la zone naturelle protégée, mais l'impact resterait limité car il s'agit actuellement d'un champ et le corridor biologique passe plus à l'est du site. Il serait nécessaire de réaliser une route d'accès vers la D89 (environ 400 m de longueur) ou vers la Rue de la Craz (environ 300 m de longueur). Ce scénario a servi de base de dialogue avec la commune pour trouver une alternative à l'emplacement au point nominal.

Une solution techniquement réalisable pour l'accès depuis l'extérieur de l'anneau, au prix d'un coût plus élevé, a été élaborée. Le puits serait situé environ 150 m à l'extérieur de l'anneau (voir Fig. 2.47). La vérification de sa visibilité depuis les habitations isolées situées à la périphérie de la commune a montré que cet emplacement ne devait pas être privilégié.



Fig. 2.47 : Accès au tunnel principal par l'extérieur avec une liaison souterraine. Cette approche est plus compliquée et induit des coûts supplémentaires.

Synergies et potentiels territoriaux

La proximité des sites du CERN (Prévessin en France, et Meyrin en Suisse) représente une opportunité exceptionnelle car elle permet d'exploiter des synergies pour l'installation, le fonctionnement, la maintenance et la réparation des équipements en un temps réduit. Les champs situés au nord de la commune semblent appropriés pour le recyclage des matériaux excavés pour l'agriculture. Il n'y a pas de visibilité directe depuis le village. La proximité de l'ancienne gare de Collonges, à une distance de 12 km via la voie ferrée désaffectée, représente une opportunité pour l'enlèvement des matériaux et l'approvisionnement, en évitant autant que possible les camions grâce à l'utilisation de bandes transporteuses. Une liaison avec la gare de La Plaine en Suisse serait techniquement possible, mais dépendrait d'un accord entre la France et la Suisse. Cela permettrait également d'évacuer des matériaux par une combinaison de bandes transporteuses et de systèmes ferroviaires. L'amélioration du réseau électrique local, nécessaire pour mener à bien la phase de construction, bénéficierait à la commune et à ses habitants. Elle permettrait l'augmentation de l'utilisation des énergies renouvelables et le renforcement des stations de recharge des véhicules. L'amélioration du réseau de transports publics, et ce dès la phase de construction, peut également aider les résidents de la commune, qui utilisent aujourd'hui largement leur véhicule privé pour leurs déplacements sur la D884 en France, vers Meyrin et La Plaine, en Suisse. Challex est une commune qui accueille traditionnellement des employés des organisations internationales, dont une grande partie travaille au CERN. Le renforcement des infrastructures serait donc bénéfique à l'agglomération et au projet. La réutilisation de la chaleur résiduelle provenant du collisionneur de particules trouverait des applications dans le chauffage des habitations individuelles et collectives (par exemple, EHPAD Les Cyclamens), ainsi que du centre commercial Val Thoiry, à une distance d'environ 7 km. Les autres communes se trouvant à proximité telles que Greny, Saint-Jean-de-Gonville, Péron et La Plaine (Suisse) pourraient également bénéficier de cette fourniture de chaleur. L'entreprise Firmenich (parfums et arômes), dont le siège est situé à La Plaine, en Suisse, pourrait également profiter de cette chaleur. La chaleur pourrait également être utilisée de manière innovante pour la pisciculture, les fermes aquaponiques et maraîchères et la culture en serre.

2.6.13. Site de Prévessin

L'objectif des études d'implantation des installations d'injection est d'utiliser au maximum les infrastructures existantes du CERN. Compte tenu des contraintes territoriales fortes qui ont été identifiées et documentées pendant 7 ans, des besoins en électricité, en eau brute, d'un espace de plus d'un kilomètre de longueur en surface pour un accélérateur linéaire et les ateliers, bureaux et zones de stockage associés, le site existant du CERN à Prévessin s'est révélé être le lieu le plus approprié pour une hypothèse de travail. Ce site dispose de l'espace nécessaire pour accueillir les sources d'électrons et de positons, les accélérateurs linéaires, les anneaux d'amortissement et les installations expérimentales optionnelles permettant d'exploiter le puissant injecteur d'électrons et de positons en tant qu'instrument scientifique supplémentaire pouvant être utilisé avant même la mise en service du collisionneur d'électrons-positons. De plus, ce site se trouve à une distance assez proche du site de surface LHC P8 existant qui, avec l'espace supplémentaire aux environs immédiats, forme le site de surface PA. Par conséquent, la mise en œuvre de la ligne de transfert, qui s'appuie également sur les structures souterraines SPS existantes, permet d'obtenir une configuration avantageuse. De nombreuses infrastructures techniques telles que le raccordement au réseau 400 kV existant, l'approvisionnement et le traitement de l'eau, les bureaux, les installations informatiques, l'espace pour les activités de construction permettent de limiter les efforts habituellement liés au développement territorial d'un nouveau site. Au stade actuel du développement conceptuel, l'injecteur aurait une longueur totale d'environ 1,2 km. Il pourrait presque s'insérer dans l'espace clôturé du site de Prévessin.

Un travail en commun avec les autorités et une optimisation plus poussée selon l'approche « Éviter-réduire-compenser » seront réalisés afin de limiter autant que possible toute extension territoriale inévitable et de garantir, en fin de compte, qu'un scénario de référence approprié pour l'emplacement de l'injecteur puisse être identifié.

Les premières explorations ont exclu la possibilité d'étendre le site vers le nord et l'est en raison de nombreuses contraintes liées à la nature, à l'agriculture et à la visibilité. L'hypothèse de travail actuelle, inachevée, illustrée à la Fig. 2.48, repose sur un emplacement entre le ruisseau « Lion » et le faisceau de la zone nord. Les exigences et les contraintes des différents éléments du concept technique, tels que la taille et la forme exactes de l'anneau d'amortissement, les largeurs et les longueurs des accélérateurs et leur intégration,

ne sont pas encore à un niveau permettant de figer l'emplacement exact sur le site. Le travail d'analyse effectué jusqu'à présent a toutefois permis de confirmer en principe la faisabilité technique et territoriale, et a contribué à identifier les contraintes à prendre en compte pour les activités ultérieures.

Au cours d'une phase de conception technique suivante, l'analyse environnementale guidera l'optimisation de l'emplacement afin de garantir que les contraintes naturelles soient respectées, que l'extension nécessaire du domaine clôturé existant soit aussi réduite que raisonnablement possible et que les installations expérimentales existantes ne subissent pas d'impact significatif. Un concept préliminaire pour le tracé de la ligne de transfert souterraine évite autant que possible les conflits avec les zones de construction prévues en surface. Une conception définitive nécessitera une analyse environnementale plus détaillée, notamment en ce qui concerne la géologie et l'hydrogéologie. Les efforts estimés pour ces activités d'analyse et de conception sont de l'ordre de deux à trois ans. Ils doivent être intégrés dans le processus global d'autorisation environnementale du projet.



Implementation/Implementation-Figs/FCC-injector-prevessin-2501220847_cut.pdf

Fig. 2.48 : Croquis de l'hypothèse de travail actuelle pour un injecteur basé sur un accélérateur linéaire d'une longueur d'environ 1,2 km. Un emplacement définitif reste à définir dans le cadre d'une phase de conception, en tenant compte des contraintes liées à l'environnement, aux installations expérimentales existantes, au développement territorial et à l'ingénierie.

2.6.14. Conclusion

Le Tableau 2.6 présente l'état d'avancement de l'analyse de faisabilité des emplacements des sites de surface du scénario PA31-4.0. La faisabilité technique a été évaluée à l'aide de cartes et de données dont disposaient les personnes travaillant sur l'étude ainsi que les prestataires. L'évaluation a également reposé sur des études de terrain et de l'environnement effectuées par des entreprises spécialisées, sur des échanges avec les services techniques compétents des deux États hôtes et avec des élus locaux (maires, conseillers municipaux, conseillers départementaux et conseillers régionaux), qui représentent les citoyens et agissent dans leur intérêt.

Tableau 2.6 : État d'avancement de l'évaluation de la faisabilité techniques des sites en surface du scénario PA31

Site		Faisabilité technique	Conditions de faisabilité
PA	Ferney-Voltaire, Ain, France	Confirmée	Limitier l'impact sur le paysage, valoriser l'espace naturel et la zone de compensation existante. Maximiser la synergie avec le point 8 du LHC. Compenser la perte d'espace agricole. Développer un centre d'accueil des visiteurs, par exemple, sur l'emprise du site du point 8 du LHC. Développer des synergies autour de la valorisation de la chaleur avec les municipalités situées dans un rayon de 10 km, y compris les municipalités suisses et l'aéroport de Genève.
PB	Presinge, Genève, Suisse	Confirmée	Définir l'emplacement exact du site sur la parcelle et engager la réflexion avec la municipalité. Identifier un lieu de compensation de la perte d'espace agricole. Limiter l'impact sur le paysage. Bien prendre en considération la sensibilité de l'emplacement du site dans le milieu naturel. Un concept détaillé de désignations de l'accès routier doit être développé et approuvé par le canton de Genève. Parvenir à un accord pour recycler les matériaux excavés, de préférence localement. Développer des synergies avec les acteurs locaux et les autorités locales, reposant sur la récupération de chaleur autour du site.
PD	Nangy, Haute-Savoie, France	Confirmée	Il n'y a pas de point de blocage précis, mais les enjeux forts du secteur exigent un développement conjoint du site minutieux, en accord avec les acteurs locaux. Limiter la perte d'espace agricole en travaillant sur un site de surface réduite. Compenser la perte d'espace agricole. Maintenir la compatibilité avec la liaison proposée entre la route départementale 903 et l'autoroute A40. Estimation du lancement des travaux : premier trimestre 2025. Élaborer un concept de transport pour la phase de construction afin de limiter les impacts sur un secteur déjà surchargé. Développer des synergies avec les collectivités locales situées autour de l'hôpital voisin (CHAL), de la station d'épuration de Scientrier (STEP) et de la zone industrielle au nord.
PF	Éteaux, Haute-Savoie, France	Confirmée	L'option nord au bord de la RD1203 a été confirmée à condition d'éviter les zones humides à proximité. Limiter la perte d'espace agricole. Pour une éventuelle extension vers le sud, une décision serait nécessaire avant le début de la phase 2 de l'ISDI (installation de stockage de déchets inertes) à La Roche-sur-Foron en 2027. Cela permettrait d'effectuer les travaux de terrassement de la partie ouest pour un site d'une surface réduite, au lieu d'attendre un aménagement complet de l'ISDI. Sinon, des annexes devraient être construites au-dessus des déchets inertes. Il faut parvenir à un accord avec l'exploitant de l'ISDI et les propriétaires des terrains. Il conviendra d'élaborer l'aménagement de l'accès pour cette option. Toute perte économique subie par l'exploitant de l'ISDI doit être prise en considération dans le développement de synergies entre le site et l'exploitant. Développer des synergies avec les autorités locales pour développer le site avec les services d'urgence.

PG	Charvonnex et Groisy, Haute-Savoie, France	Confirmée	L'emplacement du site se situe à cheval entre la forêt et le plateau, qui comporte des prairies inexploitées. Deux annexes proches de l'autoroute accueilleront certaines installations (par exemple, un système de refroidissement de l'eau, une sous-station électrique) afin d'éviter toute perturbation de la zone boisée. Prévoir un centre d'accueil des visiteurs pour développer un tourisme durable et de qualité. Développer des synergies avec les communes de Groisy et de Charvonnex pour aménager le site avec des services de proximité pour les chercheurs travaillant sur le site et les services d'urgence. La perte d'espaces boisés peut être compensée par un reboisement autour du site. L'aménagement de l'accès existant par le nord est approprié.
PH	Cercier et Marlioz, Haute-Savoie, France	Confirmée	Limitier les emprises du site et rester dans l'espace boisé afin d'éviter tout impact sur les habitations situées au sud du site. Réduire l'impact sur les habitats naturels et la biodiversité. Compenser les impacts sur les espaces boisés, l'habitat et la biodiversité qui ne peuvent être ni évités ni réduits. Respecter la servitude du gazoduc à proximité du site et décider quelle distance doit être maintenue entre le gazoduc et les infrastructures en surface. Envisager un morcellement du site ou son déplacement le long de la section droite.
PJ	Dingy-en-Vuache et Vulbens, Haute-Savoie, France	Confirmée	Compenser la perte d'espace agricole. Préserver les corridors écologiques. Intégrer les projets prévus pour développer la mobilité douce entre Dingy-en-Vuache et Vulbens. Prévoir un centre d'accueil des visiteurs pour développer un tourisme durable et de qualité. Travailler avec les municipalités pour développer une synergie pour le site en ce qui concerne les services de proximité pour les chercheurs travaillant sur place, les services d'urgence et les écoles.
PL	Challex, Haute-Savoie, France	Confirmée	L'emplacement du point nominal a été discuté avec la municipalité. Compensation de la perte d'espace agricole. Une optimisation conjointe du site avec la municipalité est en cours.
CERN	Prévessin et Saint-Genis Pouilly, Ain, France	Confirmée	L'emplacement de l'injecteur sur le site actuel du CERN à Prévessin a été vérifié et le principe de sa faisabilité technique a été confirmé. L'optimisation de l'emplacement sur le site reste à faire une fois que les exigences techniques détaillées et les invariants seront disponibles et que l'état de l'environnement aura été analysé. Le développement territorial en dehors du périmètre clôturé sera maintenu aussi faible que raisonnablement possible. Le tracé de la ligne de transfert souterraine vers le site PA sera conçu en tenant compte de la géologie, de l'hydrogéologie et du projet de construction des zones en surface.

2.7. Besoins en infrastructures territoriales

2.7.1. Introduction

La construction, l'installation et l'exploitation du collisionneur de particules et des expériences qui lui sont associées nécessitent un certain nombre d'infrastructures territoriales différentes. L'élaboration du scénario de mise en œuvre a mis l'accent sur l'intérêt qu'il y a à tirer parti des infrastructures existantes dans toute la mesure du possible (Fig. 2.49). Les réseaux de transport, d'électricité et d'eau bien développés dans la région autour du CERN sont l'une des motivations pour proposer l'installation dans cette région. Les principales infrastructures requises et décrites dans cette section sont les routes qui donnent accès aux sites de surface, les autoroutes pour l'évacuation des matériaux excavés et l'approvisionnement en matériaux et équipements de construction, les lignes ferroviaires pour le transport éventuel des matériaux excavés et de construction, l'électricité pour la phase de construction, l'accès direct au réseau électrique français à haute capacité pour l'exploitation et l'eau non traitée à des fins de refroidissement.

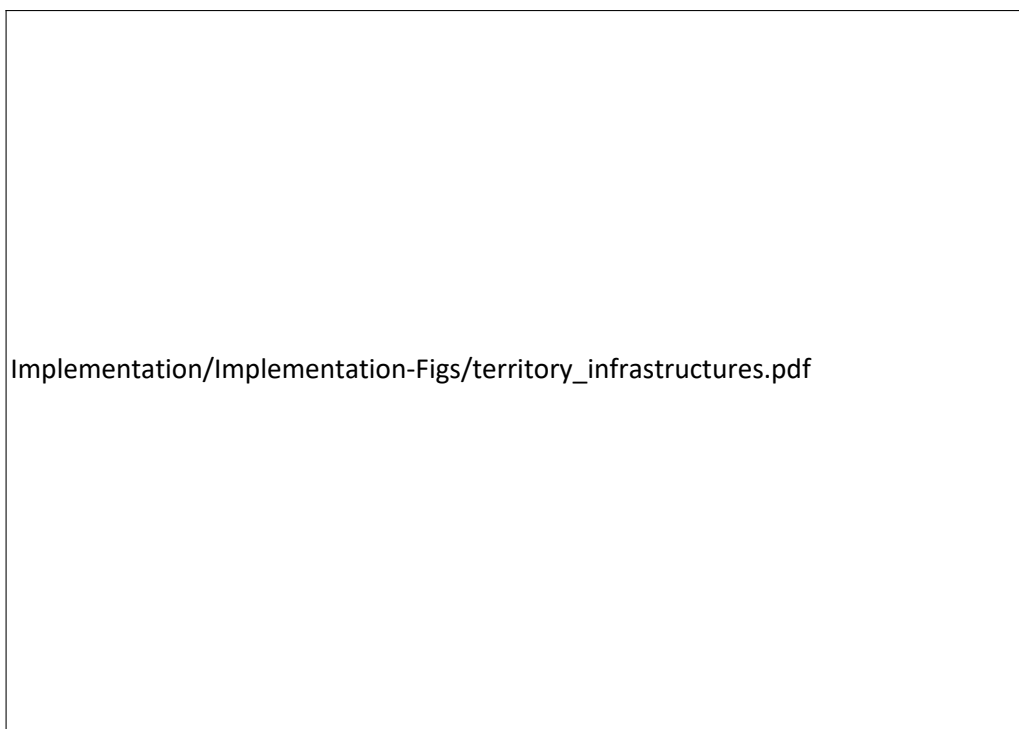


Fig. 2.49 : Les infrastructures routières, électriques et de traitement des eaux importantes, les services d'urgence et les postes frontières situés à proximité des sites de surface sont indiqués par des cercles rouges.

2.7.2. Accès routier

Le réseau routier est dense sur le tracé du scénario de référence. Pour les voies d'accès au site, afin que deux poids lourds puissent se croiser à vitesse réduite, un profil en travers minimum de 5,50 m de chaussée avec deux accotements de 0,50 m est nécessaire. En fonction des contraintes environnementales, les voies des routes renforcées ou des nouvelles routes pourront être plus étroites : des largeurs de 4,00 m pour la chaussée et de 0,50 m pour les accotements sont acceptables si des possibilités de passage dans les deux sens sont prévues. Ce profil réduit nécessitera la passation de consignes aux chauffeurs de véhicules concernés.

Plusieurs sites de surface peuvent bénéficier d'un accès routier direct (PA, PD, PF, PH) et d'autres nécessitent un renforcement mineur de l'accès routier existant (800 m de chemin forestier à revêtir pour PG, 600 m de chemin rural à revêtir pour PJ). Le site PD nécessite la création d'un accès réservé de 300 m de long. Le site PL nécessite la création d'un accès réservé d'environ 1 300 m de longueur. Au total, moins de 3 km de route doivent être créés.



Fig. 2.50 : Vue d'ensemble du réseau de transport routier et ferroviaire dans le périmètre du scénario de référence.

Une analyse du trafic routier [38] a été effectuée pour tous les sites et la faisabilité de la construction a été vérifiée grâce à ce travail. Les conceptions techniques des accès routiers ont été élaborées pour les sites PB, PD et PF afin de garantir la faisabilité dans des zones soumises à des contraintes particulières en matière de circulation routière, liées à la visibilité et à la sécurité routière dans le cas du site PB, à un important projet d'élargissement de la route et de développement de l'autoroute dans le cas du site PD, et à la sécurité routière dans le cas du site PF. Des conceptions détaillées des accès routiers doivent maintenant être réalisées pour tous les sites afin d'élaborer un ensemble cohérent de conceptions qui est nécessaire pour les évaluations de l'impact sur l'environnement et l'autorisation du projet.

Implementation/Implementation-Figs/road-accesses.pdf

Fig. 2.51 : Vue d'ensemble des concepts d'accès routier pour chacun des sites de surface.

2.7.3. Accès à l'autoroute

L'étude a examiné la faisabilité de raccordements au réseau autoroutier pour l'évacuation des matériaux et l'approvisionnement du matériel pendant la phase de construction [39]. Cette éventualité de raccordements autoroutiers, que ce soit directement, par l'intermédiaire de convoyeurs ou par des chemins en gravier s'inscrit dans un objectif d'intérêt général, visant à limiter les impacts du projet, notamment pendant la phase du chantier. Les choix techniques spécifiques seront faits ultérieurement, lors de la phase d'élaboration et de préparation du projet. Afin de vérifier la faisabilité technique, juridique et financière de l'accès direct aux autoroutes, des dossiers contenant des plans d'aménagement et des descriptions ont été constitués et soumis pour examen le 14 septembre 2022 à l'autorité compétente pour la délivrance des concessions : la Direction générale des infrastructures, des transports et des mobilités (DGITM), la Direction générale des infrastructures, des transports et des mobilités/Direction des mobilités routières/Sous-direction des financements innovants et du contrôle des concessions autoroutières/le Chef du Bureau des services aux usagers et de la comodalité et la Direction générale des infrastructures, des transports et des mobilités/Direction des mobilités routières/Sous-direction des financements innovants et du contrôle des concessions autoroutières/le Chef du Bureau du patrimoine et de l'aménagement.

La faisabilité de quatre nouveaux raccordements au réseau autoroutier a été analysée et son principe a été confirmé (voir Fig. 2.52) pour les sites suivants :

1. site PD à Nangy (sur l'autoroute A40) ;
2. Site PF à Éteaux/La Roche-sur Foron (sur l'autoroute A410),
3. site PG à Charvonnex/Groisy (sur l'autoroute A40) ;
4. site PJ à Dingy-en-Vuache/Vulbens (sur l'autoroute A410).

Les conclusions des interactions avec la DGITM ont été les suivantes :

- Les concepts d'accès et les aires de chargement/déchargement prévues sont en principe acceptables ;
- Des ajustements seront nécessaires, car les décisions finales seront prises avec l'exploitant de l'autoroute en phase de projet ;
- Des plans détaillés doivent être élaborés et présentés ;
- La procédure de demande future a été détaillée ; – Les justifications proposées, au nom de l'intérêt général, sont acceptables ;
- Les entrées-sorties devront être équipées de dispositifs de détection pour gérer les péages.

2.7.4. Accès au réseau ferroviaire

Afin de réduire la circulation des camions, de créer de nouvelles possibilités d'approvisionnement en matériaux de construction de qualité sur de plus grandes distances et d'ouvrir des possibilités de transport des matériaux excavés vers des sites de dépôt appropriés et des lieux de réutilisation d'une manière respectueuse de l'environnement et à haute capacité, des études sur les conditions d'accès ferroviaire ont été réalisées par une société spécialisée dans ce domaine [40–48].

Le scénario de référence actuel a été pris comme hypothèse de travail pour analyser les opportunités et les faisabilités concernant l'accès au système ferroviaire via les installations existantes (installations de chargement et de déchargement des marchandises) et concernant la création de nouveaux accès (appelés ITE, « Installations terminales embranchées »).

Les études ont utilisé une analyse multicritères qui a pris en compte les indicateurs suivants :

- Proximité du site de surface par rapport à une voie ferrée appropriée ;
- Compatibilité technique et administrative pour l'accès aux infrastructures ferroviaires françaises et suisses ;
- Présence d'un service ou d'une ITE existante qui pourrait être exploité ;



Fig. 2.52 : Localisation des raccordements autoroutiers, qui ont été étudiés à partir des aires de service et de repos existantes. Les points bleus correspondent aux aires de repos des autoroutes, les points magenta aux stations-service des autoroutes et les points verts aux gares de péage.

- Faisabilité de la création d’une liaison de transport entre le site et l’accès à la voie ferrée ;
- Exigences minimales d’espace pour l’accès ferroviaire et l’espace disponible ;
- Nombre de convois nécessaires pour évacuer tous les matériaux excavés ;
- Analyse de la capacité disponible et des limitations sur chaque ligne ferroviaire.

Il est important de garder à l’esprit que chaque nouvel accès ferroviaire nécessite un espace d’environ 400 m sur 40 m, soit 1,6 ha de terrain (voir Fig. 2.53).

La ligne de train 890000 passant par Meyrin, Collonges fournit aujourd’hui la capacité libre nécessaire. La ligne 902000 à Vulbens et la ligne 897000 passant à Éteaux et à Groisy n’ont que des capacités limitées.

L’analyse a révélé les possibilités « de principe » suivantes pour les accès ferroviaires :

Sur la base de l’analyse, les accès les plus probables au système ferroviaire sont aujourd’hui la gare existante et inutilisée de Collonges pour le site PL, un nouvel accès au nord de Vulbens pour le site PJ et un nouvel accès à l’ouest de Groisy pour le site PG. Alors que l’ancienne gare de Collonges se trouve à 13 km du site de surface PL à Challex, un raccordement avec une bande transporteuse peut représenter une approche appropriée, évitant le trafic de camions.

La faisabilité de principe de la création d’un accès à La-Roche-sur-Foron sur le site d’une

Implementation/Implementation-Figs/ITE.pdf

Fig. 2.53 : Espace minimum requis pour un nouvel accès ferroviaire pour le transport de marchandises.

Tableau 2.7 : Possibilités d'accès ferroviaire pour chaque site de surface.

Site	Distance	Faisabilité	Description
PA	Moins de 5 km	Incertaine	Nécessite le transport transfrontalier de matériaux
PB	Moins de 5 km	Faible	Nécessite le transport transfrontalier de matériaux
PD	Aucune possibilité à moins de 10 km	Irréalizable	
PF	Moins de 1 km	Moyenne	Contraintes d'espace et présence d'une ISDI
PG	Moins de 2 km	Moyenne	Contraintes d'implantation
PH	Aucune possibilité à moins de 10 km	Irréalizable	
PJ	Moins de 5 km	Forte	
PL	Moins de 10 km	Forte	Via la gare existante et inutilisée de Collonges

installation de stockage de déchets inertes (I.S.D.I.) existe dès lors que cette installation aura été remplie. Cependant, les quantités de matières produites sur le site PF sont limitées par rapport à d'autres sites, et les contraintes liées au statut de l'installation (ICPE en France) et à l'espace disponible nécessitent une analyse minutieuse des coûts/bénéfices et de la faisabilité administrative, en plus de l'analyse technique.

La faisabilité technique et administrative d'un accès ferroviaire à l'aéroport de Genève en Suisse pour le site PA en France fait l'objet d'une analyse spécifique qui ne sera réalisée qu'en 2025. Si cela est techniquement possible, une difficulté administrative doit être résolue en ce qui concerne le transport transfrontalier de matériaux dans les deux sens : de la France vers la Suisse pour les matériaux excavés et de la Suisse vers la France pour les matériaux et équipements de construction.

La création d'une nouvelle ITE nécessite une dizaine d'années de planification, d'élaboration détaillée de variantes à présenter pour autorisation, une étude économique de la demande concernant l'utilisation au-delà de la phase de construction du FCC, une évaluation de l'impact environnemental et le processus d'autorisation. La mise en œuvre en vue d'une utilisation nécessite environ 2 ans.

Si l'accès ferroviaire doit être utilisé pour l'évacuation des matériaux et l'approvisionnement en matériaux et équipements de construction, un projet détaillé et commun avec les services d'administration des réseaux ferroviaires nationaux français et suisse devrait être lancé de manière prospective, à partir de 2025.

2.7.5. Liaisons par convoyeurs

Afin de réduire le besoin de chemins temporaires et le trafic de camions dû aux matériaux excavés et aux transports liés aux matériaux de construction entre les sites et les accès à l'autoroute, des études ont été réalisées à titre d'exemples, par une société spécialisée dans le domaine, pour déterminer la faisabilité de liaisons par convoyeurs [45,49]. Deux sites ont été sélectionnés pour l'étude de cas : PJ (Vulbens et Dingy-en-Vuache, France) et PG (Charvonnex et Groisy, France). Il convient de souligner que les conclusions s'appliquent également aux autres sites qui ont fait l'objet d'un examen approfondi, mais pour lesquels aucun projet technique n'a été élaboré. Si une phase de projet préparatoire est lancée, des variantes de conception technique détaillées pour les tracés et les technologies de convoyage dans le cadre d'une hypothèse de construction doivent être élaborées pour les huit sites et soumises pour autorisation dans le cadre de la procédure d'autorisation environnementale du projet.

Les convoyeurs fonctionneraient à l'électricité avec une capacité de 120 kW entre le début et la fin des activités de construction. Sur la base d'une vitesse de 2 à 2,5 m/s et d'une largeur de 650 à 800 mm au maximum, le calendrier suivant a été établi :

- 22 jours par mois ;
- 226 jours par an ;
- Jusqu'à 8 heures par jour ;
- Horaires de service entre 08h00 le matin et 18h00 le soir ;
- Hors service la nuit, les week-ends et les jours fériés.

Différentes technologies pour les systèmes de convoyage ont été analysées et leurs coûts ont été estimés pour les deux sites spécifiques PG et PJ. En fonction des conditions environnementales (topographie, terrain, végétation, contraintes urbaines), différents systèmes de limitation des emprises et du bruit peuvent être envisagés. En général, le choix est toujours déterminé par l'objectif de limiter l'encombrement et les nuisances pour les capacités requises, limitées par les contraintes techniques disponibles. Les espaces publics seront mis à profit dans la mesure du possible. Les nouvelles routes seraient limitées à une largeur de 3 mètres. L'entretien des nouveaux itinéraires est limité : ils ne sont pas permanents et l'espace utilisé sera remis en état après utilisation.

La possibilité de répondre aux exigences de capacité associées à un chantier de construction utilisant 2 tunneliers a été confirmée d'un point de vue technique et environnemental. Les niveaux de bruit se situent entre 65 dB(A) directement au niveau du convoyeur et 47 dB(A) à une distance de 64 m avec la technologie actuelle disponible sur le marché. Des exemples d'itinéraires ont été développés pour confirmer la compatibilité avec les réglementations françaises en matière de bruit pour les deux sites d'étude.

Pour le site PJ, le convoyeur peut être créé jusqu'à la station-service de l'autoroute à Valleiry (distance 700 m) et/ou jusqu'à un nouvel accès ferroviaire au nord de Vulbens (1565 m) en dehors de toute zone résidentielle. Il doit traverser la route départementale RD 1206. Les perturbations dues au bruit peuvent être évitées dans les deux cas.

Pour le site PG, le convoyeur peut être créé jusqu'à l'aire de service de l'autoroute à Groisy (distance d'environ 800 m) et/ou jusqu'à un nouvel accès ferroviaire au nord de l'autoroute (925 m). La plus grande difficulté, quoique techniquement réalisable (voir Fig. 2.54), est la traversée de l'autoroute A40 pendant une période d'environ 8 ans. Il est peu probable que des zones résidentielles soient affectées.

2.7.6. Électricité pour la phase de construction

S'agissant de la fourniture en électricité pendant la phase de construction, les demandes de raccordement aux réseaux locaux doivent être faites directement aux distributeurs nationaux compétents (par exemple, Enedis en France et les SIG en Suisse). Selon les informations fournies par la société Herrenknecht, leader dans la fabrication de tunneliers, les besoins en électricité sont de 3,7 MVA pour un site de construction utilisant un seul tunnelier et de 7,4 MVA pour un site de construction avec deux tunneliers. L'hypothèse de travail présentée dans le Tableau 2.8 sera affinée avec les entreprises de génie civil durant une phase de conception ultérieure avant le début des chantiers. Cette démarche permettra de déterminer la puissance électrique exacte requise pendant la phase de construction. Cela dépendra du nombre et de la configuration des

Implementation/Implementation-Figs/conveyor-road.pdf

Fig. 2.54 : Exemple de convoyeur traversant une route principale.

tunneliers autour de l'anneau et des machines spécifiques utilisées. Toutes ces informations ne seront connues avec certitude que peu de temps avant le lancement des marchés de travaux publics. Il faut cependant tenir compte du fait que la planification, la passation des marchés et la réalisation des raccordements électriques locaux pour la phase de construction prendront plusieurs années et devront faire partie du processus global d'autorisation environnementale.

2.7.7. Électricité pour la phase d'exploitation

Le programme de recherche scientifique du FCC-ee est basé sur différents modes de fonctionnement du collisionneur (Z, WW, ZH, tt et un mode HH en option). Chaque mode utilise une configuration d'équipement différente. Ces équipements (systèmes d'accélération par cavités radiofréquences supraconductrices, systèmes de conversion d'énergie électrique et systèmes de refroidissement cryogénique) seront installés progressivement pendant les phases de maintenance et d'amélioration prévues pour ces activités. Un arrêt prolongé est prévu pour installer les systèmes radiofréquences pour les modes d'exploitation tt et HH en option. Chaque configuration est caractérisée par un besoin différent en puissance électrique (voir Tableau 2.9), qui sert de base aux estimations de consommation moyenne.

Le collisionneur fonctionne selon un programme annuel qui prévoit une période limitée de fonctionnement des faisceaux pour la recherche en physique. Le programme prévoit également des phases d'essai et de mise en fonctionnement de l'équipement, d'optimisation de la performance de la machine et d'entretien régulier. Selon le mode de fonctionnement, la consommation d'énergie électrique varie d'une année à l'autre.

À ce stade de l'étude, il n'est possible de fournir que des chiffres approximatifs de consommation annuelle (voir Fig. 2.55). La consommation annuelle d'électricité varie entre 400 GWh/an pour les services de base qui sont utilisés même en l'absence de faisceau et 1 770 GWh/an pour la phase d'exploitation tt. En moyenne, la consommation annuelle d'électricité pendant la période d'exploitation est légèrement supérieure à 1 200 GWh/an. Les capacités nécessaires pour fournir au collisionneur de particules l'énergie requise existent en France. Cependant, il faudra établir un plan pour un portefeuille spécifique d'accords d'achat d'électricité, en prévoyant un temps de préparation suffisant avant que l'énergie ne soit nécessaire, afin d'obtenir

Tableau 2.8 : Hypothèse de travail pour le raccordement aux réseaux électriques locaux pendant la phase de chantier.

Site	Emplacement	Opérateur	Puissance
PA	Ferney-Voltaire, France	Enedis	7,0 - 13,8 MVA (= 400 A à 20 kV)
PB	Presinge, France	SIG	3,0 - 7,0 MVA (= 200 A à 20 kV)
PD	Nangy, France	Enedis	7,0 - 13,8 MVA (= 400 A à 20 kV)
PF	Éteaux, France	Enedis	3,0 MVA (= 100 A à 20 kV)
PG	Charvonnex, France	Énergie et Services de Seyssel	13,8 MVA (= 400 A à 20 kV)
PH	Cercier, France	Enedis	3,0 MVA (= 100 A à 20 kV)
PJ	Vulbens, France	Enedis	13,8 MVA (= 400 A à 20 kV)
PL	Challex, France	Enedis	3,0 MVA (= 200 A à 20 kV)

Tableau 2.9 : Estimation des besoins en énergie électrique pour la phase d'exploitation. Les études de faisabilité technique ont permis de réduire de près de 45 % les besoins en puissance électrique de 2020 (hypothèse initiale) à 2024.

Mode	Énergie des faisceaux	Fonctionnement	Estimation initiale de la capacité	Estimation de la capacité actuelle
Z	45,5 GeV	4 ans	65 MW - 240 MW	30 MW - 222 MW
WW	80 GeV	2 ans	70 MW - 265 MW	33 MW - 247 MW
ZH	120 GeV	3 ans	70 MW - 294 MW	34 MW - 273 MW
t $\bar{t}$	175 GeV	5 ans	80 MW - 350 MW	40 MW - 350 MW
HH	182,5 GeV	1 an	50 MW - 384 MW	41 MW - 357 MW

des conditions favorables et de passer un contrat pour un panel d'énergies adéquat avec une faible empreinte carbone [50,51].

À la suite des études préliminaires et exploratoires, il sera nécessaire d'élaborer des concepts plus détaillés, qui permettront d'optimiser la performance énergétique des équipements de l'accélérateur et d'améliorer le fonctionnement en fonction des informations qui seront données par les opérateurs des infrastructures d'électricité et les fournisseurs d'énergie.

Cette approche se fondera sur la méthodologie habituelle, Éviter-Réduire-Compenser.

- Éviter : il s'agit surtout de limiter la consommation selon une analyse coût-bénéfice, qui inclut, par exemple, l'aménagement de l'infrastructure de recherche avec quatre expériences, la limitation de la puissance annuelle maximale avec des impacts sur la luminosité et l'allongement de la durée du programme de recherche, ainsi que l'absence de consommation des systèmes en cas de non-utilisation.
- Réduire : la réduction vise à optimiser l'efficacité des systèmes et à réduire les pertes. Cela concerne, par exemple, l'amélioration de l'efficacité de la conversion de l'énergie électrique pour les radiofréquences, la réduction des pertes dans la distribution interne et dans les équipements, la récupération et le stockage d'énergie, la consommation intelligente selon les besoins (par exemple, pour la ventilation et le refroidissement) et la mise au point de systèmes

Implementation/Implementation-Figs/annual-electricity-need.pdf

Fig. 2.55 : Besoins annuels en électricité du collisionneur et de son infrastructure technique. La consommation annuelle moyenne du programme est indiquée par une ligne horizontale bleue.

qui peuvent basculer plus facilement et rapidement d'un mode d'exploitation à l'autre (mode veille ou mode exploitation).

- Compenser : enfin, la compensation vise, d'une part, la récupération, le stockage et la fourniture d'énergie renouvelable pour la société, d'autre part, le développement de synergies pour la transition vers l'énergie provenant de sources renouvelables, l'augmentation des capacités en énergie renouvelable et la coopération à l'échelle internationale pour l'approvisionnement en énergie renouvelable. Parmi les exemples de compensation ayant des retombées économiques directes, on peut citer la création de communautés énergétiques et la mise en commun de l'aide préfinancière à la décision d'investissement pour la mise en place de sources d'énergie renouvelables, l'utilisation de la chaleur résiduelle dans les processus industriels (par exemple, la production de fromage), l'exploitation des serres, les cultures et le chauffage d'établissements publics tels que les hôpitaux, les écoles et les centres commerciaux.

Toutes ces mesures seront à améliorer au cours des quinze ans que dureront les phases de conception technique et de construction. Elles permettraient de limiter la consommation électrique et ses impacts de manière efficace.

En ce qui concerne les différentes phases du collisionneur, les besoins maximaux en énergie électrique ne sont nécessaires que pendant la phase d'exploitation et pendant une phase optionnelle à la fin du programme (hh) quand tous les équipements de radiofréquences sont installés. En moyenne, pendant la phase de recherche scientifique, le FCC-ee consommerait environ 1,3 TWh par an. Sur l'ensemble de sa durée de vie, y compris les périodes d'arrêt et de mise en service, sa consommation moyenne d'électricité serait d'environ 1 TWh par an. Pour contextualiser l'impact de cette consommation d'énergie électrique, on peut la comparer à la consommation d'électricité d'un centre informatique ultramoderne. Par exemple, le centre informatique d'Altoona (IA) aux États-Unis, appartenant à la société Meta, plus connue via les applications Facebook, Instagram et WhatsApp, a une consommation annuelle de 1,24 TWh [52]. L'empreinte carbone de ce centre informatique est de 532 158 tonnes d'équivalent CO₂ par an. Cela correspond à peu près à l'empreinte carbone de l'ensemble de la construction de l'infrastructure du FCC. La consommation de l'ensemble des centres informatiques de la société Meta est de 15 TWh/an, soit dix fois plus que les besoins énergétiques annuels du FCC-ee. L'empreinte carbone annuelle totale de tous les centres informatiques Meta s'élève à environ 5 millions de tonnes d'équivalent CO₂.

Les besoins énergétiques spécifiques ne seront connus qu'après la phase de développement technique détaillé afin de pouvoir profiter des avancées technologiques des systèmes visant à améliorer l'efficacité énergétique.

RTE, qui s'est vu confier la mission de gérer le réseau de transport d'électricité en France¹ par un contrat de service public en date du 24 octobre 2005, qui inclut entre autres l'insertion environnementale du réseau (concertation, protection des paysages et des milieux naturels et urbanisés) et la sécurisation du réseau public, est chargé d'analyser le raccordement en tenant compte des choix techniques, de mener le processus de raccordement et d'effectuer les procédures administratives nécessaires (convention de raccordement, contrat d'accès au réseau). RTE réalise également tous les travaux nécessaires pour réaliser les raccordements entre les points de livraison des sites de surface et le réseau électrique national de grande capacité après la signature de la convention de raccordement².

Selon les résultats de l'étude préalable de faisabilité technique de RTE [53], qui gère le réseau de transport d'électricité en France, le raccordement à l'infrastructure électrique de haute puissance prévoit trois points d'alimentation en France à ce stade. Un point d'alimentation électrique de secours en Suisse peut être envisagé, si cela s'avère nécessaire, sa faisabilité technique et administrative restant à étudier.

À ce stade, le tracé du scénario de référence est traversé par différentes lignes électriques, principalement des lignes de 63 kV et 225 kV. Deux lignes de 400 kV traversent le tracé du PA31 d'ouest en est (voir Fig. 2.56). Les lignes de 400 kV passent à proximité des sites PL (département de l'Ain, France) et des sites PF et PH (département de la Haute-Savoie, France). Une station de distribution importante (Cornier) se trouve à proximité des sites PD et PF en France. Les besoins en électricité sont plus élevés sur les sites PL et PH car ces sites sont destinés à héberger les systèmes radiofréquence qui accélèrent les particules dans le collisionneur.

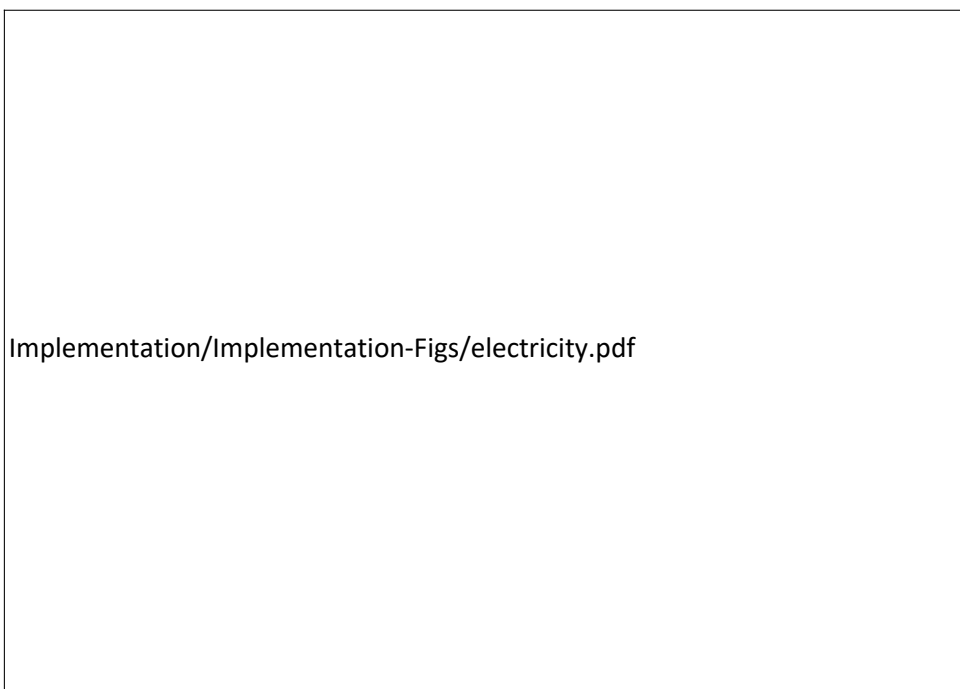


Fig. 2.56 : Réseaux d'électricité existants ou en projet, en France et en Suisse dans le périmètre du FCC. Sources : Couche publique CAD_ELEMENT_CONDUITE de SITG 2023 pour la Suisse ([https : //sitg.ge.ch/donnees/cad-element-conduite](https://sitg.ge.ch/donnees/cad-element-conduite)) disponible pour consultation et extraction pour un usage libre ; pour la France, Open Data Réseaux Énergies (ODRE, <https://opendata.reseaux-energies.fr>).

Trois points d'approvisionnement sont actuellement envisagés pour parvenir à un scénario d'approvisionnement en électricité bien équilibré. L'un d'entre eux, au site PL, se raccorde à la ligne de 400 kV voisine. Un autre, au site PD, se raccorde à la sous-station de Cornier. Le troisième utilise la

¹Décret n° 2005-1069 du 30 août 2005 approuvant les statuts de la société RTE EDF Transport : <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000000812363>

²RTE, Instruction des demandes de raccordement, version 2, 17 Octobre 2019, https://www.services-rte.com/files/live/sites/services-rte/files/documentsLibrary/DTR%201.4.1%20Procédure%20Racc%20Conso%20L342-2%20v19%2010%2017_fr

connexion au réseau existant du CERN à Bois Tollot (Ain, France). Une étude de conception détaillée est demandée par RTE pour déterminer le tracé et les spécificités des nouveaux raccordements 400 kV. Il peut être avantageux de raccorder le site PF au lieu du site PD à la ligne 400 kV, en profitant de la proximité du point de distribution de RTE à Cornier et en évitant ainsi d'avoir à traverser la rivière L'Arve. Il convient de noter que la planification, l'autorisation, la passation de contrats et la création de raccordements au réseau électrique nécessitent des délais importants. Il faut compter dix ans pour l'ensemble du processus pour un raccordement. En outre, pour l'ensemble de la procédure d'autorisation environnementale du projet de collisionneur de particules, il est nécessaire de disposer d'études d'impact sur l'environnement des raccordements au réseau. Par conséquent, la conception détaillée des raccordements et de leurs variantes de tracé en fonction des contraintes environnementales, de la faisabilité technique et des coûts doit être développée en priorité dès maintenant, même si, en fin de compte, les raccordements ne sont nécessaires qu'après la phase de construction des ouvrages de génie civil.

2.7.8. Approvisionnement en eau non traitée

Les accélérateurs de particules ont besoin d'eau non traitée, principalement pour refroidir les aimants. Le rayonnement synchrotron est la principale source de chaleur, en plus des nombreux composants mécaniques et électriques de l'infrastructure technique. Toute l'eau non traitée peut être prélevée sur une conduite d'alimentation en eau brute existante fournie par la société suisse locale Services Industriels de Genève (SIG) [54] qui prend son approvisionnement en eau dans le lac Léman, comme c'est le cas pour le CERN aujourd'hui. Aucune eau non traitée ne sera consommée à partir de réservoirs d'eau potable ou de couches d'eau souterraines.

Les solutions techniques et les choix d'équipement ne seront connus que peu de temps avant l'achat des infrastructures techniques, à mi-chemin de la phase de construction en sous-sol, afin de tirer pleinement parti des avancées technologiques, notamment en ce qui concerne l'efficacité des systèmes de refroidissement. Des estimations des besoins maximaux en eau, basées sur la consommation des systèmes de refroidissement des accélérateurs existants du CERN et sur les évolutions des concepts techniques actuels, ont été établies (voir Tableau 2.10). Ces valeurs sont le résultat de la mise au point progressive d'un concept qui a permis de réduire les besoins en eau non traitée d'une quantité initiale maximale de 5 000 000 m³ par an pour l'exploitation tt à environ 3 000 000 m³ par an. La capacité d'eau de référence actuelle nécessaire doit tenir compte de l'utilisation de systèmes de refroidissement par eau en circuit fermé avec des tours d'évaporation. La consommation d'eau non traitée provient de la nécessité de compenser l'eau évaporée dans les circuits secondaires des tours de refroidissement de chaque site de surface.

Tableau 2.10 : Résumé des besoins annuels en eau non traitée.

Mode	Besoins annuels en eau non traitée	Années
Z	1 604 861 m ³	4
WW	1 928 943 m ³	2
HZ	2 165 458 m ³	3
L.S.	163 817 m ³	1
tt	3 077 591 m ³	5

À titre de comparaison, la consommation d'eau non traitée au CERN en 2022 était la suivante :

Le schéma d'approvisionnement en eau non traitée se base sur l'hypothèse de travail consistant à utiliser les prélèvements d'eau non traitée du lac Léman par les Services Industriels de Genève (SIG) en Suisse, auxquels le CERN recourt actuellement. La capacité disponible de 604 m³/h, soit une capacité totale de plus de 5 000 000 m³ par an, est compatible avec les besoins du FCC. Cela a été confirmé par un échange entre le CERN et les SIG en 2022. Ensuite, en août 2023, les SIG ont confirmé la faisabilité technique de l'approvisionnement dans le cadre contractuel existant, soit par la construction d'un nouveau raccordement court d'environ 200 m avec un diamètre nominal de 500 mm entre la conduite Tuileries-La Berne et le point 8 du LHC à Ferney-Voltaire (France), soit en utilisant deux lignes internes existantes du CERN qui nécessiteraient une mise à niveau.

Tableau 2.11 : Résumé des besoins en eau non traitée du FCC.

Système	Besoin en eau non traitée	Description
SPS	944 m ³	BA2, BA4, BA5, BE2
LHC	795 070 m ³	Complexe LHC, LHC2, LHC3.2, LHC 3.3, LHC4, LHC5, LHC6, LHC7, LHC8
Meyrin, Prévessin	2 437 988 m ³	Approvisionnement principal des sites de Meyrin et Prévessin, SPS BA1 et BA6, approvisionnement LHC1 sécurisé, clubs, Globe

Pour que la distribution d'eau tout au long de l'accélérateur soit techniquement plus facile et économiquement plus avantageuse, deux points de fourniture supplémentaires en eau peuvent être envisagés en France, à partir de L'Arve et/ou du Rhône. Pour ce faire, une étude territoriale spécifique serait nécessaire, qui devrait intégrer les plans de gestion quantitative disponibles pour les ressources en eau (PGRE). Ces prises d'eau nécessiteraient la création d'usines de filtration et de traitement de l'eau.

Afin de réduire davantage les besoins en capacité d'eau, des études initiales ont été réalisées pour identifier des leviers prometteurs (voir Tableau 2.12). Tout d'abord, l'introduction de la récupération et de la fourniture de chaleur fatale dès le départ permet de réduire considérablement les besoins en eau, puisque la quantité d'eau devant être évaporée est moindre si la chaleur est fournie à des consommateurs. Le scénario conservateur indique le potentiel d'économie d'eau sans adaptation du programme d'exploitation classique. Certains consommateurs commerciaux ont besoin de chaleur tout au long de l'année. Il convient de souligner que la réutilisation réaliste de chaleur fatale indiquée nécessite l'adaptation du fonctionnement du collisionneur de particules à la saison au cours de laquelle la chaleur est nécessaire. Des économies potentielles encore plus importantes que celles indiquées sont possibles, en fonction de l'adaptation aux besoins de chaleur saisonniers du territoire. Deuxièmement, le fonctionnement adaptatif du système de refroidissement et des tours d'évaporation à l'aide d'un système de régulation avancé et éventuellement d'une intelligence artificielle permettrait de réduire la consommation au strict minimum requis, compatible avec les besoins réels en matière de refroidissement. Troisièmement, la création d'une prise d'eau supplémentaire à côté du site PD (Nangy, France) permettrait d'alléger les exigences du système global. Étant donné qu'une installation spécialisée de filtrage et de traitement de l'eau serait nécessaire, une première étude vise à vérifier l'utilisation des eaux usées de la station d'épuration de Bellecombe/Scientrier (Syndicat des Eaux de Rocailles et Bellecombe), située à proximité. Cette installation rejette les eaux traitées à un débit moyen d'environ 550 m³/h dans la rivière L'Arve. Bien qu'en principe techniquement réalisable et économiquement viable (le coût d'exploitation annuel par m³ d'eau d'une station d'épuration nécessaire au collisionneur correspond au coût d'un m³ d'eau non traitée achetée à un fournisseur d'eau), des études sont actuellement en cours pour estimer l'effort nécessaire pour réduire le carbonate de calcium (CaCO₃) dissous résiduel et les germes dans l'eau afin de rendre l'eau compatible avec une utilisation dans le système de refroidissement industriel.

Tableau 2.12 : Potentiel d'économie d'eau avec l'introduction de scénarios d'approvisionnement en chaleur fatale et l'utilisation d'eaux usées traitées.

Mode	Réutilisation prudente de chaleur fatale	Réutilisation réaliste de chaleur fatale	Utilisation d'eaux usées traitées
Z	356 800 m ³ /an	476 800 m ³ /an	685 000-1 000 000 m ³ /an
WW	382 400 m ³ /an	523 200 m ³ /an	685 000-1 000 000 m ³ /an
HZ	409 600 m ³ /an	571 200 m ³ /an	685 000-1 000 000 m ³ /an
L.S.	96 000 m ³ /an	96 000 m ³ /an	685 000-1 000 000 m ³ /an
- tt	473 600 m ³ /an	678 400 m ³ /an	685 000-1 000 000 m ³ /

À ce stade, sur un plan quantitatif et commercial, le scénario de référence pour la consommation d'eau est techniquement, financièrement et territorialement faisable car le prélèvement et la consommation d'eau représentent des quantités inférieures à la consommation réelle passée du CERN. La possibilité d'un approvisionnement représentant le double de la demande totale maximale a été confirmée en 2023.

2.7.9. Gestion des eaux usées

Tous les sites doivent être raccordés à l'infrastructure locale d'assainissement pour la gestion des eaux de drainage dans les structures souterraines, de l'eau de pluie collectée et de l'eau traitée qui est purgée des systèmes de refroidissement à base d'eau brute. L'eau de pluie collectée peut également être réutilisée sur les sites pour différents usages liés au projet et pour l'entretien des espaces verts. Dans la mesure du possible, toutes les eaux collectées seront filtrées et traitées sur place avant d'être rejetées dans l'environnement. D'un point de vue territorial, cette approche est préférable à une gestion centralisée des eaux usées, car elle permet de préserver les ruisseaux existants, les zones humides et la biodiversité dans le cadre de projets de renaturation mis en œuvre en association avec les sites de surface. Ce n'est que lorsque l'eau ne remplit pas les conditions requises pour être rejetée librement qu'elle serait dirigée vers le système d'égouts (par exemple, en raison d'un pourcentage plus élevé de résidus non solubles ou pendant les périodes de fortes pluies).

On peut également envisager un concept de gestion centralisée des eaux usées qui consisterait à renvoyer toutes les eaux usées vers un site du CERN (par exemple, LHC P8 et PA à Ferney-Voltaire). Pour la gestion de l'eau de refroidissement, une approche « zéro rejet liquide » (ZRL) peut également être envisagée. La méthode ZRL exige la collecte des solides sur chaque site de surface à intervalles réguliers. Le choix définitif de la technologie reste à faire et nécessite une analyse des coûts et des bénéfices complète et plus large sur l'ensemble de la période du projet, couvrant les investissements et les facteurs d'exploitation. La technologie du traitement de l'eau progresse rapidement en raison des contraintes liées à l'environnement et au développement durable. Il est donc judicieux de consulter des entreprises expérimentées et d'examiner les différentes options dans le cadre de l'évaluation de l'impact sur l'environnement avant de finaliser le choix de la technologie.

Les eaux usées provenant des activités humaines (toilettes, éviers, bureaux, centres d'accueil des visiteurs, cafés et restaurants) seront directement évacuées par des raccordements au réseau public d'eaux usées. La conception des raccordements au réseau d'eaux usées doit être élaborée en coopération avec les services de l'administration publique locale au cours d'une phase préparatoire ultérieure, en faisant appel à des entreprises spécialisées dans ce domaine. À ce stade, la configuration suivante est envisagée pour les raccordements locaux aux réseaux d'eaux usées :

- Site PA : Raccordement au réseau d'eaux usées via le LHC Pt8 en France.
- Site PB : Raccordement au réseau local d'eaux usées à Presinge, Suisse.
- Site PD : Raccordement à la station d'épuration des eaux usées (STEP) SRB à Scientrier, France.
- Site PF : Raccordement au réseau local d'eaux usées à Éteaux, France.
- Site PG : Raccordement au réseau local d'eaux usées via la station-service d'autoroute de Groisy. En variante, raccordement au réseau à Charvonnex sur la D1203 en France.
- Site PH : Création d'un nouveau réseau local d'eaux usées jusqu'au point de raccordement le plus proche, à une distance de 250 à 300 m en France. La station d'épuration des eaux usées (STEP) située à proximité du site n'est pas en mesure d'accepter toutes les eaux usées du site dans les cas les plus exigeants. Par conséquent, soit la STEP doit être renforcée pour le projet de collisionneur, soit l'excès d'eau doit être réacheminé via un réseau d'eaux usées dans le tunnel jusqu'aux sites PG et PJ. L'élaboration de la stratégie fait partie d'une phase de conception ultérieure.
- Site PJ : Raccordement au réseau local d'eaux usées à 500 m entre Vulbens et Valleiry, en France.
- Site PL : Raccordement au réseau local d'eaux usées à Challex, France.

2.7.10. Services d'urgence

L'analyse des différents scénarios de mise en œuvre a révélé que la poursuite de l'approche actuelle consistant à desservir les sites de surface des accélérateurs de particules du CERN ne peut pas être étendue au périmètre du futur collisionneur circulaire de particules sans poser de problèmes importants. Bien que les sites de surface se trouvent à proximité immédiate d'infrastructures routières importantes, les distances et la situation du trafic nécessiteraient des temps d'intervention trop longs si tous les sites devaient être desservis à partir du site du CERN de Meyrin, en Suisse. La mise en place d'un personnel spécialisé dans les services d'urgence sur chacun des sites de surface représente un coût

prohibitif, en ce qui concerne les ressources humaines et les équipements et entraînerait des difficultés dans la gestion opérationnelle de l'installation. L'analyse ultérieure d'un seul pôle d'assistance dédié n'apporte que des améliorations limitées en ce qui concerne la sécurité et les services d'urgence. C'est pourquoi une analyse géographique détaillée a été réalisée afin d'identifier des approches alternatives (voir Fig. 2.57).



Fig. 2.57 : Services de lutte contre les incendies et services d'urgence dans le périmètre du scénario de référence.

Hormis le site PH, les sites de surface du scénario d'implantation de référence sont proches de postes de lutte contre l'incendie et de services d'urgence (voir Tableau 2.13). Certains d'entre eux ont été construits récemment. Par conséquent, le scénario de projet peut envisager de recourir à un soutien du personnel d'urgence et de lutte contre l'incendie assuré par ces stations, accompagné d'une formation commune régulière et d'un centre d'orientation en cas d'urgence au CERN. Le renforcement de la collaboration du CERN avec ces services, l'apport d'équipements, de matériels et de formations se traduisent également par des avantages socio-économiques. Ceux-ci ont été analysés et font partie de l'évaluation plus large de l'impact socio-économique.

La constitution de ces ressources et la transition vers un nouveau système d'exploitation nécessitent plusieurs années de préparation. Les dix années de la phase de construction offrent une fenêtre adéquate pour lancer ce processus, qui nécessite des accords avec les services d'urgence et de lutte contre les incendies.

Tableau 2.13 : Sélection de services d'urgence à proximité des sites de surface.

Site	Distance	Emplacement	Capacité	Service
PA	1 km	Prévessin, France	66 personnes	Caserne départementale de pompiers CIS Est-Gessien
PB	5,8 km	Chêne-Bougeries, Suisse	30 personnes	Caserne de pompiers du service cantonal du feu
PD	0,3 km	Contamine-sur-Arve, France	n/a	Hôpital, Centre Hospitalier Alpes-Léman
PD	9 km	Arenthon, France	11 personnes	Poste de lutte contre les incendies et de premiers secours
PD	12,1 km	Éteaux, France	68 personnes	Centre d'intervention et de secours
PF	3,2 km	Éteaux, France	68 personnes	Centre d'intervention et de secours
PG	2,3 km	Groisy, France	50 personnes	Centre d'intervention et de secours, service d'urgence
PH	10 km	Frangy, France	37 personnes	Centre d'intervention et de secours local
PH	14 km	Épagny, France	135 personnes	Centre d'intervention et de secours, service d'urgence
PH	1,3 km	Valleiry, France	26 personnes	Centre d'intervention et de secours, service d'urgence
PL	7,4 km	Thoiry, France	70 personnes	Centre d'intervention et de secours, service d'urgence

2.7.11. Aspects territoriaux de la gestion des matériaux excavés

La gestion des matériaux excavés est traitée comme un problème socio-économique et de gestion de projet plutôt que comme un aspect propre au génie civil. La disponibilité de dépôts appropriés pour les déchets inertes diminue continuellement et les prix de mise en dépôt des matériaux continuent d'augmenter en conséquence. Pour donner un ordre de grandeur, le coût du dépôt final des matériaux excavés peut varier entre 385 millions d'euros et 825 millions d'euros en fonction des possibilités de réutilisation ou non des matériaux [1]. Alors que la fraction calcaire des matériaux excavés peut être réutilisée dans le projet, la majorité des 6 millions de m³ de volume *in situ*, à savoir 95 % de molasse et 3 % de moraines, est au centre des développements de la filière de réutilisation. L'objectif est quadruple :

1. Réduire la contrainte d'une situation déjà tendue en ce qui concerne la recherche de dépôts appropriés ;
2. Réduire les besoins en transport routier de longue distance ;
3. Réduire les coûts globaux du projet ;
4. Contribuer à la création d'avantages socio-économiques supplémentaires en faisant du projet un projet pilote pour les innovations dans le domaine de la gestion des matériaux excavés.

En ce qui concerne l'objectif de générer des avantages socio-économiques au-delà du projet, il faut garder à l'esprit que le bassin molassique s'étend au nord des Alpes, de la région de Genève à la Hongrie, en passant par la Suisse, l'Allemagne et l'Autriche. L'utilisation de nouvelles méthodes pour réutiliser ces matériaux est donc importante, tout comme les avantages socio-économiques potentiels.

Dans le cadre de l'étude de faisabilité du FCC, en s'appuyant sur les contributions de la Commission européenne pour le projet FCC Innovation Study (FCCIS) cofinancé par le programme Horizon 2020, un concours international appelé « Mining the future » a été lancé pour explorer des voies crédibles, techniquement réalisables et économiquement viables pour le développement de la réutilisation de la molasse à l'horizon 2030 [55].

Selon les conditions du cadre réglementaire en France et en Suisse, entre 15 % et 30 % des matériaux molassiques pourraient être considérés comme naturellement pollués (par exemple, hydrocarbures naturellement présents, nickel, zinc et chrome). Il y aura donc toujours une quantité résiduelle de matériaux qui devra être transportée vers des dépôts qui acceptent ces matériaux. On suppose qu'une grande partie des autres matériaux sert au remblayage des carrières et au processus de renaturation des carrières remblayées.

D'autres voies sont actuellement explorées dans le cadre d'un laboratoire de terrain appelé « Open-Skylab » (voir Fig. 2.58) dans les locaux du CERN, sur la base de protocoles scientifiques permettant le développement de processus et de produits gérés par la qualité, condition préalable légale pour la réutilisation des matériaux. Étant donné que ce projet d'innovation n'a démarré qu'en 2025 et qu'il est nécessaire de disposer d'informations beaucoup plus complètes et détaillées sur les caractéristiques des

matériaux excavés prévisibles au moyen d'un échantillonnage géotechnique (extraction de diagraphies dans un ensemble représentatif d'emplacements le long du tracé du tunnel du collisionneur), un plan spécifique pour la gestion des matériaux excavés ne pourra être élaboré qu'à un stade ultérieur. Il faut environ 5 ans pour mettre au point les procédés et les produits permettant de transformer la molasse en terre pouvant être mélangée à des sols déjà fertiles et pouvant être utilisée efficacement pour des applications dans l'agriculture, la sylviculture, les projets de renaturation, l'entretien des chemins et des bords de route et d'autres applications innovantes telles que l'isolation thermique et les matériaux de construction.



Fig. 2.58 : Situé sur un terrain d'un hectare marqué d'une ligne rouge, à côté du point 5 du CMS du CERN à Cessy, en France, le laboratoire de terrain OpenSkyLab développe des processus de gestion de la qualité pour la transformation des matériaux excavés en vue d'une utilisation dans le cadre d'applications de renaturation et d'autres applications sociétales. Le terrain a été préparé au cours de l'hiver 2025. Le développement scientifique durera au moins quatre ans.

Les autorisations de mise en œuvre de ces filières dans le cadre d'un nouveau projet de construction ne peuvent être demandées aux autorités nationales en France et en Suisse qu'à partir du moment où des processus gérés par la qualité et des descriptions spécifiques et localisées des filières de réutilisation existent et ont été validés.

Les matériaux excavés ont le statut de déchets dans les législations nationales en raison de critères formels, indépendamment de leur origine, de leur traitement et de leur degré de pollution. L'application de ces critères formels rend plus difficile la mise en œuvre des principes écologiques et économiques si utiles de l'économie circulaire. Le 13 avril 2021, Porr Bau GmbH a saisi la Cour de justice de l'Union européenne (CJUE) d'un recours contre une décision préjudicielle rendue en vertu de l'article 267 TFUE par le Landesverwaltungsgericht Steiermark (tribunal administratif régional, Styrie, Autriche), par décision du 2 avril 2021, dans l'affaire Porr Bau GmbH contre Bezirkshauptmannschaft Graz-Umgebung (autorité administrative du district de Graz et environs), concernant la conclusion de la juridiction nationale autrichienne selon laquelle les matériaux excavés déversés sur des zones de culture constituaient des déchets.

Dans l'affaire C-238/21, ECLI:EU:C:2022:885 [1], la Cour (première chambre) a statué : L'article 3, point 1, et l'article 6, paragraphe 1, de la directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil, du 19 novembre 2008, relative aux déchets et abrogeant certaines directives, doivent être interprétés en ce sens qu'ils s'opposent à toute réglementation nationale en vertu de laquelle des matériaux d'excavation non contaminés qui, en vertu du droit national, appartiennent à la classe de qualité la plus élevée,

– doivent être classés comme « déchets » lorsque leur détenteur n'a ni l'intention ni l'obligation de s'en débarrasser,

ces matériaux remplissant les conditions fixées à l'article 5, paragraphe 1, de ladite directive pour être classés comme « sous-produits » ; et

- ne perdent leur statut de déchet que lorsqu'ils sont utilisés directement comme substitut et que leur détenteur a satisfait aux critères formels pertinents aux fins de la protection de l'environnement, si ces critères ont pour effet de compromettre la réalisation des objectifs de cette directive.

Conséquence directe de l'arrêt, les matériaux excavés non contaminés peuvent être utilisés pour des applications écologiques et économiques utiles s'ils satisfont aux critères de qualité applicables. Les critères formels ne doivent pas exclure, ni entraver l'utilisation des matériaux excavés, ni empêcher la mise en œuvre des principes de l'économie circulaire. Le statut de fin de déchet peut être obtenu par un simple test de qualité. Le prétraitement, le traitement et la transformation des matériaux excavés n'ont aucune incidence sur la possibilité d'utiliser les matériaux, puisqu'ils font partie intégrante d'un processus de production décrit à l'article 6 de la directive 2008/98/CE de l'UE relative aux déchets.

Par conséquent, la réutilisation des matériaux excavés est possible dans un pays de l'UE, si l'on connaît suffisamment la qualité des matériaux excavés pour organiser la réutilisation avant l'extraction et si des accords sont passés avec des clients pour les matériaux, pour des applications compatibles avec la qualité des matériaux pouvant être livrés, y compris tout traitement potentiel avant la livraison, et si la filière de réutilisation est écologiquement justifiée et économiquement viable.

Pour soutenir ce processus, le projet doit mettre en œuvre un système de suivi complet pour l'analyse des matériaux excavés, leur traitement sur le site d'excavation, leur prétraitement et leur transformation, la production du produit final, le transport vers les clients (audit et traçabilité) et le suivi des matériaux réutilisés après que les clients les ont acceptés.

Enfin, le transport transnational doit être soigneusement planifié. Comme le principe du partage équitable aboutit à une quantité de matériaux sous le territoire suisse supérieure au volume excavé sur ce territoire, une solution pour le rapatriement des matériaux excavés de la France vers la Suisse ou une forme de compensation doit être élaborée avant que le processus d'excavation ne puisse commencer.

Pour le remblayage des carrières, l'étude de faisabilité a identifié des sites appropriés à l'horizon 2030. Cependant, il faut garder à l'esprit que ces emplacements sont rapidement occupés par d'autres processus de construction et que les capacités doivent donc être réservées à temps par le biais d'accords entre le CERN et les carrières. Alors que l'étude en France a pu être réalisée de manière exhaustive pour la région concernée (Fig. 2.59), les données sur les carrières potentielles et les mines pouvant être remblayées restent aujourd'hui incomplètes pour le territoire suisse.

Si le transport des matériaux à proximité du projet par camion le long des principaux axes de transport reste l'hypothèse principale, le transport entre les sites d'excavation et les axes de transport est de préférence effectué par d'autres moyens tels que des bandes transporteuses. Le transport vers des lieux de réutilisation plus éloignés se fait de préférence par train.

Dans un premier temps, une stratégie de gestion des matériaux excavés a été mise en place grâce aux efforts conjoints d'experts techniques et d'organisations des pays hôtes qui accompagnent régulièrement les projets de construction à grande échelle. Actuellement, des procédés et des produits sont en cours de mise au point pour démontrer le potentiel de réutilisation des matériaux molassiques. Dans le même temps, un plan de référence pour la gestion des matériaux prévisibles doit être élaboré pour confirmer que les carrières et les mines, ainsi que la disponibilité des dépôts, peuvent répondre à un scénario prudent en matière de matériaux excavés dans les deux pays hôtes. Un travail avec les autorités des États hôtes est nécessaire pour présenter les processus de réutilisation gérés par la qualité et pour obtenir les autorisations nécessaires à l'application de ces processus. Des accords avec les clients doivent être conclus afin de pouvoir mettre en œuvre les filières de réutilisation. Un nombre beaucoup plus important d'échantillons doivent être prélevés le long du tracé du tunnel et une analyse détaillée des échantillons géologiques doit être effectuée pour parvenir à une estimation plus précise d'un scénario de réutilisation. Pour étayer la stratégie au plan technique, l'analyse des matériaux en ligne pendant le creusement du tunnel et le traitement et la transformation des matériaux sur place dans une usine modulaire doivent être démontrés et portés au niveau de l'application industrielle (niveau TRL 9) dans un délai maximum de cinq ans. La question ouverte du transport ferroviaire, du trafic transfrontalier

Implementation/Implementation-Figs/quarries.pdf

Fig. 2.59 : Capacités des carrières susceptibles d'être remblayées à proximité du projet sur le territoire français et dans le canton de Genève en Suisse. Les capacités sont indiquées en tonnes.

et du rapatriement des matériaux excavés doit être résolue. Enfin, il convient d'étudier d'autres possibilités de réutilisation sur de plus grandes distances car, une fois que les matériaux se trouvent sur une voie ferrée, ils peuvent être livrés moyennant une faible empreinte carbone supplémentaire. Cela ouvre des possibilités de réutilisation qui ne sont pas envisagées à l'heure actuelle.

2.7.12. Transport et mobilité

En ce qui concerne le transport de matériaux et d'équipements et la mobilité des personnes, les thèmes suivants sont identifiés dans le cadre du développement du projet d'implantation territoriale :

1. Transport des matériaux de construction vers les chantiers de construction ;
2. Évacuation des matériaux excavés à partir des chantiers de construction ;
3. Déplacement des ouvriers de construction vers et depuis les chantiers ;
4. Transport de l'infrastructure technique et des équipements de l'accélérateur de particules vers les sites de surface ;
5. Transport de biens et de consommables vers les sites de surface pour l'exploitation, l'entretien et les réparations ;
6. Transport du personnel vers et depuis les sites de surface pour l'exploitation, l'entretien et les réparations ;
7. Trafic induit par les visiteurs sur les sites d'expérience.

L'évacuation des matériaux excavés est le facteur le plus important du trafic supplémentaire induit. La stratégie pour un futur projet consiste à limiter l'utilisation de camions pour le transport à partir des sites et de s'appuyer sur des approches alternatives telles que les convoyeurs et les téléphériques pour créer des liaisons avec les principaux axes de transport situés à proximité (par exemple, les stations-service des autoroutes, les terminaux ferroviaires, les routes départementales à plusieurs voies). Ces modalités conviennent également

à l'acheminement de certains matériaux de construction depuis les principaux itinéraires de transport jusqu'aux sites. Lorsque cela n'est pas possible, des camions acheminent le matériel depuis les principaux axes de transport via des itinéraires temporaires, par exemple, pour les éléments en béton préfabriqués et les équipements volumineux des accélérateurs de particules et de l'infrastructure technique. Ce n'est que lorsqu'une telle approche ne peut être évitée que les routes locales seront utilisées pour des activités limitées liées à la construction et à l'installation. Les transports exceptionnels sont inévitables, mais ils ne se produisent que très rarement et selon des horaires et dans des conditions planifiés et autorisés. Le trafic lié aux matériaux de construction est très limité, avec généralement moins de 10 livraisons par site équipé d'un tunnelier. Le trafic pendant la phase d'installation est de l'ordre de 9 livraisons pour un site technique et de 18 livraisons pour un site d'expérience. Le facteur limitant est la quantité de matériaux et d'équipements qui peuvent être transférés de la surface vers le sous-sol, ainsi que les capacités limitées de transport et d'installation dans la structure souterraine.

À l'heure actuelle, une première estimation du nombre d'ouvriers de construction par chantier montre que la présence varie entre 50 et 450 environ tout au long de la phase de construction pluriannuelle (Fig. 2.60). Des différences significatives d'ouvriers présents sur les chantiers de construction apparaissent entre les sites avec tunneliers (PA, PD, PG, PJ) et les sites sans tunnelier (PB, PF, PH, PL). Les sites dépourvus de tunnelier ne voient pas la présence de plus de 100 personnes à la fois. Le nombre d'ouvriers ne dépassera 250 personnes que pendant la période d'activité maximale entre 2035 et 2039. Un plan spécifique de mobilité du personnel ne peut être élaboré qu'une fois que les activités de construction seront définies de manière plus détaillée au cours d'une phase préparatoire visant à préparer les études de marché et les appels d'offres pour la construction. Pour éviter que les ouvriers ne fassent individuellement la navette entre les sites de construction et leurs résidences, le plan de construction prévoira des transferts par navette, comme le veulent les meilleures pratiques en matière de construction et d'exploitation industrielle. La même approche sera adoptée pour la phase d'installation au cours de laquelle environ 200 à 300 personnes seront actives sur les sites d'expérience et environ 100 personnes sur les sites techniques. Une petite fraction de ces personnes devra compter sur le transport individuel en voiture. Il est cependant prévu de limiter ce type de transport aux seuls cas où un tel moyen de transport est nécessaire.

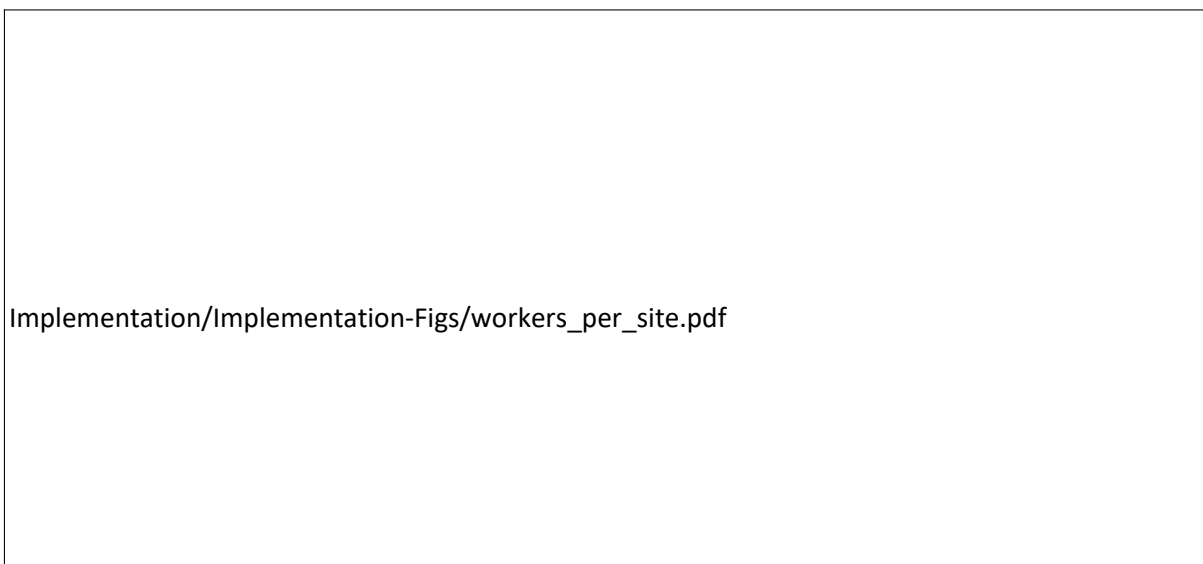


Fig. 2.60 : Exemple de scénario d'ouvriers de construction par chantier et par année. Un plan spécifique pour le personnel et la mobilité doit être élaboré dans le cadre d'un projet de phase préparatoire lorsque les activités de construction seront définies à un niveau plus détaillé.

Les déplacements du personnel pendant l'exploitation sont négligeables. Pour les périodes d'entretien et de réparations, le transfert par navette peut à nouveau être prévu. Cela favorise également la participation des membres de la collaboration internationale qui ne disposent pas nécessairement de moyens de transport individuels. La présence de 10 à 30 personnes au maximum est prévue sur un site de surface, selon qu'il s'agit d'un site technique ou d'un site d'expérience.

La circulation des visiteurs vers et depuis les sites d'expérience est généralement organisée de manière centralisée par des navettes. Si un site comporte une installation pour les visiteurs ou des infrastructures culturelles, éducatives et de loisirs supplémentaires, il faudra prévoir des capacités pour le trafic individuel. En supposant une présence attendue de 25 000 visiteurs par an et par site et 50 % de visiteurs individuels avec 2 personnes par véhicule, le trafic individuel est de l'ordre de 5 à 10 allers-retours de véhicules par site et par jour. Il convient de noter que les visites n'ont lieu qu'environ 250 jours par an et pendant environ 8 heures par jour.

2.7.13. Intégration paysagère et stratégie architecturale

Contexte

Des conceptions techniques génériques des bâtiments des sites de surface ont été élaborées dans le cadre de l'étude de faisabilité afin de mieux comprendre les besoins en espace, la compatibilité des infrastructures techniques requises avec les nombreuses contraintes liées à l'emplacement des sites de surface (par exemple, la topographie, le relief, la visibilité, la nature, les risques technologiques, l'accès, et bien d'autres encore) et les coûts. Ces développements conceptuels ne doivent pas être confondus avec les conceptions spécifiques des sites de surface qui sont finalement transformées en plans à inclure dans le processus d'autorisation environnementale. Cette activité a également nécessité l'engagement des parties prenantes locales dans des ateliers participatifs, le respect de nombreuses exigences et contraintes applicables telles que les exigences de performances fonctionnelles et structurelles, les limitations de zonage (utilisation autorisée des terrains), la protection du sol et du sous-sol, les documents et réglementations d'urbanisme, les normes nationales et internationales, les codes et normes de construction, les réglementations en matière d'efficacité énergétique, la sécurité, les interventions d'urgence, la protection contre le bruit, la limitation de la pollution lumineuse artificielle, l'accessibilité, la protection de l'habitat et de la biodiversité (par exemple, les corridors et les continuités écologiques), les considérations culturelles et patrimoniales, l'intégration paysagère et, en définitive, une autorisation sociétale d'exploitation au plan.

Pour toutes ces raisons et pour préparer une éventuelle phase préparatoire ultérieure du projet qui doit inclure les développements des sites de surface spécifiques et les constructions sur ces sites, l'étude de faisabilité a lancé une première analyse exploratoire pour identifier les composants appropriés d'une boîte à outils architecturale permettant d'orienter ce travail ultérieur. Les concepts architecturaux ont été développés par une société spécialisée dans le domaine de l'architecture innovante, de la conception de bâtiments, du développement urbain et de la planification. Une équipe multisectorielle d'architectes, de planificateurs, de concepteurs et d'urbanistes s'est réunie afin d'établir les bases qui doivent être développées dans une boîte à outils architecturale complète pour la phase de conception.

Les éléments de la boîte à outils d'architecture sont tous basés sur des projets réellement mis en œuvre. Trois exemples notables (Fig. 2.61 développés par la société contractante sont mentionnés ci-après :

1. La « Forest Tower »³ au Camp Adventure Park à Gissselfeld Klosters Skove, au Danemark. Ce projet comprend une promenade de 900 mètres reliée à une tour d'observation de 45 mètres de haut, permettant aux visiteurs de découvrir la forêt d'un point de vue unique. La rampe d'accès continue garantit l'accessibilité à tous les visiteurs, quelle que soit leur condition physique ;
2. Le projet « Living Places Copenhagen », qui démontre une nouvelle façon de construire des maisons dont l'empreinte carbone est de 3,8 kg/CO₂/m²/an, soit trois fois moins que la moyenne actuelle. Ce projet illustre la durabilité du travail et les conceptions innovantes ;
3. Le projet « Urban Village » élabore un modèle de développement de logements abordables et agréables à vivre. Il comprend la conception de bâtiments modulaires, abordables et à faible empreinte carbone, qui peuvent être facilement assemblés dans des environnements urbains contraignants.

Un autre exemple est le projet « CO-EVOLUTION », une collaboration danoise et chinoise sur le développement urbain durable en Chine, qui a reçu le Lion d'or en 2006 à la Biennale d'architecture de Venise.

³<https://www.campadventure.dk/en/skovtaarnet/>

Implementation/Implementation-Figs/EFFEKT_projects.pdf

Fig. 2.61 : Trois exemples de projets innovants conçus par l'entreprise qui a participé à l'étude de faisabilité pour l'élaboration d'une boîte à outils d'orientation en matière d'architecture. De gauche à droite : tour forestière, lieux de vie, village urbain.

Boîte à outils d'architecture

La motivation pour le développement d'une boîte à outils d'architecture est de soutenir l'intégration des sites de surface le plus tôt possible dans leurs contextes territoriaux qui diffèrent d'un site à l'autre. La boîte à outils vise également à répondre à la question de savoir comment les nouveaux sites de surface peuvent être bénéfiques pour le territoire et les communautés locales aux alentours.

La boîte à outils repose sur trois piliers :

1. Concepts et éléments d'architecture ;
2. Paysage ; et
3. Communauté.

Les trois éléments constitutifs que sont l'architecture, le paysage et la communauté (Fig. 2.62) sont au centre des stratégies d'intégration pour les sites de surface. Les stratégies visent à trouver un équilibre entre exigences techniques, durabilité environnementale et engagement communautaire. L'intégration de l'innovation architecturale, de la restauration du paysage et des équipements publics vise à réduire au maximum l'empreinte écologique et visuelle tout en favorisant la biodiversité et l'engagement local.

Architecture

Les concepts architecturaux mettent l'accent sur l'intégration durable et esthétique au sein de l'environnement. Pour atteindre ces objectifs, les concepteurs adopteront des approches modernes telles que les toitures végétalisées, les techniques de construction innovantes et les expressions de façade. Ces méthodes atténuent la domination visuelle des structures industrielles. Elles facilitent une transition harmonieuse entre les bâtiments et le paysage environnant. Les concepteurs sont encouragés à explorer de nouveaux matériaux et de nouvelles techniques de construction à même de répondre aux objectifs environnementaux et économiques. L'intégration de toitures végétalisées permet non seulement d'atténuer les incidences sur l'environnement, mais aussi de renforcer la cohésion visuelle entre l'environnement bâti et l'environnement naturel. Un exemple de mise en œuvre récente de ce concept est celui de Carlo Ratti pour l'entreprise de transformation alimentaire Mutti en Italie [56] (voir Fig. 2.63).

Implementation/Implementation-Figs/architectural-toolkit.pdf

Fig. 2.62 : Trois exemples de projets innovants conçus par la société EFFEKT De gauche à droite : tour de forêt, lieux de vie, village urbain.

Aménagement paysager

Le projet prévoit de recourir à des stratégies qui donnent la priorité à la restauration écologique et à l'harmonie visuelle. Les principaux éléments sont les suivants :

- Renaturation : Les efforts de restauration améliorent les écosystèmes locaux en favorisant la biodiversité et en augmentant la résistance aux changements environnementaux. Utilisation du terrain naturel : En intégrant les structures dans le paysage existant, les concepteurs réduisent au maximum les perturbations visuelles et maintiennent la continuité du terrain naturel.
- Utilisation du terrain : Le fait de travailler avec le terrain naturel réduit au maximum la présence visuelle des installations dans l'environnement.

Implementation/Implementation-Figs/mutti_italy.pdf

Fig. 2.63 : La toiture végétalisée créée à partir des matériaux excavés du site de construction permet au bâtiment de se fondre dans son environnement naturel (Agnese Bedini et Melania Della Grave/DSL Studio).

- Tampons verts : La mise en place de barrières végétales réduit l'impact visuel et environnemental des installations, en favorisant la flore et la faune locales. L'aménagement paysager garantit une intégration subtile des installations dans l'environnement, permettant à la nature de prospérer tout en masquant les éléments d'infrastructure.
- Paysage ininterrompu : En insérant les constructions dans le relief et le paysage, la nature peut s'étendre sans interruption au-dessus, tandis que les installations peuvent être partiellement cachées à la vue.

Engagement communautaire

Le projet s'engage à impliquer activement les communautés locales autour des sites en créant des espaces partagés, des opportunités éducatives, des espaces culturels et des installations de visite. En fonction du soutien de la communauté, des services professionnels et/ou de loisirs peuvent être prévus dans les projets. Les actions spécifiques comprennent, par exemple, la création de zones récréatives telles que des jardins communautaires, qui utilisent des espaces inutilisés tout en bénéficiant aux populations locales. La mise à disposition de plateformes éducatives et d'installations de visite permet au public de s'informer sur les objectifs scientifiques et les réalisations techniques du projet. Ces plateformes offrent des possibilités de communication directe avec les scientifiques et la communauté internationale des ingénieurs. L'exploitation de l'énergie excédentaire à des fins communautaires, telles que le chauffage des piscines publiques, des installations de santé et de relaxation et le soutien d'autres activités de loisirs, sont d'autres possibilités qui peuvent être prises en considération. Grâce à ces initiatives, le projet favorise un sentiment d'inclusion et apporte une valeur ajoutée aux communautés environnantes au-delà de sa mission scientifique de base.

Les stratégies d'intégration pour les sites de surface du FCC reflètent une approche globale des dimensions environnementales, techniques et sociales. En combinant l'innovation architecturale, la

renaturation et la conception centrée sur la communauté, le projet assure une coexistence durable et harmonieuse avec son environnement. Ces stratégies visent non seulement à atténuer les éventuelles incidences négatives, mais aussi à fournir des actions tangibles et concrètes pour améliorer les écosystèmes locaux et impliquer le public de manière efficace.

Site PA

Le site d'expérience PA de Ferney-Voltaire (Fig. 2.64) est situé dans un environnement déjà urbain qui continue à voir apparaître de nouvelles constructions telles qu'un quartier commercial et d'innovation de haute technologie, des prestataires de soins de santé, des immeubles résidentiels et des installations commerciales. Situé dans un contexte transfrontalier avec l'aéroport de Genève et un poste frontière à proximité immédiate, l'espace ouvert restant serait partiellement occupé par le site de surface. Il faut donc veiller à une bonne intégration et à la préservation de la vue sur la chaîne du Mont-Blanc. Les environs du site peuvent être restaurés afin de créer une valeur ajoutée pour un habitat existant et un corridor naturel. L'image ci-dessous donne une idée de la manière dont le site pourrait s'intégrer dans le terrain ouvert, en exploitant le voisinage immédiat du point 8 du LHC (absent de l'illustration) pour toutes les constructions et infrastructures qui ne doivent pas nécessairement se trouver à proximité immédiate des deux puits.

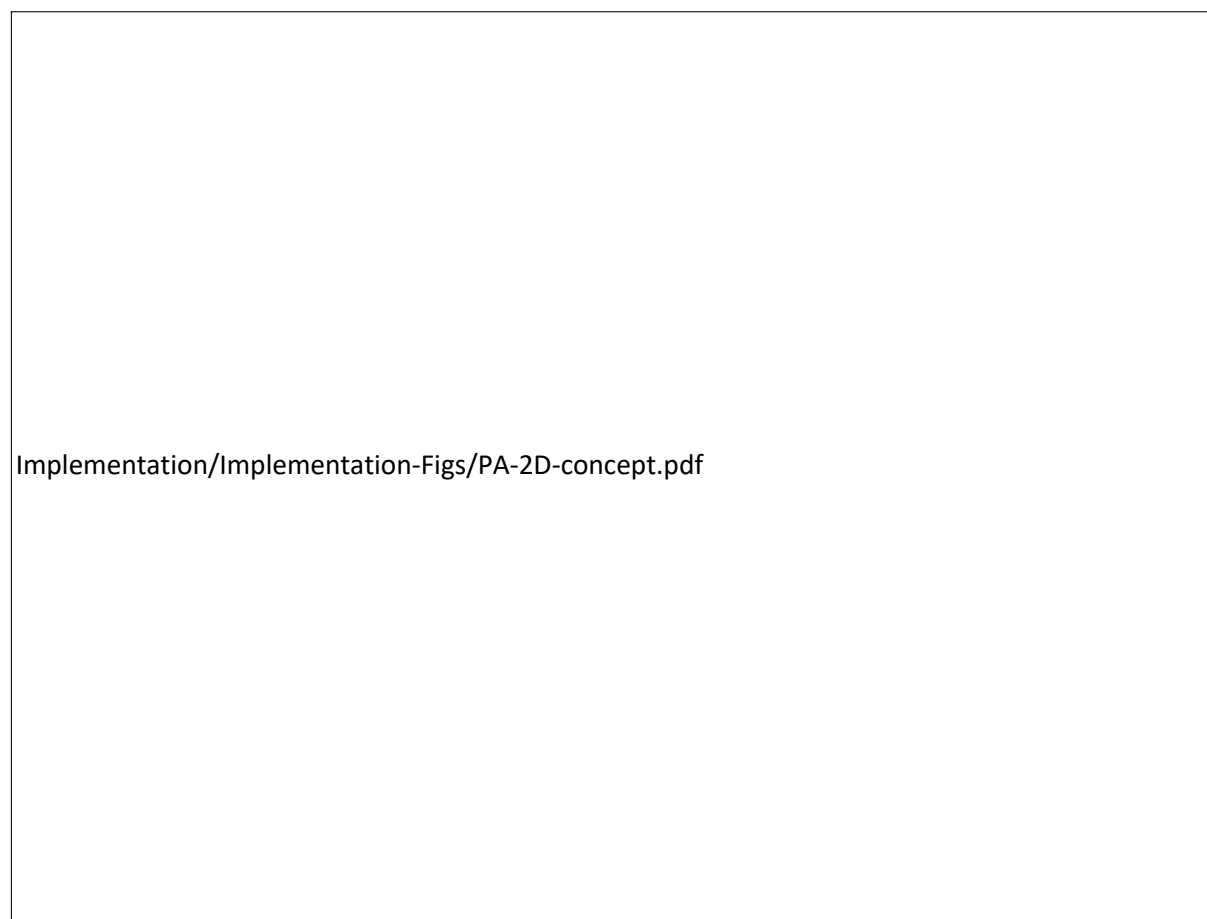


Fig. 2.64 : Besoins en espace pour un site et intégration paysagère du site d'expérience PA à Ferney-Voltaire, France.

Site PB

Le site technique PB de Presinge, en Suisse, est situé dans un paysage agricole ouvert, à l'écart des villages. La zone est cependant utilisée fréquemment par les résidents pour des activités de loisirs, telles que la marche et la course à pied. Avec des espaces naturels protégés à proximité immédiate, le

contexte exige une bonne intégration paysagère. Des bâtiments industriels conventionnels ne sont pas envisageables pour ce site. La boîte à outils d'architecture vise à fournir des principes directeurs qui doivent être appliqués en collaboration avec les parties prenantes locales afin de créer un site acceptable qui offre les fonctionnalités techniques requises pour le projet scientifique. La Figure 2.65 présente l'espace total requis pour les phases FCC-ee et FCC-hh. L'enveloppe indiquée peut être aussi petite que possible, mais aussi grande que nécessaire pour développer une intégration paysagère appropriée basée sur un paysage ininterrompu et une renaturation. L'objectif est de créer une valeur ajoutée en étendant le site de préservation de la nature et en apportant un habitat supplémentaire afin de créer de meilleures conditions pour la croissance de la biodiversité et les activités de loisirs humaines.



Fig. 2.65 : Besoins en espace pour un site et intégration paysagère du site d'expérience PB à Presinge, Suisse.

Site PD

Le site d'expérience PD à Nangy, en France, est situé entre l'autoroute A40 et la nouvelle route départementale à plusieurs voies RD903, qui passe à l'extrémité sud du site. Les environs sont dominés par le grand hôpital régional « CHAL », une zone industrielle au nord avec une grande usine de transformation du lait et un quartier mixte commercial et résidentiel de l'autre côté de la route départementale à plusieurs voies. Bien que la zone soit vaste et ouverte, le site n'est pas très visible car il serait aménagé sur une pente. Les conditions topographiques suggèrent une approche en terrasses du nord au sud. Bien qu'il ne soit pas nécessaire de construire les bâtiments et les équipements de la phase du collisionneur de hadrons dès la première phase, celle du collisionneur de leptons, l'aménagement du site et l'intégration paysagère exigent un aménagement planifié

des terrasses dès le départ. Les espaces verts domineront donc le site pendant la première phase d'exploitation. L'accès au site par le nord est exclusif, n'entraînant, ainsi, aucun trafic de transit supplémentaire.



Fig. 2.66 : Besoins en espace pour un site et intégration paysagère du site d'expérience PD à Nangy, France.

Site PF

Le site technique PF à Éteaux, en France, est situé directement sur une route nationale à forte circulation. Une entreprise de travaux publics est établie de l'autre côté de la route. La zone se caractérise par une vue ouverte sur la chaîne des Préalpes et la pente tombant sur une forêt et un petit ruisseau au sud de l'autoroute A410 rend le site partiellement visible depuis la route nationale. La boîte à outils d'architecture permet de prévoir une renaturation à cet endroit, créant ainsi une valeur ajoutée malgré la consommation d'espace agricole. Les zones humides situées à proximité immédiate du site et qui ne sont pas suffisamment préservées aujourd'hui peuvent être améliorées pour créer des habitats et catalyser la croissance durable de la biodiversité dans cette région. La Figure 2.67 montre les besoins en espace du site technique et les possibilités de restauration des zones humides à l'ouest. L'espace restauré est à peu près aussi grand que l'espace construit.

Site PG

Le site d'expérience PG, qui s'étend sur les communes de Groisy et de Charvonnex en France, est situé dans un environnement naturel mixte, une forêt et un pâturage utilisé pour le bétail. Il n'est pas possible d'éviter la forêt, car le puits principal menant à la caverne d'expérience ne peut pas être déplacé et il n'existe qu'une faible marge de manœuvre pour ajuster l'emplacement du puits menant à la caverne de service. Les contraintes d'habitat et de biodiversité

Implementation/Implementation-Figs/PF-2D-concept.pdf

Fig. 2.67 : Besoins en espace pour un site et intégration paysagère du site technique PF à Éteaux, France.

que la forêt implique nécessitent de réduire au maximum la consommation de terrain boisé. Par conséquent, il est envisagé de diviser le site de manière à placer les infrastructures ayant un impact visuel et sonore à proximité de l'autoroute au nord, les installations pouvant être déplacées sur le plateau ouvert à l'extérieur de la forêt, et à ne conserver à proximité des puits que les équipements strictement nécessaires, tels que les ascenseurs et la ventilation. Le résultat est un site qui couvre une plus grande surface, mais dont l'impact sur la nature est bien moindre que celui d'un site regroupé. La configuration permet de créer de la valeur ajoutée grâce à une installation pour accueillir les visiteurs. La première phase consacrée au collisionneur de leptons permettrait de conserver des espaces largement libres de construction et verts. Seule la deuxième phase, consacrée au collisionneur de hadrons, nécessitera des constructions temporaires pour l'enroulement de la bobine des détecteurs et des systèmes de réfrigération cryogéniques permanents. Une surface et des arbres équivalents à la surface et aux arbres défrichés peuvent être recréés sur la zone du site qui est actuellement un pâturage ouvert et sur les clairières de la forêt qui ont été créées historiquement. Cela signifie que le développement du site visera finalement un équilibre général neutre en ce qui concerne la préservation de l'habitat et de la biodiversité et qu'il pourra créer une valeur ajoutée grâce à des installations pour les visiteurs. La Figure 2.68 montre les besoins en espace pour les constructions sur le site principal (à droite) et l'annexe proche de l'autoroute (à gauche). Les espaces verts destinés à la renaturation et un exemple d'installation pour l'accueil des visiteurs sont visibles dans la partie inférieure du site principal.

Site PH

À son emplacement nominal, le site technique PH à Cercier et Marlioz en France serait entièrement situé dans un bois sur une pente assez raide. En termes d'intégration, la principale difficulté technique est la pente qui nécessite une approche en terrasses. Le site serait entièrement caché dans la forêt. Les exigences techniques d'accueil de tous les équipements nécessaires au

Implementation/Implementation-Figs/PG-2D-concept.pdf

Fig. 2.68 : Besoins en espace pour un site et intégration paysagère du site d'expérience PG à Charvonnex et Groisy, France. L'image de droite concerne le site principal autour des puits et l'image de gauche décrit l'annexe proche de l'autoroute qui contribue à réduire les impacts sur la nature, l'habitat, la biodiversité, la visibilité et le bruit.

fonctionnement du système de radiofréquences nécessitent cependant un espace important (Fig. 2.69). Les principaux éléments de construction sont la sous-station électrique de 400 kV, les convertisseurs de puissance et le système de réfrigération cryogénique.

Bien que l'emplacement soit techniquement réalisable, l'analyse de l'impact sur l'environnement et l'engagement auprès des parties prenantes locales selon le schéma « Éviter-réduire-compenser » peuvent encore nécessiter une réduction supplémentaire de la consommation d'espace. Dans ce contexte, la division du site en une partie électrique qui peut être déplacée plus loin et des éléments qui doivent être proches des puits (cryogénie, refroidissement, ventilation) peut être reconsidérée.

D'un point de vue architectural, les bâtiments du site sont moins exigeants que les autres, car le site est invisible de l'extérieur.

Site PJ

Le site d'expérience PJ à Dingy-en-Vuache et Vulbens, en France, est situé dans une zone agricole juste au sud de l'autoroute A40, avec un accès routier existant à Vulbens. L'existence d'un corridor pour la faune devra être prise en compte lors de l'intégration du site. Le site n'est pas visible de l'autoroute ni des communes. Il est éloigné de tout hameau ou maison individuelle. Les contraintes topographiques et de relief imposent à nouveau une approche en terrasses qui nécessite de préparer dès le départ l'ensemble du site pour les deux phases du collisionneur (ee et hh). Le terrain offre de bons moyens pour intégrer le site visuellement et pour prévoir une installation d'accueil de visiteurs. L'existence de liaisons de mobilité douce entre les communes voisines peut également être intégrée dans la planification du site. La majeure partie de la surface serait conservée en tant que prairie jusqu'à l'installation du second collisionneur de particules. Plusieurs espaces qui seraient nécessaires à cette phase seraient également créés dès la première phase, puisque l'approche en terrasses

Implementation/Implementation-Figs/PH-2D-concept.pdf

Fig. 2.69 : Besoins en espace pour l'intégration d'un site technique PH à Cercier et Marlioz, France.

permet de créer des volumes couverts et semi-enterrés qui peuvent être utilisés à des fins différentes à des moments différents. Comme sur d'autres sites d'expérience, les installations d'enroulement de la bobine et d'assemblage des détecteurs ne seraient que temporaires. Ces zones seraient ensuite restaurées en espaces verts (Fig. 2.70).

Site PL

Le site technique PL à Challex, en France (département de l'Ain), serait situé sur un espace agricole ouvert et plat, à l'emplacement de deux maisons individuelles. Les vignobles situés à proximité, sur le territoire suisse, se trouvent sur des pentes raides qui s'abaissent vers le Rhône et la zone du vallon de l'Allondon. La proximité de l'emplacement du site, situé à l'extérieur du village, sert aux résidents locaux et aux touristes pour des activités de loisirs telles que la marche, la randonnée, la course à pied et la visite des vignobles. L'application complète de la boîte à outils d'orientation architecturale pour une très bonne intégration dans le paysage est donc un objectif primordial. Étant donné que le terrain très plat ne peut pas être utilisé efficacement pour intégrer le site dans le paysage, le fait d'abaisser légèrement le site pour éviter de perturber le paysage peut atténuer certains problèmes de visibilité. L'expression de façade, les matériaux de construction naturels, les façades et toits verts et les écrans de visibilité seront des éléments essentiels de l'architecture et de la conception du site. La surface prévue pour ce site comprend un tampon vert supplémentaire sur l'espace, inutilisable pour l'exploitation agricole afin de veiller à ce que la visibilité du site reste faible et que l'intégration puisse être très bien planifiée et mise en œuvre. Cette intégration contribue également à améliorer la valeur de l'habitat, à favoriser l'épanouissement de la biodiversité et à rendre la zone plus attrayante pour les activités de loisirs. Seule une petite différence entre la phase de construction du collisionneur de leptons et celle du collisionneur de hadrons est prévue, ce qui garantit que, dans toute la mesure du possible, le site soit définitivement développé dès le départ.

Implementation/Implementation-Figs/PJ-2D-concept.pdf

Fig. 2.70 : Besoins en espace pour l'intégration du site d'expérience PJ à Dingy-en-Vuache et Vulbens, France. La boîte à outils d'architecture suggère de centrer le site entre les lignes d'arbres existantes afin de garantir la création de corridors fonctionnels pour la faune. Par rapport à aujourd'hui, ces lignes peuvent conduire à une amélioration des conditions d'habitat.

Conclusions

La Figure 2.72 illustre les résultats de l'application de la boîte à outils d'architecture sur l'emplacement de certains sites de surface. Ces travaux ne représentent pas de conceptions ou de choix architecturaux spécifiques pour l'implantation. Ils servent d'outil pour engager avec les parties prenantes locales un dialogue sur les besoins et les contraintes de chacun des emplacements. Ils permettent de développer des concepts architecturaux et des projets dans le cadre d'un effort de coopération, fédérant les scientifiques et les ingénieurs qui conçoivent l'infrastructure de recherche, les architectes et les paysagistes qui développent les sites et les parties prenantes locales. L'engagement prend d'abord, dans chaque lieu, la forme d'ateliers collaboratifs avec des représentants de la population et des parties prenantes locales intéressées. Cette phase comprend également des visites communes sur le terrain afin de mieux comprendre ce qui peut être envisagé de manière réaliste et ce qui est nécessaire, tant du point de vue technique que du point de vue des parties prenantes. Les exigences et les contraintes du projet technique seront intégrées dans cette activité. Une fois que les conditions limites ont été convenues et documentées, une autre phase, plus détaillée, peut commencer, au cours de laquelle les architectes-ingénieurs élaborent des scénarios spécifiques pour les sites. L'objectif est de parvenir à des conceptions de sites équilibrées et intégrées de manière adéquate lors d'une phase préparatoire ultérieure du projet. Les résultats, sous la forme de plans de conception, de descriptions et de prescriptions de construction, seront inclus dans le processus d'autorisation environnementale dans chaque État hôte.

Il convient de noter que le concept architectural et les développements de conception d'un projet

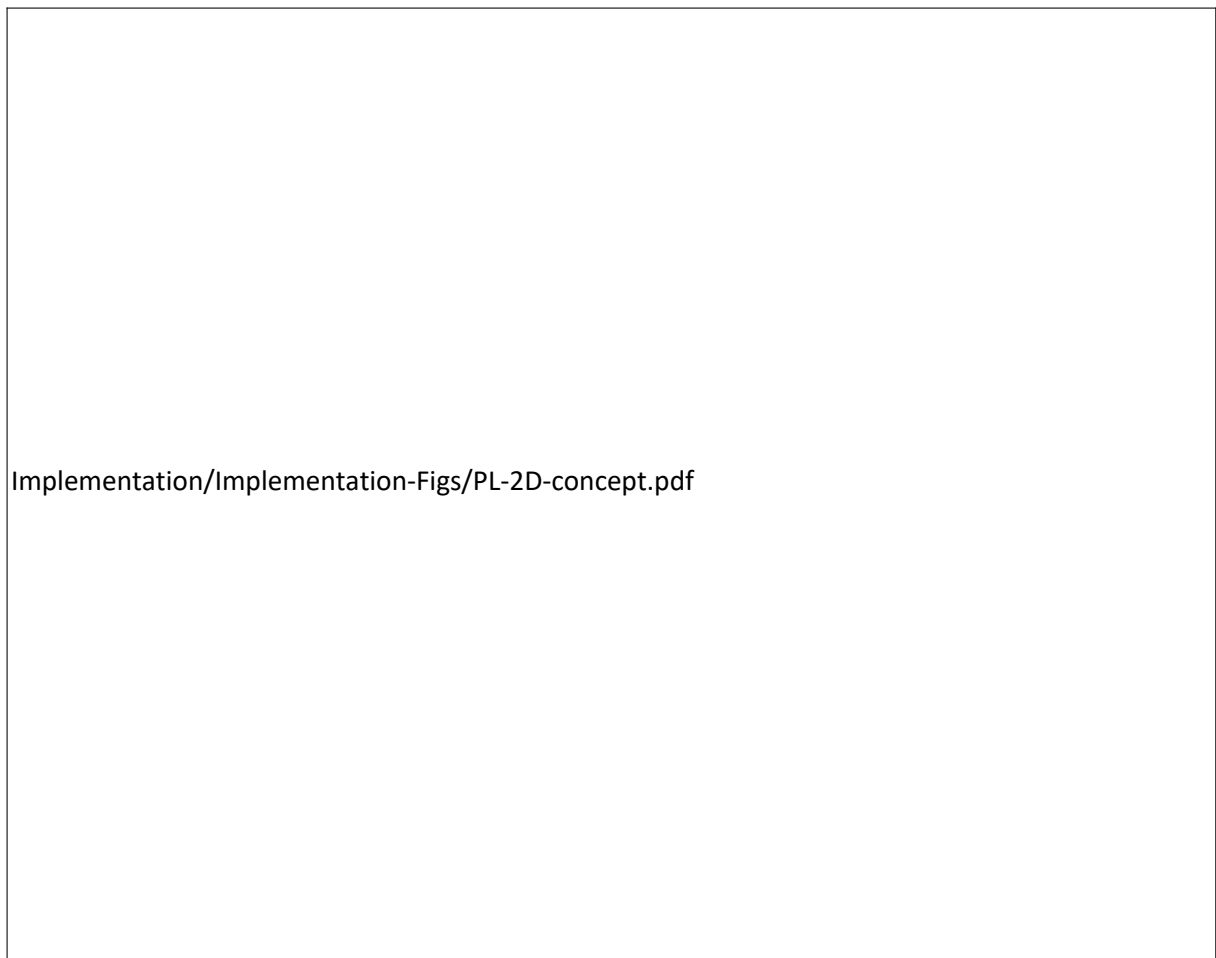
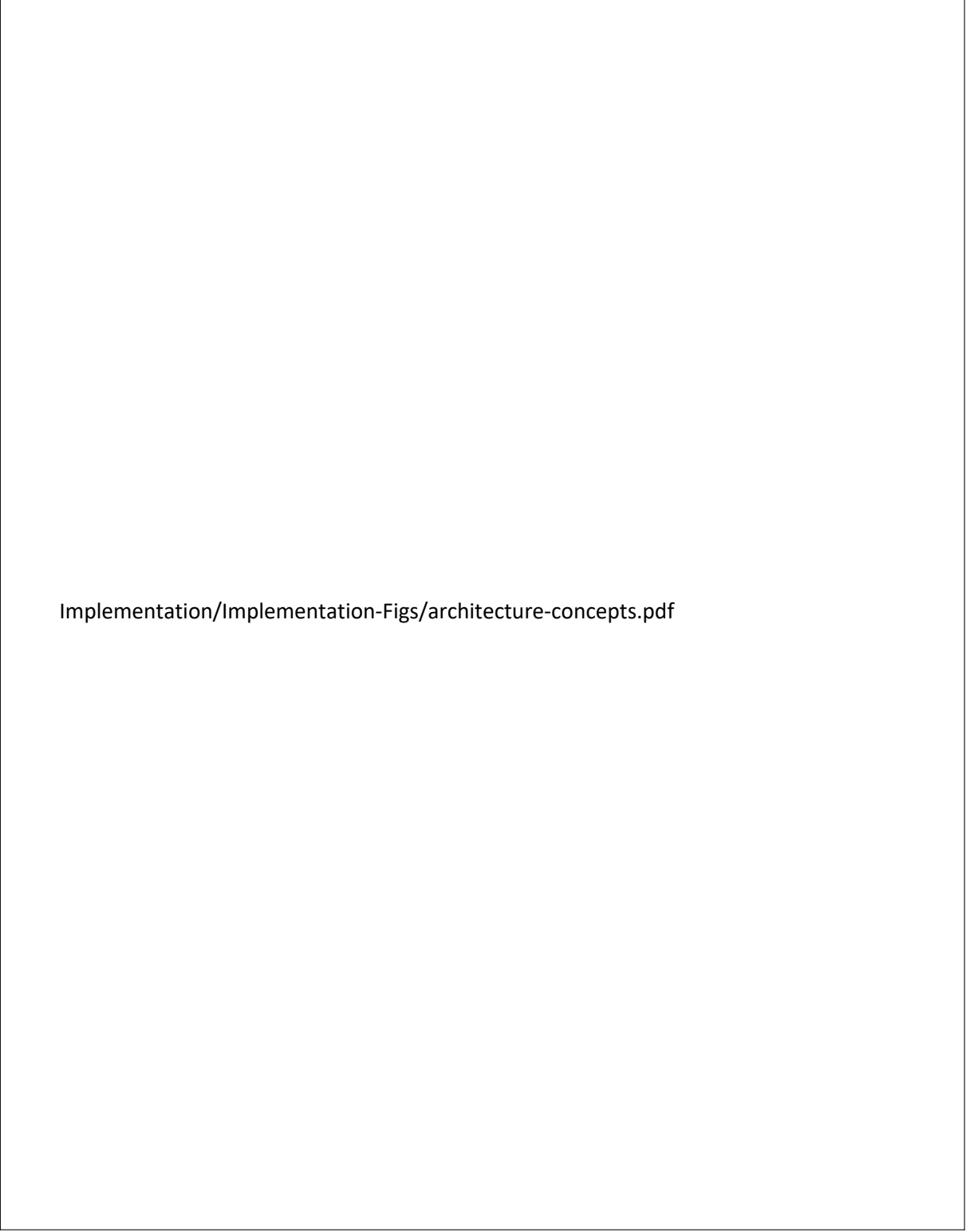


Fig. 2.71 : Besoins en espace pour l'intégration d'un site technique PL à Challex, France.

public de cette envergure, avec huit nouveaux sites de surface occupant chacun plusieurs hectares d'emprises, nécessitent une étude de marché et une procédure d'appel d'offres en temps utile pour trouver un partenaire qualifié. La disponibilité d'une telle société d'architecture doit être assurée à la fois en termes de personnel minimum et de temps ininterrompu pour travailler sur le projet. L'ensemble du processus de développement devrait s'étaler sur plusieurs années.



Implementation/Implementation-Figs/architecture-concepts.pdf

Fig. 2.72 : Collection de concepts d'artiste résultant de l'application de la boîte à outils d'architecture à des sites individuels. Les conceptions paysagères intégrées exigent une préparation précoce des parcelles, et les zones tampons vertes devront être préparées dès la phase de construction souterraine afin de pouvoir sélectionner les sites dès le début.

Futur collisionneur circulaire (FCC)

Rapport d'étude de faisabilité

Volume 3, chapitre 3

Environnement

Traduction française du chapitre 3, "Environnement"

La traduction de cette publication technique/scientifique a été réalisée à l'aide d'outils automatisés. Elle peut différer de la version originale en anglais à divers égards.

En cas de doute, la version anglaise fait foi.

31 mars 2025

Soumis à la revue European Physical Journal ST, publication conjointe de EDP Sciences, de Springer Science+Business Media, et de la Società Italiana di Fisica.

Note de la rédaction

L'une des recommandations de la mise à jour 2020 de la stratégie européenne pour la physique des particules était que « l'Europe et ses partenaires internationaux étudient la faisabilité technique et financière d'un futur collisionneur de hadrons au CERN avec une énergie au centre de masse d'au moins 100 TeV et avec une installation de productions d'électrons-positrons, d'interactions de Higgs et d'interactions électrofaibles dans une première étape ».

En juin 2021, le Conseil du CERN a lancé l'étude de faisabilité du FCC, qui doit être achevée d'ici 2025, à temps pour la prochaine mise à jour de la stratégie européenne pour la physique des particules. Les résultats de l'étude sont rendus publics dans le présent rapport d'étude de faisabilité du FCC, en tant que contribution au processus de mise à jour de la stratégie européenne pour la physique des particules, lancé par le Conseil du CERN en mars 2024. Les études présentées dans le présent rapport d'étude de faisabilité du FCC n'impliquent aucun engagement de la part des États membres ou membres associés du CERN en faveur de la construction du futur collisionneur circulaire.

Le présent rapport et les hypothèses qu'il contient ne préjugent pas des analyses de faisabilité territoriale qui seront menées par les États hôtes, la France et la Suisse, ni des résultats de leurs débats publics et processus de concertation respectifs, ni des décisions futures de leurs autorités compétentes.

Remerciements

Nous tenons à remercier les membres du Comité de pilotage international :

F. Gianotti (Président), CERN
R. Bello, CERN
P. Chomaz, CEA, France
M. Cobal, INFN et Université d'Udine, Italie
B. Heinemann, DESY, Allemagne
T. Koseki, KEK, Japon
M. Lamont, CERN
L. Merminga, FNAL, États-Unis
J. Mnich, CERN
M. Seidel, PSI et EPFL, Suisse
C. Warakaulle, CERN

et les membres du Comité consultatif scientifique :

A. Parker (Président), Université de Cambridge, Royaume-Uni
R. Bartolini, DESY, Allemagne
A. Chabert, SFTRF, France
H. Ehrbar, Heinz Ehrbar Partners LLC, Suisse
B. Gavela Legazpi, UAM Madrid, Espagne
G. Hiller, TU Dortmund, Allemagne
S. Krishnagopal, FNAL, États-Unis
P. Križan, Université de Ljubljana, Slovénie
P. Lebrun, ESI, France
P. McIntosh, STFC, ASTeC, UKRI, Royaume-Uni
M. Minty, BNL, États-Unis
R. Tenchini, INFN Sezione di Pisa, Italie

pour leurs conseils constants et leur révision minutieuse qui ont permis de mener à bien ce rapport.

Les recherches menées par la collaboration internationale pour le FCC, hébergée par le CERN, ont conduit à la présente publication et ont été financées par le programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne sous les numéros de subvention 951754 (FCCIS), 654305 (EuroCirCol), 764879 (EASITrain), 730871 (ARIES), 777563 (RI-Paths) et du FP7 sous le numéro 312453 (EuCARD-2).

Ce travail a également bénéficié du soutien de l'initiative CHART (Swiss Accelerator Research and Technology), fondée en 2016 en tant que collaboration faîtière pour les activités de recherche et de technologie portant sur les accélérateurs. Les partenaires actuels de CHART sont le CERN, l'Institut PSI, l'EPFL, l'ETH-Zurich et l'Université de Genève.

Avis concernant les marques : Toutes les marques commerciales figurant dans le présent rapport sont reconnues comme telles.

Le présent rapport a été édité avec le système collaboratif de rédaction et de publication Overleaf.com. La mise en page et la préparation finale de l'impression ont été réalisées avec pdfTeX 3.14159265-2.6-1.40.17.

Copyright CERN pour le bénéfice de la collaboration FCC 2024, Creative Commons Attribution 4.0

Le transfert de connaissances fait partie intégrante de la mission du CERN.

Le CERN publie ce volume en libre accès sous la licence Creative Commons Attribution 4.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) afin d'en permettre une large diffusion et utilisation. La soumission d'une contribution au serveur de documents du CERN est réputée valoir acceptation, de la part du contributeur, de la présente déclaration de droits d'auteur et de licence. Les contributeurs sont priés d'obtenir les autorisations éventuellement nécessaires à cette fin.

Le présent volume est indexé dans : Serveur de documents du CERN (CDS) :

CERN-FCC-ACC-2025-0003 DOI
10.17181/CERN.I26X.V4VF

<http://cds.cern.ch/record/2928194>

La présente édition du rapport doit être citée de la façon suivante :

Rapport d'étude de faisabilité du futur collisionneur circulaire, Volume 3 : Génie civil, implantation et durabilité, édition préliminaire publiée par M. Benedikt et al, Rapports sur les accélérateurs du CERN,

CERN-FCC-ACC-2025-0003, DOI 10.17181/CERN.I26X.V4VF, Genève, 2025.

Disponible en ligne : <https://cds.cern.ch/record/2928194>

Liste des éditeurs au 31 mars 2025

M. Benedikt¹ (Chef d'étude), F. Zimmermann¹ (Chef d'étude adjoint), B. Auchmann^{1,2}, W. Bartmann¹, J.P. Burnet¹, C. Carli¹, A. Chancé³, P. Craievich², M. Giovannozzi¹, C. Grojean^{4,5}, J. Gutleber¹, K. Hanke¹, A. Henriques¹, P. Janot¹, C. Lourenço¹, M. Mangano¹, T. Otto¹, J. Poole¹, S. Rajagopalan⁶, T. Raubenheimer⁷, E. Todesco¹, L. Ulrici¹, T. Watson¹, G. Wilkinson^{1,8}.

Liste des contributeurs au 31 mars 2025

A. Abada^{9,10,11}, M. Abbrescia^{12,13}, H. Abdolmaleki^{14,15}, S.H. Abidi⁶, A. Abramov¹, C. Adam^{9,16,17}, M. Ady¹, P.R. Adzic¹⁸, I. Agapov⁴, D. Aguglia¹, I. Ahmed¹⁹, M. Aiba², G. Aielli^{20,21}, T. Akan²², N. Akchurin²³, D. Akturk²⁴, M. Al-Thakeel^{1,25,26}, G.L. Alberghi²⁵, J. Alcaraz Maestre²⁷, M. Aleksa¹, R. Aleksan³, F. Alharthi^{9,10,28}, J. Alimena⁴, A. Alimenti²⁹, S. Alioli^{30,31}, L. Alix^{1,9,16}, B.C. Allanach³², L. Allwicher⁴, A.A. Altintas³³, M. Altinli^{33,34}, M. Alviggi^{35,36}, G. Ambrosio³⁷, Y. Amhis^{9,10,11}, A. Amiri^{38,39}, G. Ammirabile⁴⁰, T. Andeen⁴¹, K.D.J. Andréi¹, J. Andrea^{9,42,43}, A. Andreazza^{44,45}, M. Andreini¹, T. Andriollo⁴⁶, L. Angel⁴⁷, M. Angelucci⁴⁸, S. Antusch⁴⁹, M.N. Anwar^{12,50}, L. Apolinário⁵¹, G. Apollinari³⁷, R.B. Appleby^{52,53}, A. Apresyan³⁷, Aram Apyan⁵⁴, Armen Apyan⁵⁵, A. Arbey^{9,56,57}, B. Argiento^{35,36}, V. Ari⁵⁸, S. Arias⁵⁹, B. Arias Alonso¹, O. Arnaez^{9,16,17}, R. Arnaldi⁶⁰, F. Arneodo⁶¹, H. Arnold⁶², P. Arrutia Sota¹, K. Arundell⁶³, M.E. Ascioti^{64,65}, K.A. Assamagan⁶, S. Aumiller⁶⁶, G. Aydin⁶⁷, K. Azizi^{38,68}, P. Azzi⁶⁹, N. Bacchetta⁶⁹, A. Bacci⁴⁴, B. Bai⁷⁰, Y. Bai⁷¹, L. Balconi^{44,45}, G. Baldinelli^{64,65}, B. Balhan¹, A.H. Ball^{1,72}, A. Ballarino¹, S. Banerjee⁷³, S. Banik^{2,74}, D.P. Barber^{4,75}, M.B. Barbero^{9,76,77}, D. Barducci^{40,78}, D. Barna⁷⁹, G.G. Barnaföldi⁷⁹, M.J. Barnes¹, A.J. Barr⁸, R. Bartek⁸⁰, H. Bartosik¹, S.A. Bass⁸¹, U. Bessler^{9,82,83}, M.J. Basso^{84,85}, A. Bastianin^{45,86}, P. Bataillard⁸⁷, M. Battistin¹, J. Bauche¹, L. Baudin¹, J. Baudot^{9,42,43}, B. Baudouy³, L. Bauerdick³⁷, C. Bayindir^{88,89}, H.P. Beck⁹⁰, F. Bedeschi⁴⁰, C. Bee⁶², M. Begel⁶, M. Behtouei⁴⁸, L. Bellagamba²⁵, N. Bellegarde¹, E. Belli^{1,91}, E. Bellingeri⁹², S. Belomestnykh³⁷, A.D. Benaglia³⁰, G. Bencivenni⁴⁸, J. Bendavid¹, M. Benmergui⁹³, M. Benoit⁹⁴, D. Benvenuti^{1,40}, T. Bergauer⁹⁵, N. Bernachot⁹⁶, G. Bernardi^{9,97,98}, J. Bernardi⁹⁹, Q. Berthet^{100,101,102}, S. Bertoni¹⁰³, C. Bertulani¹⁰⁴, M.I. Besana², A. Besson^{9,42,43}, M. Bettelini¹⁰⁵, S. Bettoni², S. Beuvier¹⁰⁶, P.C. Bhat³⁷, S. Bhattacharya¹⁰⁷, J. Bhom¹⁰⁸, M.E. Biagini⁴⁸, A. Bibet-Chevalier¹⁰⁹, M. Bicerli¹¹⁰, M. Biglietti¹¹¹, G.M. Bilei⁶⁴, B. Bilki^{112,113}, K. Bisgaard Christensen¹, T. Biswas¹¹⁴, F. Blanc¹¹⁵, F. Blekman^{4,116,117}, A. Blondel^{9,102,118}, J. Blümlein⁴, D. Boccanfuso^{35,119}, A. Bogomyagkov¹²⁰, P. Boillon¹⁰⁹, P. Boivin¹⁰¹, M.J. Boland¹²¹, S. Bologna¹²², O. Bolukbasi³³, R. Bonnet¹⁰³, J. Borburgh¹, F. Bordry¹, P. Borges de Sousa¹, G. Borghello¹, L. Borriello³⁵, D. Bortoletto⁸, M. Boscolo⁴⁸, L. Bottura¹, V. Boudry^{9,82,83}, R. Boughezal¹²³, D. Bourilkov¹²⁴, M. Boyd^{84,125}, D. Boye⁶, G. Bozzi^{126,127}, V. Braccini⁹², C. Bracco¹, B. Bradu¹, A. Braghieri¹²⁸, S. Braibant^{25,26}, J. Bramante¹²⁹, G.C. Branco¹³⁰, R. Brenner¹³¹, N. Brisa¹⁰³, D. Britzger¹³², G. Broggi^{1,91}, L. Bromiley¹, E. Brost⁶, Q. Bruant³, R. Bruce¹, E. Bründermann¹³³, L. Brunetti^{9,16,17}, O. Brüning¹, O. Brunner¹, X. Buffat¹, E. Bulyak¹³⁴, A. Burdyko^{44,135}, H. Burkhardt^{1,136}, P.N. Burrows¹³⁷, S. Busatto^{44,91}, S. Buschaert⁸⁷, D. Buttazzo⁴⁰, A. Butterworth¹, D. Butti¹, G. Cacciapaglia^{138,139,140}, Y. Cai⁷, B. Cai¹¹⁴¹, V. Cairo¹, O. Cakir⁵⁸, P. Calafiura¹⁴², R. Calaga¹, S. Calatroni¹, D.G. Caldwell¹⁴³, A. Çalışkan¹⁴⁴, C. Calpini¹⁴⁵, M. Calviani¹, E. Camacho-Pérez¹⁴⁶, P. Camarri^{20,21}, L. Caminada^{2,74}, M. Campajola^{35,36}, A.C. Canbay⁵⁸, K. Canderan¹, S. Candido¹, F. Canelli⁷⁴, A. Canepa³⁷, S. Cantarella⁴⁸, K.B. Cantún-Avila¹⁴⁶, L. Capriotti^{147,148}, A. Carami¹⁴⁹, A. Carbone⁴⁴, J.M. Carceller¹, G. Carini⁶, C. Carli¹, F. Carlier¹, C.M. Carloni Calame¹²⁸, C. Caron¹⁵⁰, F. Carra¹, C. Cartannaz⁸⁷, S. Casenove¹, G. Catalano¹⁵¹, V. Cavaliere⁶, C. Cazzaniga¹⁵², C. Cecchi^{64,65}, F.G. Celiberto¹⁵³, M. Cepeda²⁷, F. Cerutti¹, F. Cetorelli^{30,31}, G. Chachamis⁵¹, Y. Chae⁴, F. Chagnet¹⁵⁴, I. Chaikovska^{9,10,11}, M. Chalhoub⁸⁷, M. Chamizo-Llatas⁶, M. Champagne¹⁵⁵, H. Chanal^{9,156,157}, G. Chapelier¹⁰⁹, P. Charitos¹, C. Charles¹⁰⁶, T.K. Charles¹⁵⁸, C. Charlot^{9,82,83}, S. Chatterjee⁴, A. Chaudhuri¹⁵⁹, R. Chehab^{9,10,11}, S.V. Chekanov¹⁶⁰, H. Chen⁶,

T. Chesne¹⁰⁶, F. Chiapponi^{25,26}, G. Chiarello^{161,162}, M. Chiesa¹²⁸, P. Chiggiato¹, Ph. Chomaz³, M. Chorowski¹⁶³, J.P. Chou¹⁶⁴, M. Chrzaszcz¹⁰⁸, W. Chung¹⁶⁵, S. Ciarlantini^{69,166}, A. Ciarma⁴⁸, D. Cieri¹³², A.K. Ciftci¹⁶⁷, R. Ciftci¹⁶⁸, R. Cimino⁴⁸, F. Cirotto^{35,36}, M. Ciuchini¹¹¹, M. Cobal^{169,170}, A. Coccaro¹⁴¹, R. Coelho Lopes De Sa¹⁷¹, J.A. Coleman-Smith¹, F. Collamati¹⁷², C. Colldelram¹⁷³, P. Collier¹, P. Collins¹, J. Collot^{9,174,175}, M. Colmenero¹, L. Colnot¹⁵¹, G. Coloretti⁷⁴, F.A. Conventi^{35,176}, A. Cook¹, L. Cooley^{177,178}, A.S. Cornell¹⁷⁹, C. Cornella¹, G. Cornette¹⁰⁶, I. Corredoira¹⁸⁰, P. Costa Pinto¹, F. Couderc³, J. Coupard¹, S. Coussy⁸⁷, R. Crescenzi¹⁸¹, I. Crespo Garrido^{1,182}, T. Critchley^{1,102}, A. Crivellin⁷⁴, T. Croci⁶⁴, C. Cudré¹⁰⁶, G. Cummings³⁷, F. Cuna¹², R. Cunningham¹, B. Curé¹, E. Curtis¹⁸³, M. D'Alfonso¹⁸⁴, L. D'Aloia Schwartzentruber¹⁸⁵, G. D'Amen⁶, B. D'Anzi^{12,13}, A. D'Avanzo^{35,36}, D. d'Enterria¹, A. D'Onofrio³⁵, M. D'Onofrio¹⁸⁶, M. Da Col¹⁵¹, M. Da Rocha Rolo⁶⁰, C. Dachauer¹⁸⁷, B. Dagli²⁴, A. Dainese⁶⁹, B. Dalena³, W. Dallapiazza¹⁸⁸, M. Dam¹⁸⁹, H. Damerau¹, V. Dao⁶², A. Das¹⁹⁰, M.S. Dagaard¹, S. Dauphin¹⁰⁹, A. David¹, T. Davidé¹⁹¹, G.J. Davies¹⁸³, S. Dawson⁶, J. de Blas¹⁹², A. de Cosa¹⁵², S. De Curtis¹⁹³, N. De Filippis^{12,50}, E. De Lucia⁴⁸, R. De Maria¹, E. De Matteis⁴⁴, A. De Roeck¹, A. De Santis⁴⁸, A. De Vita^{1,69,166}, A. Deandrea^{9,56,57}, C.J. Debono¹⁹⁴, M. Deeb¹⁰¹, M.M. Defranchis¹, J. Degens¹⁸⁶, S. Deghayé¹, V. Del Duca⁴⁸, C.L. Del Pio⁶, A. Del Vecchio⁹¹, D. Delikaris¹, A. Dell'Acqua¹, M. Della Pietra^{35,36}, M. Delmastro^{9,16,17}, L. Delprat¹, E. Delugas¹⁵¹, Z. Demiragli¹⁹⁵, L. Deniau¹, D. Denisov⁶, H. Denizli¹⁹⁶, A. Denner¹⁹⁷, A. Denot¹⁰⁹, G. Deptuch⁶, A. Desai¹⁹⁸, H. Deveci¹, A. Di Canto⁶, A. Di Ciaccio^{20,21}, L. Di Ciaccio^{9,16,17}, D. Di Croce^{1,115}, C. Di Fraia^{35,36}, B. Di Micco^{29,111}, R. Di Nardo^{29,111}, T.B. Dingley⁸, F. Djama^{9,76,77}, F. Djurabekova¹⁹⁹, D. Dockery³⁷, S. Doebert¹, D. Domange^{1,200}, M. Donegà¹⁵², U. Dosselli⁶⁹, H.A. Dostmann^{1,201}, J.A. Dragovich³⁷, I. Drebot⁴⁴, M. Drewes²⁰², T.A. du Pree²⁰³, Z. Duan²⁰⁴, C. Duarte-Galvan²⁰⁵, O. Duboc²⁰⁶, M. Duda², P. Duda¹⁶³, H. Duran Yildiz⁵⁸, H. Durand¹⁰⁶, P. Durand¹⁰⁶, G. Durieux²⁰², Y. Dutheil¹, I. Dutta³⁷, J.S. Dutta²⁰⁷, S. Dutta²⁰⁸, F. Duval¹, F. Eder¹, M. Eisterer⁹⁹, Z. El Bitar^{9,42,43}, A. El Saied²⁰⁹, M. Elisei⁴⁴, J. Ellis^{1,210}, W. Elmetenawee¹², J. Elmsheuser⁶, V. Daniel Elvira³⁷, S.C. Eno²¹¹, Y. Enomoto²¹², B.A. Erdelyi^{69,166}, O.E. Eruteya^{102,213}, M. Escobar²¹⁴, O. Etisken²¹⁵, I. Eymard¹⁴⁵, J. Eysermans¹⁸⁴, D. Falchieri²⁵, C. Falkenberg²⁰⁶, F. Fallavollita^{1,132}, A. Afalou^{1,9,10}, J. Faltova¹⁹¹, J. Fanini¹, L. Fanò^{64,65}, K. Fanti¹⁰⁶, R. Farinelli²⁵, M. Farino¹⁶⁵, S. Farinon¹⁴¹, H. Fatehi³⁸, J. Fatterbert¹⁰⁶, A. Faure²¹⁶, A. Faus-Golfe^{9,10,11}, G. Favia¹, L. Favilla^{35,119}, W.J. Fawcett³², A. Federowicz³⁷, L. Feligioni^{9,76,77}, L. Felsberger¹, Y. Feng²³, A. Fernández Téllez²¹⁷, R. Ferrari¹²⁸, L. Ferreira¹, F. Ferro¹⁴¹, M. Fiascaris¹, C. Fiorio⁴⁵, S.A. Fleury¹, L. Florez¹⁸⁸, M. Florio^{45,151}, A. Fondacci⁶⁴, B. Fontimpe²¹⁴, K. Foraz¹, R. Fortunati², M. Foudaidy^{9,10,11}, M. Fouaidy^{9,10,11}, A. Foussati¹, A. Fowler¹, J.D. Fox²¹⁸, M. Francesconi³⁵, B. Francois¹, R. Franqueira Ximenes¹, F. Fransesini⁴⁸, A. Frasca^{1,186}, A. Freitas²¹⁹, J.A. Frost⁸, K. Furukawa²¹², A. Gabrielli^{25,26}, A. Gaddi¹, F. Gaede⁴, A. Gallén¹³¹, R. Galler^{220,221}, E. Gallice¹⁰⁶, E. Gallo^{4,116}, H. Gamper¹, G. Ganis¹, S. Ganjour³, S. Gao⁶, A. Garand¹⁴⁹, C. Garaus²⁰⁶, D. Garcia¹, R. García Alía¹, R. García Gil²²², C.M. Garcia Jaimes^{1,115}, H. Garcia Rodrigues^{2,223}, C. Garion¹, M. Garlaschè¹, D. Garnier¹⁵⁴, M.V. Garzelli¹¹⁶, S. Gascon-Shotkin^{9,56,57}, M. Gasior¹, G. Gaudino^{35,119}, G. Gaudio¹²⁸, V. Gaur²²⁴, K. Gautam^{74,117}, V. Gawas¹, T. Gehrmann⁷⁴, A. Gehrmann-De Ridder^{74,152}, K. Geiger¹, M. Genco¹⁵¹, F. Gerigk¹, H. Gerwig¹, A. Ghribi^{1,9,225}, P. Giacomelli²⁵, S. Giagu^{91,172}, E. Gianfelice³⁷, S. Giappichini¹³³, D. Gibellieri^{1,226}, F. Giffoni¹⁵¹, G. Gil da Silveira²²⁷, S.S. Gilardoni¹, M. Giovannetti⁴⁸, T. Girardet¹⁰⁶, S. Girod^{1,106}, P. Giubellino⁶⁰, P. Giubilato^{69,166}, F. Giulio^{20,21}, M. Giuliani¹⁰³, E.L. Gkougkousis^{1,74}, S. Glukhov²²⁸, J. Gluza²²⁹, B. Goddard¹, C. Goffing^{1,133}, D. Goldsworthy¹, T. Golling¹⁰², R. Gonçalo^{51,230}, V.P. Gonçalves^{47,231}, T. Gonçalves Da Silva²¹⁴, J. Gonski⁷, R. Gonzalez Suarez¹³¹, S. Gorgi Zadeh¹, S. Gori²³², E. Gorini^{161,233}, L. Gouskos²³⁴, M. Gouzevitch^{9,56,57}, E. Granados¹, F. Grancagnolo¹⁶¹, S. Grancagnolo^{161,233}, A. Grassellino³⁷, A. Grau¹³³, E. Graverini^{40,78,115}, F.G. Gravili^{161,233}, H.M. Gray^{142,235}, M. Grazzini⁷⁴, Mario Greco^{29,111}, Michela Greco^{60,236}, A. Greljo⁴⁹, J-L. Grenard¹, A.V. Gritsan²³⁷, R. Gröber^{69,166}, A. Grudiev¹, E. Gschwendtner¹, J. Gu²³⁸, D. Guadagnoli^{17,138,239}, G. Guerrieri¹, A. Guiavarch²⁰⁹, G. Guillermo Canton^{1,240}, M. Guinchard¹, Y.O. Günaydin²⁴¹, K. Gurcel⁹³, L.X. Gutierrez Guerrero^{242,243}, D. Gutiérrez Rueda¹, A. Gutiérrez-Rodríguez²⁴⁴, V. Guzey^{199,245}, C. Haber¹⁴², T. Hacheney²⁴⁶, B. Hacıahinoglu³³, K. Hahn¹²³, J. Hajer¹³⁰, T. Hakulinen¹, J.C. Hammersley²⁴⁷, M. Hance²³²,

J.B. Hanßen¹⁸⁹, B. Härer¹³³, E. Hauzinger²²⁰, M. Haviernik¹⁹¹, B. Hegner¹, C. Helsens¹¹⁵, Ana Henriques¹, C. Hernalsteens¹, H. Hernández-Arellano²¹⁷, R.J. Hernández-Pinto²⁰⁵, M.A. Hernández-Ruíz²⁴⁴, J. Hernández-Sánchez²¹⁷, J.W. Heron¹, L.M. Herrmann¹, R. Hirosky²⁴⁸, J.F. Hirschauer³⁷, J.D. Hobbs⁶², S. Höche³⁷, M. Hofer¹, G. Hoffstaetter^{6,249}, W. Höfle¹, M. Hohlmann²⁵⁰, F. Holdener²⁵¹, B. Holzer¹, C.G. Honorato²¹⁷, H. Hoorani²⁵², A. Houver¹⁰⁶, E. Howling^{1,8,137}, X. Huang⁷, F. Hug²⁵³, B. Humann¹, P. Hunchak¹²¹, Y. Husein¹, A. Hussain^{1,254}, G. Iadarola¹, G. Iakovidis⁶, G. Iaselli^{12,50}, P. Iengo³⁵, A. Ilg⁷⁴, M. Iodice¹¹¹, A.O.M. Iorio^{35,36}, V. Ippolito¹⁷², U. Iriso¹⁷³, J. Isaacson³⁷, G. Isidori⁷⁴, R. Islam²⁵⁵, A. Istepanyan¹⁰⁶, S. Izquierdo Bermudez¹, V. Izzo³⁵, P.D. Jackson¹⁹⁸, R. Jafari^{1,38}, S.S. Jagabathuni^{1,102}, S. Jana^{256,257}, C. Järmyr Eriksson¹, P. Jausserand¹⁵⁴, M. Jensen²⁵⁸, J.M. Jimenez¹, F.R. Joaquim¹³⁰, O.R. Jones¹, J. Joos¹⁰⁹, E. Jourd’huy^{9,259}, E. Jourdan²¹⁴, J.M. Jowett^{1,260}, A. Jueid²⁶¹, A.W. Jung²⁰⁷, M. Kagan⁷, I. Kahraman⁵⁸, V. Kain¹, J. Kalinowski²⁶², J.F. Kamenik^{263,264}, A. Kanso²⁶⁵, T. Kar²⁶⁶, S.O. Kara²⁶⁷, H. Karadeniz²⁶⁸, S.R. Karmarkar²⁰⁷, V. Karpati²⁶⁹, I. Karpov¹, M. Karppinen¹, P. Karst^{9,76,77}, S. Kartal³³, V.V. Kashikhin³⁷, U. Kaya⁵⁸, A. Kehagias^{1,270}, J. Keintzel¹, M. Kennouche¹, M. Kenzie³², M. Kerréveur-Lavaud⁴⁶, R. Kersevan^{1,271}, V. Keus^{199,272}, H. Khanpour^{14,273,274}, V.V. Khoze²⁷⁵, V.A. Khoze²⁷⁵, P. Kicsiny¹, R. Kieffer¹, C. Kiel¹¹⁵, J. Kieseler¹³³, A. Kilic²⁷⁶, B. Kilminster⁷⁴, S. Kim²⁷⁷, Z. Kirca²⁷⁶, M. Klein¹⁸⁶, A. Klimentov⁶, M. Klute¹³³, V. Klyukhin^{120,278}, M. Knecht^{138,279,280}, B. Kniehl¹¹⁶, P. Ko²⁸¹, S. Ko¹, F. Kocak²⁷⁶, T. Koffas²⁸², C. Kokkinos^{283,284}, K. Kołodziej²²⁹, K. Kong²⁸⁵, P. Kontaxakis¹⁰², I.A. Koop¹²⁰, P. Kopciwicz¹, P. Koppenburg²⁰³, M. Koratzinos^{1,2}, K. Kordas²⁸⁶, A. Korsun^{9,10,11}, O. Kortner¹³², S. Kortner¹³², B. Korzh¹⁰², T. Koseki²¹², J. Kosse², P. Kostka^{1,186}, S. Kostoglou¹, A.V. Kotwal⁸¹, G. Kozlov^{1,278}, I. Kozsar¹, T. Kramer¹, P. Krkotic¹, H. Kroha¹³², K. Kröninger²⁴⁶, S. Kuday^{1,58}, G. Kuhlmann²⁸⁷, O. Kuhlmann^{1,288}, M. Kuhn²⁸⁹, A. Kulesza²⁹⁰, M. Kumar²⁹¹, F. Kurian⁶, A. Kurtulus^{1,152}, T.H. Kwok⁷⁴, S. La Mendola¹, M. Lackner^{99,292}, T. Ładzinski¹, D. Lafarge¹, P. Laïdouni¹, G. Lamanna^{9,16,17}, N. Lamas¹⁹, G. Landsberg²³⁴, C. Lange², D.J. Lange¹⁶⁵, A. Langner¹, A.J. Lankford²⁹³, M.S. Larson²⁹⁴, K. Lasocha¹, A. Latina¹, S. Lauciani⁴⁸, M. Laufenberg¹⁰⁶, G. Lavezzari¹, L. Lavezzi⁶⁰, L. Lavezzo¹, M. Le Garrec^{1,9,16}, A. Le Jeune¹⁰³, Ph. Lebrun^{1,295}, Y. Léchevin¹, A. Lechner¹, E. Lecointe¹⁰⁶, J.S.H. Lee²⁹⁶, S.W. Lee²⁹⁷, S.J. Lee^{281,298}, T. Lefevre¹, C. Leggett¹⁴², T. Lehtinen²⁹⁹, S. Leone⁴⁰, C. Leonidopoulos³⁰⁰, S. Leontinis⁷⁴, G. Leprince-Maillères³⁰¹, G. Lerner¹, O. Leroy^{9,76,77}, T. Lesiak¹⁰⁸, P. Levai⁷⁹, A. Leveratto⁹², R. Levi¹⁵⁴, A. Li⁶, S. Li^{302,303}, D. Liberati³⁰⁴, G.L. Lichtenstein⁴⁷, M. Liepe²⁴⁹, Z. Ligeti¹⁴², H. Lin³⁰⁵, S. Linda¹⁴⁵, E. Lipeles³⁰⁶, Z. Liu³⁰⁷, S.M. Liuzzo³⁰⁸, T. Loeliger²⁸⁹, A. Loeschcke Centeno³⁰⁹, A. Lorenzetti⁷⁴, C. Lorin³, R. Losito¹, M. Louka^{12,310}, M.L. Loureiro García¹⁸², I. Low^{123,160}, K. Lubonis¹⁵⁴, M.T. Lucchini^{30,31}, V. Lukashenko⁷⁴, G. Luminati⁴⁸, A.J.G. Lunt^{1,311}, A. Lusiani^{40,312}, M. Luzum³¹³, H. Ma⁶, A. Maas³¹⁴, E. Macchia^{1,91,172}, A. Macchiolo⁷⁴, G.E. Machinet²⁶⁵, R. Madar^{9,156,157}, T. Madlener⁴, C. Madrid²³, A. Magalotti²⁹, M. Maggiora^{60,236}, A.-M. Magnan¹⁸³, M.A. Mahmoud³¹⁵, Y. Mahmoud^{316,317}, F. Mahmoudi^{1,9,56}, H. Mainaud Durand¹, J. Maitre¹⁰⁹, Y. Makhloufi¹⁰², B. Malaescu^{9,118,318}, A. Malagoli⁹², C.H. Malan¹⁰⁹, M. Malekhosseini³⁸, M. Malekhosseini³⁸, A. Maloizel^{1,97,98}, S. Malvezzi³⁰, A. Malzac¹⁴⁹, G. Manco¹²⁸, L.S. Mandacarú Guerra¹⁶⁵, P. Manfrinetti^{92,319}, E. Manoni⁶⁴, J. Mans³⁰⁷, L. Mantani³²⁰, S. Manzoni¹, L. Marafatto¹⁶⁹, C. Marcel¹, T. Marcel¹¹⁰, R. Marchevski¹¹⁵, G. Marchiori^{9,97,98}, F. Mariani^{44,91}, V. Mariani^{64,65}, S. Marin¹, C. Marinas³²⁰, V. Marinozzi³⁷, S. Mariotto^{44,45}, C. Marquis¹⁰⁶, J. Martelain³²¹, G. Martelli^{64,65}, A. Martens^{9,10,11}, I. Martin-Melero¹, V.I. Martinez Outschoorn¹⁷¹, F. Martinez²¹⁷, C.M. Jardim²⁷, L. Marzola^{322,323}, S. Masciocchi^{260,266}, A. Mashal¹⁴, A. Masi¹, I. Masina^{147,148}, P. Mastrapasqua²⁰², V. Mateu³²⁴, S. Mattiazzo^{69,166}, M. Maugis¹⁰³, D. Mauree¹⁴⁵, G.H.I. Maury-Cuna³²⁵, A. Mayoux¹, E. Mazzeo¹, S. Mazzoni¹, M. McCullough¹, M. Meena^{9,42,43}, E. Meftah¹⁰², Andrew Mehta¹⁸⁶, Ankita Mehta¹, B. Mele¹⁷², R. Mena-Andrade¹, M. Mentink¹, D. Mergelkuhl¹, V. Mertinger²⁶⁹, L. Mether¹, S. Meylan¹⁰⁶, T. Michel¹⁰³, T. Michlmayr², M. Migliorati^{91,172}, A. Milanese¹, C. Milardi⁴⁸, G. Milhano⁵¹, C. Mirabelli³²⁶, T. Miralles^{9,156,157}, L. Miralles Verge¹, D. Mirarchi¹, K. Mirbaghestan⁷⁴, N. Mirian^{4,327}, V.A. Mitsou³²⁰, D.S. Mitzel²⁴⁶, M. Mlynarikova¹, S. Möbius⁹⁰, M. Mohammadi Najafabadi^{1,14}, G.B. Mohanty³²⁸, R. N. Mohapatra²¹¹, S. Moneta⁶⁴, P.F. Monni¹, E. Monnier^{9,76,77}, S. Monteil^{9,156,157}, I. León Monzón²⁰⁵, F. Moortgat^{1,329}, N. Morange^{9,10,11}, M. Moretti^{147,148}, S. Moretti⁷², T. Mori^{1,212}, I. Morozov¹²⁰, A. Morozzi⁶⁴, M. Morrone¹, A. Moscariello¹⁰², F. Moscatelli^{64,330}, I.

Moulin²¹⁶, N. Mounet¹, A. Mueller³³¹, A.-S. Müller¹³³, B.O. Müller²⁸⁷, J. Mundet²²², E. Musa^{1,4}, V. Musat^{1,8}, R. Musenich¹⁴¹, E. Musumeci³²⁰, M. Mylona¹, V.V. Mytrochenko^{9,10,134}, B. Nachman¹⁴², T. Nakamoto²¹², M. Napsuciale³²⁵, M. Nardecchia^{91,172}, G. Nardini³³², G. Narváez-Arango³³³, S. Naseem⁶¹, A. Navascues Cornago¹, B. Naydenov¹, G. Nergiz¹, A.V. Nesterenko²⁷⁸, C. Neubüser³³⁴, H.B. Newman³³⁵, F. Niccoli^{1,336}, O. Nicrosini¹²⁸, U. Niedermayer²²⁸, G. Niehues¹³³, J. Nielsen¹, G. Nigrelli^{1,91,172}, S. Nikitin¹²⁰, I.B. Nikolaev¹²⁰, A. Nisati¹⁷², N. Nitika^{169,170}, J.M. No³³⁷, M. Nonis¹, Y. Nosochkov⁷, A. Novokhatski^{1,7}, J.M. O'Callaghan³³⁸, S.A. Ochoa-Oregon²⁰⁵, K. Ohmi^{204,212}, K. Oide^{1,102,212}, V.A. Okorokov¹²⁰, C. Oleari^{30,31}, D. Oliveira Damazio^{1,6}, Y. Onel¹¹³, A. Onofre^{339,340,341}, P. Osland³⁴², T. Otto¹, Y.M. Oviedo-Torres^{343,344,345}, A. Ozansoy⁵⁸, F. Ozaydin^{88,346}, K. Ozdemir³⁴⁷, A. Ozturk¹, M.A. Pérez de León²⁰⁵, S. Pacetti^{64,65}, H. Pacey⁸, J. Paciello¹⁰⁹, C.E. Pagliarone^{348,349}, A. Paillex¹⁰⁶, H.F. Pais da Silva¹, F. Palla⁴⁰, A. Pampaloni¹⁴¹, C. Pancotti¹⁵¹, M. Pandurovic³⁵⁰, O. Panella⁶⁴, G. Panizzo^{169,170}, C. Pantouvakis^{69,166}, L. Panwar^{9,118,318}, P. Paolucci³⁵, Y. Papa¹⁰⁶, A. Papaefstathiou³⁵¹, Y. Papaphilippou¹, A. Paramonov¹⁶⁰, A. Paret^{128,352}, B. Parker⁶, V. Parma¹, F. Parodi^{141,319}, M. Parodi¹, B. Paroli^{44,45}, J.A. Parsons³⁵³, D. Passarelli³⁷, D. Passeri^{64,65}, B. Pattnaik³²⁰, A. Patwa³⁵⁴, C. Paus¹⁸⁴, F. Pauss¹⁵², F. Peauger¹, I. Pedraza²¹⁷, R. Pedro⁵¹, J. Pekkanen¹, G. Peon¹, A. Perez¹¹⁰, E. Perez¹, F. Pérez¹⁷³, J.C. Perez¹, J.M. Pérez²⁷, R. Perez-Ramos^{138,139,355}, G. Pérez Segurana¹, A. Perillo Marcone¹, S. Perna^{35,36}, K. Peters⁴, S. Petracca^{35,356}, A.R. Petri⁴⁴, F. Petriello¹²³, A. Petrovic¹, L. Pezzotti²⁵, G. Piacquadio⁶², G. Piazza¹⁸¹, A. Piccini¹, F. Piccinini¹²⁸, A. Pich³²⁰, T. Pieloni¹¹⁵, J. Pierlot¹, A.D. Pilkington⁵², M. Pillet³²⁶, M. Pinamonti^{169,170}, N. Pinto²³⁷, L. Pintucci^{169,170}, F. Pinzauti¹, K. Piotrkowski²⁷³, C. Pira⁴⁸, M. Pitt¹, R. Pittau¹⁹², S. Pittet¹, P. Placidi^{64,65}, W. Placzek³⁵⁷, S. Plätzer^{314,358}, M.-A. Pleier⁶, E. Ploerer^{74,117}, H. Podlech^{359,360}, F. Poirier^{9,16,17}, G. Polesello¹²⁸, M. Poli Lener⁴⁸, J. Polinski¹⁶³, Z. Polonsky⁷⁴, N. Pompeo²⁹, M. Pont¹⁷³, G. Alexandru-Popeneciu³⁶¹, W. Porod¹⁹⁷, L. Porta¹, L. Portales³, T. Portaluri³⁰⁹, M.A.C. Potenza⁴⁵, C. Prasse²⁸⁷, E. Premat¹⁸⁵, M. Presilla¹³³, S. Prestemon¹⁴², A. Price³⁵⁷, M. Primavera¹⁶¹, R. Principe¹, M. Prioli⁴⁴, F.M. Procacci¹², E. Proserpio^{44,135}, A. Provino^{92,319}, C. Pueyo¹, T. Puig¹⁹, N. Pukhaeva²⁷⁸, S. Pulawski²²⁹, G. Punzi^{40,78}, A. Pyarelal³⁶², J. Qian³⁰⁵, H. Quack³⁶³, F. S. Queiroz⁴⁷, G. Quintas-Neves³⁰¹, H. Rafique⁷², J.-Y. Raguin², J. Raidal³²², M. Raidal³²², P. Raimondi³⁷, A. Rajabi⁴, S. Ramírez-Urbe²⁰⁵, S. Randles¹⁸⁶, T. Rao⁶, C.Ø. Rasmussen⁶, A. Ratkus³⁶⁴, P.N. Ratoff^{53,365}, P. Razis^{366,367}, P. Rebello Teles^{1,368}, M.N. Rebelo¹³⁰, M. Reboud^{9,10,11}, S. Redaelli¹, C. Regazzoni¹⁰⁶, L. Reichenbach^{1,369}, M. Reissig¹³³, E. Renou¹⁰⁶, A. Rentería-Olivo³²⁰, J. Reuter⁴, S. Rey¹⁰⁶, A. Ribon¹, D. Ricci¹, M. Rignanese^{69,166}, S. Rimjaem³⁷⁰, R.A. Rimmer³⁷¹, R. Rinaldesi¹, L. Rinolfi^{1,295}, O. Rios¹, G. Ripellino¹³¹, B. Rivas³⁷², A. Rivetti⁶⁰, T. Robens³⁷³, F. Robert¹⁸⁵, E. Robutti¹⁴¹, C. Roderick¹, G. Rodrigo³²⁰, M. Rodríguez-Cahuantzi²¹⁷, L. Röhrig^{156,157,246}, M. Roig³⁷⁴, F. Rojati¹⁰⁹, J. Rojo^{203,375}, J. Roloff²³⁴, P. Roloff¹, A. Romanenko³⁷, A. Romero Francia¹, H. Romeyer³⁷⁶, N. Rompotis¹⁸⁶, N. Rongieras¹⁰³, G. Rosaz¹, K. Roslon³⁷⁷, M. Rossetti Conti⁴⁴, A. Rossi^{64,65}, E. Rossi^{35,36}, L. Rossi^{44,45}, A.N. Rossia^{69,166}, S. Rostami³⁸, G. Roy¹, B. Rubik³⁷, I. Ruehl¹, A. Ruiz-Jimeno³⁷⁸, R. Ruprecht¹³³, J.P. Rutherford³⁶², L. Rygaard⁴, M.S. Ryu²⁹⁷, L. Sabato^{1,115}, G. Sadowski^{9,42,43}, D. Saez de Jauregui^{133,379}, M. Sahin³⁸⁰, A. Sailer¹, M. Saito³⁸¹, P. Saiz¹, G.P. Salam^{382,383}, R. Salerno^{9,82,83}, T. Salmi²⁹⁹, B. Salvachua¹, J.P.T. Salvesen^{1,8,137}, B. Salvi³⁰¹, D. Sampsonidis²⁸⁶, Y. Villamizar^{138,139,140}, C. Sandoval³³³, S. Sanfilippo², E. Santopinto¹⁴¹, R. Santoro^{44,135}, X. Sarasola¹¹⁵, L. Sarperi²⁸⁹, I.H. Sarpün³⁸⁴, S. Sasikumar¹, M. Sauvain³⁸⁵, A. Savoy-Navarro^{3,9}, R. Sawada³⁸¹, G. Sborlini³⁸⁶, J. Scamardella^{35,36}, M. Schaer², M. Schumann^{1,4}, M. Schenk¹, C. Scheuerlein¹, C. Schiavi^{141,319}, A. Schloegelhofer¹, D. Schoerling¹, A. Schöning²⁶⁶, S. Schramm¹⁰², D. Schulte¹, P. Schwaller^{253,387}, A. Schwartzman⁷, Ph. Schwemling³, R. Schwienhorst³⁸⁸, A. Sciandra⁶, L. Scibile¹, I. Scimemi³⁸⁹, E. Scomparin⁶⁰, C. Sebastiani¹, B. Seeber³⁹⁰, J.T. Seeman⁷, F. Sefkow⁴, M. Seidel^{2,115}, S. Seidel⁷⁵, J. Seixas^{341,391,392}, N. Selimovic⁶⁹, M. Selvaggi¹, C. Senatore¹⁰², A. Senoli¹⁹⁶, N. Serra⁷⁴, A. Seryi³⁷¹, A. Sfyrli¹⁰², Pramond Sharma³⁹³, Punit Sharma⁶, C.J. Sharp¹, L. Shchutska¹¹⁵, V. Shiltsev³⁹⁴, M. Siano^{44,45}, R. Sierra¹, E. Silva²⁹, R.C. Silva^{47,345}, L. Silvestrini¹⁷², F. Simon¹³³, G. Simonetti¹, R. Simoniello¹, B.K. Singh³⁹⁵, S. Singh⁶, B. Singhal⁸⁰, A. Siodmok^{1,357}, Y. Sirois^{9,82,83}, E. Sirtori¹⁵¹, B. Sitar³⁹⁶, D. Sittard¹, E. Sitti¹⁵², T. Sjöstrand⁵⁹, P. Skands³⁹⁷, L. Skinnari²⁹⁴, K. Skoufaris¹, K. Skovpen³²⁹, M.

Skrzypek¹⁰⁸, P. Slavich^{138,139,140}, V. Slokenbergs²³, V. Smaluk⁶, J. Smiesko^{1,398}, S.S. Snyder⁶, E. Solano¹⁷³, P. Sollander¹, O.V. Solovyanov^{1,9,156}, M. Son³⁹⁹, F. Sonnemann¹, R. Soos^{1,9,10}, F. Sopkova¹⁹¹, T. Sorais⁴⁰⁰, M. Sorbi^{44,45}, S. Sorti^{44,45}, R. Soualah⁴⁰¹, M. Souayah¹, L. Spallino⁴⁸, S. Spanier⁴⁰², P. Spiller²⁶⁰, M. Spira², D. Stagnara¹⁰³, M. Stallmann¹⁸⁸, D. Standen¹, J.L. Stanyard¹, B. Stapf¹, G.H. Stark²³², M. Statera⁴⁴, C. Staudinger^{1,206}, G. Streicher⁴⁰³, N.P. Strohmaier², R. Stroynowski¹⁰⁷, S. Stucci⁶, G. Stupakov⁷, S. Su³⁶², A. Sublet¹, K. Sugita²⁶⁰, M.K. Sullivan⁷, S. Sultansoy²⁴, I. Syratchev¹, R. Szafron⁶, A. Sznajder⁴⁰⁴, W. Tachon⁴⁰⁵, N.D. Tagdulang^{37,173,338}, N.A. Tahir²⁶⁰, Y. Takahashi¹²⁴, J. Tamazirt^{9,10,11}, S. Tang⁶, Y. Tanimoto²¹², I. Tapan²⁷⁶, G.F. Tassielli^{12,406}, A.M. Teixeira^{9,156,157}, V.I. Telnov¹²⁰, H.H.J. Ten Kate^{1,407}, V. Teotia⁶, J. ter Hoeve³⁰⁰, A. Thabuis¹, G.T. Telles¹⁹, A. Tishelman-Charny⁶, S. Tissandier¹⁰⁹, S. Tizchang^{14,408}, J.-P. Tock¹, B. Todd¹, L. Toffolin^{1,169,409}, A. Tolosa-Delgado¹, R. Tomás García¹, T. Tomasini⁴¹⁰, G. Tonelli^{40,78}, T. Tong⁴¹¹, F. Toral²⁷, T. Torims^{1,364}, L. Torino¹⁷³, K. Torokhtii²⁹, R. Torre¹⁴¹, E. Torrence⁴¹², R. Torres^{53,186}, Toshiyuki Mitsuhashi²¹², A. Tracogna¹⁵¹, O. Traver¹⁷³, D. Treille¹, A. Tricoli⁶, P. Trubacova¹, E. Tsemlis¹, G. Tsipolitis²⁷⁰, V. Tsulaia¹⁴², B. Tuchming³, C.G. Tully¹⁶⁵, I. Turk Cakir⁵⁸, C. Turrioni⁶⁴, J. Tynan¹⁰⁶, F.P. Ucci^{128,352}, S. Udongwo⁴¹³, C.S. Ün²⁷⁶, A. Unnervik¹, A. Upegui^{100,101}, J.P. Uribe-Ramírez²⁰⁵, J. Uythoven¹, R. Vaglio^{36,92}, F. Valchkova-Georgieva⁴¹⁴, P. Valente¹⁷², R.U. Valente¹⁷², A.-M. Valente-Feliciano³⁷¹, G. Valentino^{1,194}, C.A. Valerio-Lizarraga^{205,325}, S. Valette¹, J.W.F. Valle³²⁰, L. Valle¹, N. Valle¹²⁸, N. Vallis^{1,2,115}, G. Vallone¹⁴², P. van Gemmeren¹⁶⁰, W. Van Goethem¹, P. van Hees⁵⁹, U. van Rienen⁴¹³, L. van Riesen-Haupt^{1,115}, P. Van Trappen¹, M. Vande Voorde^{415,416}, A.L. Vanel¹, E.W. Varnes³⁶², J.-L. Vay¹⁴², F. Veit²⁸⁷, I. Veliscek⁶, R. Veness¹, A. Ventura^{161,233}, M. Verducci^{40,78}, C.B. Verhaaren⁴¹⁷, C. Vernier⁷, A.P. Verweij¹, J.-F. Vian⁴¹⁸, A. Vicini^{44,45}, N. Vignaroli^{161,233}, S. Vignetti¹⁵¹, M.C. Villeneuve²²⁰, I. Vivarelli^{25,26}, E. Voevodina^{1,132}, D.M. Vogt⁴¹⁹, B. Voirin⁴²⁰, S. Voiriot¹⁰⁶, J. Voiron¹⁴⁵, P. Vojtyla¹, V. Völkl¹, L. von Freeden¹, Z. Vostrel^{1,421}, N. Voumard¹, E. Vryonidou⁵², V. Vysotsky¹²⁰, R. Wallny¹⁵², L.-T. Wang⁴²², Y. Wang^{9,10,11}, R. Wanzenberg⁴, B.F.L. Ward⁴²³, N. Wardle¹⁸³, Z. Wa^{3,5108}, L. Watrelot¹, A.T. Watson⁴²⁴, M.F. Watson⁴²⁴, M.S. Weber⁹⁰, C.P. Welsch^{53,186}, M. Wendt^{1,6}, J. Wenninger¹, B. Weyer¹, G. White⁴²⁵, S. White³⁰⁸, B. Wicki¹, M. Wadorski¹, U.A. Wiedemann¹, A.R. Wiederhold⁵², A. Wiedl¹³³, H.-U. Wienands¹⁶⁰, A. Wieser¹⁵², C. Wiesner¹, H. Wilkens¹, D. Willi⁴²⁶, P.H. Williams^{53,427}, S.L. Williams³², A. Winter⁴²⁴, R.B. Wittwer⁷⁴, D. Wollmann¹, Y. Wu¹¹⁵, Z. Wu^{9,16,17}, J. Xiao^{9,56,57}, K. Xie³⁸⁸, S. Xie^{37,335}, M. Yalvac²², F. Yaman^{427,428}, W.-M. Yao¹⁴², M. Yeresko^{9,156,157}, A. Yilmaz¹⁹⁶, H.D. Yoo²⁷⁷, T. You²¹⁰, F. Yu^{253,387}, S.S. Yu⁸⁰, T.-T. Yu⁴¹², S. Yue¹, A. Zaborowska¹, M. Zahnd¹⁰⁶, C. Zamantzas¹, G. Zanderighi^{66,132}, C. Zannini¹, R. Zanzottera^{44,45}, P. Zaro¹⁰³, R. Zennaro², M. Zerlauth¹, H. Zhang²⁰⁴, J. Zhang¹⁶⁰, Y. Zhang²⁰⁴, Z. Zhang^{9,10,204}, Y. Zhao¹, Y.-M. Zhong⁴²⁹, B. Zhou³⁰⁵, D. Zhou²¹², J. Zhu³⁰⁵, G. Zick³⁷⁴, M.A. Zielinski¹, E. Zimmermann¹⁰⁶, A. Zingaretti^{69,166}, J. Zinn-Justin³, A.V. Zlobin³⁷, M. Zobov⁴⁸, F. Zomer^{9,10,11}, S. Zorzetti³⁷, X. Zuo¹³³, J. Zurita³²⁰, V.V. Zutshi³⁹⁴, M. Zykova².

1 Suisse - CERN, European Organization for Nuclear Research

2 Suisse - PSI, Paul Scherrer Institute

3 France - CEA/Irfu, Commissariat à l’Energie Atomique et aux Energies Alternatives, Institut de recherche sur les lois fondamentales de l’Univers

4 Allemagne - DESY, Deutsches Elektronen-Synchrotron

5 Allemagne - Humboldt-Universität zu Berlin

6 États Unis d'Amérique - BNL, Brookhaven National Laboratory

7 États Unis d'Amérique - SLAC National Accelerator Laboratory

8 Royaume Uni - University of Oxford

9 France - CNRS/IN2P3, Centre National de la Recherche Scientifique, Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules

- 10 France - IJCLab, Laboratoire de Physique des 2 Infinis Irène Joliot Curie
- 11 France - Université Paris-Saclay et Université Paris-Cité
- 12 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Bari
- 13 Italie - Università di Bari
- 14 Iran - IPM, Institute for Research in Fundamental Science
- 15 Iran - Malayer University
- 16 France - LAPP, Laboratoire d'Annecy de Physique des Particules
- 17 France - Université Savoie Mont Blanc
- 18 Serbie - University of Belgrade
- 19 Espagne - ICMAB/CISC, Institut de Ciència de Materials de Barcelona, Consejo Superior de Investigaciones Científicas
- 20 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Roma Tor Vergata
- 21 Italie - Università Roma Tor Vergata
- 22 Turquie - Yozgat Bozok Üniversitesi
- 23 États Unis d'Amérique - Texas Tech University
- 24 Turquie - TOBB ETU, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
- 25 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Bologna
- 26 Italie - Università di Bologna
- 27 Espagne - CIEMAT, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas
- 28 Arabie Saoudite - KACST, King Abdulaziz City for Science and Technology
- 29 Italie - Università Roma Tre
- 30 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Milano-Bicocca
- 31 Italie - Università di Milano-Bicocca
- 32 Royaume Uni - University of Cambridge
- 33 Turquie - İstanbul Üniversitesi
- 34 Turquie - Eskişehir Teknik Üniversitesi
- 35 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Napoli
- 36 Italie - Università di Napoli Federico II
- 37 États Unis d'Amérique - FNAL, Fermi National Accelerator Laboratory
- 38 Iran - University of Tehran
- 39 Iran- FUM, Ferdowsi University of Mashhad
- 40 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Pisa
- 41 États Unis d'Amérique - University of Texas Austin
- 42 France - IPHC, Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien
- 43 France - Université de Strasbourg

- 44 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Milano
- 45 Italie - Università di Milano
- 46 Suisse - PIBG, Pôle Invertébrés du Basin Genevois
- 47 Brésil - UFRN, Universidade Federal do Rio Grande do Norte
- 48 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Laboratori Nazionali di Frascati
- 49 Suisse - UNIBAS, University of Basel
- 50 Italie - Politecnico di Bari
- 51 Portugal - LIP, Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas
- 52 Royaume Uni - University of Manchester
- 53 Royaume Uni - CI, Cockcroft Institute
- 54 États Unis d'Amérique - Brandeis University
- 55 Arménie - A. Alikhanyan National Laboratory
- 56 France - IP2I, Institut de Physique des 2 Infinis de Lyon
- 57 France - Université Claude Bernard Lyon 1
- 58 Turquie - Ankara Üniversitesi
- 59 Suède - Lund University
- 60 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Torino
- 61 Émirats arabes unis - New York University Abu Dhabi
- 62 États Unis d'Amérique - Stony Brook University
- 63 Royaume Uni - Springer Nature
- 64 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Perugia
- 65 Italie - Università di Perugia
- 66 Allemagne - Technische Universität München
- 67 Turquie - Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi
- 68 Turquie - Düzce Üniversitesi
- 69 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Padova
- 70 République Populaire de Chine - Harbin Institute of Technology
- 71 États Unis d'Amérique - University of Wisconsin-Madison
- 72 Royaume Uni - RAL, Rutherford Appleton Laboratory, Science and Technology Facilities Council
- 73 Inde - IMSc, Institute of Mathematical Sciences, Chennai
- 74 Suisse - Universität Zürich
- 75 États Unis d'Amérique - University of New Mexico
- 76 France - CPPM, Centre de Physique des Particules de Marseille
- 77 France - Aix-Marseille Université

- 78 Italie - Università di Pisa
- 79 Hongrie - HUN-REN Wigner Research Centre for Physics
- 80 États Unis d'Amérique - Catholic University of America
- 81 États Unis d'Amérique - Duke University
- 82 France - LLR, Laboratoire Leprince-Ringuet
- 83 France - École Polytechnique, Institut Polytechnique de Paris
- 84 Canada - TRIUMF, Canada's National Laboratory for Particle and Nuclear Physics
- 85 Canada - Simon Fraser University
- 86 Italie - FEEM, Fondazione Ente Nazionale Idrocarburi (ENI) Enrico Mattei
- 87 France - BRGM, Bureau de Recherches Géologiques et Minières
- 88 Turquie - İsk Üniuersitesi
- 89 Turquie - Istanbul Teknik Üniuersitesi
- 90 Suisse - UNIBE, University of Bern
- 91 Italie - Università di Roma la Sapienza
- 92 Italie - CNR-SPIN, Consiglio Nazionale delle Ricerche
- 93 France - Expert naturaliste et entomologiste
- 94 États Unis d'Amérique - ORNL, Oak Ridge National Laboratory
- 95 Autriche - HEPHY, Institut für Hochenergiephysik
- 96 Suisse - Geos, Bureau d'ingénieurs conseils en géotechnique, génie civil, hydraulique et environnement
- 97 France - APC, Laboratoire AstroParticule et Cosmologie
- 98 France - Université Paris Cité
- 99 Autriche - TUWIEN, Technische Universität Wien
- 100 Suisse - HEPIA, Haute École du Paysage, d'Ingénierie et d'Architecture de Genève
- 101 Suisse - HES-SO University of Applied Sciences and Arts Western Suisse
- 102 Suisse - UNIGE, Université de Genève
- 103 France - SETEC ALS, Société d'ingénierie conseil en infrastructures de transport, génie civil et environnement
- 104 États Unis d'Amérique - East Texas A&M University
- 105 Suisse - Amberg Engineering Ltd
- 106 Suisse - ECOTEC Environnement SA, Bureau d'études et de conseil en environnement
- 107 États Unis d'Amérique - Southern Methodist University
- 108 Pologne - IFJ PAN, Institute of Nuclear Physics, Polish Academy of Sciences
- 109 France - Cerema, établissement public pour l'élaboration, le déploiement et l'évaluation de politiques publiques d'aménagement et de transport

- 110 Royaume Uni - Rendel Ltd, Engineering design consultancy firm
- 111 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Roma Tre
- 112 Turquie - Istanbul Beykent Üniversitesi
- 113 États Unis d'Amérique - University of Iowa
- 114 Inde - Indian Institute of Technology Kanpur
- 115 Suisse - EPFL, École Polytechnique Fédérale de Lausanne
- 116 Allemagne - Universität Hamburg, Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften
- 117 Belgique - VUB, Vrije Universiteit Brussel
- 118 France - LPNHE, Laboratoire de Physique Nucléaire et de Hautes Énergies
- 119 Italie - Scuola Superiore Meridionale
- 120 Affiliated with an institute formerly covered by a cooperation agreement with CERN
- 121 Canada - University of Saskatchewan and the Canadian Light Source
- 122 Royaume Uni - University of Bristol
- 123 États Unis d'Amérique - Northwestern University
- 124 États Unis d'Amérique - University of Florida
- 125 Canada - York University
- 126 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Cagliari
- 127 Italie - Università di Cagliari
- 128 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Pavia
- 129 Canada - Queen's University
- 130 Portugal - CFTP-IST, Centro de Física Teórica de Partículas, Instituto Superior Tecnico, Universidade de Lisboa
- 131 Suède - Uppsala University
- 132 Allemagne - MPP, Max-Planck-Institut für Physik Garching
- 133 Allemagne - KIT, Karlsruher Institut für Technologie
- 134 Ukraine - NSC KIPT, National Science Center Kharkiv Institute of Physics and Technology
- 135 Italie - Università degli Studi dell'Insubria
- 136 Allemagne - Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
- 137 Royaume Uni - JAI, John Adams Institute for Accelerator Science, University of Oxford
- 138 France - CNRS/INP, Centre National de la Recherche Scientifique, Institut de Physique
- 139 France - LPTHE, Laboratoire de Physique Théorique et Hautes Energies
- 140 France - Sorbonne Université
- 141 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Genova
- 142 États Unis d'Amérique - LBNL, Lawrence Berkeley National Laboratory

- 143 Italie - IIT, Istituto Italiano di Tecnologia
- 144 Turquie - Gümüşhane Üniversitesi
- 145 Suisse - WSP Ingénieurs Conseils SA
- 146 Mexique - UADY, Autonomous University of Yucatan
- 147 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Ferrara
- 148 Italie - Università di Ferrara
- 149 France - MARCELEON, Cabinet d'ingénierie juridique et foncière
- 150 Allemagne - Springer Nature
- 151 Italie - CSIL (Economic Research Institute)
- 152 Suisse - ETHZ, Swiss Federal Institute of Technology Zurich
- 153 Espagne - UAH, Universidad de Alcalá Madrid
- 154 France - CIA, Conseil Ingénierie Acoustique
- 155 France - Evinerude, Bureau d'études environnementales
- 156 France - LPCA, Laboratoire de Physique de Clermont Auvergne
- 157 France - Université Clermont Auvergne
- 158 Australie - ANSTO, Australien Synchrotron
- 159 Inde - Brahmananda Keshab Chandra College
- 160 États Unis d'Amérique - ANL, Argonne National Laboratory
- 161 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Lecce
- 162 Italie - Università di Palermo
- 163 Pologne - Wrocław University of Science and Technology
- 164 États Unis d'Amérique - Rutgers University
- 165 États Unis d'Amérique - Princeton University
- 166 Italie - Università di Padova
- 167 Turquie - IUE, İzmir Ekonomi Üniversitesi
- 168 Turquie - Ege Üniversitesi
- 169 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Gruppo Collegato di Udine
- 170 Italie - Università di Udine
- 171 États Unis d'Amérique - University of Massachusetts Amherst
- 172 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Roma
- 173 Espagne - CELLS/ALBA, Consortium for the Construction, Equipment and Exploitation of the Synchrotron Light Laboratory
- 174 France - LPSC, Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie
- 175 France - Université Grenoble Alpes
- 176 Italie - Università degli Studi di Napoli Parthenope

- 177 États Unis d'Amérique - National High Magnetic Field Laboratory
- 178 États Unis d'Amérique - Florida State University
- 179 Afrique du Sud - University of Johannesburg
- 180 Espagne - IGFAE, Instituto Galego de Fisica de Altas Enerxías, Universidade de Santiago de Compostela
- 181 Royaume Uni - LSE, London School of Economics
- 182 Espagne - Universidade de Santiago de Compostela
- 183 Royaume Uni - Imperial College London
- 184 États Unis d'Amérique - MIT, Massachusetts Institute of Technology
- 185 France - CETU, Centre d'Etude des Tunnels
- 186 Royaume Uni - University of Liverpool
- 187 Suisse - Linde Kryotechnik AG
- 188 Suisse - ILF Consulting Engineers
- 189 Danemark - NBI, Niels Bohr Institute
- 190 Japon - Hokkaido University
- 191 République Tchèque - CUNI, Charles University
- 192 Espagne - Universidad de Granada
- 193 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Firenze
- 194 Malte - University of Malta
- 195 États Unis d'Amérique - BU, Boston University
- 196 Turquie - IBU, Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi
- 197 Allemagne - Julius-Maximilians-Universität Würzburg
- 198 Australie - University of Adelaide
- 199 Finlande - HIP, Helsinki Institute of Physics, University of Helsinki
- 200 Belgique - ULB, Université Libre de Bruxelles
- 201 Allemagne - IMA, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart
- 202 Belgique - CP3, Centre de Cosmologie, de Physique des Particules et de Phénoménologie, Université Catholique de Louvain
- 203 Pays Bas - NIKHEF, Nationaal instituut voor subatomaire fysica
- 204 République Populaire de Chine - IHEP, Chinese Academy of Sciences
- 205 Mexique - UAS, Universidad Autónoma de Sinaloa
- 206 Autriche - BOKU, Universität für Bodenkultur Wien
- 207 États Unis d'Amérique - Purdue University
- 208 Inde - University of Delhi
- 209 France - Ginger BURGEAP, bureau d'études en environnement
- 210 Royaume Uni - King's College London
- 211 États Unis d'Amérique - University of Maryland

- 212 Japon - KEK, High Energy Accelerator Research Organization
- 213 Suisse - Geoenergy, Reservoir Geology and Basin Analysis Group
- 214 France - SETEC International, Société d'ingénierie en charge des transports et des infrastructures
- 215 Turquie - KÜ, Kırıkkale Üniversitesi
- 216 France - SETEC LERM, Société d'ingénierie conseil en matériaux de construction
- 217 Mexique - BUAP, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
- 218 États Unis d'Amérique - Stanford University
- 219 États Unis d'Amérique - University of Pittsburgh
- 220 Autriche - MUL, Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Subsurface Engineering, Geotechnik und unterirdisches Bauen
- 221 Autriche - MUL-ZaB, Underground Research Center, Zentrum am Berg
- 222 Espagne - IFAE, Institut de Física d'Altes Energies
- 223 Suisse - FHNW, University of Applied Sciences Northwestern Suisse
- 224 Inde - UPES, University of Petroleum and Energy Studies
- 225 France - GANIL, Grand Accélérateur National d'Ions Lourds
- 226 France - Université Caen Normandie
- 227 Brésil - UFRGS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul
- 228 Allemagne - Technische Universität Darmstadt
- 229 Pologne - University of Silesia in Katowice
- 230 Portugal - Universidade de Coimbra
- 231 Brésil - UFPel, Universidade Federal de Pelotas
- 232 États Unis d'Amérique - University of California Santa Cruz
- 233 Italie - Università del Salento
- 234 États Unis d'Amérique - Brown University
- 235 États Unis d'Amérique - University of California Berkeley
- 236 Italie - Università di Torino
- 237 États Unis d'Amérique - Johns Hopkins University
- 238 République Populaire de Chine - Fudan University
- 239 France - LAPTh, Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de Physique Théorique
- 240 République Populaire de Chine - Dongguan University of Technology
- 241 Turquie - Kahramanmaraş, Sütçü İmam Üniversitesi
- 242 Mexique - UNACH, Universidad Autónoma de Chiapas
- 243 Mexique - MCTP, Mesoamerican Centre for Theoretical Physics
- 244 Mexique - UAZ, Universidad Autónoma de Zacatecas

- 245 Finlande - University of Jyväskylä
- 246 Allemagne - Technische Universität Dortmund
- 247 Royaume Uni - Overleaf
- 248 États Unis d'Amérique - University of Virginia
- 249 États Unis d'Amérique - Cornell University
- 250 États Unis d'Amérique - FIT, Florida Institute of Technology
- 251 Suisse - Shirokuma GmbH
- 252 Pakistan - National Centre for Physics
- 253 Allemagne - Johannes Gutenberg Universität Mainz
- 254 Pakistan - PAEC, Pakistan Atomic Energy Commission
- 255 Inde - Mathabhanga College
- 256 Inde - Harish-Chandra Research Institute
- 257 Allemagne - MPIK, Max-Planck-Institut für Kernphysik Heidelberg
- 258 Suède - European Spallation Source ERIC
- 259 France - Centre de calcul de l'IN2P3
- 260 Allemagne - GSI, Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH
- 261 République de Corée - IBS, Institute for Basic Science, Center for Theoretical Physics of the Universe
- 262 Pologne - University of Warsaw
- 263 Slovénie - University of Ljubljana
- 264 Slovénie - Jozef Stefan Institute
- 265 France - Microhumus, Bureau d'étude et d'ingénierie spécialisé dans la gestion des sols dégradés
- 266 Allemagne - Fakultät für Physik und Astronomie, Universität Heidelberg
- 267 Turquie - Nigde Ömer Halisdemir Üniversitesi
- 268 Turquie - Giresun Üniversitesi
- 269 Hongrie - University of Miskolc
- 270 Grèce - NTUA, National Technical University of Athens
- 271 Suisse - Transmutex SA
- 272 Irlande - DIAS, Dublin Institute for Advanced Studies, School of Theoretical Physics
- 273 Pologne - AGH, University of Science and Technology
- 274 Iran - University of Science and Technology of Mazandaran
- 275 Royaume Uni - IPPP, Institute for Particle Physics Phenomenology, Durham University
- 276 Turquie - Bursa Uludağ Üniversitesi
- 277 République de Corée - YU, Yonsei University

278 Affiliated with an international laboratory covered by a cooperation agreement with CERN
279 France - CPT, Centre de Physique Théorique
280 France - Aix-Marseille Université et Université du Sud Toulon Var
281 République de Corée - KIAS, Korea Institute for Advanced Study
282 Canada - Carleton University
283 Grèce - FEAC Engineering P.C.
284 Grèce - UPATRAS, University of Patras
285 États Unis d'Amérique - University of Kansas
286 Grèce - AUTH, Aristotle University of Thessaloniki
287 Allemagne - IML, Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik
288 Allemagne - RWTH Aachen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
289 Suisse - ZHAW, Zurich University of Applied Sciences
290 Allemagne - Universität Münster
291 Afrique du Sud - University of the Witwatersrand
292 Autriche - Fachhochschule Technikum Wien
293 États Unis d'Amérique - University of California Irvine
294 États Unis d'Amérique - Northeastern University
295 France - ESI, European Scientific Institute
296 République de Corée - UOS, University of Seoul
297 République de Corée - KNU Kyungpook National University
298 République de Corée - KU, Korea University
299 Finlande - Tampere University
300 Royaume Uni - University of Edinburgh
301 Suisse - BG Ingénieurs Conseils
302 République Populaire de Chine - T.-D. Lee Institute
303 République Populaire de Chine - Shanghai Jiao Tong University
304 Italie - CNR, Consiglio Nazionale delle Ricerche
305 États Unis d'Amérique - University of Michigan
306 États Unis d'Amérique - University of Pennsylvania
307 États Unis d'Amérique - University of Minnesota
308 France - ESRF, European Synchrotron Radiation Facility
309 Royaume Uni - SUSSEX, University of Sussex
310 Italie - Università di Bari Aldo Moro
311 Royaume Uni - University of Bath

312 Italie - Scuola Normale Superiore di Pisa
 313 Brésil - Universidade de São Paulo
 314 Autriche - Universität Graz
 315 Egypte - Center for High Energy Physics, Fayoum University
 316 Egypte - Center of theoretical physics, British University in Egypte
 317 Egypte - Cairo University
 318 France - Sorbonne Université et Université Paris Cité
 319 Italie - Università di Genova
 320 Espagne - IFIC-CSIC/UV, Instituto de Física Corpuscular, Consejo Superior de Investigaciones Científicas/Universidad de Valencia
 321 Suisse - Service de géologie, sols et déchets du canton de Genève
 322 Estonie - NICPB, National Institute for Chemical Physics and Biophysics
 323 Estonie - UT, University of Tartu
 324 Espagne - Universidad de Salamanca
 325 Mexique - UGTO, Universidad de Guanajuato
 326 Suisse - Edaphos engineering
 327 Allemagne - Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf
 328 Inde - Tata Institute of Fundamental Research Mumbai
 329 Belgique - Universiteit Gent
 330 Italie - CNR-IOM, Consiglio Nazionale delle Ricerche
 331 Autriche - JKU, Johannes Kepler Universität Linz
 332 Norvège - University of Stavanger
 333 Colombie - Universidad Nacional de Colombia
 334 Italie - Trento Institute for Fundamental Physics and Applications
 335 États Unis d'Amérique - Caltech, California Institute of Technology
 336 Italie - Università della Calabria
 337 Espagne - IFT, Instituto de Física Teórica, Universidad Autónoma de Madrid
 338 Espagne - UPC, Universitat Politècnica de Catalunya
 339 Portugal - Departamento de Física, Universidade do Minho
 340 Portugal - Centro de Física das Universidades do Minho e do Porto
 341 Portugal - LaPMET, Laboratory of Physics for Materials and Emergent Technologies
 342 Norvège - University of Bergen
 343 Chili - SAPHIR, Instituto Milenio de Física Subatómica en la Frontera de Altas Energías
 344 Chili - Universidad Andres Bello
 345 Brésil - IIP, International Institute of Physics

346 Japon - Tokyo International University
347 Turquie - Izmir Bakırçay Üniversitesi
348 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Laboratori Nazionali del Gran Sasso
349 Italie - Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale
350 Serbie - Vinca Institute of Nuclear Sciences
351 États Unis d'Amérique - Kennesaw State University
352 Italie - Università di Pavia
353 États Unis d'Amérique - Columbia University
354 États Unis d'Amérique - DOE, Department of Energy of the États Unis d'Amérique of America
355 France - IPSA, Institut Polytechnique des Sciences Avancées
356 Italie - Università degli Studi del Sannio
357 Pologne - UJ, Université Jagellonne (Cracovie)
358 Autriche - Universität Wien
359 Allemagne - Goethe-Universität Frankfurt, Institut für Angewandte Physik
360 Allemagne - HFFH, Helmholtz Forschungsakademie Hessen für FAIR
361 Roumanie - INCDTIM, National Institute for Research and Development of Isotopic and Molecular Technologies
362 États Unis d'Amérique - University of Arizona
363 Allemagne - Technische Universität Dresden
364 Lettonie - RTU, Riga Technical University
365 Royaume Uni - Lancaster University
366 Chypre - University of Chypre
367 Chypre - Cosmos Open University
368 Brésil - CBPF, Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas
369 Allemagne - Universität Bonn
370 Thaïlande - CMU, Chiang Mai University
371 États Unis d'Amérique - JLAB, Thomas Jefferson National Accelerator Facility
372 Équateur - ESPOL, Escuela Superior Politécnica del Litoral
373 Croatie - IRB, Rudjer Boskovic Institute
374 France - Air Liquide Advanced Technologies
375 Pays Bas - VU Amsterdam
376 France - INGÉROP ,Groupe d'ingénierie et de conseil en mobilité durable, transition énergétique et cadre de vie
377 Pologne - Warsaw University of Technology
378 Espagne - IFCA, Instituto de Física de Cantabria
379 Allemagne - Institut für Beschleunigerphysik und Technologie

380 Turquie - Uşak Üniversitesi
381 Japon - ICEPP, International Center for Elementary Particle Physics, University of Tokyo
382 Royaume Uni - Rudolf Peierls Centre for Theoretical Physics, University of Oxford
383 Royaume Uni - All Souls College, University of Oxford
384 Turquie - Akdeniz Üniversitesi
385 Suisse - Latitude Durable SARL
386 Espagne - USAL, Universidad de Salamanca
387 Allemagne - PRISMA+ Cluster of Excellence
388 États Unis d'Amérique - Michigan State University
389 Espagne - Universidad Complutense Madrid
390 Suisse - scMetrology SARL
391 Portugal - IST, Instituto Superior Tecnico, Universidade de Lisboa
392 Portugal - CeFEMA, Center of Physics and Engineering of Advanced Materials
393 Inde - Indian Institute of Science Education and Research Mohali
394 États Unis d'Amérique - NIU, Northern Illinois University
395 Inde - Banaras Hindu University
396 Slovaquie - Comenius University
397 Australie - Monash University
398 Slovaquie - Slovak Academy of Sciences
399 République de Corée - KAIST, Korea Advanced Institute of Science and Technology
400 France - Amberg Engineering Chambéry
401 Émirats arabes unis - Khalifa University of Science and Technology
402 États Unis d'Amérique - University of Tennessee
403 Autriche - WIFO, Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung
404 Brésil - Universidade do Estado do Rio de Janeiro
405 France - Mélica, NATURA SCOP, Études et expertises environnementales
406 Italie - Università LUM, Casamassima
407 Pays Bas - University of Twente
408 Iran - Arak University
409 Italie - Università di Trieste
410 France - ForestAllia, Cabinet de gestion et d'expertise forestières
411 Allemagne - Universität Siegen
412 États Unis d'Amérique - University of Oregon
413 Allemagne - Universität Rostock
414 Suisse - CEGELEC SA

415 Suède - KTH, Royal Institute of Technology, Stockholm
 416 Suède - OKC, Oskar Klein Centre for Cosmoparticle Physics
 417 États Unis d'Amérique - Brigham Young University
 418 France - Expert foncier et agricole
 419 Allemagne - ITSM, Institut für Thermische Strömungsmaschinen und
 Maschinenlaboratorium, Universität Stuttgart
 420 France - École Normale Supérieure de Lyon
 421 République Tchèque - CTU, Czech Technical University
 422 États Unis d'Amérique - University of Chicago
 423 États Unis d'Amérique - Baylor University
 424 Royaume Uni - University of Birmingham
 425 Royaume Uni - University of Southampton
 426 Suisse - Swisstopo, Federal Office of Topography
 427 Royaume Uni - Daresbury Laboratory, Science and Technology Facilities Council
 428 Turquie - IZTECH, Izmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü
 429 Hong Kong - City University of Hong Kong
 † décédé(e)

Résumé

Le Volume 3 du rapport de faisabilité du FCC présente des études relatives au génie civil, à l'élaboration d'un scénario d'implantation du projet, ainsi qu'aux aspects environnementaux et de durabilité. Le rapport détaille les améliorations itératives apportées aux concepts de génie civil depuis 2018, en tenant compte des conditions du sous-sol, des exigences en matière d'accélérateurs et d'expériences, ainsi que de considérations de nature territoriale. Il décrit une configuration de génie civil techniquement réalisable et économiquement viable qui sert de base aux études de sous-sol détaillées, à la conception de la construction, à l'estimation des coûts et à la planification de la mise en œuvre du projet. En outre, le rapport met en évidence les études de sous-sol en cours dans des zones clés afin de soutenir le développement d'un modèle souterrain 3D amélioré pour la région.

Le rapport décrit le développement du scénario de projet basé sur l'approche d'optimisation itérative « Éviter-Réduire-Compenser ». Le scénario de référence établit un équilibre entre les performances physiques optimales et la compatibilité territoriale, les risques de mise en œuvre et les coûts. Des études environnementales sur le terrain couvrant près de 600 hectares et portant sur de nombreux aspects urbains, économiques, sociaux et techniques ont confirmé la faisabilité technique du projet et ont contribué à la préparation des documents d'entrée essentiels pour la phase d'autorisation officielle du projet. Le résumé souligne également l'ouverture d'un dialogue public dans le cadre de la procédure d'autorisation. Les résultats d'une évaluation complète de l'impact socio-économique, qui comprend aussi les effets environnementaux significatifs, sont présentés. Même dans les conditions les plus prudentes et les plus strictes, on obtient un ratio coûts-bénéfices positif pour la phase FCC-ee. Enfin, le rapport donne un bref résumé des études menées pour documenter l'état actuel de l'environnement.

Préface de la Directrice générale du CERN

En 2021, en réponse à la mise à jour 2020 de la stratégie européenne pour la physique des particules, le Conseil du CERN a lancé l'étude de faisabilité du futur collisionneur circulaire (FCC).

Le présent rapport résume l'immense travail effectué par la collaboration internationale pour le FCC pendant plusieurs années. Il couvre, entre autres, les objectifs et le potentiel de la physique, la géologie, le génie civil, l'infrastructure technique, l'implantation territoriale, les aspects environnementaux, les besoins en R&D pour les accélérateurs et les détecteurs, les bénéfices socio-économiques et le coût. Il constitue une contribution importante à la mise à jour en cours de la stratégie européenne pour la physique des particules.

L'étude de faisabilité a nécessité la participation active d'un large éventail de parties prenantes. En particulier, tout au long de l'étude, le CERN a été accompagné par ses deux États hôtes, la France et la Suisse et a travaillé avec des entités aux niveaux local, régional et national. Je suis très reconnaissante aux autorités et aux équipes des États hôtes pour leur aide précieuse. En outre, des parties importantes de l'étude ont été soutenues par l'Union européenne dans le cadre des programmes-cadres Horizon 2020 et Horizon Europe. L'étude a également bénéficié des contributions de laboratoires d'accélérateurs et d'universités de toute l'Europe, comme l'initiative CHART (Swiss Accelerator Research and Technology), ainsi que des Amériques, de l'Asie, de l'Afrique et de l'Australie.

Le programme FCC intégré proposé comprend deux étapes possibles : un collisionneur électron-positron servant à la production de bosons de Higgs, d'interactions électrofaibles et de quarks top fonctionnant à différents niveaux d'énergie au centre de masse, suivi ultérieurement par un collisionneur proton-proton fonctionnant à un niveau d'énergie de collision sans précédent d'environ 100 TeV. Les programmes de physique complémentaires de chaque étape correspondent aux priorités dans le domaine de la physique, telles qu'elles sont exprimées dans la mise à jour 2020 de la stratégie européenne pour la physique des particules.

L'une des principales réalisations de l'étude de faisabilité est le choix de l'emplacement de l'anneau du collisionneur et de l'ensemble de l'infrastructure, y compris les sites de surface et les puits d'accès, qui a été développé et optimisé pendant plusieurs années selon le principe « éviter, réduire, compenser ». Des études de durabilité ont évalué l'efficacité énergétique, l'utilisation des sols, la gestion de l'eau et des ressources, ainsi que l'impact socio-économique, garantissant que le FCC soit conçu conformément aux normes environnementales et sociétales les plus actuelles.

Je tiens à remercier toutes celles et tous ceux qui ont contribué à ce rapport pour leur travail acharné et leur engagement, qui ont permis d'obtenir les résultats exceptionnels présentés ici.

Fabiola Gianotti CERN,

Directrice générale

Préface du Président du conseil de collaboration FCC

S'appuyant sur la précédente étude de conception du futur collisionneur circulaire (FCC) menée entre 2014 et 2018, l'étude de faisabilité du FCC (2021-2025) a été réalisée grâce à une solide collaboration internationale, qui comprend désormais plus de 160 instituts dans le monde entier. Le « programme intégré » du FCC, développé dans le cadre de l'étude de faisabilité, consiste en un premier collisionneur électrons-positrons, le FCC-ee, qui pourra être suivi d'un collisionneur protons-protons, le FCC-hh. Cet échelonnement dans le temps tient compte des priorités dans le domaine de la physique, telles que formulées dans les mises à jour de la stratégie européenne pour la physique des particules de 2012 et 2020, ainsi que de l'état de préparation technologique et des coûts relatifs des FCC-ee et FCC-hh.

Au fil des ans, j'ai suivi de près l'avancement régulier de l'étude, en représentant la collaboration FCC au sein du Comité directeur international et en participant aux réunions annuelles de la Semaine FCC, qui comprennent les sessions du Comité de collaboration internationale. L'engagement et l'enthousiasme des membres de la collaboration ont toujours été impressionnants. L'effort collectif est clairement visible. La participation des étudiants et des chercheurs en début de carrière est en augmentation. Il existe vraiment une détermination commune et un élan pour aller de l'avant.

La forte collaboration internationale autour du FCC et son réseau mondial constituent une base solide pour l'avenir de ce projet. La communauté FCC ne cesse de s'agrandir, avec l'engagement croissant de nouveaux instituts et partenaires dans le monde entier. Ce large soutien sera essentiel lorsque le projet entrera dans sa prochaine phase.

L'étude de faisabilité du FCC démontre non seulement la viabilité technique du projet, mais aussi la force de la communauté internationale qui le soutient. Alors que nous passons à l'étape suivante de la phase de prise de décision, cet effort collectif est essentiel pour montrer la voie à suivre. Le FCC promet des opportunités scientifiques de grande envergure et des avantages à long terme pour l'innovation, la formation et la collaboration mondiale dans le domaine de la science et de la technologie.

Philippe Chomaz CEA,

Président du comité de collaboration internationale FCC

Table des matières

3. Environnement.....	27
3.1. Contexte	27
3.2. Aspects environnementaux.....	29
3.2.1. Méthodologie	29
3.2.2. Champ d'application.....	31
3.2.3. Situation et conclusions	32
3.2.4. Stratégie environnementale.....	36
3.2.5. Consommation d'énergie	43
3.2.6. Utilisation de la chaleur résiduelle	48
3.2.7. Empreinte carbone liée à la construction	56
3.2.8. Empreinte carbone liée à l'exploitation	61
3.2.9. Utilisation de l'eau et économies d'eau	65
3.2.10. Trafic routier induit	69
3.2.11. Surveillance de l'environnement.....	71
3.3. État actuel de l'environnement	72
3.3.1. Méthodologie.....	72
3.3.2. Air et climat	72
3.3.3. Eau.....	77
3.3.4. Eaux souterraines.....	80
3.3.5. Biodiversité.....	87
3.3.6. Fonctionnalité écologique.....	114
3.3.7. Urbanisme	116
3.3.8. Mobilité	117
3.3.9. Activités humaines	122
3.3.10. Patrimoine	130
3.3.11. Paysage.....	132
3.3.12. Bruit.....	134
3.3.13. Vibrations	137
3.3.14. Lumière	138
3.3.15. Rayonnement	139
3.3.16. Risques techniques.....	143
3.3.17. Autres projets.....	147
3.4. Conclusion	154

3. Environnement

3.1. Contexte

L'étude de faisabilité internationale et collaborative du FCC a servi de base aux procédures d'autorisation environnementale ultérieures du projet dans les deux États hôtes, en vue d'obtenir la délivrance d'un permis unique pour le projet dans chaque pays. Le terme projet, conformément aux cadres réglementaires nationaux et internationaux applicables, fait référence à toute intervention dans l'espace naturel, y compris le sol. Il repose sur trois éléments essentiels :

1. une intention de construire communiquée aux collectivités ;
2. Une définition sourcée de la portée du projet, comprenant les projets indirects et les projets connexes générés.
3. une documentation sur les limites et les interfaces du projet.

Le terme projet s'entend au sens large. Il englobe tous les éléments nécessaires à la construction et à l'exploitation de l'infrastructure de recherche basée sur le collisionneur de particules. Il comprend donc, (1) l'infrastructure de recherche et (2) tous les développements et éléments territoriaux en France et en Suisse nécessaires à la construction et à l'exploitation de l'infrastructure de recherche.

L'infrastructure de recherche est composée de structures souterraines et de surface, de toute l'infrastructure technique, des accélérateurs de particules et des détecteurs d'expérience. Les éléments de développement territorial comprennent, entre autres : l'approvisionnement en eau brute et en eau potable ; le traitement des eaux et des eaux usées non publiques, l'alimentation en basse, moyenne et haute tension ; les routes d'accès ; les éventuels accès autoroutiers et ferroviaires ; les installations de traitement et de gestion des déchets, le stockage des matériaux d'excavation ; les sites de dépôt final et de réutilisation, les sites de compensation.

Des projets d'annexe territoriale devront être envisagés et élaborés en collaboration avec les États hôtes. Ces projets peuvent, par exemple, comprendre notamment les services suivants : services d'urgence et de sécurité ; logements temporaires liés à la phase de construction ; renforcement des installations éducatives pour les travailleurs et les participants au projet (par exemple, les écoles) ; services de santé pour les travailleurs et les participants au projet ; réseaux de chauffage urbain visant à fournir de la chaleur résiduelle aux consommateurs ; prises d'eau partagées avec des clients publics ; réseau géodésique régional. Par conséquent, le projet est divisé en segments qui pourraient ultérieurement être portés par différentes organisations et impliquer plusieurs acteurs exerçant des responsabilités distinctes. La définition du champ d'application, des limites et des interfaces sera donc d'une importance capitale pour la phase préparatoire de la construction. La présente étude est limitée à l'identification des segments de projet les plus pertinents et au lancement du processus d'inventaire de leurs exigences et de leurs caractéristiques clés.

Le terme environnement désigne tous les éléments qui entourent le projet (Fig. 3.1). D'après la directive 2011/92/EU du Parlement européen et du Conseil et les articles L.122-1 et R.1222 du code de l'environnement français, ainsi que la section 3.2.1 de la norme européenne EN 14001, l'environnement s'entend au sens le plus large. En particulier, l'article L110-1 du Code de l'environnement porte sur des aspects tels que le contexte spatial, les ressources naturelles, les habitats, les sons et odeurs, les sites, les paysages, la qualité de l'air, la qualité de l'eau, les êtres vivants, la biodiversité, les sols, la géodiversité (les caractéristiques du sous-sol), la faune, la flore, le climat, la cohésion sociale, l'économie et l'épanouissement des êtres humains. En Suisse, le Manuel de l'étude de l'impact sur l'environnement (Manuel EIE) fournit des orientations aux études d'impact sur l'environnement en vertu de l'Ordonnance relative à l'étude de l'impact sur l'environnement (OEIE) découlant de la Loi sur la protection de l'environnement (LPE) au niveau fédéral. Ce manuel traite des aspects suivants : climat, sites, monuments historiques, archéologie, dangers naturels, aménagement du territoire, air, bruit, vibrations, énergie, rayonnements non ionisants et ionisants, eaux souterraines, eaux de surface, écosystèmes fluviaux, gestion des eaux, sol, sites pollués, déchets, substances dangereuses, organismes dangereux, prévention des accidents majeurs, forêts, flore, faune, biotopes, paysage, pollution lumineuse, chemins pour piétons et randonnées, effets transfrontaliers, ainsi que les prescriptions cantonales de protection de l'environnement, pour autant qu'elles n'entravent pas la mise en œuvre de manière disproportionnée.

Conformément à l'exigence consistant à identifier et à comprendre les interactions directes et indirectes entre les segments et les défis potentiels qui en découlent, il convient d'examiner un certain nombre de sujets. Il s'agit par exemple, mais pas exclusivement, de la géologie, de l'hydrogéologie, de l'urbanisme, de la santé et de la sécurité des personnes, du bien-être de toutes les espèces vivantes concernées, de la circulation et de la mobilité, des services et des infrastructures, du patrimoine naturel et culturel, des biens échangés, tels que les déchets de tous types, des synergies et des conflits avec d'autres projets planifiés, des biens matériels, tels que les objets physiques appartenant à des propriétaires privés ou publics, des risques techniques, et bien d'autres sujets.

Enviro/Environment-Figs/Environment.png

Fig. 3.1 : Le terme « environnement » désigne tous les éléments qui entourent un projet et leurs interactions avec le projet et entre eux. Il s'entend au sens le plus large.

Un aspect environnemental fait référence à tout élément ou processus du projet qui interagit avec l'environnement. L'identification et la hiérarchisation de ces aspects est une condition préalable à toute étude de l'impact sur l'environnement. Plusieurs de ces aspects peuvent être identifiés et quantifiés à un stade précoce, bien qu'ils dépendent finalement des exigences et des choix de conception. La difficulté des projets de collisionneurs de particules à grande échelle réside dans leur processus de conception itératif, qui s'étend sur plusieurs dizaines d'années. Si les structures souterraines et les travaux de construction doivent être planifiés en premier, les infrastructures techniques dépendent des accélérateurs et des expériences. Quant aux structures de surface, elles sont finalisées à un stade ultérieur afin d'incorporer des techniques avancées et de refléter l'intégration paysagère par les parties prenantes. Ce processus évolutif, guidé par un cycle « planifier-faire-agir-vérifier », pose problème pour produire des études d'impact en temps utile dans le cadre de projets à long terme ayant des implications territoriales.

Un impact sur l'environnement désigne toute modification de l'environnement du projet résultant d'un aspect environnemental identifié et pertinent. Il découle de l'interaction entre la sensibilité environnementale d'un lieu donné (questions et défis environnementaux) et les effets potentiels d'un aspect environnemental relatif à un élément du projet (Fig. 3.2). Les impacts ne peuvent donc être analysés et évalués que pour un scénario de projet spécifique et localisé. L'analyse d'impact exige en outre une certaine stabilité des conceptions et un niveau de détail suffisant. Dans la pratique, l'analyse d'impact repose sur les éléments suivants :

1. un scénario de projet spécifique (description, localisation, portée, limites, interfaces) ;
2. des plans de construction spécifiques ;
3. des conceptions spécifiques pour les infrastructures techniques, la machine et les éléments d'expérience ;
 4. une description générale des processus de construction ;
 5. des concepts opérationnels détaillés ;
 6. les procédures prescrites pour l'exploitation, y compris la gestion des défaillances et des accidents ;
 7. une analyse de l'état actuel (initial) de l'environnement du projet (sur au moins quatre saisons) ;
 8. à la suite de l'analyse de l'état initial, les questions et les défis prioritaires des lieux dans lesquels le projet s'implantera ;
 9. une description des biens, produits et ressources (et leur origine) utilisés à toutes les phases du projet, par exemple un scénario relatif à l'approvisionnement et au transport.
10. des concepts de gestion pertinents pour tous les déchets à toutes les phases du projet.

Enviro/Environment-Figs/environmental_aspects_effects_impacts.pdf

Fig. 3.2 : Les impacts sur l'environnement sont la conséquence de la sensibilité environnementale d'un emplacement donné (enjeux et défis) et des effets potentiels des aspects environnementaux d'un projet à cet emplacement

Une étude d'impact sur l'environnement est nécessaire pour évaluer la compatibilité environnementale du projet. Elle fait partie du processus d'autorisation environnementale propre à chaque État hôte. Elle consiste à analyser et évaluer les effets environnementaux pertinents liés aux aspects du projet, en les recoupant avec les défis environnementaux (également appelés « enjeux ») qui ont été identifiés et consignés aux emplacements concernés par le projet, dans le cadre de l'analyse de l'état initial. Ce processus obligatoire sur le plan juridique consiste à vérifier que le projet est conforme aux réglementations. Il prévoit une amélioration itérative du scénario de projet reposant sur l'approche « éviter-réduire-compenser », qui a déjà été adoptée et mise en œuvre lors de l'élaboration du scénario de configuration et d'emplacement. La participation du public constitue un élément clé de ce processus, en vertu de la Convention d'Aarhus [57], convention des Nations unies ratifiée par la France en 2002 et par la Suisse en 2014, visant à garantir l'accès à l'information, la participation du public au processus décisionnel et l'accès à la justice en matière d'environnement. En outre, la Convention Espoo [58], adoptée par la France en 2001 et par la Suisse en 1996, réglemente les exigences en matière d'évaluation des impacts sur l'environnement dans un contexte transfrontalier et s'applique également à ce projet. Étant donné que le projet ne peut pas être subdivisé et que les demandeurs d'autorisation environnementale ne peuvent pas être considérés séparément, un seul projet unifié sera présenté dans les deux États hôtes au cours de la procédure d'autorisation.

3.2. Aspects environnementaux

3.2.1. Méthodologie

L'identification et l'inventaire des aspects environnementaux, c'est-à-dire de tout élément du projet susceptible d'interagir avec l'environnement, est une condition préalable à la possibilité de planifier l'évaluation des impacts sur l'environnement au cours d'une phase préparatoire ultérieure du projet. Ce travail a pu commencer du fait de la disponibilité des concepts techniques en 2024 ; il se poursuivra après la fin de l'étude de

faisabilité. Il permet d'établir une base de référence des effets potentiels sur l'environnement, dans l'hypothèse de choix techniques correspondant à l'état actuel de la technique, c'est-à-dire sans optimisation et sans prévoir d'évolutions et d'améliorations techniques allant au-delà de ce que les partenaires industriels pensent pouvoir fournir aujourd'hui.

L'identification des aspects environnementaux et l'évaluation des effets potentiels sur l'environnement sont effectuées de manière systématique, à l'aide de fiches de description de systèmes gérées en fonction de la configuration. Ces fiches sont élaborées conjointement par les ingénieurs en environnement et les ingénieurs sous-systèmes pour tous les éléments du projet.

Ne relèvent toutefois pas de cette approche les infrastructures techniques situées en dehors des limites des sites FCC (routes d'accès, accès aux autoroutes, accès ferroviaires potentiels, réseau électrique public, réseaux d'eau et d'eaux usées, etc.). Ces éléments sont traités dans des études d'impact environnemental distinctes et spécifiques.

Les informations rassemblées et compilées systématiquement dans un rapport sur les aspects environnementaux [59] servent les objectifs suivants :

- Identifier des entreprises capables de réaliser des études d'impact sur l'environnement ;
- Informer les organismes notifiés de l'État hôte en matière d'environnement de la portée, du contenu et des interfaces du projet afin d'encourager une implication efficace ;
- Informer le public sur les éléments remarquables du projet et leurs éléments pertinents du point de vue de l'environnement ;
- Fournir une base de référence aux ingénieurs du projet pour la mise en œuvre de l'approche d'écoconception ;
- Orienter l'évaluation de l'impact sur l'environnement.

Par conséquent, toutes les informations recueillies sont documentées en français, dans un langage qui permette au grand public de comprendre le projet, l'équipement technique du projet et les effets potentiels sur l'environnement liés à ces éléments.

En fonction des effets potentiels sur l'environnement, la documentation concerne différents segments de projet au niveau du système ou du sous-système. Quelle que soit la granularité de l'élément concerné, sont recueillies et documentées les informations suivantes :

- Le nom du système ou du sous-système ;
- Le niveau de maturité des spécifications et des conceptions ;
- Les liens avec d'autres systèmes, tels qu'un accélérateur de particules, une infrastructure technique ou une expérience ;
- Une brève description non technique (environ 80 mots ou un paragraphe) du système (nature et but) ; Quel est le rôle du système et pourquoi existe-t-il ;
- Une description fonctionnelle succincte (une page maximum) du système : quelles fonctions le système met-il en œuvre, comment est-il composé et comment atteint-il son objectif ;
- Les capacités et les performances du système, y compris les informations suivantes : capacités dans les différents modes de fonctionnement, avec une description, nombre d'unités déployées, besoins en énergie, besoins en ressources et en matières premières, possibilité et manière de transformer l'énergie, types et quantités d'émissions, avec une estimation de la pertinence environnementale (y compris une description de la production de déchets liés au système), pertes et inefficacités connues dans la fourniture de la fonction prévue, besoins d'espace connus. Pour toutes les capacités et les caractéristiques de performance du système, une indication du niveau de confiance et de la stabilité des informations est fournie.
- Les lieux où le système est déployé.

Cette description est complétée par un résumé structuré des aspects environnementaux notables et de leurs

effets sur l'environnement, en fonctionnement normal, en fonctionnement dégradé ou en cas d'accident. Sont examinés les aspects suivants :

- les rejets dans l'eau, le sol, le sous-sol et l'air (y compris les odeurs) ;
- la production de déchets conventionnels et radioactifs ;
- L'utilisation d'électricité et d'autres sources d'énergie ;

La consommation de matières premières ;

- la consommation de ressources naturelles : eau, terres, habitats naturels, habitats aquatiques, zones protégées, sous-sols protégés, surfaces agricoles, surfaces agricoles protégées et autres ;
- l'utilisation de consommables (par exemple, des produits chimiques) ;
- les émissions d'énergie, telles que les rayonnements non ionisants et ionisants, le bruit, les vibrations, la chaleur, la lumière ou d'autres formes d'énergie ;
- les effets sur l'environnement humain, les biens matériels et le patrimoine, notamment : la circulation et les voies de transport, le paysage, la visibilité et co-visibilité, la santé, l'augmentation des risques technologiques, l'agriculture et la sylviculture, les espaces construits, les infrastructures techniques, le développement démographique, le développement territorial, l'urbanisme, le tourisme et les loisirs.

Les aspects sont présentés par phase de projet (construction, installation, exploitation, maintenance/réparation, mise hors service). Pour chaque aspect sont indiqués la probabilité d'occurrence et l'effet potentiel associé, sa pertinence, afin de pouvoir établir une hiérarchie des aspects environnementaux, ainsi que le niveau de confiance relatif à cet élément d'information.

Les descriptions sont complétées par des diagrammes fonctionnels et des schémas de haut niveau, ainsi que par des références à des informations complémentaires visant à étayer la source et à permettre aux personnes souhaitant approfondir la question d'obtenir des informations supplémentaires.

3.2.2. *Champ d'application*

L'approche méthodologique systématique, qui a pour objectif d'établir un premier inventaire des aspects environnementaux de l'ensemble du projet, englobe une grande variété d'éléments, afin d'être aussi exhaustif que possible, compte tenu de la contrainte que représente, à ce stade préliminaire, l'état d'avancement encore faible des spécifications et des conceptions.

L'inventaire et le rapport abordent les thèmes suivants :

1. Injecteur de leptons : sources, production de positons, accélérateur linéaire et lignes de transfert vers le booster.
2. Collisionneur de leptons : le collisionneur en tant qu'entité entière et indivisible, les circuits d'aimants, l'alimentation des aimants, le système de vide, le système radiofréquence, les systèmes de transfert de faisceaux, l'équipement d'interception des faisceaux. Les systèmes et l'équipement étudiés sont également applicables aux aspects environnementaux liés au fonctionnement du booster.
3. Réseau et installations géodésiques.
4. Réseaux de communication de données dans l'ensemble du périmètre du projet, y compris les équipements de communication liés à la sécurité.
5. Expériences : le programme de recherche et sa durée jusqu'à la fin du siècle, un détecteur générique et une hypothèse de travail pour ses sous-détecteurs, les systèmes d'infrastructure technique nécessaires au fonctionnement du détecteur, l'infrastructure d'acquisition de données et de calcul en ligne.

6. Infrastructures techniques : systèmes de ventilation, production d'air comprimé, raccordements au réseau électrique national français à haute capacité pour l'exploitation, réseaux locaux de distribution d'électricité principalement destinés à la construction, systèmes de stockage d'énergie à court terme visant à assurer la stabilité de l'alimentation électrique, alimentation électrique de secours, réseaux généraux de communication, système de réfrigération cryogénique, stockage de cryogène, alimentation en eau potable, alimentation en eau brute, systèmes de refroidissement de l'eau, production d'eau déminéralisée, production d'eau glacée, gestion de l'eau des tours de refroidissement, récupération et évacuation des eaux souterraines, gestion des eaux usées, gestion des eaux claires (y compris les eaux de pluie) et systèmes de sécurité du personnel.
7. Collisionneur d'hadrons : programme de recherche, injecteurs, collisionneur, expériences et infrastructures techniques de haut niveau, s'appuyant sur les technologies actuelles.
8. Structures souterraines, en particulier leur construction : puits, tunnels de ligne de transfert, cavernes, accès, ascenseurs, systèmes de transport souterrains.
9. Sites de surface, en particulier leur construction : Sites de surface, en particulier leur construction : emplacement et fonctions de chaque site (PA, PB, PD, PF, PG, PH, PJ et PL), réutilisation, à un niveau élevé, du point 8 du LHC pour le site PA et les sites de Prévessin et de Meyrin.
10. Aménagement du territoire en France : alimentation électrique destinée à la construction, alimentation électrique destinée à l'exploitation, eau potable, réseau d'assainissement, traitement des eaux usées, options pour l'approvisionnement supplémentaire en eau de refroidissement, routes d'accès, accès aux autoroutes, options pour les accès ferroviaires, services d'urgence, besoins liés aux réseaux de communication, besoins liés à la gestion des déblais, exigences liées à l'approvisionnement en chaleur résiduelle, besoins liés au transport local pour les phases de construction, d'installation et d'exploitation.
11. Aménagement du territoire en Suisse : alimentation électrique destinée à la construction, alimentation électrique destinée à l'exploitation, eau potable, réseau d'assainissement, traitement des eaux usées, approvisionnement en eau brute pour le refroidissement, accès au site, options pour l'accès ferroviaire, services d'urgence, besoins liés aux réseaux de communication, besoins liés à la gestion des déblais, exigences liées à l'approvisionnement en chaleur résiduelle, besoins liés au transport local pour les phases de construction, d'installation et d'exploitation.
12. Phase de construction : description spécifique des aspects environnementaux liés aux activités de construction souterraine et au développement des sites de surface, calendrier provisoire, descriptions des sites de construction, préparation des sites avant le début de la construction, gestion des sites de construction, gestion du personnel participant à la construction, fourniture des matériaux de construction, ressources nécessaires à la construction, processus de construction des puits et des cavernes, processus de construction des tunnels, approche de la construction de la structure civile des sites de surface, principes de gestion des matériaux d'excavation, remise en état des sites après la construction.
13. Phase d'installation : installation des infrastructures techniques, des accélérateurs de particules et des détecteurs, fourniture des cryogènes, mise en service des infrastructures techniques, des détecteurs et des accélérateurs.

3.2.3. Situation et conclusions

Le rapport complet sur les aspects environnementaux [59] est en cours d'élaboration. Il s'agit d'un travail itératif qui progresse avec l'inventaire des spécifications et des technologies appropriées destinées à servir de référence et des perspectives réalistes concernant les technologies et les approches futures.

La phase de construction relevant du génie civil (ouvrages souterrains et sites de surface), les systèmes d'infrastructure technique et les systèmes du collisionneur de leptons sont décrits en fonction de la base de

référence actuelle, avec le niveau de confiance et de détail préliminaire correspondant. Cette analyse préliminaire évoluera au fur et à mesure que des plans de construction plus détaillés seront disponibles.

Les besoins en matériaux et en ressources, qui constituent la base de l'analyse itérative des aspects environnementaux, doivent être considérés comme approximatifs et liés à certaines incertitudes. En particulier, seule une description de haut niveau d'un détecteur d'expérience générique est disponible aujourd'hui comme base de référence pour les études ultérieures. Cette description est basée sur les technologies de pointe disponibles pour les détecteurs, les infrastructures techniques types des détecteurs ainsi que l'acquisition et le traitement des données. La phase de conception ultérieure devra comprendre au minimum des descriptions individuelles de quatre détecteurs d'expérience spécifiques, avec des hypothèses de conception technique plus tangibles basées sur des perspectives technologiques raisonnables pour les années à venir.

Pour réaliser une évaluation des incidences sur l'environnement, il est nécessaire de disposer de plans détaillés. Si les conceptions techniques des accélérateurs de particules, des détecteurs d'expérience et des infrastructures techniques nécessaires ne sont pas disponibles, des engagements volontaires sur les caractéristiques de performance devront être établis.

Une étude préliminaire est actuellement menée sur l'injecteur de leptons et ses systèmes, ainsi que sur la phase d'installation (y compris la mise en service). La description de ces éléments n'est donc pas prise en compte à ce stade. Les aménagements du territoire en France et en Suisse n'ont pas encore été définis avec précision.

Toutefois, les besoins minimaux sont connus et ont été inclus. Il convient de noter que certains ajustements concernant l'emplacement des sites peuvent encore être nécessaires, en fonction des avancées du dialogue avec les parties prenantes implantées à proximité desdits sites.

À ce stade, les principaux aspects environnementaux relevés dans le présent chapitre sont liés aux activités de construction : l'aménagement du territoire sur une surface d'environ 50 hectares répartis entre huit nouveaux sites de surface, la production de 6 millions de m³ (in situ) de matériaux d'excavation et les nuisances liées à toute activité de construction (bruit, vibrations, poussière, pollution due à la lumière artificielle, surcroît de trafic, etc.).

Par conséquent, l'étude a prévu une analyse du cycle de vie des activités de construction afin de mieux comprendre les autres effets potentiels sur l'environnement, notamment sur le climat et sur l'épuisement des ressources naturelles [60]. La création de structures de génie civil liées à une infrastructure de recherche a un impact plus faible que celle des constructions souterraines conventionnelles. L'ACV a été réalisée à partir de produits disponibles à faible empreinte carbone, soutenus par des déclarations environnementales des produits (EPD) certifiées EN 15804, par des processus de construction qui favorisent des chaînes d'approvisionnement courtes et par des prescriptions de construction qui envisagent une utilisation responsable des ressources. L'empreinte carbone ainsi estimée pour les phases A1 à A5 du cycle de vie concernant la phase de construction est d'environ 0,53 million de tCO₂(eq). Cette valeur peut être comparée à l'empreinte carbone actuelle du CERN, établie à 0,36 million de tCO₂(eq) en 2022, en tenant compte des émissions des champs 1, 2 et 3. Il est à noter que pour la comptabilisation du carbone, les émissions doivent être réparties entre les pays potentiellement émetteurs ; par conséquent, l'impact annuel par habitant qui en résulte est d'environ 0,11 kg, limité à la période de construction. À titre de comparaison, l'accord de Paris définit un budget carbone de 2 000 kg par habitant et par an. Les effets sont principalement liés à deux types de matériaux de construction : le béton prêt à l'emploi et l'acier. Des optimisations de conception et des avancées technologiques permettront de réduire davantage l'empreinte écologique. Une mise à jour de l'analyse du cycle de vie peut être effectuée au cours de la phase de conception technique afin de rendre compte de manière quantitative des effets de la réduction. Les effets directement liés à la construction et la gestion de ces effets seront examinés dans une étude d'impact environnemental spécifique. La planification du processus de construction devra comprendre un plan de gestion de l'impact sur l'environnement décrivant l'utilisation responsable des ressources (comme l'eau), la gestion de la production de déchets liés à l'activité de construction et la gestion du trafic lié à la construction.

En ce qui concerne la gestion des matériaux excavés, l'inventaire initial des emplacements pour le remblayage des carrières et le dépôt des matériaux non réutilisables a conclu à la faisabilité technique et administrative de la construction. En outre, afin d'encourager la réutilisation, une étude pluriannuelle spécifique a été lancée

en 2024 sur le domaine du CERN, portant sur les matériaux à base de molasse excavée provenant de la construction du HL-LHC, dans le but de développer des processus, conformes aux principes de gestion de la qualité, de transformation de la molasse en matériaux réutilisables. Les filières comprennent des projets de réensauvagement (par exemple, la restauration de terres en friche et la préparation des couches inférieures du sol en vue de créer de nouvelles zones agricoles présentant une couche arable fertile), la création de haies hautes, la stabilisation des bordures de route, l'entretien des chemins ruraux et forestiers, la création de parcs et de mini-forêts et l'amélioration des sols agricoles de mauvaise qualité. D'autres applications, telles que la production de matériaux d'isolation et de matériaux de construction non structuraux, sont en cours de développement avec des partenaires industriels. L'objectif est de limiter à 30 % les dépôts destinés exclusivement aux matériaux non réutilisables. Il est important de reconnaître qu'aucune déclaration définitive ne peut être faite à ce stade quant à la fraction réutilisable, car il est nécessaire de mener des études souterraines spécifiques afin de comprendre les caractéristiques des matériaux d'excavation. Cependant, la collaboration FCC investit activement dans la recherche et le développement de différentes solutions innovantes afin d'encourager au mieux la réutilisation des matériaux et de réduire autant que possible l'impact sur l'environnement.

Bien que le surcroît de trafic induit par les activités de construction soit limité en comparaison du trafic existant (entre 2 et 15 transports par heure sur les huit sites pendant les heures de travail, soit une augmentation de 0,15 à 1,8 % du trafic total, selon le site) à proximité immédiate des chantiers de construction, il faudra veiller à planifier rigoureusement les activités de transport. Il faudra notamment privilégier le transport des matériaux d'excavation vers l'axe de transport principal le plus proche au moyen de bandes transporteuses et optimiser l'approvisionnement en matériaux depuis les axes de transport vers les sites (par exemple, à l'aide de bandes transporteuses et d'une logistique optimisée). L'objectif est d'éviter autant que possible le transit par les quartiers résidentiels et les petites routes. La définition des transports fait partie de la planification de la construction, de la procédure d'autorisation correspondante et des exigences associées qui seront reflétées dans les procédures d'appel d'offres.

L'artificialisation¹ des terres et la perte d'habitat et de biodiversité qui en découle ont été quantifiées et présentées dans l'étude d'impact socio-économique. Cet effet devrait être largement atténué par des projets de réensauvagement autour des sites et par la récréation d'espaces agricoles. L'étude d'impact sur l'environnement devra développer ces mesures en détail.

Pendant les phases de construction et d'exploitation, le bruit pourrait entraîner des effets notables à certains endroits, là où les habitations se situent dans un périmètre de 100 à 300 m autour des sites. Les effets ont été quantifiés et sont présentés dans l'étude d'impact socio-économique. L'étude d'impact sur l'environnement devra prévoir l'élaboration de mesures de protection adéquates suivant l'approche « éviter-réduire-compenser ». Jusqu'à présent, les effets potentiels relevés toucheraient moins de 10 ménages au total pour l'ensemble du projet.

Les effets des rayonnements ionisants ont également été quantifiés et se sont révélés négligeables : à proximité des sites de surface, la dose annuelle effective est inférieure à 0,01 mSv/an, bien en deçà du rayonnement ambiant naturel, de l'ordre de 0,8 mSv/an. En effet, d'après l'expérience acquise par le CERN sur plusieurs décennies, les installations de recherche scientifique génèrent des rayonnements ionisants supplémentaires bien en deçà des seuils autorisés, sans effets sur la santé. Néanmoins, on s'est appuyé sur les méthodes de quantification socio-économique pertinentes pour évaluer les effets et en rendre compte. L'étude d'impact sur l'environnement devra comprendre toutes les mesures de surveillance et de protection nécessaires pour maintenir les effets potentiels à un niveau insignifiant.

Les effets notables devraient être principalement indirects, c'est-à-dire liés à l'approvisionnement en matières premières et en matériaux de construction, ainsi qu'aux émissions à l'extérieur du site concerné. Il s'agit d'émissions du champ 2, qui résultent de l'achat d'électricité, de chauffage ou de refroidissement pour alimenter les opérations liées au projet, ainsi que d'émissions du champ 3, qui englobent l'impact environnemental au sens large sur l'ensemble de la chaîne de valeur, notamment la production et le transport de matériaux, les activités de construction et la gestion des déchets. Pour traiter les deux aspects liés à la construction de l'installation, aux instruments scientifiques et à leur exploitation, un plan d'approvisionnement tenant compte des aspects environnementaux devra être élaboré et mis en œuvre. Une première analyse, réalisée avec des spécialistes du domaine de l'approvisionnement en énergie, a montré qu'opter pour des

sources d'énergie renouvelables pour une large part de l'approvisionnement permettrait de maintenir les émissions indirectes à un faible niveau. Sur un horizon de dix ans, il est envisageable de privilégier des méthodes de construction utilisant l'électricité. Une entrée en service à l'horizon 2050 offre également la possibilité de couvrir une part substantielle de l'approvisionnement en énergie à partir de sources d'énergie renouvelables. La fourniture de chaleur résiduelle, en particulier lorsque l'exploitation de l'infrastructure de recherche est adaptée aux besoins locaux et saisonniers, pourrait largement contribuer à réduire l'empreinte carbone par le remplacement des sources de chaleur fossiles traditionnelles. L'approvisionnement en matières premières et en matériaux de construction destinés aux infrastructures et aux instruments devra être planifié avec soin et pris en compte dans les exigences relatives à l'approvisionnement et aux fournitures en nature. En Europe, le marché évolue rapidement vers la promotion des matériaux recyclés (par exemple, l'acier) et la production à faible émission de carbone (par exemple, avec du béton). Il est nécessaire d'appliquer les exigences définies par les normes européennes, telles que la comparaison des produits sur la base des déclarations environnementales de produit (EPD), pour assurer une faible empreinte environnementale. D'autres analyses du cycle de vie des infrastructures techniques, des éléments des accélérateurs de particules et des détecteurs d'expériences seront nécessaires pour définir ces exigences lors de la phase de conception ultérieure. Les gaz nocifs pour l'environnement devront être évités s'ils n'ont pas déjà été retirés du marché.

Les sites de surface entraînent des effets notables sur l'environnement principalement liés à la visibilité. Ces questions doivent être abordées lors de la phase de conception, en impliquant le public directement affecté ou concerné et avec la coopération d'architectes ayant de l'expérience dans l'intégration paysagère de bâtiments industriels et fonctionnels. Des études préliminaires ont été réalisées, confirmant qu'il existe, à l'heure actuelle, des approches et des technologies appropriées.

1 Peut être défini comme la transformation d'un sol à caractère agricole, naturel ou forestier par des mesures de gestion, pouvant aboutir à son imperméabilisation totale ou partielle.

Chaque site présente des exigences et des contraintes spécifiques qui doivent être dûment prises en compte. Concernant le projet intégré, le principal défi réside dans le caractère évolutif de la définition de l'espace nécessaire pour abriter les équipements techniques du collisionneur de leptons, ainsi que dans les besoins à long terme d'un éventuel collisionneur d'hadrons ultérieur. Sur certains sites qui imposent en priorité une intégration paysagère harmonieuse, les contraintes joueront un rôle déterminant dans la prise de décision. Il est important de trouver un juste équilibre entre la nécessité de minimiser l'empreinte écologique du site pour favoriser une utilisation efficace des terres et la nécessité de s'assurer que l'infrastructure sera capable d'accueillir à la fois la phase du collisionneur initial et la phase potentielle d'un second collisionneur.

La consommation d'espaces agricoles et de forêts n'entraîne pas seulement une réduction d'habitat et de biodiversité, mais génère également des impacts économiques tangibles. Les pertes de revenus (directs, en amont et en aval) ont été analysées et quantifiées, et sont présentées dans l'étude socio-économique. Des propositions de compensation doivent être élaborées. En Suisse, seule une compensation « un-à-un » de l'espace est acceptable ; en France, des mesures de compensation collective peuvent également être définies conjointement avec les parties prenantes concernées au cours de la phase d'évaluation de l'impact sur l'environnement. La compensation directe de la perte de surfaces agricoles protégées implique le transfert de la terre arable de haute qualité vers des sites où la qualité du sol est moins bonne ou vers des friches qui devront être remises en état. La perte de forêts, dans le cas de la France, peut, par exemple être partiellement compensée par un reboisement à proximité des sites de surface et à d'autres endroits spécifiques. Les entités notifiées seront consultées afin de recommander et valider des mesures compensatoires.

La consommation d'eau reste dans les limites actuelles, car les besoins de la phase FCC-ee sont similaires à ceux du CERN. Reconnaisant l'importance d'une gestion responsable des ressources, des efforts seront faits pour limiter l'utilisation de l'eau. Le FCC-ee remplace la demande en eau du Grand collisionneur de hadrons. Compte tenu de l'épuisement continu des ressources en eau, la protection des ressources en eau et la réduction de la consommation font partie des objectifs de l'écoconception. Des études sont donc en cours pour déterminer si les eaux usées traitées peuvent être utilisées à des fins de refroidissement, et de quelle manière. Les premiers résultats confirment, en principe, la faisabilité technique et financière d'un tel procédé. Des effets pourraient subsister au niveau local en ce qui concerne l'eau nécessaire à la phase de construction.

L'étude d'impact sur l'environnement ultérieure devra donc comprendre un plan d'approvisionnement et de gestion de l'eau, afin d'éviter que les activités de construction aient des impacts locaux notables sur la population et sur les activités économiques existantes.

La construction et l'exploitation de l'infrastructure de recherche entraînent la production d'une grande quantité de déchets conventionnels. L'étude d'impact sur l'environnement ultérieure devra détailler les types et les quantités de déchets produits. Cet effet étant principalement dû aux biens achetés, il convient de prendre en compte la prévention et la gestion des déchets dans le processus d'achat. Étant donné que l'exploitation d'une nouvelle infrastructure de recherche remplacera celle de l'actuel projet phare du CERN et que le nombre de personnes concernées devrait être stable dans le temps, la production quotidienne de déchets ne devrait pas augmenter. Des efforts continus pour réduire la production de déchets, en encourageant la réutilisation, en premier lieu, et le recyclage, conformément aux réglementations des États hôtes, devraient permettre de poursuivre la réduction des déchets déjà engagée à ce jour.

Enfin, il est nécessaire d'adopter un concept d'exploitation adaptatif en vue de maintenir les impacts sur l'environnement dans des limites acceptables. L'exploitation doit également tenir compte des contraintes extérieures, du fait des effets du changement climatique et de la nécessité de générer des bénéfices environnementaux visant à équilibrer les externalités négatives. Par exemple, pour optimiser la fourniture de chaleur résiduelle, il peut être nécessaire de décaler l'exploitation vers les périodes les plus froides. L'exploitation des accélérateurs de particules pourrait être liée à la disponibilité d'une énergie renouvelable abondante, qui sera signalée par des notifications en ligne reçues dans le cadre d'une liaison avec le fournisseur d'énergie. Elle devra peut-être également prendre en compte les changements de température de l'eau de refroidissement du circuit secondaire dus à l'évolution à long terme du climat. Du fait de la présence de personnel, il faudra également tenir compte des variations saisonnières des conditions de travail. Par exemple, il pourrait être plus conforme aux principes de durabilité de travailler pendant les saisons froides que pendant les saisons chaudes, car le chauffage peut être assuré par la récupération de chaleur résiduelle, alors que le refroidissement nécessite de l'énergie supplémentaire.

L'inventaire et l'analyse préliminaires des aspects environnementaux ont conduit le groupement d'entreprises dans le domaine de l'environnement à élaborer une première version de la stratégie environnementale décrite à la section 3.2.4. Les lignes directrices de cette stratégie sont communiquées aux concepteurs de l'installation selon une approche itérative, et sont comprises dans les nouvelles actions en matière d'achats liées aux études et aux conceptions techniques. Il s'agit ainsi de mettre en place progressivement une culture d'intégration de l'impact environnemental dans le processus de conception. Cette approche, basée sur l'écoconception, devrait jouer un rôle fondamental dans la conception, la construction et l'exploitation ultérieures du FCC.

3.2.4.Stratégie environnementale

Objet et champ d'application

La vision stratégique [29] en matière d'environnement, d'écoconception et de développement durable du projet a pour objectif de définir et de fixer des lignes directrices visant à :

présenter les ambitions du maître d'ouvrage en matière d'environnement, d'écoconception et de développement durable ;

concevoir et piloter le projet de manière à prendre en compte les aspects environnementaux ;

inscrire le projet dans une approche globale de développement durable fondée sur les trois piliers du développement durable : environnemental, social et économique ;

établir un cadre interdisciplinaire pour le projet, ainsi que pour les partenaires et collaborateurs internationaux, qui puisse être appliqué à toutes les phases du développement et de l'exploitation du projet.

La vision stratégique s'applique à toutes les phases du développement du projet : planification, conception, construction, exploitation, maintenance et développement futur. Elle concerne donc la construction de l'infrastructure, les accélérateurs de particules et les expériences qui y seront menées. D'un point de vue géographique, la vision stratégique a une portée transnationale ; elle intègre les réglementations nationales et spécifiques applicables à chaque étape du projet.

Organisation et pilotage

La stratégie environnementale, son organisation et son pilotage sont basés sur les principes [61] déjà suivis au CERN, qui héberge le projet. La stratégie comprend également les recommandations émises dans le cadre des normes environnementales qui servent de lignes directrices [19, 62], y compris les recommandations relatives aux questions clés à traiter. Dans les objectifs principaux du CERN pour la période 2021-2025 [63] et au-delà, l'environnement arrive en tête des priorités. La vision stratégique 2E+SD, basée sur l'environnement, l'écoconception et le développement durable, reflète un engagement fort en faveur de la conception d'un nouveau projet qui comprenne les aménagement locaux et régionaux. Jusqu'à présent, les objectifs du CERN en matière d'environnement ont été axés sur les activités existantes. Il faut désormais faire évoluer cette approche, afin de pouvoir relever les défis environnementaux liés à la construction et à l'exploitation d'une nouvelle infrastructure de recherche à grande échelle, tout en tenant compte des questions de protection et d'aménagement de la région. Le projet doit être conçu en tenant compte dès le départ de l'environnement dans lequel s'implantera l'infrastructure. Pour élaborer un scénario de projet, le maître d'ouvrage doit mettre en place une structure appropriée responsable de l'intégration de la stratégie 2E+SD. Cette structure permettra de piloter la stratégie et sa mise en œuvre indépendamment des entités chargées de l'étude, de la conception et de la réalisation. Il devra être directement rattaché à la direction du projet et disposer de référents clairement identifiés dans toutes les entités impliquées dans les différentes phases du projet. Il contribuera à définir les procédures de gestion de projet et fixera les exigences en matière de gestion opérationnelle (les questions organisationnelles) ou de pilotage.

Responsabilités individuelles et collectives

L'équipe de direction du projet élabore la stratégie, la communique clairement et veille à ce que tous les collaborateurs internationaux s'y conforment. Elle établit une structure organisationnelle et prend toutes les mesures nécessaires pour atteindre les objectifs définis dans la vision stratégique 2E+SD. Dans cette perspective, les mesures suivantes seront prises :

À court terme (2024-2030)

- comprendre le contexte environnemental et réglementaire dans lequel s'inscrit le projet d'infrastructure de recherche et les projets connexes ;
- établir une feuille de route « Environnement, écoconception et développement durable » afin de structurer la manière dont l'environnement est pris en compte tout au long du projet, ainsi que d'identifier et d'impliquer toutes les parties prenantes ;
- fixer des objectifs à atteindre et des objectifs d'amélioration continue applicables à toutes les parties prenantes et à toutes les phases du projet, sur la base des objectifs de développement durable de l'ONU ;
- s'engager dans un processus systématique de prévention, de limitation et de compensation des impacts du projet grâce à des mesures de suivi et d'amélioration ;
- suivre les évolutions du point de vue réglementaire et technique, afin d'anticiper les changements à venir dans les domaines de l'environnement, de l'écoconception et du développement durable ;
- appliquer les objectifs environnementaux et de développement durable à toutes les activités liées au projet, en particulier lors de la phase de conception du projet.

À moyen terme (2030-2040+)

- piloter la mise en œuvre des objectifs environnementaux et de développement durable dans la construction d'infrastructures, d'équipements techniques (accélérateurs de particules, expériences scientifiques et toute l'infrastructure technique nécessaire à leur fonctionnement) et dans les projets d'aménagement du territoire ;

- mettre en place les partenariats avec les parties prenantes locales décidés au cours de la période précédente (2024-2030) ;
- mettre à jour la vision stratégique et l'adapter en fonction de l'évolution de la situation, compte tenu du suivi environnemental.

À long terme (2040+)

- poursuivre la mise en œuvre des paramètres de durabilité, en particulier les solutions à faible consommation d'énergie et à faibles émissions de gaz à effet de serre, pour autant qu'elles soient compatibles avec l'exploitation scientifique du projet et économiquement viables.

Toute personne prenant part aux activités liées au projet contribue activement à la mise en œuvre de la stratégie 2E+SD par un comportement exemplaire, en gardant à l'esprit les objectifs associés et en adoptant les meilleures pratiques du marché sur la base d'une évaluation des technologies émergentes.

À chaque étape du projet, tout en s'efforçant d'atteindre ses objectifs scientifiques, chacun doit rechercher activement les informations lui permettant de limiter l'impact du projet sur l'environnement, et assumer les responsabilités qui lui sont confiées en matière d'environnement, d'écoconception et de développement durable.

L'adoption de mesures doit se fonder sur une évaluation coût-bénéfice des différentes options, y compris, le cas échéant, l'analyse du cycle de vie.

Il est entendu que les actions visant à prévenir et à réduire les impacts doivent être techniquement réalisables, économiquement viables et compatibles avec la nécessité d'assurer une excellence scientifique durable à l'échelle mondiale et avec les objectifs scientifiques de la nouvelle infrastructure de recherche.

Thèmes environnementaux prioritaires

Parmi les nombreux aspects environnementaux, huit thèmes ont été jugés prioritaires pour la phase de conception ultérieure :

Eau

- limiter la consommation d'eau, en particulier durant les périodes sensibles, et ne pas consommer d'eau provenant de sites sensibles ;
- surveiller et contrôler la qualité de l'eau rejetée et la manière dont elle est gérée ;
- optimiser l'utilisation d'eau ; recycler et réutiliser l'eau ;

Déchets

- acheminer tous les déchets vers les installations de tri appropriées ;
- valoriser les déchets afin de prévenir et de réduire les déchets finaux ;
- utiliser des matériaux recyclés ou biosourcés, dans la mesure du possible ;

Énergie

- limiter la consommation et augmenter l'efficacité du système ;
- privilégier les sources d'énergie renouvelables ;
- récupérer et stocker l'énergie ; fournir de la chaleur résiduelle ;

Rayonnements ionisants

- appliquer les normes et l'accord du CERN avec les deux États hôtes [64] ;
- étudier des solutions visant à réduire et limiter la production de rayonnements ionisants ;
- identifier et quantifier les risques locaux ;

Biodiversité

- identifier et préserver les sites sensibles ;
- identifier les espèces locales protégées et patrimoniales ;
- prendre des mesures de compensation environnementale pertinentes ;

Émissions

- quantifier les émissions, y compris en termes d'empreinte carbone ;
- développer des systèmes de récupération et de gestion ;
- surveiller et contrôler la qualité des émissions et ce qu'il advient d'elles ;

Emplacement

- éviter les sites sensibles ou soumis à de fortes contraintes ;
- limiter les surfaces utilisées et optimiser l'aménagement du site ;
- intégrer l'infrastructure et les activités dans l'environnement ;

Dimensions sociétales

- limiter les activités aux lieux et aux périodes nécessaires ;
- limiter les nuisances et préserver le confort des riverains ;
- prévoir la création de valeur ajoutée pour la société dans le cadre du projet.

Lignes directrices spécifiques

Des lignes directrices spécifiques, présentées ci-après, ont été formulées à la suite de la vision stratégique. Elles doivent être prises en compte dans toutes les phases de conception ultérieures par toutes les personnes chargées de développer des infrastructures et des équipements.

Eau

- éviter l'utilisation d'eau potable à des fins non sanitaires ;
- éviter l'exploitation des eaux souterraines ;
- dès la phase de planification, veiller à la préservation de la qualité et de la quantité des eaux souterraines ;
- veiller à ne pas créer d'interaction entre les couches d'eau souterraine et à ne pas mélanger leurs eaux ;
- mettre en place des systèmes de collecte des eaux pluviales pour les usages qui ne nécessitent pas d'eau potable ;
- limiter l'évaporation en utilisant des circuits fermés et, si possible, des systèmes secs ;
- optimiser l'utilisation de l'eau, notamment par le recyclage et la réutilisation ;
- limiter l'exploitation directe des cours d'eau ;
- veiller à ce que les eaux rejetées dans le milieu naturel soient d'une qualité au moins équivalente à celle des eaux du milieu ;
- élaborer des synergies pour le partage de l'eau et la réutilisation des eaux usées au profit d'autres consommateurs, pour autant que le permettent la technique et la réglementation ;
- évaluer l'utilisation des eaux usées dans les processus industriels ;

Déchets

- dans la mesure du possible, utiliser des matériaux ayant un faible impact sur l'environnement (recyclés, biosourcés, etc.) ;
- inclure dans les procédures d'appel d'offres l'obligation pour les entreprises d'éviter les emballages et d'éliminer leurs déchets ;
- acheminer tous les déchets vers le centre de tri approprié ;
- réutiliser les matériaux excavés, si possible de manière locale ;
- éviter les équipements et conteneurs à usage unique ou limité ;
- partager l'espace et les équipements ;

Énergie

- mettre en œuvre les objectifs des États hôtes en matière d'énergie et de climat lors de la planification, la construction et l'exploitation des futures installations ;
- limiter la consommation d'énergie aux quantités et aux durées nécessaires ;
- récupérer et réutiliser autant d'énergie que possible au sein de l'infrastructure de recherche ;
- appliquer des mesures de récupération d'énergie ;
- limiter l'utilisation d'énergies fossiles ;
- planifier la mise en œuvre en temps voulu des contrats d'approvisionnement en énergie ou des contrats d'achat d'électricité pour l'approvisionnement en énergies renouvelables ;
- prévoir la récupération, le stockage et l'approvisionnement en énergie, y compris en chaleur résiduelle, dans un premier temps pour une utilisation au sein du projet, avec la possibilité de la rendre disponible par la suite en dehors du projet ;

- éviter toute consommation inutile (par exemple, n'utiliser les systèmes qu'aux lieux et aux périodes nécessaires, éviter les systèmes fonctionnant en mode veille et évaluer la possibilité d'éteindre les systèmes) ;
- augmenter la température de l'eau de refroidissement et de l'air ambiant dans les zones nécessitant un traitement de l'air ;
- limiter les zones dans lesquelles le traitement de l'air est nécessaire, et la durée de ce traitement ;
- éviter l'éclairage et l'exploitation des machines quand ce n'est pas nécessaire ;
- optimiser les calendriers en recherchant un équilibre entre différents critères, notamment en privilégiant la consommation lors des périodes où l'énergie renouvelable est disponible à bas prix et en utilisant au mieux la chaleur résiduelle ;
- optimiser et mutualiser les moyens de transport (convoyeurs, trains, véhicules électriques, etc.) et les déplacements domicile-travail entre les sites ;
- adapter les systèmes informatiques et de traitement des données aux besoins ;
- concevoir et construire des bâtiments présentant des objectifs ambitieux en matière de performance énergétique ;

Rayonnements ionisants

- limiter les activités à l'origine de rayonnements ionisants ;
- placer les activités dangereuses dans des zones non sensibles ;
- identifier, quantifier et contrôler toutes les émissions et immissions radioactives dans l'environnement et les déchets ;
- suivre les réglementations locales en vigueur ;
- établir des protocoles de gestion des risques ;

Biodiversité

- identifier les enjeux locaux en matière de biodiversité afin d'éviter la destruction de sites sensibles, d'habitats et de corridors écologiques ; quand la prévention n'est pas possible, réduire et compenser ;
- limiter les impacts indirects susceptibles de perturber l'environnement (bruit, lumière, vibrations, etc.) ;
- limiter les impacts inévitables (intensité et couleur des éclairages, périodes d'exploitation, etc.) ;
- prévoir des mesures de préservation de la faune et de la flore, et, lorsque cela n'est pas possible, élaborer des mesures d'atténuation pour gérer les impacts résiduels ;
- encourager la biodiversité sur les sites et aux alentours ;
- planter uniquement des essences locales et éviter les essences ornementales indésirables ;

Émissions

- prendre en compte les objectifs climatiques fixés par la Suisse et la France conformément aux recommandations du GIEC ;
- identifier toutes les sources d'émissions ;
- traiter les émissions et les immissions dans l'environnement avant leur rejet ;
- déterminer l'empreinte carbone des émissions et des immissions dans l'environnement ;

- faire en sorte que les activités suivent une trajectoire positive en matière d'émissions ;
- contrôler et mesurer les activités susceptibles de polluer l'air, le sol et l'eau ;
- éviter les gaz ayant un effet de serre important (par exemple, l'hexafluorure de soufre, ou SF₆) au profit de solutions de remplacement ;
- privilégier l'électricité et l'hydrogène (piles à combustible) provenant de sources renouvelables pour l'alimentation des machines et le transport des équipements ;
- encourager la mobilité douce et les transports électriques ;
- rester en dessous des seuils en vigueur pour l'immission de poussières en suspension (PM10) et de dioxyde d'azote (NO₂) dans le périmètre des futures extensions ;
- identifier et limiter les émissions de gaz à effet de serre au cours du cycle de vie de l'infrastructure de recherche, en tenant compte des objectifs scientifiques, de la faisabilité technique et de la viabilité économique, y compris pendant les activités de construction et d'acquisition des équipements ;

Emplacement

- éviter les emplacements présentant des enjeux majeurs ;
- réduire l'empreinte des sites de surface au strict minimum, conformément aux exigences fixées ;
- optimiser l'utilisation de l'espace en densifiant les sites et les bâtiments ;
- veiller à ce que les infrastructures s'intègrent bien dans le paysage, l'environnement local et le milieu urbain ;
- éviter l'imperméabilisation des sols et gérer les eaux de pluie ;
- prévoir des îlots de fraîcheur ;
- limiter l'impact des activités au sein du site ;
- assurer la résilience des sites ;

Dimensions sociétales

- identifier les sensibilités et les défis locaux ;
- limiter les nuisances sonores, olfactives et lumineuses pour les riverains ;
- intégrer les activités au tissu économique et social et développer des synergies avec les services locaux, comme les pompiers et d'autres services d'urgence et de sécurité ;
- dans la mesure où cela est compatible avec le plan du projet, limiter les nuisances pendant les périodes de repos (nuits, week-ends) ;
- limiter le trafic routier et mettre en place des alternatives (transport mutualisé, transports publics, transport ferroviaire, convoyeurs, etc.) ;
- prévoir des espaces de stationnement et des aires de chargement et de déchargement pendant la phase de construction, en fonction des besoins identifiés et quantifiés à l'avance.

Matières premières

- analyser le cycle de vie des matériaux et des infrastructures afin d'anticiper leur fin de vie ;
- privilégier l'utilisation de matériaux de construction à faible teneur en carbone (par exemple, le béton bas carbone), lorsque cela est possible ;
- privilégier, dans la mesure du possible, l'utilisation de matériaux recyclés (acier, cuivre, etc.) ;

- privilégier l'approvisionnement local et la production régionale ;
- opter, dans la mesure du possible, pour des ressources organiques (bois, etc.).

3.2.5. Consommation d'énergie

Dans le cadre du projet, l'utilisation de sources d'énergie renouvelables [65] devra être encouragée et renforcée en continu. L'utilisation d'énergie provenant de combustibles fossiles sera généralement évitée et, lorsqu'elle ne peut l'être, sera maintenue à un niveau aussi bas que possible. La chaleur résiduelle et les sources d'énergie renouvelables seront réutilisées pour le chauffage interne de l'infrastructure d'accélérateur de particules chaque fois que cela sera possible et économiquement viable à long terme. L'utilisation de sources d'énergie fossile pour l'alimentation électrique de secours devra également être évitée. Une alternative valable peut consister à utiliser de l'hydrogène pour alimenter un système basé sur une pile à combustible, en complément de l'approvisionnement en électricité à court terme via des systèmes de stockage d'énergie par batterie (BESS).

Des études réalisées avec des consultants externes afin de déterminer dans quelle mesure les sources d'énergie renouvelables peuvent être exploitées montrent qu'une stratégie basée sur un approvisionnement en électricité principalement à partir de sources d'énergie renouvelables à l'échelle nationale pourrait satisfaire les besoins du projet [50]. L'augmentation continue des sources d'énergie renouvelables et des capacités de transfert transfrontalier d'électricité, promise par le gouvernement français [66], conforte la validité de ce concept [67]. À l'instar d'autres pays européens, le réseau électrique français a connu une réduction continue de son intensité carbone [68], si bien qu'à ce jour, la France figure parmi les pays dont l'intensité carbone de la production d'électricité, calculée en fonction de la zone géographique, est la plus faible (Fig. 3.3 : Suède, France, Suisse et Norvège). La planification à long terme [69] publiée début 2025 confirme la faisabilité d'utiliser le réseau et des sources d'énergie renouvelables pour assurer l'approvisionnement en énergie nécessaire.

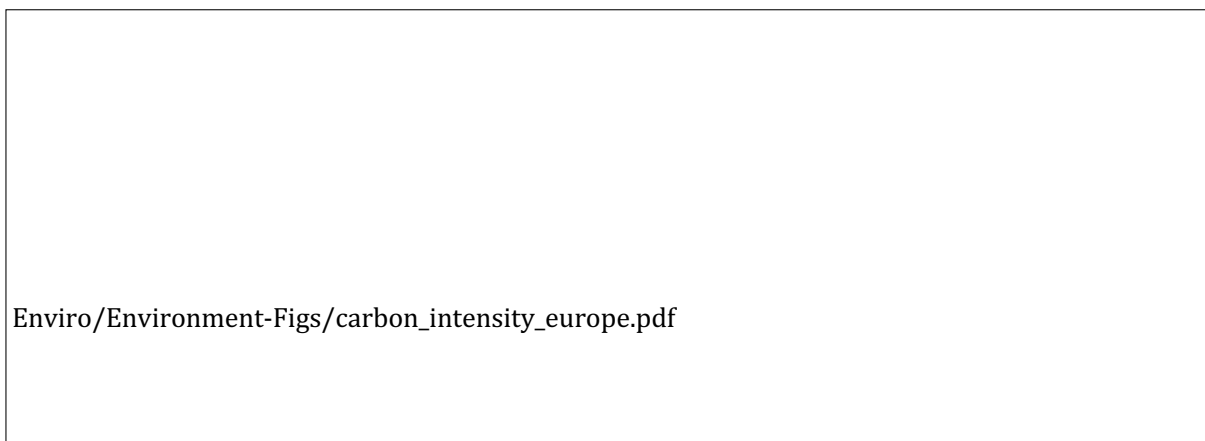


Fig. 3.3 : Évolution de l'intensité carbone des réseaux nationaux en Europe. Source : RTE [68].

Les études donnent à penser que, d'ici 2035, les besoins en énergie liés aux activités de construction pourraient être entièrement couverts par des sources d'énergie renouvelables. La mise en œuvre de cette approche via un approvisionnement local en électricité nécessite toutefois la conclusion de contrats de fourniture d'énergie renouvelable assortis de certificats d'origine. Pour ce faire, il convient d'effectuer une analyse suffisamment exhaustive des besoins en énergie sur les chantiers, pour la phase de construction, ainsi qu'une planification fiable et suffisamment stable de la construction (sécurité de la planification).

Pour préparer l'approvisionnement en énergie en vue de la phase d'exploitation, une période de préparation pouvant aller jusqu'à dix ans pourrait être nécessaire. Ce délai permettrait de déterminer les besoins en énergie, les modèles de consommation et les besoins invariants en énergie, ainsi que de développer des concepts et des techniques permettant d'adapter l'infrastructure de recherche aux possibilités d'approvisionnement en termes de disponibilité et de prix. En outre, cela laisse le temps de développer le portefeuille de contrats d'achat d'électricité en termes de fonctions et de capacités, d'élaborer les conditions de ces contrats et de mener à bien les procédures d'appel d'offres. Le portefeuille permettra de disposer à terme

d'un mélange de technologies de production d'énergie adaptées aux besoins de l'infrastructure de recherche, à la flexibilité des fournisseurs, à l'empreinte carbone et aux conditions générales liées au contrat. Les études réalisées avec des consultants externes montrent qu'à l'horizon 2035, il serait possible de couvrir plus de 1 TWh avec des énergies renouvelables dans la région, soit un niveau de 60 % ; à l'horizon 2050, un niveau de couverture sensiblement supérieur pourrait être atteint.

Il convient de garder à l'esprit que l'approvisionnement et la consommation d'énergie issue de sources renouvelables n'implique pas un raccordement physique entre le producteur et le consommateur. Dans un réseau électrique interconnecté, les électrons sont fongibles, c'est-à-dire indifférenciables et interchangeables. Par conséquent, tout achat d'énergie issue de sources renouvelables est pris en compte dans le système de comptabilité financière, sociétale et environnementale qui détermine le niveau de durabilité du projet. Le lieu et la période où l'énergie a été produite physiquement ne sont pas pertinents dans le cadre d'un contrat d'achat d'électricité. Il est donc important de distinguer l'empreinte carbone du réseau électrique (empreinte carbone de la consommation basée sur l'emplacement) de l'empreinte carbone du certificat d'origine de l'électricité d'un projet (empreinte carbone de la consommation basée sur le marché). Les certificats d'énergie renouvelable et les garanties d'origine qui font partie des contrats d'achat d'électricité jouent un rôle crucial dans la comptabilisation carbone d'un projet. Le champ d'application 2 du Protocole des gaz à effet de serre comprend l'obligation explicite de communiquer les deux chiffres [70]. Pour obtenir de bonnes performances financières, il est souhaitable de disposer d'une prévision plus détaillée des volumes requis au cours d'une année d'exploitation et de pouvoir s'adapter à la disponibilité de l'énergie renouvelable et à l'évolution de ses gains. Par conséquent, un portefeuille de contrats d'achat d'électricité issue d'énergies renouvelables doit être établi avec un temps de préparation adéquat. Le portefeuille évoluera au cours de la phase d'exploitation, car les besoins en consommation d'énergie évoluent en fonction des différentes phases d'exploitation.

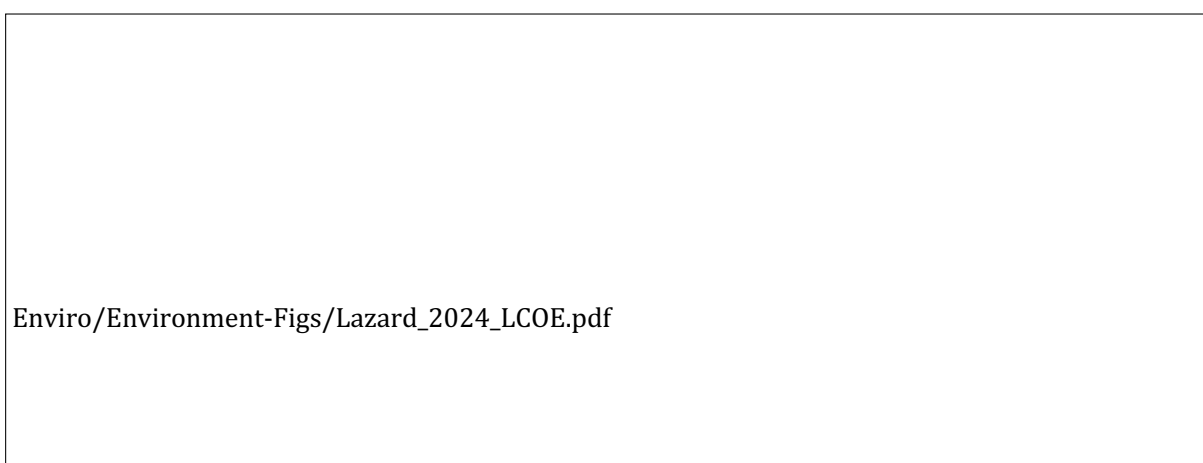


Fig. 3.4 : Évolution du coût actualisé de l'électricité (LCOE, source : *Lazard's Levelized Cost of Energy*, version 17.0)

D'ici 2023, les coûts actualisés de l'électricité (LCOE)² issue de toutes les sources d'énergie renouvelables seront inférieurs aux coûts de production de l'électricité issue de combustibles fossiles [71] (Fig. 3.4). Les fluctuations saisonnières des prix quotidiens de l'électricité sont le résultat d'une interaction complexe entre la capacité de production (l'offre), la demande et des facteurs non techniques. Par rapport à la situation qui prévalait avant la pandémie, l'évolution des prix de l'électricité reste volatile. Dans le réseau interconnecté, le lieu de production peut être différent du lieu de consommation. Par conséquent, aucune déclaration générale ne peut être faite, et l'observation sur plusieurs saisons des prix de l'électricité en grande quantité n'a pas permis de dégager un modèle clair de variation saisonnière des coûts (Fig. 3.5). En particulier, les coûts de production de l'électricité issue de sources d'énergie renouvelables sont variables : alors que l'énergie éolienne est 10 % moins chère en hiver et 20 % moins chère au printemps qu'en été, c'est généralement l'inverse que l'on constate pour l'électricité issue de sources photovoltaïques. Dans les zones climatiques continentales, il existe un quasi-équilibre entre l'offre et la demande [72].

À ce jour, il n'a pas été possible de relever de différence significative en fonction des saisons concernant le coût de l'énergie issue de sources renouvelables.

Pour parvenir à couvrir convenablement les besoins en électricité par des sources à faibles émissions de carbone, le stockage d'énergie hors site peut être prévu dans la stratégie d'achat d'électricité. Par exemple, les contrats d'achat d'électricité hybrides font rapidement leur apparition sur le marché et, d'ici 2040 à 2050, ils feront partie intégrante de l'achat d'électricité en grande quantité. Les quantités manquantes d'énergie renouvelable pourraient être comblées par de l'énergie nucléaire, dont le LCOE est plus élevé que celui des sources renouvelables, mais qui se caractérise par une très faible empreinte carbone.

À titre de comparaison, les parcs éoliens en mer de taille moyenne et d'une capacité de 600 MW, tels que ceux de Kriegers Flak, au Danemark, ou de Dunkerque, produisent environ 2,5 TWh d'électricité par an à un coût de 44 euros/MWh aux prix de 2021.

²Le LCOE (Levelized Cost of Energy) est une mesure utilisée pour évaluer le coût de la production d'électricité à partir de différentes sources d'énergie pendant leur durée de vie. Il représente le coût unitaire (par exemple, USD/MWh) de la construction et de l'exploitation d'une centrale électrique, en tenant compte de tous les coûts et revenus.

Enviro/Environment-Figs/Monthly_spot_prize_France_2023_2024.pdf

Fig. 3.5 : Exemple de prix au comptant mensuels de l'électricité en France entre 2023 et 2024 (source : Ember Energy [73]).

En raison des crises économiques ayant entraîné une augmentation des prix de l'énergie entre 2020 et 2023, les prix des enchères pour l'énergie éolienne renouvelable en mer, en France, diminuent à nouveau. En France, à l'heure actuelle, les prix des enchères pour les sources d'énergie éolienne renouvelable sont en moyenne de 69 euros/MWh. Ces prix constituent un bon indicateur pour estimer le prix de l'électricité à prendre en compte dans les coûts énergétiques annuels de l'évaluation globale de la durabilité. Sur la base des prix actuels (Fig. 3.6) et des performances environnementales de la production d'énergie, les estimations actuelles, très prudentes, donnent une fourchette de prix moyenne comprise entre 70 et 80 euros/MWh et une intensité carbone basée sur le marché de 15 à 25 gCO₂(eq)/kWh d'électricité.

Enviro/Environment-Figs/Wind_Auction_DB_France_2024.pdf

Fig. 3.6 : Évolution des prix du marché contractuel de l'électricité d'origine éolienne en Europe en centimes d'euro/kWh jusqu'à fin 2024 (source : graphique basé sur les ventes aux enchères publiques de l'énergie éolienne en Europe)

Ce montant est nettement plus élevé que l'objectif de prix de 56 euros/MWh en 2030, en France, indiqué dans la Programmation pluriannuelle de l'énergie du gouvernement français [66] (Fig. 3.7).



Fig. 3.7 : Objectifs déclarés de prix du marché relatifs à l'électricité pour 2030 publiés par le gouvernement français dans sa Programmation pluriannuelle de l'énergie [66]).

Afin d'augmenter le potentiel de fourniture de chaleur résiduelle tout en maintenant les systèmes de stockage de la chaleur à des dimensions raisonnables, il serait préférable de faire preuve de flexibilité opérationnelle et de déplacer l'exploitation à des saisons plus fraîches. Compte tenu des régimes climatiques régionaux, les conditions de travail sont généralement plus favorables en automne et au printemps qu'en été.

La phase préparatoire ultérieure du projet devra comprendre la préparation de la stratégie d'achat d'électricité et un plan pour la phase de construction. Cette phase servira d'expérience d'apprentissage pour établir et négocier le portefeuille de contrats d'achat d'électricité en vue de la phase d'exploitation, qui devrait débiter après 2045.

3.2.6. Utilisation de la chaleur résiduelle

La quasi-totalité de l'énergie utilisée pour le fonctionnement des infrastructures techniques et des sous-systèmes d'un accélérateur de particules est en définitive convertie en chaleur. L'énergie utilisée pour amplifier l'énergie radiofréquence, absorber le rayonnement synchrotron et faire fonctionner les aimants de l'accélérateur, les systèmes de gestion de l'air, l'électronique et l'équipement de traitement des données est presque entièrement convertie en chaleur basse température, généralement inférieure à 45 °C. Des températures supérieures à 50 °C, mais encore inférieures à 70 °C, peuvent être atteintes à de rares occasions, par exemple lors du refroidissement d'équipements de réfrigération cryogénique et de transformateurs et sous-stations électriques. Cette chaleur est généralement dissipée dans l'air ambiant via les systèmes de refroidissement à eau ou à air libre, et est donc perdue. Au vu de la quantité de chaleur générée par les infrastructures de recherche basées sur des accélérateurs de particules, il y a un intérêt à étudier comment récupérer cette chaleur et la convertir en une ressource précieuse. L'utilisation de chaleur à d'autres fins, dans le cadre du projet ou en dehors, présente les avantages socio-économiques potentiels suivants :

- une réduction de la consommation d'électricité et des coûts associés, grâce à la réduction des besoins opérationnels du système de refroidissement ;
- une réduction de la consommation d'eau brute et des coûts associés, grâce à la réduction des besoins opérationnels du système de refroidissement ;
- une augmentation de la durée de vie du système de refroidissement et une réduction des coûts de maintenance et de réparation associés, grâce à la réduction de la charge opérationnelle de l'équipement ;
- une réduction des émissions de carbone liées à la production de chaleur, en évitant la production de chaleur spécifique ;
- une réduction des frais de chauffage pour les consommateurs ;
- la possibilité de créer de nouvelles activités économiques à proximité de la source de chaleur.

Cependant, la récupération et la fourniture de chaleur impliquent également des efforts et des coûts supplémentaires, liés à :

- des composants supplémentaires servant à récupérer la chaleur ;
- un réseau spécifique servant à transporter la chaleur là où elle est nécessaire ;
- d'éventuels composants supplémentaires servant à augmenter, pour des besoins spécifiques, la température de la chaleur basse température fournie ;
- des systèmes de stockage de chaleur à court et à long terme, pour assurer la stabilité de l'approvisionnement et fournir de la chaleur en cas de besoin ;
- la nécessité de rénover les bâtiments existants et de construire de nouveaux bâtiments dotés d'équipements de chauffage et de refroidissement qui fonctionnent avec de la chaleur basse température ;
- la nécessité de faire appel à un opérateur de réseau de chaleur, si la chaleur est utilisée en dehors de l'infrastructure de recherche.

Une étude technico-économique a été réalisée par une entreprise d'ingénierie spécialisée, afin d'établir un inventaire des sources de chaleur dans l'infrastructure de recherche, et ainsi de vérifier la faisabilité technique et financière d'un tel système et, surtout, d'élaborer une carte détaillée de la demande de chaleur dans le périmètre des sites de surface. L'étude comprenait également une évaluation de la faisabilité technique et de la viabilité économique d'un système de récupération et de fourniture de chaleur [74–76].

Les informations recueillies ont également été intégrées à l'analyse d'impact socio-économique complète, plus large, qui évalue la contribution de ce système à la valeur actuelle nette du projet et rend ensuite compte du bénéfice net global. Cette approche assure la mise en œuvre d'un processus décisionnel éclairé. Si le système est mis en place, il sera fortement recommandé de contrôler en permanence l'approvisionnement en chaleur, afin de mesurer son efficacité et d'optimiser davantage le processus de récupération et de fourniture de chaleur

résiduelle.

Bien qu'il soit techniquement possible de moderniser les systèmes de refroidissement existants pour y intégrer la récupération et la fourniture de chaleur, cela peut se révéler plus coûteux que de planifier le concept dès le départ. En effet, en fonction des équipements, des infrastructures et de l'environnement existants autour de l'accélérateur de particules, la température de fonctionnement de l'équipement fournissant la chaleur peut ne pas correspondre aux besoins des consommateurs, par exemple : températures trop basses du circuit de refroidissement par eau de l'aimant, absence d'infrastructure de refroidissement des baies du centre de données, inadéquation des caractéristiques de la chaleur résiduelle avec les réseaux de chauffage urbain existants ou absence de réseaux de chauffage urbain à basse température, et, enfin, manque d'espace et absence de contrats avec les consommateurs. La modernisation des systèmes existants serait toutefois préférable à l'absence de récupération de chaleur. C'est pourquoi, dès le départ, le projet FCC a adopté une approche d'écoconception qui intègre la récupération et la fourniture de chaleur dans l'infrastructure de recherche tout en la plaçant dans son contexte socio-économique et environnemental plus large.

La récupération et la fourniture de chaleur résiduelle sont déjà mises en œuvre au CERN dans le cadre du projet LHC. Une installation alimente en chaleur résiduelle le système de réfrigération cryogénique du point 8 du LHC à Ferney-Voltaire. Un réseau de chauffage urbain développé par la société Dalkia pour la municipalité, avec le soutien de l'État, de la région et de l'ADEME, est relié à ce site de surface. Le site de surface PA de Ferney-Voltaire est envisagé comme une extension immédiate de ce site LHC, qui non seulement exploite le réseau de chauffage urbain existant, mais crée également des possibilités de se relier aux réseaux de chauffage structurés [77] du territoire suisse voisin, qui alimente également l'aéroport de Genève et les principales installations industrielles et commerciales, ainsi que des bâtiments à usage d'habitation à proximité du site de surface. Un deuxième exemple est le centre de données nouvellement construit sur le site de Prévessin du CERN. La chaleur résiduelle qui y est récupérée couvrira en grande partie les besoins de chauffage sur le domaine du CERN. Un troisième exemple est le projet de récupération de chaleur au point 1 du site de surface LHC du CERN (expérience ATLAS) qui fournira de la chaleur au campus de Meyrin du CERN.

Quelques exemples d'équipements pouvant servir de point de départ à l'étude du caractère fonctionnel de l'intégration de la fourniture et de la récupération de chaleur sont donnés ci-après :

- aimants résistifs (récupération de l'eau de refroidissement à des températures comprises entre 25 et 45 °C) ;
- cavités radiofréquence résistives (température de l'eau de refroidissement comprise entre 25 et 45 °C) ;
- absorbeurs de rayonnement synchrotron (température de l'eau de refroidissement comprise entre 25 et 45 °C) ;
- électronique montée sur baies (refroidissement par eau avec un δT de 20 K et une plage de températures comprise entre 27 et 49 °C sur le circuit extérieur et une plage de températures comprise entre 39 et 60 °C sur le circuit de refroidissement des baies) ;
- amplificateurs radiofréquence de différents types : état solide, klystrons, amplificateurs à IOT avec une température du circuit d'eau de refroidissement comprise entre 25 et 35 °C, présentant une grande stabilité et une faible contrainte de fluctuation de température (selon le cas, aussi réduite que 0,1 °C), etc. Du fait de la conception des klystrons, la température maximale de l'eau au niveau de leur collecteur peut atteindre 63 °C, mais jusqu'à présent, on ne connaît pas d'applications fonctionnant à ce régime ;
- installations de réfrigération cryogénique pour composants supraconducteurs (aimants, cavités radiofréquence, etc.) ; la température de l'eau du circuit de refroidissement des équipements est comprise entre 50 °C (compresseurs) et 75 °C (séparateur d'huile) ;

- électronique de puissance et convertisseurs (température du circuit comprise entre 30 et 60 °C pour les systèmes IGBT refroidis directement par eau, par exemple) ;
- postes de transformation électrique disposant de systèmes de refroidissement par eau dont la température est comprise entre 20 et 70 °C (transformateurs à base d'huile) ;
- centres de données [78] (récupération de 15-20 °C de chaleur dans l'air, 40-50 °C dans les unités CRAH et 50-60 °C dans les systèmes de refroidissement liquide) ;
- systèmes de ventilation et de gestion de l'air (chaleur des moteurs et transfert air-air) entre 25 et 40 °C environ.

L'analyse initiale des équipements et de la charge thermique permettra aux concepteurs de comprendre quels sont les composants qui produisent le plus de chaleur et avec quelles caractéristiques (stabilité, température). Il sera possible d'établir une hiérarchie des composants produisant de la chaleur et ainsi d'orienter le développement du concept de récupération et de fourniture de chaleur. Pour cette première étape, il conviendrait d'effectuer une analyse multicritère utilisant une pondération différente pour chaque aspect. Le processus d'analyse devrait comprendre au minimum la liste, non exhaustive, d'aspects ci-après :

- exigences et contraintes en matière de température de fonctionnement des composants de l'équipement à refroidir et leur tolérance en matière de variation de température ;
- température du potentiel de récupération de chaleur pour les différents équipements à refroidir.
- variabilité et stabilité de la production de chaleur (sur une base horaire, quotidienne, hebdomadaire, mensuelle) ;
- conditions climatiques et météorologiques dans l'environnement de l'infrastructure de recherche (par exemple, pour un accélérateur de particules ou un centre de données, les technologies de récupération et de fourniture de chaleur sont différentes selon que les installations sont exploitées dans une région du nord ou du sud de l'Europe) ;
- cas d'utilisation, au sein de l'infrastructure de recherche, de la chaleur de récupération (préchauffage de l'eau, des bureaux, des ateliers, des salles de réunion, des foyers-hôtels, etc.) ;
- demande des consommateurs de chaleur industrielle en dehors des infrastructures de recherche (industries de production et de transformation alimentaire, bureaux, hôtels, aéroports, centres commerciaux, théâtres, cinémas, centres de congrès, etc.) ;
- demande de chauffage d'espaces et d'établissements publics (écoles et universités, hôpitaux, prisons, gares, etc.) ;
- demande de chauffage d'espaces privés (immeubles d'habitation, maisons individuelles, etc.) ;
- demande de production d'eau chaude (la température requise est supérieure à 55 °C pour des raisons sanitaires et, par conséquent, l'amorçage avec des chaudières à eau et des pompes à chaleur peut être nécessaire au cas par cas) ;
- distances entre le site de production de chaleur et les consommateurs (à noter que des distances allant jusqu'à 10 km sont possibles grâce à la technologie de tuyauterie de pointe pour systèmes de chauffage urbain à basse température fonctionnant aux alentours de 50 °C) ;
- analyse des écarts concernant le besoin de stockage thermique (volume, espace, durée, type de technologie, coûts d'investissement, coûts d'exploitation, etc.) ;
- coûts d'investissement liés à la récupération, au stockage et à la fourniture de chaleur ;
- coûts d'exploitation liés à la récupération, au stockage et à la fourniture de chaleur ;
- dépenses d'investissement et d'exploitation en dehors du système (opérateur du réseau de chauffage

urbain, pompes à chaleur privées et équipement d'amorçage, etc.) ;

- possibilités de cofinancement public ;
- durée et période d'observation envisagées pour la récupération et la fourniture de chaleur ;
- base de référence pour éviter les sources d'énergie fossile pour le chauffage et l'énergie primaire pour le chauffage. Seule l'énergie nécessaire à l'augmentation de la température pour des utilisations finales spécifiques doit être prise en compte ;
- définition de l'interface entre le système de récupération et de fourniture de chaleur qui fait partie de l'infrastructure de recherche et le segment qui ne relève pas de la responsabilité de l'infrastructure de recherche ;
- conditions de l'opérateur de fourniture de chaleur qui fournit l'infrastructure jusqu'au consommateur et qui fournit la chaleur avec des garanties ou des conditions contractuelles qui exigent que le consommateur produise ou obtienne l'écart entre la chaleur fournie et la chaleur requise ;
- type de technologie de fourniture de chaleur proposé (directe, indirecte via une boucle, indirecte via le chauffage du sol, etc.).

Sur la base des conceptions techniques de la phase de développement ultérieure, il est nécessaire de collecter toutes les données et d'identifier les sources de chaleur les plus prometteuses remplissant les conditions requises pour une récupération de chaleur. Les potentiels consommateurs de chaleur doivent être confirmés dans le cadre d'une activité de co-aménagement du territoire. Enfin, afin de mettre au point le scénario de récupération et de fourniture de chaleur, il faudra prendre en compte un certain nombre d'aspects, présentés dans la liste non exhaustive suivante :

- augmentation de la chaleur fournie, grâce à l'assouplissement des exigences de refroidissement des équipements (refroidissement par eau des aimants jusqu'à 50 °C, augmentation de la température de l'air ambiant à l'intérieur de l'installation jusqu'à 40 °C et éventuellement au-delà, etc.) ;
- vérification du fait que les systèmes critiques restent dans les marges de fonctionnement requises (par exemple, l'augmentation de la température de l'eau de refroidissement des klystrons ou l'assouplissement des exigences relatives à leur stabilité thermique peuvent entraîner des performances inacceptables ou rendre l'exploitation impossible) ;
- quantité totale du potentiel de réduction des émissions de CO₂ résultant de l'évitement des combustibles fossiles et de toute énergie primaire, sur la base d'une estimation crédible de l'énergie nécessaire à la préparation de la chaleur destinée aux applications finales ;
- optimisation de la fourniture de chaleur, grâce à l'ajustement du calendrier d'exploitation et à l'instauration de la possibilité de réagir de façon dynamique aux besoins en chaleur ;
- adaptation du calendrier d'exploitation de l'accélérateur de particules à la demande de chaleur de la société, afin d'améliorer les performances socio-économiques globales ;
- coûts énergétiques potentiellement différents pour l'opérateur de l'infrastructure de recherche, après ajustement du calendrier d'exploitation de l'accélérateur de particules ou instauration de la possibilité de réagir de façon dynamique aux contraintes relatives à la fourniture d'électricité et à la demande de chaleur ;
- avantages sociétaux et économiques supplémentaires pouvant être générés par l'apparition de nouveaux consommateurs de chaleur à proximité du site de chaleur fournie (industries agroalimentaires, producteurs agricoles, production de biogaz, bains thermaux, installations de loisirs, etc.) ;
- mise en place de systèmes de stockage thermique temporaires (quotidiens, hebdomadaires, mensuels) ;
- possibilité de recourir à des mécanismes de cofinancement public spécifiques et à des prêts assortis de conditions particulières ;
- optimisation de l'interface entre l'infrastructure de recherche, l'opérateur et les consommateurs de chaleur.

La chaleur récupérée ne sera pas consommée à tout moment et le schéma de consommation évoluera. Il faut donc veiller à ne pas sous-dimensionner les systèmes de refroidissement, de ventilation et d'évaporation destinés à l'infrastructure de recherche. Si la chaleur n'est pas consommée ou ne peut être livrée, il doit être possible de refroidir tous les composants de manière fiable afin d'assurer leur exploitation à des fins de recherche scientifique.

L'analyse technico-économique a permis d'établir les scénarios de fourniture de chaleur résiduelle en fonction de la demande sur la base des trois hypothèses différentes présentées dans le tableau [3.1](#).

Tableau 3.1 : Potentiel de fourniture de chaleur résiduelle en fonction de la demande locale, du scénario d'approvisionnement et du mode d'exploitation

Mode	Potentiel d'approvisionnement minimum	Adaptation du calendrier d'exploitation à la demande	Adaptation à la demande et redistribution entre les sites
Z	223 GWh/an	308 GWh/an	414 GWh/an
WW	239 GWh/an	339 GWh/an	471 GWh/an
HZ	256 GWh/an	371 GWh/an	529 GWh/an
L.S.	60 GWh/an	60 GWh/an	60 GWh/an
t̄ t	296 GWh/an	441 GWh/an	710 GWh/an

Sur la base de ce scénario, il est possible d'estimer le potentiel d'émissions de carbone évitées dans la région en remplaçant la chaleur produite de manière conventionnelle par de la chaleur résiduelle issue en grande partie de sources d'énergie renouvelables. Le tableau [3.2](#) présente les estimations des émissions de carbone évitées, sur la base des hypothèses suivantes : une empreinte carbone moyenne basée sur le marché de 25 tCO₂/GWh d'électricité fournie au FCC ; une moyenne pondérée d'environ 190 tCO₂ par GWh de chaleur conventionnelle produite pouvant être remplacée par de la chaleur résiduelle³. L'empreinte carbone nette évitée grâce à la fourniture de chaleur résiduelle serait donc de 190-25 = 165 tCO₂/GWh. La comparaison entre les émissions de carbone évitables grâce à la fourniture de chaleur résiduelle et la fourchette des émissions de carbone totales de champ 2 liées à l'exploitation du collisionneur, comprise entre 305 000 et 509 000 tCO₂ montre que la fourniture de chaleur résiduelle peut se substituer partiellement aux sources de chaleur conventionnelles au même niveau, générant ainsi des externalités environnementales positives substantielles qui sont mises en évidence dans l'évaluation complète de l'impact socio-économique.

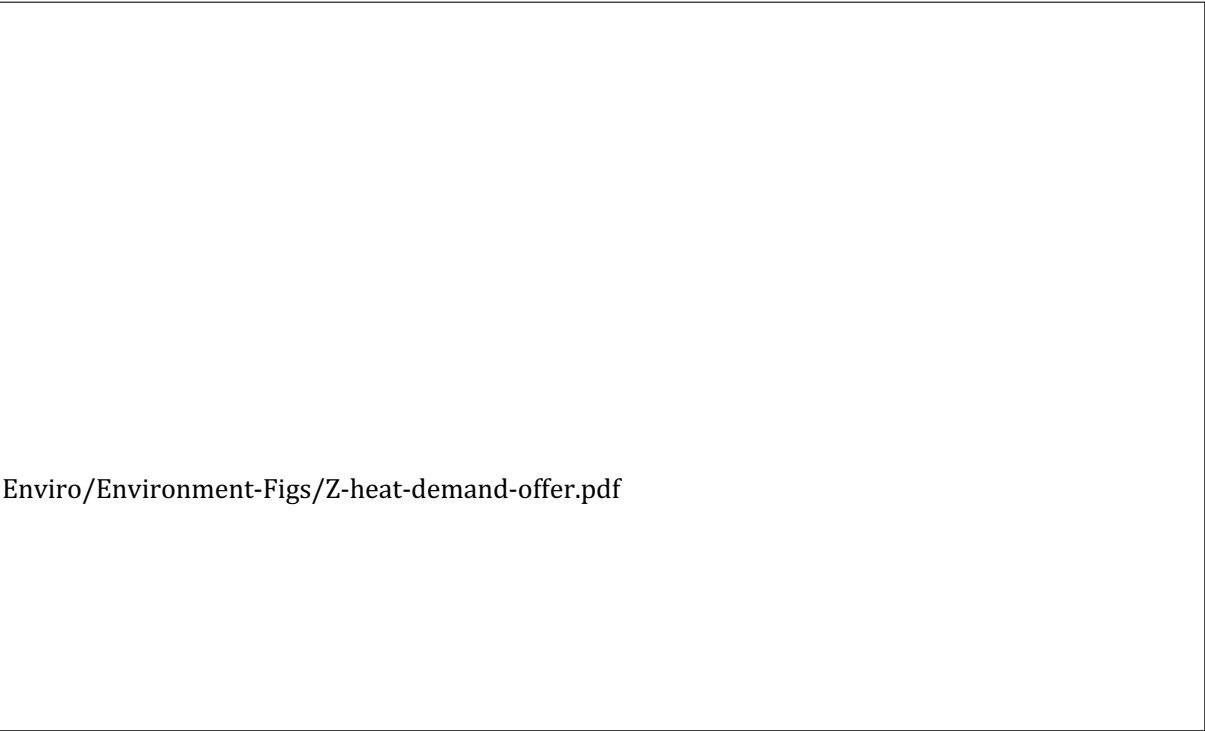
Le scénario « minimal » repose sur l'hypothèse selon laquelle l'exploitation du collisionneur de particules commence en mars et se termine au plus tard en novembre. La figure [3.8](#) montre, à titre d'exemple, l'aperçu hebdomadaire de la demande cumulée de chaleur dans un périmètre de 5 km autour de chaque site de surface.

³Mix régional de production de chaleur : 36 % d'électricité à 147 gCO₂/kWh, 34 % de gaz à 227 gCO₂/kWh, 16 % de pétrole à 324 gCO₂/kWh, 11 % de bois à 30 gCO₂/kWh, 0,3 % de chaleur à 49 gCO₂/kWh, conduisant à une empreinte totale de 186,7 gCO₂/kWh = 186,7 tCO₂/GWh

La figure 3.9 montre la demande et l'offre de chaleur liés au mode d'exploitation Z tout au long de l'année, selon un calendrier mieux adapté à la demande de chaleur.

Tableau 3.2 : Scénario décrivant le potentiel d'évitement des émissions de carbone grâce à la fourniture de chaleur résiduelle, sur la base d'une moyenne de 165 tCO₂ évitées par GWh de chaleur fournie.

Mode	Années	Chaleur fournie/an	Chaleur fournie	CO ₂ évité/an	CO ₂ évité
Z	4	308 GWh/an	1 232 GWh	50 820 tCO ₂ /an	203 280 tCO ₂
WW	2	339 GWh/an	678 GWh	55 935 tCO ₂ /an	111 870 tCO ₂
HZ	3	371 GWh/an	1 113 GWh	61 215 tCO ₂ /an	183 645 tCO ₂
L.S.	1	60 GWh/an	60 GWh	9 900 tCO ₂ /an	9 900 tCO ₂
t̄ t	5	441 GWh/an	2 205 GWh	72 765 CO ₂ /an	363 825 CO ₂
Total			5 288 GWh		872 520 tCO ₂



Enviro/Environment-Figs/Z-heat-demand-offer.pdf

Émissions de champ 2 liées à l'exploitation (pour comparaison, 20 350 GWh à 25 tCO₂/GWh)
508 750 tCO₂

Fig. 3.8 : Demande et fourniture hebdomadaires de chaleur selon un exemple de calendrier basé sur le mode d'exploitation Z

La figure 3.10 montre le site PA à Ferney-Voltaire, à titre d'exemple, pour l'étude de la demande de chaleur qui a permis de développer le concept d'approvisionnement en chaleur.

Plusieurs entités industrielles et publiques consommatrices de chaleur ont été identifiées à proximité de plusieurs sites de surface. Il s'agit par exemple d'un hôpital, d'une école, d'une fromagerie, d'un aéroport, de zones commerciales et de logements sociaux. Il est jugé préférable de fournir de la chaleur à ces consommateurs plutôt qu'à des maisons individuelles, qui sont plus difficiles à raccorder. Les consommateurs publics, industriels et commerciaux ont généralement une demande de chaleur plus élevée et plus stable. Le site PD à Nangy (voir Fig. 3.11), par exemple, pourrait fournir des quantités importantes de chaleur, de l'ordre de 10 GWh/an, à proximité immédiate du site de surface.

L'étude technico-économique a révélé que la fourniture de chaleur résiduelle serait difficile sur le site PH à Cercier et Marlioz, et serait modeste sur les sites PL à Challex et PB à Presinge. Une redistribution de la chaleur de PH à PG, de PL à PA et entre PB et PD pourrait par conséquent être envisagée pour améliorer le rendement.

Le tableau 3.3 donne un aperçu de la demande potentielle totale de chaleur résiduelle qui existe à ce jour dans les périmètres étudiés autour de chaque site.

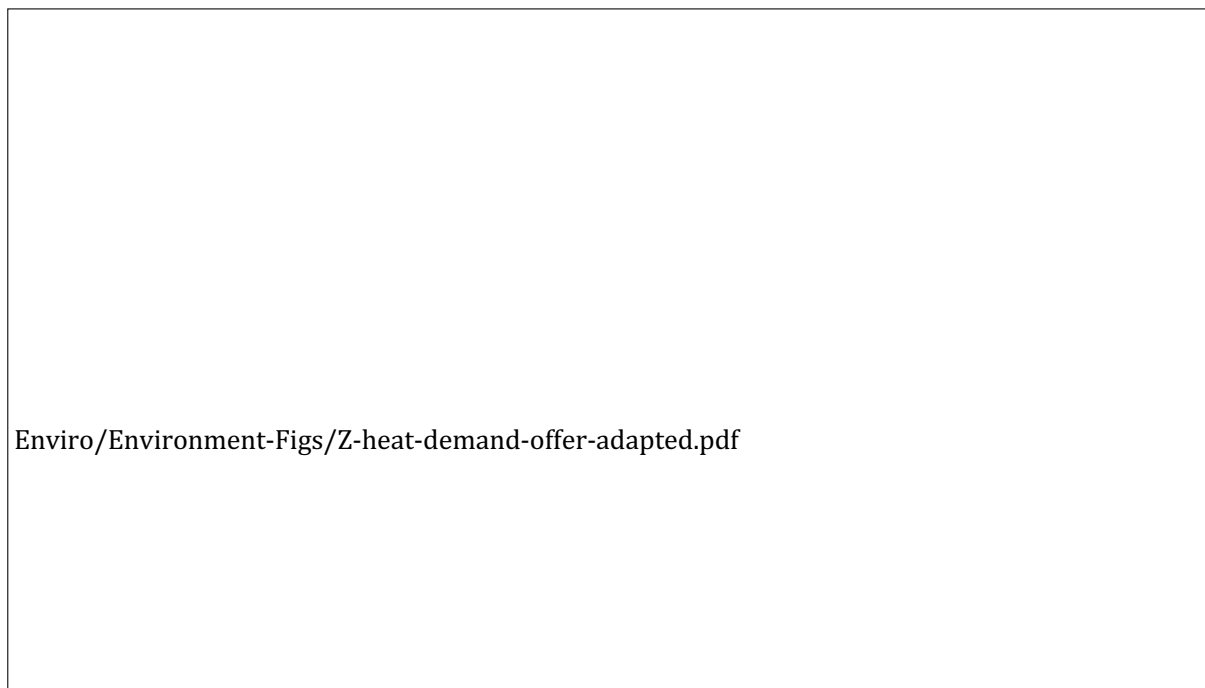


Fig. 3.9 : Demande et fourniture hebdomadaires de chaleur selon un calendrier adapté basé sur le mode d'exploitation Z

La meilleure façon de réutiliser la chaleur résiduelle est de faire émerger de nouveaux consommateurs, tels que des établissements de santé, des bains thermaux, des serres, des installations industrielles et des bâtiments à usage d'habitation qui soient connectés dès le départ au nouveau réseau.

La fourniture de chaleur résiduelle par le FCC génère quatre types d'effets d'aubaine :

1. Un équilibre entre l'empreinte carbone résiduelle non évitable et non réductible de l'énergie électrique : l'alimentation du FCC en électricité (d'après l'hypothèse de travail basée sur l'utilisation d'électricité issue en partie de sources renouvelables) représenterait une empreinte carbone moyenne d'environ 40 000 tCO₂(eq)/an. Le potentiel d'approvisionnement annuel associé à la chaleur résiduelle est d'environ 320 GWh d'énergie par an. La quantité totale maximale de chaleur résiduelle est d'environ 1 600 GWh par an. Par conséquent, la fourniture de chaleur résiduelle peut compenser l'empreinte carbone de l'énergie électrique consommée, à condition que la chaleur puisse être fournie et que la demande puisse être satisfaite via une

infrastructure de distribution de chaleur. L'étude technico-économique [74–76] a montré que 220 GWh à 300 GWh de chaleur pourraient être consommés dans un rayon d'environ 5 km autour des sites de surface. Toutefois, pour accroître l'efficacité de la fourniture de chaleur résiduelle, le programme d'exploitation du collisionneur de particules doit s'adapter aux besoins en chaleur dans des limites acceptables.

2. Une réduction de l'empreinte carbone du chauffage et du refroidissement dans la région : la fourniture d'énergie par un réseau de chaleur utilisant une part importante d'énergies renouvelables (y compris la chaleur résiduelle) permet d'éviter le recours à d'autres sources de chaleur. Sur la base de l'hypothèse de réutilisation minimale (220 – 300 GWh/an), il serait possible d'éviter la production de 27 500 à 38 500 tCO₂(eq) chaque année. Une adaptation raisonnable du calendrier d'exploitation tout au long de l'année serait nécessaire pour exploiter efficacement cette approche.
3. Une augmentation du pouvoir d'achat de la population locale : l'organisation qui gère le FCC n'est pas une organisation à but lucratif. L'énergie peut donc être fournie par des opérateurs de réseau à des prix très compétitifs. Selon la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) française, les installations de valorisation thermique des déchets (qui récupèrent la chaleur des déchets) vendent cette chaleur à un prix très compétitif, compris entre 10 et 25 €/MWh.

Enviro/Environment-Figs/waste-heat-PA.pdf

Fig. 3.10 : Exemple extrait de l'étude de la demande de chaleur concernant le site PA à Ferney-Voltaire, dans un rayon d'environ 5 km autour du site.

La chaleur fournie peut ainsi être privilégiée pour le chauffage, l'eau chaude et le refroidissement. Dans le réseau Anergie à Ferney-Voltaire, le prix de la chaleur résiduelle fournie par les équipements du CERN est encore plus bas. Selon une étude d'AMORCE et de l'ADEME, le prix de vente moyen des réseaux alimentés principalement par des énergies renouvelables et de récupération (EnR&R) était de 78,2 €/MWh TTC en 2020 (ces prix ne prennent pas en compte les coûts d'investissement initiaux des réseaux). Selon l'étude sur la fourniture de chaleur résiduelle réalisée pour ce projet par le bureau d'études Ginger BURGEAP, le prix moyen était au même niveau plus récemment. Sur la base de ce modèle, les économies potentielles sont actuellement estimées à 50 €/MWh par rapport au chauffage au gaz, et à 140 €/MWh par rapport à l'électricité, en prenant comme référence les prix de l'énergie au 1^{er} novembre 2023.

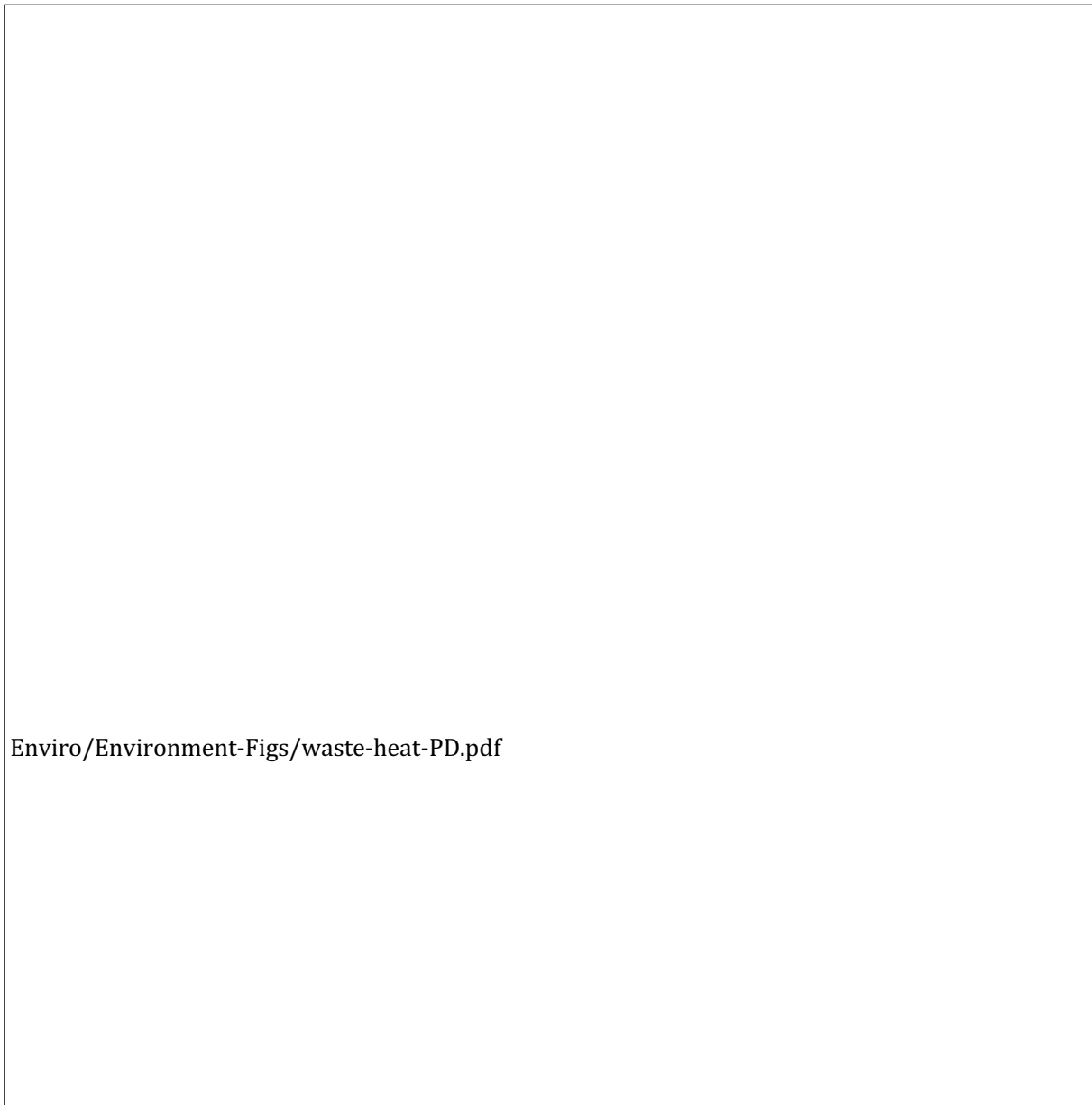
4. Une limitation de la consommation d'eau : la réutilisation de chaleur résiduelle permettrait également de réduire les besoins en eau de refroidissement. Les potentiels sont décrits à la section [3.2.9](#).

3.2.7. Empreinte carbone liée à la construction

Dans un contexte d'intensification de la lutte contre le changement climatique à l'échelle mondiale, la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) est devenue une priorité absolue. Les infrastructures (transport, construction, instruments scientifiques, etc.) jouent un rôle essentiel dans cette transition. L'analyse du budget carbone, dans le cadre d'une analyse du cycle de vie plus complète (voir Fig. [3.12](#)), est devenue un outil essentiel pour mesurer et gérer efficacement ces émissions.

Une analyse complète du cycle de vie conforme aux normes ISO et aux normes européennes applicables, EN 14040 et EN 14044, a été réalisée [60]. Pour le secteur de la construction, c'est la norme EN 17472 qui a été suivie. Outre l'utilisation de bases de données génériques, un scénario d'approvisionnement spécifique a été analysé, sur la base des déclarations environnementales de produits (EPD) actuellement disponibles et conformes à la norme européenne EN 15804+2 et à la fiche de déclaration environnementale et sanitaire (FDES) française.

Ce travail avait d'abord pour objectif d'identifier les facteurs clés à l'origine des impacts sur l'environnement liés à la construction, estimés en termes quantitatifs, et ensuite d'établir un scénario de référence crédible pour le budget carbone, qui servira de base de référence pour les conceptions et optimisations ultérieures.



Enviro/Environment-Figs/waste-heat-PD.pdf

Fig. 3.11 : Exemple extrait de l'étude de la demande de chaleur concernant le site PD à Nangy, concernant un hôpital proche (au sud), un producteur de fromage (au nord) et une zone mixte industrielle/résidentielle (au nord-est)

Il est important de noter qu'une analyse de cycle de vie générique ne peut pas fournir d'indications pertinentes sur l'empreinte carbone, mais consiste simplement à identifier des facteurs. Un scénario de projet spécifique et géolocalisé prévoyant un scénario d'approvisionnement particulier est nécessaire pour pouvoir présenter des estimations absolues et crédibles. La méthodologie adoptée comprend les étapes suivantes :

14. Identification des composants : un inventaire détaillé des matériaux a été dressé, sur la base des devis quantitatifs pour la construction du sous-sol, des quatre sites d'expérience et des sites techniques. Les produits concernés sont utilisés tout au long du cycle de vie de l'infrastructure.
15. Acquisition d'EPD : des EPD ont été obtenues pour chaque matériau et produit identifié, assurant la conformité à la norme EN 15804+A2, qui constitue le fondement de la norme EN 17472. Les matériaux ont été sélectionnés sur la base de connaissances spécialisées de l'environnement local et des produits de pointe.

Tableau 3.3 : Aperçu de la demande potentielle totale de chaleur résiduelle existant à ce jour dans les périmètres étudiés autour de chaque site

Site	Potentiel	Demande	Consommateurs
PA	Forte	200 GWh/an	Écoles, zones commerciales et résidentielles
PA Étendu	Forte	1 700 GWh/an	Extension à la Suisse : aéroport, activités commerciales et industrielles, zones résidentielles, hôpitaux
PB	Moyenn	30 - 200 GWh/an	École, serres, pénitencier, hôpital, activités commerciales, logement
PB Étendu	Élevé	> 200 GWh/an	Demande à des fins commerciales et résidentielles en France, à proximité de la frontière, secteur d'Annemasse
PD PF	Faible Moyen	14 GWh/an 60 GWh/an	Hôpital. industrie Secteur de La Roche-sur-Foron : zones centre d'exposition, écoles
PG industrielles PG Annecy	Faible	16 GWh/an Élevé	écoles, zones résidentielles 860 GWh/an Annecy à une zones industrielles, commerciales, résidentielles
PH distance de 7 km :	Très faible	14 GWh/an	À 8 km de distance : maison de retraite, zones résidentielles
PJ	Faible	20 GWh/an	Écoles, commerces, zones résidentielles

Enviro/Environment-Figs/LCA-construction-stages.pdf

Fig. 3.12 : Étapes envisagées pour l'analyse du cycle de vie de l'infrastructure

La disponibilité des produits a été confirmée par les fournisseurs.

16. Sélection du logiciel : Un outil certifié, ONE CLICK LCA, compatible avec la déclaration environnementale de produit française et suisse, a été choisi, garantissant des calculs robustes et précis.
17. Saisie des données : les données ont été importées dans le logiciel et les données spécifiques au projet ont été saisies, y compris les quantités de matériaux et les phases du cycle de vie, et le transport des matériaux d'excavation et de construction.
18. Calculs : le logiciel a été utilisé pour estimer le budget carbone, en s'appuyant sur les données des déclarations environnementales de produits, afin d'évaluer les émissions de GES pour chaque phase du cycle de vie.
19. Analyse des résultats : les résultats ont été analysés afin d'identifier les principales sources d'émissions et de les comparer aux critères de référence et aux objectifs de réduction.
20. Orientation : les résultats ont été utilisés pour sensibiliser les ingénieurs et les scientifiques à la nécessité d'inclure un bilan carbone comme contribution supplémentaire à la phase de conception ultérieure, et de veiller à ce que les exigences soient bien formulées et justifiées, afin que l'infrastructure corresponde à ce qui est requis, limitant ainsi les impacts sur l'environnement.

L'analyse du cycle de vie présente une répartition des émissions de GES et des potentiels impacts sur l'environnement quantitatifs supplémentaires pour les différentes phases du cycle de vie, les produits et les matériaux. Les principales sources d'émissions sont le béton armé (14 %), le béton préfabriqué (49 %) et le béton (23 %). Il est ainsi possible de mettre en évidence les possibilités de réduire les émissions dans le but de concevoir l'infrastructure dans une perspective de réduction du carbone, en choisissant soigneusement les matériaux, en optimisant le processus de construction et en apportant des améliorations en matière d'efficacité énergétique. L'approche la plus efficace en matière de gestion de l'impact sur l'environnement consiste à définir des exigences techniques pour les infrastructures avec leur justification, à concevoir l'infrastructure sur la base des exigences sans perdre de vue l'objectif de réduction des émissions de carbone, à procéder à une sélection minutieuse des matériaux en accord avec les exigences, à optimiser le processus de construction et à améliorer l'efficacité énergétique. Les impacts sur les GES du scénario initial et du scénario de référence sont présentés dans le Tableau 3.4.

Tableau 3.4 : Empreinte carbone de référence pour la construction de l'infrastructure du FCC sur une période de dix ans, sur la base de scénarios spécifiques de sélection des fournisseurs et d'approvisionnement basés sur des EPD

Élément	Empreinte carbone
Sites souterrains	477 388 tCO ₂ (eq)
4 sites techniques	17 600 tCO ₂ (eq)
4 sites d'expérience	31 200 tCO ₂ (eq)
Total	526 188 tCO ₂ (eq)

L'empreinte carbone de la construction sur une période de dix ans, estimée à 526 188 tCO₂(eq), peut être comparée à l'empreinte carbone annuelle actuelle du CERN (184 173 tCO₂(eq)) [79]. La construction correspond ainsi à environ trois ans de l'empreinte annuelle du CERN, soit environ 30 % de l'empreinte carbone annuelle du CERN par année de construction. L'empreinte carbone de la construction du FCC peut également être comparée à celle des Jeux olympiques de Paris, dont le budget carbone était estimé à 1 580 000 tCO₂(eq) [80].

En comparaison avec des projets de construction classiques, l'empreinte carbone d'une infrastructure de recherche est nettement inférieure (voir Fig. [3.13](#)) à celle d'une petite ligne de métro ou de tramway. Par exemple, la construction de la ligne de métro U5 à Berlin, en Allemagne, a engendré une empreinte carbone de 98 000 tCO₂(eq) par km [81]. En moyenne, l'empreinte carbone d'une ligne de transport souterraine est de 80 000 tCO₂(eq) par km. La construction d'une ligne de tramway a une empreinte carbone comprise entre 600 et 10 850 tCO₂(eq) par km.

Sur la base de l'analyse du cycle de vie, un certain nombre de recommandations ont été formulées avec l'aide de l'entreprise spécialisée qui a réalisé l'analyse.

Même si l'empreinte carbone annuelle du CERN sera progressivement réduite, conformément aux objectifs environnementaux fixés, aux plans nationaux de protection du climat et aux recommandations du GIEC, il serait souhaitable de limiter l'ajout des impacts sur le climat occasionnés par la construction au budget carbone lié à l'exploitation. Par conséquent, pendant la construction d'une nouvelle installation, il serait prudent de réduire les activités liées à de fortes intensités de carbone. En ce qui concerne la construction, les stratégies suivantes pourraient contribuer à réduire davantage les impacts potentiels : – mise en œuvre d'une méthodologie d'ingénierie des systèmes approfondie visant à formuler des exigences techniques justifiées et entièrement documentées pour les éléments structurels souterrains et de surface. Ces exigences correspondent au strict minimum requis pour mener à bien le programme de recherche scientifique (par exemple, en déterminant la taille et le volume précis des structures qui répondent aux besoins techniques et physiques essentiels).

Enviro/Environment-Figs/Linear-carbon-footprint-comparison.pdf

Fig. 3.13 : Comparaison de l'empreinte carbone liée à la construction par km du tunnel FCC aux structures linéaires types des transports publics [60]

- mise en œuvre d'une approche d'écoconception dans le processus global d'ingénierie des systèmes afin de réduire les émissions de carbone et de répondre aux spécifications établies (par exemple, le dimensionnement adéquat des cavernes, des puits et des alcôves) ;
- modification structurelle du scénario, en réduisant d'au moins 5 cm l'épaisseur du revêtement des structures souterraines, ce qui entraînerait une réduction de 16 % des quantités de béton préfabriqué et d'acier d'armature ;
- substitution de matériaux, en envisageant des matériaux à faible impact qui répondent aux spécifications établies et en travaillant avec des partenaires industriels afin d'innover et de produire autant que possible de façon locale ;
- optimisation du processus de construction, afin de limiter les émissions ;
- réutilisation des matériaux excavés, par exemple pour la production de béton.

Par rapport au scénario de base initial, le fait d'avoir ramené la circonférence à environ 91 km et d'avoir supprimé 4 puits a entraîné une réduction significative de l'empreinte carbone liée à la construction au cours de la phase de développement du scénario. En outre, pour appréhender l'empreinte carbone, il convient de tenir compte du contexte, à savoir la mise en place d'une infrastructure destinée à une communauté mondiale d'environ 15 000 scientifiques et prévue pour abriter deux collisionneurs de particules successifs jusqu'à la fin du siècle. Bien que, selon les normes internationales, les quantités rapportées par l'ACV doivent être entièrement comptabilisées uniquement pour la première phase du projet (FCC-ee), elles peuvent être considérées comme un investissement profitable à la seconde phase, celle du collisionneur d'hadrons de haute énergie (FCC-hh).

3.2.8. Empreinte carbone liée à l'exploitation

Détecteurs

Si l'empreinte carbone des installations de recherche scientifique actuelles, telles que le LHC et ses expériences, est largement due aux gaz utilisés dans les détecteurs, cette cause n'aura plus qu'une pertinence

marginale à l'ère du FCC : les gaz ayant des effets importants sur le climat sont déjà interdits et la liste de ces produits s'allonge rapidement.

Les gaz utilisés aujourd'hui seront en grande partie indisponibles d'ici 2050, lorsque le premier collisionneur entrera en phase d'exploitation. Les performances et l'exploitation à long terme des détecteurs en milieu gazeux dépendent principalement de l'utilisation d'un mélange gazeux optimal, qui est le milieu actif où se produit l'ionisation primaire dans le détecteur. Plusieurs technologies de détecteurs en milieu gazeux utilisent des mélanges comportant des gaz coûteux ou à effet de serre, qui possèdent des propriétés spécifiques permettant d'optimiser les performances des détecteurs et d'éviter les effets du vieillissement. Les gaz à effet de serre les plus utilisés sont le $C_2H_2F_4$ (connu sous le nom de R134a et présentant un potentiel de réchauffement global ou PRG de 1 430) et le SF_6 (PRG de 23 900), pour les chambres à plaques résistives, le C_4F_{10} (PRG de 8 860), pour les détecteurs Tchénkov, et le CF_4 (PRP de 7 390), pour les chambres à fils, les détecteurs Tchénkov et les détecteurs gazeux à micropistes (MPGD). Ces gaz sont nécessaires pour atténuer les phénomènes de vieillissement, pour servir de radiateur Tchénkov et pour contenir le développement de charges (grâce à leurs propriétés électrostatiques) ou améliorer la résolution temporelle.

Le volume des détecteurs peut aller de quelques m^3 à des centaines de m^3 , ce qui rend obligatoire l'utilisation de systèmes de recirculation des gaz pour réduire les coûts d'exploitation et les émissions de GES. Même quand ces systèmes sont utilisés, des émissions peuvent parfois être présentes, principalement en raison des spécifications des détecteurs ou de la présence de fuites. Les fuites résiduelles sont principalement dues à des défaillances de tubes et de connecteurs en plastique, qui se brisent en raison de leur fragilité intrinsèque et des contraintes mécaniques. Ces fuites ne sont pas accessibles pendant les périodes d'exploitation et, dans certains cas, pendant les arrêts techniques réguliers. De grandes campagnes de recherche et de réparation des fuites ont généralement lieu pendant les périodes de long arrêt, mais des fuites continuent généralement à apparaître.

Pour réduire les émissions, la stratégie actuelle [82] repose sur trois axes :

- **La recirculation des gaz.** Le mélange de gaz est prélevé à la sortie des détecteurs, purifié et renvoyé vers les détecteurs. Il est techniquement possible de recycler 100 % du mélange de gaz.
- **La récupération des gaz.** Le mélange de gaz est envoyé dans une usine de récupération où les GES sont extraits, stockés et réutilisés. Ce système est toujours utilisé en combinaison avec un système de recirculation des gaz, pour permettre une réduction supplémentaire des émissions de GES.
- **La recherche de gaz alternatifs.** On recherche des mélanges de gaz alternatifs convenant aux détecteurs de particules et ne comportant pas ou peu de GES.

La substitution des gaz fluorés (gaz F) est indispensable, en raison de l'application en Europe du règlement sur les gaz fluorés, qui rendra ces substances indisponibles d'ici 2050. En outre, en 2023, l'Agence européenne des produits chimiques (ECHA) a publié une proposition de restriction des PFAS, c'est-à-dire des substances per- et polyfluoroalkylées, qui contiennent au moins un atome de carbone méthyle (CF_3 -) ou méthylène ($-CF_2$ -) entièrement fluoré (sans aucun H/Cl/Br/I attaché à cet atome). La proposition concerne plus de 10 000 PFAS différents, qui sont considérés comme des polluants environnementaux liés à des effets nocifs sur la santé. La plupart des gaz prétendent « respectueux de l'environnement » appartiennent à la famille des PFAS.

En outre, les dispositifs et circuits utilisant des gaz pour le refroidissement ou la détection de particules doivent être conçus de manière à être étanches et à utiliser un principe de recirculation.

Scope 2

L'empreinte carbone sera principalement due à l'utilisation d'électricité.

La même approche sera adoptée pour optimiser l'utilisation de toutes les autres ressources, telles que l'énergie électrique. L'adoption de la séquence « Éviter-Réduire-Compenser » (par ordre de hiérarchie) oriente le cycle itératif de planification, de mise en œuvre, de vérification et d'action qui permet une optimisation continue.

Un processus complet de collecte des spécifications techniques doit être mis en place afin d'évaluer où et quand l'énergie électrique est nécessaire. En suivant un scénario de référence, l'écoconception permet

d'élaborer des concepts et de choisir des produits permettant de réduire la consommation d'énergie. Un examen du modèle d'exploitation, guidé par des objectifs globaux de durabilité intégrant les aspects économiques, écologiques et sociétaux, orientera l'élaboration de différents scénarios. Certaines mesures nécessitent une nouvelle itération du cycle d'écoconception, avec l'introduction de nouvelles exigences qui encouragent le

développement durable, concernant notamment l'intégration d'une fonctionnalité de récupération et de fourniture de la chaleur résiduelle. Cela permet, par exemple, de remplacer l'énergie fossile utilisée à l'intérieur comme à l'extérieur du projet ; des contraintes supplémentaires peuvent toutefois apparaître, telles que des coûts d'investissement et d'exploitation supplémentaires, des spécifications en matière de comptabilité financière et écologique, ainsi que la nécessité de stocker l'énergie, d'adapter l'exploitation de façon dynamique et d'établir des cadres administratifs et commerciaux pour assurer une mise en œuvre optimale du projet.

Tableau 3.5 : Exemples de sources d'électricité ayant une empreinte carbone officiellement connue.

Pays	Source	Énergie	Empreinte carbone	
			gCO ₂ /kWh	Année
			tCO ₂ /GWh	
France	Base Empreinte de l'ADEME	Éolien en mer	15,6	2023
France	Base Empreinte de l'ADEME	Mix énergétique indéterminé	52,0	2022
Allemagne	Umweltbundesamt (UBA) ⁴	Mix énergétique indéterminé	380,0	2023
Italie	ISPRA	Mix énergétique indéterminé	257,2	2022
Suisse	BAFU/OFEV ⁵	Mix énergétique indéterminé	54,7	2018
Suisse	BAFU/OFEV	Mix d'énergies renouvelables	15,7	2018

Tous les critères ESG pertinents doivent être pris en compte ; il est donc recommandé de faire appel à des entreprises expérimentées pour l'optimisation énergétique globale des infrastructures.

Pour déterminer l'empreinte carbone de l'électricité consommée lors des phases de conception et de planification, il convient d'utiliser les valeurs nationales officielles pour l'année de référence choisie dans l'analyse de durabilité. Par conséquent, l'empreinte carbone dépend de la technologie utilisée (éolien en mer, éolien terrestre, photovoltaïque, hydraulique, nucléaire) et du lieu géographique de production d'énergie. Même si toute l'électricité est acheminée au FCC par le réseau électrique français, exploité par RTE, cela ne signifie pas que l'électricité doive provenir uniquement du territoire français. Des études menées avec des spécialistes du domaine [51] ont montré qu'un portefeuille complet de contrats d'approvisionnement en énergie ou de contrats d'achat d'électricité sera établi dans les meilleures conditions avec un délai suffisant (de l'ordre de dix ans). Ce portefeuille doit pouvoir répondre à l'évolution des besoins liés aux phases de mise en service et d'exploitation. Afin d'encourager l'utilisation de sources d'énergie renouvelables et de tirer parti de la fonctionnalité de fourniture de chaleur résiduelle, le collisionneur de particules devra s'adapter aux conditions des contrats d'approvisionnement en énergie, qui seront établies en fonction des conditions commerciales, d'une part, et de la disponibilité des énergies renouvelables, d'autre part.

Selon le pays d'origine, l'intensité en carbone de l'électricité est établie par différentes sources. Le tableau [3.5](#) en donne une illustration.

Une fois qu'un contrat spécifique d'achat d'électricité est en place, les émissions seront comptabilisées à l'aide des informations sur les émissions données par le fournisseur. Par exemple, un contrat d'électricité axé sur le consommateur et basé entièrement sur des sources d'énergie renouvelables (62 % d'hydroélectricité, 31 %

d'énergie éolienne et 7 % d'énergie photovoltaïque ; 100 % certifiées sources d'énergie renouvelables) en France, à l'heure actuelle, présente une empreinte carbone effective de 34 kgCO₂(eq)/MWh [83]. Cette valeur est supérieure au facteur d'émission, à utiliser pour les phases de planification et de conception, indiqué par l'ADEME pour les sources d'énergie renouvelables, étant donné que la consommation d'électricité dans le cadre d'un contrat en cours comprend toutes les émissions générées tout au long de la chaîne de valeur et pas seulement celles liées à la production. En outre, les énergies renouvelables provenant potentiellement de contrats d'achat d'électricité physiques ne sont pas prises en compte dans l'empreinte carbone.

Différentes hypothèses ont été retenues pour estimer l'empreinte carbone du champ d'application 2 liée à l'exploitation. L'une d'entre elles est basée sur le mix énergétique actuel, qui comprend l'énergie nucléaire et des sources d'énergie renouvelables, dont la contribution est variable (jusqu'à 75 %) et qui présente une empreinte carbone de 24 gCO₂/kWh. Cette configuration génère une empreinte carbone indirecte annuelle moyenne d'environ 500 000 tCO₂, soit approximativement 35 000 tCO₂ par an en fonction du portefeuille de contrats d'achat d'électricité basé sur des énergies renouvelables⁶.

⁶20 900 GWh * 24 tCO₂(eq)/Gwh = 501 600 tCO₂(eq).

Tableau 3.6 : Hypothèse de mix énergétique présentant l’empreinte carbone la plus faible, utilisée pour estimer l'empreinte carbone dans le cadre d’une exploitation à l'horizon 2050. Les chiffres de l'intensité carbone ont été obtenus à partir de la base de données Base Empreinte 2023 de l’ADEME.

Source d'énergie	Contribution	Intensité carbone
Nucléaire	10 %	3,7 gCO ₂ (eq)/kWh
Éolien en mer	55 %	15,6 gCO ₂ (eq)/kWh
Éolien terrestre	10 %	14,1 gCO ₂ (eq)/kWh
Photovoltaïque	15 %	25,2 gCO ₂ (eq)/kWh
Hydraulique	10 %	6,0 gCO ₂ (eq)/kWh
Total	100 %	14,74 gCO₂(eq)/kWh

L'estimation de référence optimiste s'appuie sur un mix énergétique basé sur un portefeuille de contrats d'achat d'électricité et de contrats d'approvisionnement en énergie physiques et non physiques à l'horizon 2050, provenant entièrement du territoire français, sur le réseau national exploité par RTE (voir tableau 3.6). Avec ce mix, on estime l'empreinte carbone totale⁷ à environ 300 000 tCO₂(eq) pour l'ensemble de la période de recherche scientifique sur 15 ans, soit une moyenne annuelle d'environ 20 500 tCO₂(eq). En se basant sur une estimation pessimiste de 25 tCO₂(eq)/GWh, on obtient une empreinte carbone de 522 500 tCO₂(eq), soit une moyenne annuelle d'environ 34 800 tCO₂(eq).

L'empreinte carbone résiduelle peut en principe être compensée par la fourniture de chaleur résiduelle. En fonction de la quantité de chaleur résiduelle réutilisée, il est possible d'envisager un scénario d'exploitation neutre en carbone après 2050. Un tel scénario nécessite l'élaboration minutieuse de contrats d'approvisionnement en énergie et/ou de contrats d'achat d'électricité à long terme et la création de réseaux de chauffage urbain et de fourniture de chaleur industrielle, et une adaptation de l'exploitation de l'accélérateur à la fourniture d'énergie et à la demande de chaleur. L'intégration d'un stockage thermique temporaire aidera à atteindre l'objectif fixé.

3.2.9. Utilisation de l'eau et économies d'eau

L'eau potable provenant des réseaux de distribution locaux existants ne sera utilisée que pour la boisson et à des fins sanitaires. Toute l'eau brute nécessaire aux systèmes de refroidissement industriels proviendra de l'approvisionnement en eau existant (SIG) du CERN en Suisse, qui puise l'eau du Léman.

D'un point de vue quantitatif, le scénario de référence relatif à la consommation d'eau est réalisable sur les plans technique, financier et territorial, étant donné que les prélèvements et la consommation d'eau représentent des quantités inférieures à la consommation effective du CERN en 2022. La disponibilité d'un approvisionnement représentant le double des besoins totaux a été confirmée par les SIG en 2023.

Pendant la phase de conception ultérieure, il sera nécessaire de vérifier les aspects relatifs au partage d'eau avec les autres acteurs locaux utilisant les mêmes sources, notamment en ce qui concerne les bassins versants connexes qui connaissent actuellement des déficits chroniques (le pays de Gex, La Roche-sur-Foron et éventuellement les Usses). De nombreuses synergies peuvent être envisagées avec les autorités locales à proximité des sites de surface en termes de réutilisation de la chaleur résiduelle et des eaux usées.

Par conséquent, une étude a été lancée récemment pour déterminer s'il est faisable d'utiliser l'eau d'une station d'épuration proche du site PD à Nangy (STEP SRB à Scientrier ; voir tableau 3.7), et de quelle

manière. Les premiers résultats sont prometteurs, mais nécessitent toutefois une réduction du contenu non soluble dans l'eau et un traitement efficace des bactéries. Une telle installation devra faire l'objet d'une démonstration. Si sa viabilité est démontrée, l'installation pourra conduire à une réduction substantielle de la quantité d'eau brute utilisée et contribuer à fournir de l'eau traitée à d'autres usages industriels, lorsque l'accélérateur de particules n'en a pas besoin.

$$^{7}20\,900\text{ GWh} * 14,74\text{ tCO}_2(\text{eq})/\text{GWh} = 308\,066\text{ tCO}_2(\text{eq}).$$

Tableau 3.7 : Aperçu des besoins en eau brute pour le refroidissement en fonction de chaque mode d'exploitation, des possibilités de réutilisation des eaux usées pour les sites PD, PF et PG et de l'eau traitée résiduelle pouvant être mise à la disposition du public

Mode	Années	Besoin initial du FCC en eau	Eaux usées utilisées par les sites PD, PF, PG	Besoins en eau résiduelle	Eaux usées traitées mises à disposition de la société
Z	4	1 604 861 m ³ /an	560 304 m ³ /an	1 044 557 m ³ /an	2 049 792 m ³ /an
WW	2	1 928 943 m ³ /an	619 017 m ³ /an	1 309 927 m ³ /an	1 991 080 m ³ /an
ZH	3	2 165 458 m ³ /an	705 173 m ³ /an	1 460 285 m ³ /an	1 904 924 m ³ /an
L.S.	1	163 817 m ³ /an	78 840 m ³ /an	977 m ³ /an	2 531 256 m ³ /an
t ⁻ t	5	3 077 591 m ³ /an	897 334 m ³ /an	2 180 258 m ³ /an	1 712 763 m ³ /an

L'analyse préliminaire a été réalisée sur la base de l'eau fournie à la station d'épuration au cours d'une année type et d'une hypothèse prévoyant une capacité de traitement allant jusqu'à 400 m³/h. Bien qu'une station d'épuration soit, en principe, capable de fournir plus d'eau que nécessaire pour le refroidissement du collisionneur de particules, il est prudent de partir du principe que l'eau traitée est mélangée à de l'eau brute ordinaire, qu'elle n'est pas toujours conforme aux besoins et que le traitement n'est pas toujours totalement efficace ou disponible. La Figure 3.14 donne une idée de l'exploitation annuelle type de la station d'épuration de Scientrier, à proximité du site PD, et de la manière dont la récupération des eaux usées répondrait aux besoins de refroidissement du collisionneur dans le cadre du mode d'exploitation Z, à titre d'exemple.



Fig. 3.14 : Exploitation de la STEP de Scientrier tout au long d'une année type, en fonction des besoins de refroidissement de l'eau dans le cadre du mode d'exploitation Z du FCC et des quantités mises à la disposition du FCC et de la société grâce au traitement de l'eau

Il convient de noter qu'en fin de compte, la faisabilité de cette approche et les capacités effectives dépendent des conceptions techniques et de la possibilité de mettre en œuvre le concept en coopération avec les parties prenantes nationales, régionales et locales en France.

En outre, la récupération et la fourniture de chaleur résiduelle permettraient de réduire la consommation d'eau, car la quantité de chaleur ayant besoin d'être dissipée dans les tours d'évaporation serait moindre. Le potentiel de réduction estimé dans l'étude d'ingénierie spécifique était d'environ 1,6 m³ d'eau par MWh de chaleur résiduelle fournie. Le tableau 3.8 présente les économies potentielles d'eau de refroidissement en fonction de chaque mode de fonctionnement et de l'un des trois scénarios d'approvisionnement en chaleur résiduelle :

Scénario 1 : la chaleur est distribuée dans un rayon de 5 km sans adaptation du calendrier. Cela signifie que l'exploitation du FCC aurait lieu d'avril à septembre, lorsque les besoins de chauffage sont faibles.

Scénario 2 : la chaleur est distribuée dans un rayon de 5 km selon un calendrier adapté. Cela signifie que l'exploitation du FCC aurait lieu d'octobre à mars, lorsque les besoins en chauffage sont élevés.

Scénario 3 : la chaleur est distribuée dans un rayon de 5 km selon un calendrier et une distribution adaptée. Cela signifie que l'exploitation du FCC aurait lieu d'octobre à mars, lorsque la demande de chauffage est la plus forte, et que la chaleur serait distribuée dans les zones où la demande est plus forte que dans le scénario 2.

Tableau 3.8 : Potentiel d'économie d'eau lié à la fourniture de chaleur résiduelle (scénario 2, adaptation de l'exploitation du collisionneur à la demande saisonnière)

Mode	Années	Chaleur fournie	Eau économisée
Z	4	308 GWh/an	477 000 m ³ /an
WW	2	339 GWh/an	523 000 m ³ /an
HZ	3	371 GWh/an	571 000 m ³ /an
L.S.	1	60 GWh/an	96 000 m ³ /an
t ⁻ t	5	441 GWh/an	678 000 m ³ /an
Total		5 288 GWh	8 155 200 m³

Les économies d'eau se traduiraient également par une réduction modeste des coûts d'exploitation, de l'ordre de 6 millions de francs suisses. Bien qu'il ne s'agisse pas d'une contribution notable à la durabilité financière, les économies d'électricité, de 4 GWh par an, soit environ 60 GWh au total, représenteraient une valeur supplémentaire de 5 millions de francs suisses, ce qui compenserait sur les plans économique et financier l'effort supplémentaire nécessaire à l'exploitation du système de récupération de chaleur résiduelle.

3.2.10. Trafic routier induit

Pour estimer le surcroît de trafic induit par les activités de construction, une analyse du trafic a été réalisée en utilisant des données actualisées sur le trafic dans des périmètres de 5 km environ autour des sites de surface et en comparant différents camions standard utilisés pour la construction (Fig. [3.15](#)). En s'appuyant sur cette analyse (Fig. [3.16](#)) et sur le scénario hypothétique le plus défavorable, dans lequel tous les matériaux doivent être transportés par camions sur les routes, on remarque que le surcroît de trafic induit par le projet, réparti sur neuf sites de construction et sur plus de huit ans, n'est que marginal (tableau [3.9](#)). On suppose que le trafic est limité aux jours ouvrables et aux heures de travail habituelles, en dehors des heures de pointe du matin et du soir.

La conception ultérieure du projet mettra l'accent sur la réduction des besoins en transport routier. Le trafic pourrait être encore réduit par l'utilisation de camions plus grands (2+3 essieux ou 3+2 essieux). Le meilleur moyen d'acheminer les matériaux excavés vers les grands réseaux de transport routier et ferroviaire consiste à utiliser des bandes transporteuses, qui n'induisent aucun trafic local. Dans la mesure du possible, les matériaux de construction sont acheminés par autoroute jusqu'au raccordement au site ou par les grands axes routiers afin d'éviter de traverser des zones résidentielles.

Le trafic induit pendant les cinq années d'installation des équipements de l'accélérateur de particules est faible. Il est de l'ordre de 9 à 18 camions par site et par jour, soit entre 1 et 2 camions par heure de travail. Aucun trafic n'est prévu pendant la nuit et les jours non ouvrables. Ce trafic limité, pendant l'installation, s'explique par la capacité de transfert limitée des équipements par les puits d'accès. La vitesse de manutention entre la surface et le sous-sol et dans l'environnement souterrain contraignant détermine la quantité d'équipements pouvant être acheminée.

Implementation/Implementation-Figs/truck_capacities.pdf

Fig. 3.15 : Volume et charge transportables par différents camions standard comparés dans l'analyse du surcroît de trafic routier induit par le chantier de construction

Enviro/Environment-Figs/traffic_study.pdf

Fig. 3.16 : Périmètres des études du trafic pour chaque chantier de construction. Les lignes en gras indiquent le trafic enregistré sur les principaux axes de transport.

On estime à 200-300 le nombre de personnes par jour présentes sur les sites expérimentaux et à environ 100 le nombre de personnes présentes sur les sites techniques (voir tableau [3.10](#)). Cela se traduit par un trafic journalier lié au travail de l'ordre de 100 à 200 véhicules. Ce trafic pourrait être considérablement réduit en organisant le travail et en offrant la possibilité de faire du covoiturage et de prendre le bus.

Pendant les périodes d'exploitation, on s'attend à ce que la présence de personnel sur les sites techniques soit réduite au minimum, en fonction des besoins du système, ce qui se traduit par un impact négligeable sur le trafic. Pour les sites expérimentaux, le scénario de dotation en personnel le plus élevé prévoit de petites équipes comptant jusqu'à 20 personnes travaillant en trois équipes. Le transport doit être organisé de manière à limiter les déplacements quotidiens de véhicules à quelques dizaines de voitures entrant et sortant de chaque site.

Tableau 3.9 : Scénario le plus défavorable concernant le transport de matériaux excavés pendant la période de construction, dans lequel ne sont utilisés que des camions. Le trafic peut varier en fonction des différents scénarios d'excavation, entraînant une diminution du trafic à PL et PB et une augmentation du trafic à PA

Site	Trafic journalier	Nombre de camions 5 essieux supplémentaires par jour	Surcroît de trafic en pourcentage	Nombre de camions 5 essieux supplémentaires par heure
PA	7803	46	0,5 %	4
PB	5918	37	0,6 %	3
PD	20 475	93	0,4 %	8
PF	11 331	12	0,1 %	1

Le trafic lié aux visites sur les sites PA, PD, PG et PJ pourrait cependant être sensiblement plus élevé.

Tableau 3.10 : Nombre de personnes sur le site à différentes périodes d'activité

Site	Installation - 5 ans	Fonctionnement 10 mois par an	Maintenance 2 mois par an	Arrêt - à quelques années d'intervalle
PA, PD, PG, PJ	200 - 300 personnes	15 à 20 personnes	100 personnes	200 - 300 personnes
PB, PD, PH, PL	100 personnes	0 à 10 personnes	15 - 30 personnes	Jusqu'à 100 personnes

3.2.11. Surveillance de l'environnement

Un système de surveillance de l'environnement sera mis en place dès que la nouvelle infrastructure de recherche sera entièrement construite. Un tel système permettra de suivre le respect des objectifs initialement fixés et de garantir la sécurité de l'exploitation. Un tel système comprend généralement les fonctionnalités suivantes :

- Surveillance des eaux claires : les stations de mesure des eaux usées intègrent un contrôle continu de la température, du pH, des hydrocarbures, de la mousse, de la turbidité, de la conductivité et du débit. Des alarmes sont déclenchées en fonction des seuils et des tendances. Lorsqu'un site de surface est équipé d'installations de rétention d'eau, des moniteurs supplémentaires seront installés pour activer la rétention en cas de besoin.
- Surveillance des eaux usées : les stations de mesure intègrent un contrôle continu de la température, du pH, de la conductivité et du débit de l'eau rejetée dans le réseau public d'assainissement. Des échantillonnages périodiques sont également effectués.
- Échantillonnage des eaux de traitement : ces stations servent à prélever périodiquement des échantillons d'effluents résiduels de procédés, tels que le recyclage et le traitement de l'eau.

- Surveillance de la qualité de l'air : ces stations surveillent en permanence l'air, y compris les oxydes (oxydes d'azote et ozone) qui peuvent être des sous-produits du fonctionnement du synchrotron. Ces systèmes sont couplés à des fonctions de recyclage de l'air. Une comparaison continue avec les conditions atmosphériques de fond existantes sera effectuée.
- Surveillance du bruit : ces stations mesurent et enregistrent en continu les niveaux de bruit sur les sites de surface et dans les zones sensibles situées à proximité.
- Surveillance météorologique : ces stations sont équipées d'anémomètres et de pluviomètres destinés à évaluer les risques liés aux substances potentiellement radioactives et aux fumées en cas d'incendie. Une coopération avec les services météorologiques nationaux sera envisagée pour l'échange de données.
- Surveillance radiologique : surveillance des paramètres radiologiques pendant et après l'exploitation afin d'apporter la preuve du respect des contraintes et des limites de dose. Le système comprend des équipements de surveillance sur site pour la sécurité des travailleurs et de surveillance sur site et hors site pour l'environnement.

Outre les installations fixes de surveillance de l'environnement, des dispositifs portables supplémentaires seront utilisés pour la surveillance périodique sur le terrain. Des échantillons d'eau, de sol et de plantes seront régulièrement analysés par des laboratoires environnementaux.

3.3. État actuel de l'environnement

3.3.1. Méthodologie

L'état actuel de l'environnement dans le périmètre du scénario de mise en œuvre de référence et sur les sites de surface candidats a été analysé conformément aux réglementations nationales des deux États hôtes, la France et la Suisse. Le rapport unique et intégré établi à la suite de cette analyse [30], et complété par des cartes interactives, des documents audio, des images et des vidéos, ainsi que par un système d'information environnementale fondé sur le système d'information géographique ESRI, constitue un travail préparatoire essentiel pour le processus ultérieur d'autorisation environnementale, qui doit inclure une évaluation de l'impact sur l'environnement dans un contexte transnational. Ce travail a été réalisé entre 2023 et 2025 avec un consortium d'entreprises expertes. La section suivante donne un aperçu de la portée du travail effectué et fournit les conclusions de base. L'état initial de l'environnement n'est valable que pour une période limitée, car l'environnement évolue constamment. Par conséquent, d'autres études complémentaires (par exemple, des études hydrogéologiques, des études complémentaires sur la faune et la flore, des mesures environnementales plus complètes) et des études sur d'autres sites potentiels doivent être entreprises au cours d'une phase ultérieure d'évaluation de l'impact sur l'environnement.

3.3.2. Air et climat

Climat

Les conditions climatiques et leur évolution probable doivent être prises en compte dans le cadre d'un programme à long terme tel que le FCC, qui s'étendra jusqu'à la fin du siècle. L'analyse de l'état de l'environnement comprend la collecte de données climatiques provenant de sources bibliographiques et des installations d'observation du climat situées à Genève, en Suisse, et à Annecy, en France. Malgré la distance limitée (de l'ordre de 30 km) qui sépare les sites du FCC les plus éloignés, les conditions climatiques sont notablement différentes. Le nord est caractérisé par un climat subcontinental avec des étés chauds, mais des conditions météorologiques modérées grâce à l'effet protecteur des montagnes et de l'effet modérateur de la masse d'eau du Léman. Le sud connaît un climat continental montagnard présentant des différences de conditions météorologiques et de température plus importantes entre l'été et l'hiver. Les vents sont relativement constants dans toutes les régions. L'évolution du climat génère une anomalie de température continue et évolutive, comprise entre +1,7° et +2,5°C par rapport à la période préindustrielle. Le nombre de jours de gel a diminué de 20 % depuis 1950. Les précipitations sont très variables, sans changement notable

au cours de la période considérée. Les chaleurs extrêmes en période estivale devraient continuer à s'intensifier jusqu'à la fin du siècle. Elles s'accompagnent généralement de périodes de sécheresse produisant des effets sur les sols, et la quantité de précipitations devrait diminuer. Les pluies devraient s'intensifier pendant les périodes humides.

Ces dernières années, la température des lacs a augmenté en raison du changement climatique. Depuis 1980, la surface de la plupart des lacs s'est réchauffée d'environ 0,4°C par décennie. Le réchauffement des eaux profondes est plus variable et se situe principalement entre 0,0 et 0,2°C par décennie pour les lacs profonds. On prévoit une nouvelle augmentation de la température de la couche d'eau de surface jusqu'à 1 m de profondeur dans tous les lacs suisses : pour un scénario sans atténuation du changement climatique, cette augmentation serait de l'ordre de 3 à 4°C dans la plupart des lacs d'ici la fin du siècle. Aux profondeurs où se fait la prise d'eau brute, la température de l'eau ne devrait augmenter que légèrement.

Toutefois, l'évolution des conditions climatiques ne devrait pas avoir d'effets notables sur le collisionneur de particules, notamment les systèmes de refroidissement par eau. Néanmoins, le FCC doit tenir compte de l'évolution du climat dans sa conception et dans l'élaboration d'un concept d'exploitation. Dans le cas où la température augmenterait en moyenne de 4°C environ jusqu'à la fin du siècle, ces étapes concernent en particulier l'adoption de conditions d'exploitation permettant un travail efficace (par exemple, en évitant les périodes trop chaudes) et l'augmentation des bénéfices liés au projet de réutilisation de la chaleur résiduelle, à la fois en interne et dans la région (par exemple, en déplaçant l'exploitation vers une saison plus froide).

Enviro/Environment-Figs/Photo_AirMeasurements_Point11pm.pdf

Fig. 3.17 : Mesures de la qualité de l'air réalisées à l'aide d'équipements de surveillance servant à évaluer les polluants atmosphériques à proximité du site de surface.

Air

L'air dans le périmètre du FFC est généralement bon, et sa qualité s'améliore constamment. La principale cause de pollution de l'air est le trafic routier, en particulier les camions à moteur diesel. Les particules fines sont principalement générées par le secteur agricole et l'industrie, en particulier la construction et les carrières. Tous les polluants atmosphériques types ont été étudiés et des mesures de la qualité de l'air ont été réalisées afin d'établir des niveaux de référence à proximité des sites de surface. Ces niveaux de référence constituent un apport précieux pour l'élaboration du processus de construction et pour la conception des infrastructures, en vue d'assurer de manière adéquate la protection de la qualité de l'air et la réalisation de l'objectif « zéro pollution » de l'Union européenne à l'horizon 2050. Si le projet est poursuivi, une surveillance continue de l'air devra être mise en place sur les sites de surface afin de suivre son évolution et de pouvoir contrôler les impacts sur la qualité de l'air liés aux phases de construction et d'exploitation.

Plans de protection du climat

La France a réduit ses émissions de 27 % par rapport à 1990, ce qui correspond à la réduction moyenne des émissions en Europe, de l'ordre de 31 %. L'empreinte par habitant en 2022 était d'environ 6,5 tCO₂(eq) par an [84], une valeur inférieure à la moyenne de l'Union européenne établie à 8 tonnes métriques par habitant. Si les secteurs de l'énergie et de l'industrie ont pu réduire considérablement leur empreinte, le secteur des transports n'a pas encore connu les mêmes améliorations. Les émissions liées aux transports ont même légèrement augmenté. Cette situation se reflète également à l'échelle régionale, le secteur des transports restant le principal producteur d'émissions de gaz à effet de serre. La France a adopté l'Accord de Paris de 2015 visant à réduire les émissions nettes de 55 % par rapport à 1990 d'ici 2030 et à atteindre la neutralité climatique d'ici 2050. À l'échelle locale, les objectifs de protection du climat peuvent varier. Par exemple, pour le pays de Gex, à proximité du CERN, les objectifs fixés sont de -66 % d'ici 2050 par rapport à l'année 2015. Pour le Grand Annecy, les objectifs sont de -55 % d'ici 2030 et de -87 % d'ici 2050.

En Suisse, les émissions de gaz à effet de serre n'ont cessé de diminuer depuis 2010. Les transports, l'agriculture et l'industrie restent les principales sources d'émissions. À partir de 2025, deux lois imposeront des obligations : la loi sur le CO₂ et la loi sur le climat et l'innovation. L'objectif fixé est une réduction de 60 % des émissions de gaz à effet de serre d'ici 2030 par rapport à 1990. L'objectif à long terme pour le pays est d'atteindre la neutralité carbone nette d'ici 2050. À l'échelle cantonale, un plan opérationnel de protection du climat a également été mis en place. Il fixe des objectifs et 41 mesures spécifiques à mettre en œuvre d'ici 2030. Les objectifs de réduction des émissions sont conformes aux valeurs établies au niveau fédéral.

Résumé et conclusions

La planification, la construction et l'exploitation d'une future infrastructure de recherche au CERN tiennent compte des plans et des réglementations qui ont été établis au niveau national pour atteindre les objectifs de l'Accord de Paris. Les aspects liés à l'énergie et aux émissions de gaz à effet de serre sont pris en compte conformément aux politiques actuelles établies par le CERN, visant à maintenir l'énergie nécessaire à ses activités à un niveau aussi bas que possible, tout en veillant à ce que les objectifs de son programme de recherche puissent être atteints. Il s'agit notamment d'améliorer en permanence l'efficacité énergétique du Laboratoire, de récupérer et de fournir de la chaleur résiduelle et de réduire les émissions de gaz à effet de serre. Le CERN s'efforce de démontrer que des mesures appropriées sont prises en matière d'énergie et d'émissions de gaz à effet de serre à toutes les phases d'une future infrastructure de recherche, conformément aux plans et aux réglementations établis par les États hôtes.

Fin 2019, le CERN s'est fixé pour objectif de réduire ses émissions directes de CO₂ de 28 % par rapport aux niveaux de 2018 (année de référence) d'ici la fin de la troisième période d'exploitation du LHC (vers 2026). Cet objectif est mis en évidence depuis septembre 2020 dans les rapports publics du CERN sur l'environnement qui sont publiés tous les deux ans. Récemment, le CERN a adopté un objectif de réduction de ses émissions directes de CO₂ de 50 % d'ici 2030 par rapport à 2018 ([85]). Le CERN rend compte également des émissions indirectes liées à la consommation d'électricité et les autres types d'émissions, telles que celles liées aux achats, et ces données sont publiées. Les objectifs de réduction associés sont à l'étude.

Si une nouvelle infrastructure de recherche est approuvée et prise en compte dans la gestion globale des performances environnementales du CERN, les plans et objectifs de réduction des émissions, y compris celles de la nouvelle infrastructure de recherche, seront fixés en fonction de l'enveloppe de mesures actualisées correspondante.

Enviro/Environment-Figs/Photo_AirMeasurements_Point10-cropped.pdf

Fig. 3.18 : Mesures de la qualité de l'air effectuées pour évaluer les polluants atmosphériques à proximité du site de surface

L'intégration d'une nouvelle infrastructure de recherche dans l'environnement du CERN générera des émissions supplémentaires, que l'organisation s'efforcera de limiter, en tenant compte des objectifs fixés en termes de performance pour la recherche scientifique. Une approche rigoureuse d'écoconception appliquée aux activités de construction, aux infrastructures techniques, aux accélérateurs de particules et aux détecteurs sera adoptée à l'échelle de l'organisation, et sera exigée de l'ensemble de la collaboration internationale contribuant au projet, afin que les contributions en nature soient conformes aux règles et réglementations environnementales pertinentes.

Le collisionneur de particules proposé ne sera pas exploité en même temps que le LHC. Par conséquent, les émissions générées par l'exploitation du nouveau collisionneur et de ses expériences remplaceront celles liées à l'exploitation du LHC. Le nouveau collisionneur et ses expériences s'appuieront sur des technologies beaucoup plus avancées et grâce à l'écoconception, cette infrastructure de recherche engendrera des émissions inférieures à celles du LHC.

Parallèlement aux efforts continus visant à moderniser, sur le plan technologique, d'autres installations de recherche et activités du CERN, il est possible de soutenir efficacement les efforts déployés par les États hôtes pour atteindre leurs objectifs en matière de protection du climat.

Dans le cadre de la procédure d'autorisation environnementale, un plan de protection du climat intégrant le nouveau projet devrait être compris dans l'évaluation de l'impact environnemental.

3.3.3. Eau

Contexte

La situation des eaux de surface et souterraines dans le périmètre du scénario a été analysée à partir de données bibliographiques, de bases de données, de cartes et de rapports. Sur ce sujet, les cadres juridiques en France et en Suisse sont très différents, ce qui rend difficiles la comparaison et l'intégration des données. En France sont appliquées les définitions et directives de l'Union européenne, mais en Suisse, il existe différents cadres de protection de l'eau à l'échelle fédérale et cantonale. L'état actuel de l'eau doit donc être étudié séparément pour chacun des deux pays. En outre, les nappes phréatiques souterraines doivent être distinguées des eaux de surface. Cependant, ces deux types de masses d'eau, souterraines et superficielles, s'étendent au-delà des frontières nationales, ce qui soulèvera des questions transfrontalières dans le cadre de l'analyse ultérieure des aspects environnementaux potentiels : effets et impacts qui devront être pris en compte pendant la phase préparatoire du projet.

Eaux souterraines

France

En ce qui concerne les eaux souterraines, cinq masses d'eau distinctes ont été identifiées. FRDG517 s'étend de Gex à travers le bassin genevois jusqu'à la Grande Côte de Bonmont et la région des Ussets. FRDG208, située sous FRDG517, s'étend du Jura jusqu'au lac et vers la région des Ussets dans une géologie calcaire. FRDG231 se situe au nord du Genevois français, en partie sous FRDG517, en partie circonscrit comme un cours d'eau entre le Rhône et Divonne-les-Bains, touchant la frontière suisse à la hauteur de Versoix. FRDG511 se situe dans la région alpine de la Savoie, au sud de FRDG517. FRDG364, correspondant à la vallée de l'Arve, passe à environ 100 m du site PD à Nangy.

En ce qui concerne la législation européenne, l'objectif fixé consiste à maintenir le niveau de qualité atteint en 2015, dit « bon état », pour toutes les masses d'eau. Ce niveau doit être maintenu à la fois en termes de qualité et de quantité.

Des aquifères existent en relation avec ces masses d'eau. À l'exception du périmètre d'implantation, ils sont « libres », c'est-à-dire qu'il n'y a pas de couche imperméable entre eux et la surface. Aucune des entités hydrogéologiques n'est caractérisée par un aquifère.

Compte tenu des niveaux de qualité à préserver et des interactions potentielles entre les masses d'eau, des mesures de protection particulières ont été mises en place et devront être respectées lors des travaux souterrains.

Suisse

En Suisse, on distingue différents types d'aquifères en fonction de leur quantité d'eau et de leur profondeur. Des aquifères profonds peuvent également se situer dans la couche de molasse, dans laquelle les tunnels seraient construits en priorité. À ce jour, quatre nappes phréatiques sont identifiées dans le canton de Genève, dont deux sont utilisées pour l'alimentation en eau potable : celles de l'Allondon et du Genevois. Les nappes de Montfleury et du Rhône font actuellement l'objet d'études de quantité et de qualité visant à déterminer si elles pourraient être utilisées pour l'alimentation en eau potable. À ce jour, les couches profondes ne sont pas cartographiées ; des études souterraines spécifiques sont donc nécessaires en vue d'un projet de futur collisionneur de particules. Une multitude d'aquifères peu profonds et temporaires, situés entre 2 et 10 m de profondeur, sont répartis sur l'ensemble du canton. Ils doivent être analysés aux emplacements où des puits et des sites de surface sont prévus. L'une d'entre elles se situe à une distance d'environ 140 m du site PB à Presinge, à 2 m de profondeur. Aucun effet mutuel potentiel n'a pu être déterminé.

Un autre aquifère se trouve à environ 90 m du site PA, en France. La nappe de Montfleury, à environ 45 m de profondeur, se situe à 800 m au sud du site principal. Un aquifère superficiel se situe directement au niveau du site de surface PL à Challex, en France. Il s'étend au niveau de la frontière ; aucune information n'est disponible à son sujet. Les sites PL et PA nécessitent une analyse particulière afin que ces aquifères soient pris en compte dans le choix de l'emplacement du puits et de la technique de construction utilisée. Concernant les sites PL, PA et PB, il est nécessaire de prendre en compte les couches d'eau potentielles à proximité des sites de surface et les questions transfrontalières associées.

Surface

France

Quatre masses d'eau de surface principales se situent dans un rayon de 1 km autour des sites de surface. Trois d'entre elles (FRDR11960, FRDR559, FRDR537) sont en bon état ; la dernière (FRDR555c) présente une qualité moyenne : l'objectif est qu'elle atteigne une bonne qualité d'ici 2033.

Enviro/Environment-Figs/maquette-hydro.pdf

Fig. 3.19 : Vue d'ensemble des masses d'eau de surface et souterraines dans le périmètre du scénario. Dans ce schéma conceptuel, il est supposé que les structures souterraines se situent à 250 m d'altitude. Les nappes phréatiques, dont la profondeur est incertaine, sont indiquées en gris. L'emplacement et l'altitude des sites de surface sont également indiqués.

Le site PF d'Éteaux se situe à proximité d'un cours d'eau (50 à 100 m). Le site PH se trouve également à proximité d'un petit ruisseau (30 m). D'autres sites, comme PD (à 600 m de l'Arve) et PG (à 300 m de la Fillière), sont plus éloignés des cours d'eau.

Suisse

Le Léman, en Suisse, est le plan d'eau de surface le plus important. Il se situe à 4 km des sites PA et PB. Le site PB se situe à proximité d'un petit ruisseau (30 m).

Résumé

Le tracé projeté au niveau du sous-sol dans le scénario d'implantation croise l'emplacement géographique de nombreuses masses d'eau souterraines. Le tunnel sera toutefois situé nettement plus en profondeur que ces masses (voir Fig. 3.19). Aucune prise d'eau dans un quelconque aquifère n'est prévue pendant la construction et l'exploitation du FCC. L'eau potable sera acheminée via des raccordements au réseau d'eau potable existant. L'eau brute utilisée à des fins de refroidissement sera prélevée dans le réseau d'approvisionnement en eau du CERN en Suisse, qui puise l'eau du Léman. Les zones de protection de l'eau potable sont largement évitées pour l'ensemble du projet, de sorte que tout effet négatif potentiel peut être exclu.

La plupart des couches souterraines ne sont pas situées sous une couche étanche ; elles présentent donc un risque de pollution. En outre, les couches de molasse peuvent comprendre des cavités contenant de l'eau. Par conséquent, des études hydrogéologiques spécifiques seront menées afin d'optimiser l'emplacement des puits, de façon à éviter les effets négatifs potentiels sur les aquifères dans les zones PA (Ferney-Voltaire, en France), à 35 m de distance d'une zone d'interdiction de forage (secteur B, en Suisse), et PL (Challex, en France). Il faudra faire particulièrement attention à éviter d'affecter les ruisseaux avoisinants et la biodiversité autour des sites PB (Presinge, en Suisse) et PH (Cercier et Marlioz, en France). Le site PH se situant en outre dans une zone sujette à un manque d'eau chronique, les travaux souterrains, tels que la création d'un puits, feront, dès la conception, l'objet de mesures de protection adaptées, au cas où ils risqueraient d'affecter des cavités contenant de l'eau.

En ce qui concerne les rejets d'eau dans l'environnement, en particulier dans les ruisseaux avoisinants, la conception de l'infrastructure comprendra des processus de filtrage et de nettoyage avant tout rejet. Le raccordement aux réseaux d'eaux usées permettra de s'assurer que toutes les autres eaux sont rejetées via l'infrastructure de traitement des eaux existante, en veillant continuellement à respecter les cadres juridiques et réglementaires des deux États hôtes.

Enviro/Environment-Figs/3d-relief-small.pdf

Fig. 3.20 : Relief de la zone où s'inscrit le scénario de référence du FCC

3.3.4. Eaux souterraines

Secours

Le périmètre du FCC est limité par des montagnes importantes (voir Fig. 3.20). Le Jura s'étend au nord et à l'ouest du Léman, avec des sommets atteignant 1 720 m. Le sud-est se caractérise par le plateau des Bornes, qui laisse place aux Préalpes, puis au Mont Blanc, de 4 806 m d'altitude. L'ouest est limité par la montagne de Vuache, qui s'élève à 1 112 m. Le Salève, de 1 379 m d'altitude, se situe au centre du tracé circulaire du FCC. La chaîne des Aravis se situe immédiatement au sud des sites PD, PF et PG. Le Mont-Sion (785 m) se situe entre la chaîne du Vuache et le Salève. Au sud, le tunnel passe sous le massif de la Mandallaz (923 m), également appelé massif de Balme, qui fait partie des Préalpes. Le massif du Chablais se situe au nord-est du Léman et à l'est des sites PB et PD. Malgré la présence de nombreuses chaînes de montagnes et de sommets, tous les sites de surface se situent sur des terrains moins en altitude (entre 400 et 700 m), dans des zones plates.

Topographie

Le site PA se situe à environ 425 m d'altitude, dans une zone ouverte présentant une très légère pente d'environ 2 à 5 %. Le site PB se situe à environ 430 m d'altitude, sur une zone plane et dégagée. Des collines s'élèvent à quelques kilomètres au nord. Le site PD, à environ 460 m d'altitude, est situé sur une pente d'environ 5 % en direction du nord. La zone est vallonnée dans toutes les directions, mais le terrain est coupé par des voies de communication importantes (autoroute A40, route départementale D903). L'absence de buissons et de haies rend le terrain visible.

Enviro/Environment-Figs/Profil_topo_geology_bassin_geneve.pdf

Fig. 3.21 : Profil géologique du bassin de Genève, illustrant les unités stratigraphiques, les caractéristiques tectoniques et les formations sédimentaires qui façonnent la région

Le site PF atteint des altitudes comprises entre 730 et 745 m sur une pente ouest-est d'environ 7 %. La zone est donc très visible depuis les montagnes et depuis la RD1203, mais pas depuis l'autoroute A410. Le site PG est séparé de l'autoroute A410, au nord, par une forêt située sur une pente légère nord-sud et ouest-est de 5 %, à environ 600 m d'altitude. En limite sud, la pente commence à devenir forte - de 25 à 40 % en direction de la RD1203 (route d'Annecy). Cette zone est évitée. Le site PH se situe sur une pente de 10 à 20 %, à une altitude comprise entre 517 et 591 m, en contrebas de la RD203. L'ensemble de la zone est couvert par une forêt s'étendant en direction de la vallée des Usses, à l'ouest. Du fait de la topographie, il est nécessaire d'adopter un aménagement en terrasses pour la construction du site. Le site PJ se situe sur une pente large et longue de 6 %, à une altitude comprise entre 496 et 532 m, qui part de l'autoroute A40 et descend dans la vallée du Rhône. Cet emplacement nécessite également un aménagement en terrasses. Des alignements d'arbres situés aux environs viennent rompre l'uniformité de l'espace et de la pente. Le site PL se situe à 500 m d'altitude, sur un terrain plutôt plat. Du fait de l'absence de haies ou d'arbres importants dans les environs, le terrain est très visible. Il s'abaisse fortement en direction de la vallée du Rhône, de l'autre côté de la voie d'accès à la Suisse qui passe à proximité.

Géologie

La géologie est abordée plus en détail dans les sections consacrées au génie civil, car c'est elle qui détermine l'emplacement des travaux souterrains. Dans la présente section, un aperçu général permettra de situer le contexte. Le paysage géologique du bassin de Genève s'étend du Jura, au nord-ouest, aux Préalpes, au sud-est, avec un bassin molassique tertiaire recouvrant des formations crétacées. Façonné par les glaciations du Quaternaire, le bassin comprend des vallées profondes et des dépôts sédimentaires pouvant atteindre 400 m d'épaisseur, en particulier dans le Grand-Lac, avec les sédiments holocènes variant au gré des courants fluviaux. Dans le delta du Rhône, les sédiments holocènes dépassent 100 m d'épaisseur. Le bassin comprend trois unités géologiques principales : les roches sédimentaires du Jura, au nord-ouest, les grès (molasse) du Tertiaire, au centre, et la molasse des unités préalpines, au sud-est.

Le département de l'Ain s'étend sur deux domaines géographiques et géologiques très différents : à l'ouest, les grandes plaines de la Bresse et de la Dombes, une faille tectonique remplie de dépôts

tertiaires ; à l'est, le massif du Jura, marquant la limite sud-ouest de la plaine molassique suisse. Le département est en outre couvert par trois grandes unités géologiques : la Bresse et la Dombes, y compris la Côtère et une partie du Val de Saône ; le Bugey et la partie sud du Revermont ; et enfin le pays de Gex. Le pays de Gex, où sont situés les sites PA et PL, présente des formations calcaires montagneuses (Jurassique moyen et supérieur, Crétacé inférieur) avec des systèmes karstiques, bordées de failles et de dépôts glaciaires. De même, les sites de surface PD, PF, PG, PH, PJ, en Haute-Savoie, en France, et PB, en Suisse, s'inscrivent dans le bassin molassique, avec des caractéristiques géologiques diverses : des massifs alpins cristallins aux bassins molassiques sédimentaires comme le plateau des Bornes. Ces dépôts de molasse, formés par l'érosion alpine au cours de l'Oligocène et du Miocène, varient en épaisseur, et leur tectonique est influencée par le soulèvement alpin. Les formations géologiques où sont situées les différents sites de surface sont présentées dans le tableau [3.11](#).

Tableau 3.11 : Formations géologiques présentes sur les sites de surface.

Site	Dépôts	Composition des matériaux
PA	Glacio-lacustres würmiens	Argiles litées et limons
PB	Morainiques	Argiles, limons et sables
PD	Glacio-lacustres	Argiles et limons
PF	Morainiques würmiens à post-würmiens	Limons, sables, galets, graviers, avec présence localisées d'argiles
PG	Morainiques würmiens	Argiles, sables, galets, cailloux et blocs
PH	Morainiques würmiens à post-würmiens	Argiles, sables, galets, cailloux et blocs
PJ	Morainiques würmiens à post-würmiens (ou colluvions)	Limons, sables, galets, graviers, avec présence localisée d'argiles
PL	Morainique würmienne	Cailloux, graviers, sables et calcaire avec présence localisée d'argiles

Sol

Des études de terrain relatives aux sols ont été réalisées en juillet 2023, pour le site PD, et en avril 2024, pour les sites PA, PB, PF, PG, PH, PJ et PL. L'objectif principal était d'analyser les caractéristiques pédologiques du sol de ces sites, afin de déterminer s'ils sont adaptés aux activités agricoles et à d'autres utilisations potentielles.

Le processus a consisté à identifier et décrire la végétation et les cultures existantes, ainsi qu'à évaluer les facteurs ayant un impact sur la productivité agricole, tels que l'accessibilité, la topographie, les zones non cultivables, les zones humides et les infrastructures d'irrigation. Des échantillons de sol ont été prélevés à l'aide de tarières manuelles jusqu'à une profondeur de 120 cm, afin d'examiner les différentes couches de sol, les éléments grossiers et les traces d'engorgement. Le nombre d'échantillons par site a été déterminé en fonction de la taille des parcelles et de la diversité des sols, afin d'assurer une représentation adéquate. Au total, 48 échantillons ont été prélevés sur les huit sites.

Le site PA est dominé par des sols limoneux profonds (néoluvisols) à faible teneur en éléments grossiers, bien que les zones proches des routes présentent des sols moins profonds et plus rocheux.

Sur le site PB, l'horizon de surface est composé de sols argileux et limoneux présentant de faibles quantités d'éléments grossiers ; des signes de pseudogley apparaissent toutefois dans les couches plus profondes.

Enviro/Environment-Figs/Photo_SoilInvestigations_Auger_PD.pdf

Fig. 3.22 : La méthode de forage à la tarière utilisée pour prélever des échantillons de sol à différentes profondeurs

Le site PD est caractérisé par des sols limoneux profonds, sains et bien drainés, présentant peu d'éléments grossiers dans tout le profil du sol et une hydromorphie limitée. Le sol profond, fertile et facilement mécanisable est bien adapté à l'agriculture.

Sur le site PF, la couche superficielle est constituée de néoluvisols limoneux à faible teneur en cailloux, tandis que l'accumulation d'argile commence à une profondeur d'environ 70 cm. Ces caractéristiques sont adaptées aux prairies permanentes.

Les études réalisées sur le site PG et ses annexes montrent que le sol actuel ne correspond pas au sol

enregistré dans la base de données française Gis Sol. Le sol du site principal de PG est profond, homogène, de texture argileuse à argilo-limoneuse, avec de faibles quantités d'éléments grossiers et des traces temporaires d'hydromorphie. Les sites annexes présentent des sols plus légers et pulvérulents, modérément profonds et de texture argilo-limoneuse.

Le site PH est situé sur des sols profonds de type brunisol, avec des caractéristiques de redoxisol, où d'importantes caractéristiques hydromorphiques sont apparentes près de la surface, indiquant un drainage limité. L'étude confirme que les prairies permanentes sur une petite partie du site de surface PH correspondent à la couverture du sol répertoriée dans la base de données.

Le site PJ se caractérise par des sols argilo-limoneux profonds présentant peu d'éléments grossiers. Des caractéristiques d'hydromorphie modérée sont visibles près de la surface, avec des traces de calcaire altéré au-delà de 70 cm. La zone est adaptée aux prairies permanentes et temporaires.

Le site PL, à la frontière avec la Suisse, présente principalement des calcosols, avec des zones de colluviosols dans les régions plus au sud. Les sols varient de superficiels à profonds, les éléments grossiers étant plus fréquents dans les zones superficielles. Les caractéristiques hydromorphiques sont moins prononcées et les sols sont généralement adaptés à l'agriculture.

Enviro/Environment-Figs/Photo_SoilInvestigations_soil_PD.pdf

Fig. 3.23 : Échantillon de sol obtenu par la méthode de forage à la tarière

Dans l'ensemble, la plupart des sites de surface reposent sur des sols profonds contenant peu d'éléments grossiers, signe d'un bon potentiel agricole, bien que leur tendance à l'hydromorphie et le manque de drainage à certains endroits puissent limiter leur usage agricole. Des analyses de laboratoire supplémentaires relatives au sol sont en cours, afin d'évaluer la qualité de celui-ci, selon la présence de divers éléments minéraux et de leur disponibilité pour les plantes, ainsi que de contaminants potentiels.

Résumé

En ce qui concerne uniquement le relief et la topographie, le site PH à Cercier et Marlioz présente des difficultés importantes, en raison de la pente de la forêt. Le site PJ à Dingy-en-Vuache et Vulbens est également situé sur une pente, mais il s'agit d'une zone ouverte, nettement moins pentue et bien accessible. Les sites PA, PB et PL, situés dans des zones très ouvertes et plates, doivent faire l'objet d'une intégration soignée, pour des questions de visibilité et de covisibilité. Les sites PD et PF ne présentent pas de difficultés particulières, bien qu'une bonne intégration paysagère soit conseillée afin de réduire la visibilité et se fondre dans le terrain. Sur le site PG, il faut veiller à éviter la pente raide qui mène à la route d'Annecy.

Le contexte géologique de la zone d'étude met en évidence la diversité des formations présentes sur l'ensemble du territoire genevois et des départements de l'Ain et de la Haute-Savoie. Le bassin présente des dépôts sédimentaires influencés par les glaciations quaternaires, notamment d'épais sédiments holocènes dans le delta du Rhône et le Grand-Lac. Les sites sont situés sur différentes unités géologiques : le pays de Gex (formations calcaires avec des systèmes karstiques) et des bassins molassiques (formés par l'érosion alpine), présentant différents matériaux, y compris des argiles glacio-lacustres, des sables morainiques, des graviers et

des limons. Ces variations soulignent l'histoire géologique complexe de la région, élément essentiel à prendre en compte pour le placement des ouvrages souterrains et la gestion des matériaux excavés.

Les études pédologiques ont confirmé la diversité des caractéristiques des sols : on trouve ainsi des sols limoneux bien drainés, profonds et fertiles, mais aussi des sols aux profils hydromorphiques et argileux, présentant une capacité de drainage limitée. Les sites tels que PD et PL sont bien adaptés à l'agriculture, en raison de leurs sols profonds, fertiles et facilement mécanisables. Les sites PA, PB, PF et PJ présentent des degrés variables d'hydromorphie, en particulier dans les couches plus profondes, ce qui les rend mieux adaptés aux prairies ou aux pratiques agricoles sélectives. PH et PG présentent des contraintes hydromorphiques, notamment, concernant PH, des problèmes prononcés de rétention des eaux de surface, en raison de l'altération de son sous-sol calcaire. Les variations de texture, de profondeur et de teneur en éléments grossiers reflètent l'influence de la géologie locale et de la façon dont les terres ont été utilisées au cours de l'histoire.

3.3.5. Biodiversité

Enviro/Environment-Figs/Photo_Biodiversity_FieryClearwingMoth_Plant_PD.pdf

Fig. 3.24 : Sésie de l'Oseille (*Pyropteron chrysidiformis*) se nourrissant d'une plante.

La notion de biodiversité englobe la diversité des espèces, des écosystèmes, des habitats et des processus écologiques. Elle comprend à la fois les environnements naturels et les environnements modifiés par l'homme, qui créent ensemble les conditions nécessaires à l'existence et au fonctionnement de divers organismes. Les différentes espèces présentes dans les espaces naturels ne sont pas confinées dans ces

espaces, mais s'étendent sur des corridors faunistiques et des zones présentant une cohérence écologique, qui comprennent les espèces terrestres et aquatiques, à savoir les plantes, les insectes, les mammifères, les amphibiens et les reptiles, considérés comme un ensemble.

Dans le but d'évaluer les impacts potentiels sur la biodiversité, la situation actuelle a été analysée pour tous les sites de surface candidats, d'abord en utilisant des informations bibliographiques : par exemple, l'étude des zones de protection aux niveaux régional, national et international, ainsi que des inventaires du patrimoine naturel, des corridors écologiques et de leurs prolongements. Ensuite, des études de terrain ont été réalisées par de nombreux spécialistes sur une période de plus d'un an, couvrant les quatre saisons. Elles ont servi non seulement à confirmer et à compléter les informations bibliographiques existantes, mais aussi à établir une base de référence destinée à l'approche « éviter-réduire-compenser », à l'optimisation des sites et à l'évaluation ultérieure de l'impact sur l'environnement. Ces études ne se sont pas limitées aux périmètres des sites de surface. Elles ont été étendues à un périmètre de plusieurs centaines de mètres, en fonction de la topographie ; la zone en dehors des périmètres des sites a toutefois été étudiée de manière moins détaillée. Un périmètre étendu, couvrant jusqu'à 5 km, a été analysé à un niveau élevé à l'aide des bases de données existantes et du matériel cartographique.

Le site PA à Ferney-Voltaire se situe à proximité de zones de protection de la nature et de zones humides, ainsi que de forêts servant de corridors transfrontaliers pour les animaux. Des zones de reproduction des amphibiens ont été relevées dans le périmètre étendu, du côté suisse. Les forêts servent également de refuge aux oiseaux migrateurs. À proximité du site PB à Presinge se trouvent des zones de protection de la nature et des zones humides, y compris des zones de reproduction des amphibiens, et, à une certaine distance, une zone de protection des oiseaux migrateurs. À proximité du site PD, situé dans la

région de l'Arve, se trouve une zone de protection de la nature. Des zones de protection de la nature et des corridors écologiques ont été identifiés à proximité du site PF à Éteaux. À proximité du site PG à Groisy et à Charvonnex se trouvent plusieurs zones de protection de la nature, et, plus loin, une zone de protection du biotope. Il existe également, à proximité du site PH à Cercier et Marlioz, des zones de protection de la nature, et, à une certaine distance, une zone de protection de biotope. Des espèces rares sont présentes dans les environs immédiats du site et en partie à la limite du site, principalement à proximité d'un ruisseau qui passe au nord de la limite du site. Le site PJ à Dingy-en-Vuache et Vulbens se situe à proximité de zones de protection de la nature. Le site PL à Challex se situe à proximité immédiate de zones de protection de la nature et de corridors écologiques transfrontaliers reliant les espaces forestiers et la zone de l'Allondon à celle du Rhône. Les zones de protection forte des oiseaux présentes du côté suisse de la frontière s'étendent dans la forêt du côté français. On sait qu'il y existe des zones de protection du biotope.

Aucun des sites n'est directement concerné par des restrictions visant à protéger l'environnement, par la présence d'un parc national ou par des réglementations nationales en matière de protection de la biodiversité (parc Natura 2000, site Ramsar, géoparc UNESCO, parc national, etc.).

Enviro/Environment-Figs/Photo_Habitats_BocageMeadow_SitePB.pdf

Fig. 3.25 : Prairie de fauche bocagère photographiée lors des études de terrain

Habitats naturels

Dans le cadre de l'analyse environnementale, le terme « habitat » désigne l'environnement naturel ou l'écosystème où une espèce, une communauté ou un groupe d'organismes particuliers vit, se développe et prospère. Il englobe les éléments physiques, chimiques et biologiques favorisant la vie, tels que le sol, l'eau, l'air, le terrain, les autres plantes et animaux, ainsi que l'interaction entre tous ces éléments. Les études réalisées ont consisté à dresser un inventaire des habitats existants au niveau des sites de surface, à étudier les périmètres autour de ceux-ci, ainsi qu'à évaluer leurs caractéristiques et leurs qualités. Ce travail a permis de déterminer les niveaux de sensibilité associés aux grandes zones concernées par les sites de surface, afin d'appliquer l'approche « éviter-réduire-compenser », dans le but d'optimiser davantage le scénario du projet.

Le site PA de Ferney-Voltaire, en France, constitue principalement un environnement agricole, ouvert et périurbain d'environ 70 ha, et est également étroitement lié à Genève Aéroport, à des espaces agricoles en Suisse et à des espaces forestiers entre la Suisse et la France. Il est principalement constitué de prairies, de buissons, d'arbres, de monocultures et d'habitats artificiels (chemins, routes, bâtiments industriels et commerciaux). Les bosquets situés à proximité du site présentent une sensibilité élevée. Dans l'ensemble, le site présente une sensibilité moyenne à faible et ne répond souvent que partiellement aux spécifications d'un habitat.

Le site PB à Presinge, en Suisse, est également un espace agricole ouvert dominé par des monocultures, avec quelques forêts et haies isolées à proximité. Seule une fine bande à proximité immédiate du ruisseau avoisinant présente une qualité d'habitat modérée à moyenne.

Le site PD à Nangy, en France, situé dans un cadre rural, est bordé d'un côté par une autoroute et une route départementale, et d'un autre par un hameau. Quelques buissons et arbres isolés se trouvent à proximité. La qualité de l'habitat est très faible à faible. Dans cet espace très restreint, les buissons ne présentent une valeur élevée que dans une petite parcelle située à l'extrémité sud, à la limite du site de surface.

Le site PF d'Éteaux, en France, se situe dans une zone mixte agricole et de prairie. Des zones boisées commencent aux limites du site. Au nord, le site est bordé par une route nationale très fréquentée. La zone d'étude étendue comprend une zone humide. À l'emplacement du site de surface, la qualité de l'habitat est faible à moyenne. Les zones humides et les forêts avoisinantes sont très sensibles.

Le site PG à Groisy et Charvonnex, en France, se situe dans un environnement mixte composé de prairies, de bois et de chemins ruraux ou forestiers. L'espace étendu à proximité de l'autoroute est dominé par des espaces

artificialisés tels que des bassins de rétention, des zones de stockage temporaire de déchets inertes, des routes, des chemins et des zones construites. De façon globale, la zone peut être caractérisée principalement comme un habitat forestier. En moyenne, l'ensemble de la zone étudiée présente une qualité d'habitat faible à moyenne. À certains endroits présentant des caractéristiques de zones humides, aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur des forêts, la qualité de l'habitat peut être considérée comme moyenne. Deux zones forestières situées en dehors du périmètre du site, mais à proximité immédiate de celui-ci, ont été identifiées comme ayant une sensibilité élevée, en raison de la qualité des arbres.

Le site PH à Cercier et Marlioz, en France, se situe presque entièrement dans un bois. Il existe quelques zones dégagées, couvertes de prairies et d'herbages. Dans l'ensemble, la qualité de l'habitat est faible et, là où il y a des monocultures, elle est très faible. Au sud du site existe une zone présentant des caractéristiques de zone humide. Ses effets s'étendent sur une grande partie du site (0,4 ha), ce qui fait d'elle une zone d'habitat de haute qualité.

Le site PJ à Dingy-en-Vuache et Vulbens, en France, se situe dans un espace rural et agricole ouvert, bordé sur deux côtés par des alignements d'arbres, par un ruisseau temporaire, par une autoroute, au nord, et par un chemin rural et d'autres zones agricoles, au sud. Le périmètre d'étude étendu comprend également des zones pouvant être caractérisées comme humides. La qualité de l'habitat est hétérogène, allant de très faible à élevée. L'espace occupé par le site de surface se divise en deux moitiés : une zone de faible qualité d'habitat et une zone de haute qualité d'habitat. La zone la plus proche de l'autoroute est celle qui présente la meilleure qualité.

Le site PL à Challex, en France, se situe dans un cadre rural. Le site et le périmètre d'étude étendu, qui couvre 100 ha, comprend des champs agricoles, des friches, des buissons et des arbres entourant des maisons situées sur le site de surface. Les espaces herbacés présentent des caractéristiques de zones humides. Les zones agricoles et zones construites comportant des arbres et des jardins présentent, à l'heure actuelle, une qualité d'habitat faible à très faible. Les prairies humides situées en dehors du site de surface, mais à proximité de celui-ci, présentent une qualité d'habitat moyenne.

Zones humides

Les zones humides rendent de nombreux services aux écosystèmes, notamment en termes de régulation, de stockage de l'eau et de conservation de la biodiversité. Dans le cadre de la présente étude, des études ont été menées sur la présence de zones humides dans les espaces potentiellement concernés par les sites de surface. Étudier les zones humides est important du point de vue de l'environnement ; dans le droit français, cela constitue également une obligation réglementaire. La présente étude a pour objectif de faciliter le processus de prise de décision au sujet de l'emplacement des sites et de leur optimisation, selon l'approche « éviter-réduire-compenser ». En France, en cas de destruction d'une zone humide, la réglementation impose des mesures compensatoires, avec un ratio pouvant atteindre une et demie à deux fois la surface de la zone humide impactée. Les mesures peuvent comprendre l'amélioration des fonctions partiellement dégradées des zones humides et un suivi sur une période définie afin d'évaluer leur efficacité.

L'étude des zones humides a été réalisée de la même manière pour les territoires suisses et français, afin d'obtenir des données comparables et cohérentes. En Suisse, seules les zones humides répertoriées dans les inventaires fédéraux des bas-marais, des zones alluviales et de l'OROEM, des sites RAMSAR et des sites de reproduction des amphibiens sont potentiellement protégées.

Enviro/Environment-Figs/Photo_Wetland_Mandallaz.pdf

Fig. 3.26 : Zone humide observée lors des études de terrain

En l'absence d'un équivalent direct de la notion de zones humides dans la législation suisse, la présente étude s'est inspirée de la définition des zones humides donnée par la législation française. Selon l'article L211-1 du code de l'environnement français [86], « On entend par zone humide les terrains, exploités ou non, habituellement inondés ou gorgés d'eau douce, salée ou saumâtre de façon permanente ou temporaire ; la végétation, quand elle existe, y est dominée par des plantes hygrophiles pendant au moins une partie de l'année ». » L'article R211-108 du code de l'environnement précise que : « Les critères à retenir pour la définition des zones humides [...] sont relatifs à la morphologie des sols liée à la présence prolongée d'eau d'origine naturelle et à la présence éventuelle de plantes hygrophiles. Elles sont définies à partir de listes établies par région biogéographique. En l'absence de végétation hygrophile, la morphologie des sols suffit à définir une zone humide ». Ainsi, la législation française définit les zones humides sur la base de critères floristiques et/ou pédologiques.

La délimitation des zones humides sur les surfaces concernées par les sites potentiels a été réalisée sur la base d'inventaires départementaux et cantonaux, suisses et français, de critères floristiques et d'inventaires pédologiques. Les inventaires des départements de l'Ain et de la Haute-Savoie ont permis une première délimitation des zones humides connues et actuellement présentes sur les sites de surface. Des inventaires floristiques, permettant une seconde délimitation des zones humides, ont été réalisés en période de floraison, au printemps 2023, par une entreprise spécialisée, afin d'identifier et de délimiter les types d'habitats potentiellement présents dans les périmètres immédiat et étendu autour de chaque site. Ces inventaires ont

également mis en évidence les surfaces pro parte, c'est-à-dire les surfaces où l'habitat identi-

fié n'est pas systématiquement ou pas entièrement caractéristique des zones humides. Enfin, des inventaires pédologiques ont été réalisés en 2023 et 2024 par une autre entreprise spécialisée. Ces inventaires ont permis d'identifier des sols caractéristiques de zones humides ; puis, à ces endroits, des études souterraines peu profondes (de 12 à 90 cm de profondeur) ont été menées en 2014 pour déterminer si d'autres caractéristiques de zones humides étaient présentes ou non.

À la limite du site PA à Ferney-Voltaire, deux zones humides, d'une superficie totale de 6,3 ha, ont été relevées. Le site n'a pas d'impact direct sur la zone. Le concept du site prévoit un projet de réensauvagement visant à améliorer la qualité de cette zone et à en faire un habitat naturel permanent et protégé, comprenant des éléments récréatifs. Il existe, à proximité du site PB à Presinge, des zones correspondant à la définition française des zones humides. Aucune de ces zones ne se trouve dans le périmètre immédiat du site, et le site n'aura aucun impact sur ces zones de protection. Le plan conceptuel du site de surface comprend l'intégration d'une partie de la zone du ruisseau voisin, afin de réensauvager l'espace actuellement utilisé à des fins agricoles et d'en faire un habitat entièrement protégé.

Dans le périmètre étendu du site PD à Nangy, on relève trois zones humides, séparées du site par une autoroute. Le site n'affecte aucune de ces zones humides. Un certain nombre de zones humides se situent à proximité immédiate du site PF à Éteaux. Les études de terrain ont révélé que la zone est plus grande que celle répertoriée dans l'inventaire régional. Le site n'a pas d'impact sur ces zones. Cependant, le plan conceptuel du site prévoit la création d'une zone tampon verte comprenant l'une des zones actuellement utilisées à des fins agricoles, afin de la réensauvager et d'en faire un habitat protégé. Il existe également plusieurs zones humides dans la forêt située à proximité du site PG à Charvonnex et Groisy. La forme du site a été adaptée de façon à éviter tout effet négatif potentiel sur ces zones. Une zone humide, située dans la forêt, à la limite nord du site PH à Cercier et Marlioz, traverse le site vers le sud. Sur les 16 ha où elle s'étend, environ 0,8 ha se trouve dans les limites actuellement envisagées pour le site. Par conséquent, le site sera encore optimisé au cours d'une phase de conception ultérieure, afin d'éviter que la zone humide soit affectée par des effets importants ou d'élaborer des mesures compensatoires pertinentes lorsque certains effets ne peuvent être évités. Par exemple, une zone de terrain voisine présentant une très faible valeur en termes de biodiversité et d'habitat a été identifiée et peut servir d'espace optionnel au cas où l'équipement du site de surface ne s'adapterait pas à la géométrie réduite du site de surface.

Les environs du site PJ, en particulier à proximité de l'autoroute, se caractérisent par des zones humides étendues couvrant 13,6 ha, dont 1,6 ha se trouve sur une zone du site de surface exploitée à des fins agricoles. La phase ultérieure de conception du site tiendra compte de la présence de cette zone en vue d'établir des mesures d'évitement et de réduction, y compris la possibilité de créer une annexe plus au nord, sur un terrain qui n'est pas affecté par le site. Des mesures de compensation peuvent devoir être élaborées pour la partie qui ne peut être entièrement évitée. Des zones humides existent également à une certaine distance du site PL à Challex, dans la forêt. Elles ne sont pas affectées par le site.

En résumé, aucun des sites n'est directement affecté par des contraintes liées aux zones humides. La restauration d'une zone de compensation écologique à proximité immédiate du site PA donne la possibilité d'augmenter la valeur de la zone et de compenser ainsi la perte d'espace, en favorisant le développement d'un habitat naturel et les possibilités de biodiversité. Pendant la conception plus approfondie des sites de surface, il conviendra d'accorder aux sites PH et PJ une attention particulière, en raison de la présence partielle, dans le périmètre du site, de zones présentant des caractéristiques de zones humides. Il faudra également veiller, lors de l'optimisation du périmètre du site PG, à faire en sorte que les zones présentant des caractéristiques de zones humides soient en dehors des limites du site.

Flore

Des études de terrain ont été réalisées en 2023 afin de valider les données bibliographiques et d'inventorier les espèces présentes sur les sites de surface. Ces études visaient à confirmer la présence d'une flore remarquable et d'espèces invasives et à apporter un éclairage sur le contexte écologique local. On appelle « flore remarquable » les plantes qui présentent un caractère extraordinaire du fait de leurs caractéristiques uniques, leur rareté ou leur importance écologique ou culturelle. Ces plantes se distinguent souvent par leur

apparence frappante, leur adaptation inhabituelle ou le rôle essentiel qu'elles jouent au sein de leur écosystème. Le terme peut s'appliquer à des plantes indigènes, endémiques ou même cultivées. Les plantes invasives sont des espèces non indigènes introduites dans un écosystème particulier, où elles se propagent rapidement et supplantent souvent les plantes indigènes.

Enviro/Environment-Figs/Photo_Flora_Orchid_OrchisMilitaris_PG.pdf

Fig. 3.27 : Orchidée militaire (*Orchis Militaris*) observée lors des études de terrain, fournissant des données précieuses sur la faune locale et les dynamiques de l'écosystème

Ces plantes n'ont généralement pas de prédateurs naturels, de maladies ou d'autres facteurs de contrôle dans leur nouvel environnement, ce qui leur permet de prospérer de manière incontrôlée. Elles peuvent ainsi perturber les écosystèmes locaux, réduire la biodiversité et provoquer des dommages sur le plan de l'environnement et de l'économie.

Dans la présente étude, le terme « espèces remarquables » désigne les espèces qui bénéficient d'un statut de protection légale (à l'échelle nationale, régionale ou départementale) dans l'un des deux États hôtes, ainsi que les espèces « quasi menacées » (NT) et celles qui figurent sur les listes rouges régionales et nationales.

Une attention particulière a été accordée aux espèces invasives, car les sols qui abritent de telles espèces ne doivent pas être transférés tels quels vers des zones de compensation des terres, afin d'éviter la propagation de ces espèces. Les niveaux de risque établis selon des critères régionaux et nationaux ont été pris en compte pour déterminer la sensibilité des zones à l'égard des espèces invasives.

Les habitats et la flore de la zone d'étude du site PA à Ferney-Voltaire, en France, sont dominées par les espaces agricoles. Aucune espèce remarquable n'a été observée lors des relevés sur le terrain. Cependant, la liste municipale des espèces de Ferney-Voltaire identifie trois espèces remarquables qui pourraient en principe être présentes dans la zone d'étude étendue autour du site. Pour confirmer ou infirmer leur présence dans toutes les zones qui seraient potentiellement affectées par le site de surface, il sera nécessaire de mener des études complémentaires au cours d'une phase préparatoire du projet. Plusieurs espèces de plantes invasives ont été observées dans la zone d'étude du site PA ; elles devront être prises en compte lors de l'élaboration des plans de compensation des espaces agricoles.

Les habitats et la composition de la zone d'étude du site PB à Presinge, en Suisse, sont principalement agricoles. Plus loin se trouvent des boisements, et, à proximité du ruisseau du Nant du Paradis, des plantes typiques des milieux humides (zones humides, végétation rivulaire). Lors des études de terrain, deux espèces remarquables, protégées à l'échelle cantonale et nationale, ont été observées. Hormis ces exceptions, aucune autre espèce importante répertoriée dans la bibliographie n'a été recensée. On trouve dans les environs plusieurs espèces invasives, et même quelques espèces exotiques. L'espace agricole est exempt d'espèces remarquables et invasives.

Enviro/Environment-Figs/Photo_Flora_SalviaGlutinosa_PD.pdf

Fig. 3.28 : Sauge glutineuse (*Salvia glutinosa*) observée lors des études de terrain, fournissant des données précieuses sur la faune locale et la dynamique des écosystèmes

En appliquant le catalogue communal des espèces remarquables au site PD à Nangy, en France, il n'apparaît pas que ce site présente une sensibilité particulière. Aucune espèce remarquable n'a été recensée lors des relevés sur le terrain. Plusieurs espèces invasives pouvant avoir un impact négatif sur les cultures agricoles ont cependant été observées. Il reste donc à étudier si le sol peut être transporté tel quel à des fins de compensation ou si des mesures particulières d'élimination de ces espèces seront nécessaires.

Aucune espèce remarquable n'a été recensée lors des relevés sur le terrain du site PF à Éteaux, en France. Trois espèces remarquables figurant dans la bibliographie pourraient, en principe, être présentes dans la zone d'étude étendue, y compris les prairies humides et les zones boisées, en dehors du périmètre du site de surface.

Le catalogue des espèces communales de Groisy et Charvonnex applicable au site PG, en France, mentionne trois espèces remarquables qui pourraient être présentes dans la zone d'étude. Aucune d'entre elles n'a été identifiée lors des relevés sur le terrain ; aucune autre espèce remarquable de la bibliographie n'a été observée non plus. Quelques espèces invasives ayant été recensées dans la zone d'étude, la couche arable qui sera retirée devra être débarrassée de ces espèces.

La liste des espèces floristiques des communes de Cercier et Marlioz applicable au site PH, en France, comprend un nombre considérable d'espèces remarquables, mais aucune d'entre elles n'est présente dans la zone d'étude, et aucune espèce remarquable n'a été observée lors des relevés sur le terrain.

Aucune des espèces remarquables répertoriées dans la bibliographie établie au sujet de Dingy-en-Vuache et de Vulbens, pour le site PJ, en France, n'est présente dans la zone d'étude, et aucune espèce remarquable n'a été observée lors des relevés sur le terrain. Certaines espèces remarquables figurant sur les listes communales pourraient cependant être potentiellement présentes dans les zones présentant des caractéristiques suffisantes pour abriter ces espèces, principalement des zones humides en bordure de l'emplacement candidat pour le site de surface.

Pour le site PL à Challex, en France, quatre espèces sont mises en évidence dans la bibliographie. Deux d'entre elles pourraient potentiellement être présentes dans la zone du site PL. Cependant, aucune d'entre elles n'a été observée lors des relevés sur le terrain. Deux espèces invasives ont toutefois été

recensées dans la zone d'étude, et devront être prises en compte en cas de réutilisation de la couche arable à des fins agricoles.

En résumé, aucune sensibilité particulière en matière de flore remarquable n'a été établie pour les emplacements candidats des sites de surface. Cependant, pour les sites présentant des espèces invasives, il sera nécessaire de traiter soigneusement la couche arable avant qu'elle puisse être réutilisée dans le cadre de mesures de compensation. La conception du site de surface PB nécessite une attention particulière, en raison de la présence de deux espèces remarquables observées lors des relevés sur le terrain et de la présence potentielle, dans la zone étendue, d'un grand nombre d'espèces répertoriées dans la bibliographie. La sensibilité du site reste donc considérée comme forte à ses abords. Aucune espèce floristique remarquable n'a été recensée sur les sites PA, PG, PH, PJ, PL et PF, mais des études complémentaires sur ces zones seront nécessaires lors d'une phase préparatoire du projet, afin de confirmer l'état des lieux et de planifier les activités de construction du site. En général, des relevés sur le terrain supplémentaires seront donc nécessaires pour évaluer de manière fiable les impacts sur l'environnement. La sensibilité du site PF est également considérée comme forte, en raison de la présence potentielle d'une flore remarquable en bordure du site. Il faudra prêter attention aux espèces invasives présentes à différents endroits, et en tenir compte lors de l'examen de la réutilisation des terres agricoles à d'autres emplacements.

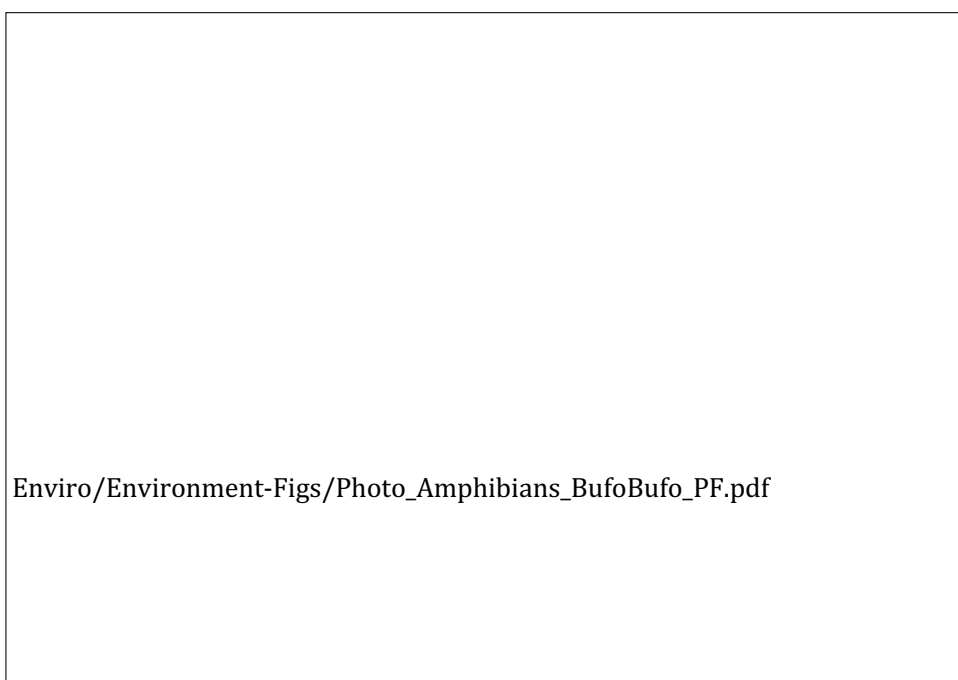


Fig. 3.29 : Crapaud commun (*Bufo bufo*) observé lors des études de terrain, fournissant des données précieuses sur la faune locale et la dynamique des écosystèmes

Faune

Amphibiens

Pour certains groupes d'amphibiens, l'identification des espèces nécessite une analyse génétique, en raison de la forte hybridation au sein de ces groupes. Cependant, un inventaire basé sur des données bibliographiques et des études de terrain a été établi non seulement pour les sites, mais aussi pour les périmètres à proximité du site. Les études se sont déroulées de jour comme de nuit pendant plusieurs mois. Les amphibiens sont généralement observés à proximité des espaces aquatiques, des ruisseaux, des rivières et des zones humides.

Des espèces d'amphibiens ont été observées à proximité du site PA à Ferney-Voltaire, sur les territoires français et suisse. Certaines d'entre elles sont considérées comme menacées en Suisse. Aucune espèce d'amphibiens n'est présente sur le site de surface.

Dans les environs immédiats du site PB à Presinge, l'inventaire bibliographique a été confirmé par les études sur le terrain ; l'enjeu⁸ étant important, la zone fluviale sera entièrement évitée par le projet. L'intégration d'un projet de réensauvagement sur le site contribuera à élever encore le niveau de protection de cette zone. La zone est actuellement partiellement utilisée à des fins agricoles. Le site PD à Nangy et ses environs présentent un enjeu faible concernant les amphibiens. Bien que le site PF à Éteaux ne soit pas directement concerné, les environs immédiats ont révélé la présence d'espèces associées à un enjeu élevé. En ce qui concerne le site PG à Charvonnex et Groisy, la présence de plusieurs espèces d'amphibiens a été confirmée à proximité, et peu sur le site lui-même. À proximité du site PF, les amphibiens représentent également un enjeu élevé ; sur le site lui-même, aucun enjeu n'a été identifié. Quelques espèces d'amphibiens ont été observées à proximité du site PJ, mais le site lui-même n'a pas révélé d'enjeux particuliers. Quelques espèces d'amphibiens ont été observées dans la zone étendue autour du site PL à Challex, y compris en Suisse. Certaines d'entre elles sont classées comme menacées et protégées. Le site lui-même n'abrite pas d'amphibiens.

En résumé, les zones situées à proximité des sites PA et PD présentent quelques habitats qui leur confèreraient une valeur élevée. Pour les sites PF et PJ, la disponibilité des habitats semble également relativement limitée, mais la présence de bois, de haies et de cours d'eau leur confère une valeur plus élevée. Les environs du site PB, quant à eux, ont la particularité d'être situés en partie sur un site de reproduction d'amphibiens, ce qui augmente sa valeur, même si aucune espèce associée à un enjeu élevé n'a été observée. Les sites PG, PH et PL présentent une valeur élevée, en raison de la forte densité d'habitats aquatiques et du grand nombre d'espèces associées à un enjeu élevé observées aux environs.

Oiseaux

Enviro/Environment-Figs/Photo_Fauna_Birds_AcrocephalusScirpaceus_PB.pdf

Fig. 3.30 : Rousserolle effarvate (*Acrocephalus scirpaceus*) observée lors des études de terrain, fournissant des données précieuses sur la faune locale et la dynamique des écosystèmes.

Des études ornithologiques ont été réalisées à l'aide d'enregistreurs sonores et, pour l'observation visuelle, à l'aide de jumelles et d'appareils photo. La période d'étude s'est étendue sur 2023 et 2024. Un inventaire sur plusieurs saisons a été réalisé pour chacun des huit sites de surface. Cinq ornithologues ont participé aux études. Les inventaires ont été réalisés dans des conditions météorologiques favorables (pas de pluie, peu ou pas de vent). Les observations de terrain ont été consignées sur place à l'aide de matériel informatique. L'intensité de l'observation a varié en fonction des saisons :

⁸Les questions environnementales mentionnées ici et dans les sections suivantes peuvent également être désignées par le terme « enjeux ».

Les inventaires de printemps ont bénéficié d'une observation accrue car il s'agit d'une période sensible pour les oiseaux nicheurs. Une matrice a été établie à partir des lignes directrices européennes concernant les espèces menacées ; elle ne s'applique qu'au territoire français. Pour la Suisse, les listes de protection cantonales et fédérales ont été utilisées pour analyser les risques.

Les oiseaux disposent d'espaces de vie aux environs du site PA à Ferney-Voltaire, principalement dans des arbres, des buissons et des haies. Quelques espèces remarquables ont été observées dans les environs. Les oiseaux sont également présents à proximité de l'espace agricole du site PB à Presinge et près des petits ruisseaux et des rivières. Des espèces protégées et menacées ont été observées dans la zone étendue autour du site. Des zones et des arbres situés aux environs du site PD à Nangy offrent des espaces de protection pour les oiseaux. Quelques espèces remarquables ont été observées sur le site de surface. Le site de surface PF à Éteaux comprend actuellement plusieurs buissons permettant aux oiseaux de trouver de la nourriture et de se reposer pendant la migration. Quelques espèces remarquables ont été observées sur le site. La forêt du site PG à Charvonnex et Groisy offre un espace de vie à de nombreuses espèces d'oiseaux et les buissons environnants servent de lieux de refuge et de reproduction. Quelques espèces remarquables ont été observées à proximité du site. La forêt située sur le site PH à Cercier et Marlioz offre également des espaces pour les oiseaux. Quelques espèces patrimoniales ont été observées sur le site. Le site PJ est entouré de buissons et de haies qui servent aux oiseaux d'espaces de vie et de reproduction, ainsi que d'espaces de repos pendant la migration. Quelques espèces patrimoniales ont été observées sur le site et dans les environs immédiats. Les haies situées à proximité du site PL offrent également une protection pour les oiseaux ; des espèces remarquables y ont été observées.

Enviro/Environment-Figs/Photo_Fauna_Birds_FalcoTinnunculus_Arve.pdf

Fig. 3.31 : Crécerelle d'Europe (*Falco tinnunculus*) observée lors des études de terrain, fournissant des données précieuses sur la faune locale et la dynamique des écosystèmes

Une base de données complète des espèces observées a été établie et intégrée dans un système d'information géographique de l'ensemble du projet. Les observations d'oiseaux ont une validité limitée, et doivent être poursuivies s'il est décidé d'avancer dans la conception d'un projet.

En résumé, les sites PD, PL et PJ, en France, et le site PB, en Suisse, ainsi que leurs environs, comportent des haies et des espaces ouverts où nichent des espèces à haute préoccupation de conservation. Les sites PF, PG, PH, en France, comprennent des haies et des forêts adjacentes à des pâturages extensifs, qui constituent des habitats cruciaux pour les espèces peu communes en toutes saisons. Le site PA, en France, est principalement constitué de zones agricoles conventionnelles, qui s'engorgent d'eau en hiver et servent de site d'escale important pour les échassiers.

Pour atténuer l'impact sur l'environnement, des mesures spécifiques seront prises pendant la phase de conception afin de recréer des sites de nidification et des espaces de vie pour les oiseaux comparables à ceux qui sont perdus, soit dans les zones tampons vertes des sites, soit dans les environs immédiats. Ces efforts seront intégrés dans les projets de réensauvagement associés au développement.

Mammifères

Enviro/Environment-Figs/Photo_Fauna_Mammals_Vulpes_SitePF.pdf

Fig. 3.32 : Renard roux (*Vulpes vulpes*) observé lors des études de terrain, fournissant des données précieuses sur la faune locale et la dynamique des écosystèmes.

Des données sur les mammifères terrestres ont été collectées au cours de toutes les évaluations nature concernant les autres groupes faunistiques réalisées sur les sites de surface. Des données sur les mammifères terrestres ont ainsi été collectées de jour comme de nuit, sur tous les sites de surface, au cours des quatre saisons. Les espèces de mammifères terrestres ont été recensées par observation visuelle ou à l'aide d'indices, tels que des traces, des fèces, des terriers, etc. L'attention particulière accordée aux conditions météorologiques pour les autres groupes s'est également appliquée lors des évaluations des mammifères terrestres. Toutes les observations ont été géolocalisées et intégrées dans le système d'information géographique du projet.

Lors des évaluations nature réalisées sur le site PA à Ferney-Voltaire, quelques mammifères terrestres ont été observés de manière peu fréquente : il s'agit du chevreuil européen, du sanglier, du blaireau européen, du lièvre européen, du rat brun et de la grande musaraigne à dents blanches. Dans les environs étendus, les données bibliographiques ont également révélé la présence d'espèces moyennement préoccupantes, telles que le hérisson et le castor.

Dans les environs du site PB à Presinge, deux espèces classées à haute préoccupation de conservation en Suisse ont été observées : le castor et le lièvre. D'autres espèces, classées peu préoccupantes, ont été observées : le chevreuil, le blaireau et le renard. Les données bibliographiques ont également fourni des informations sur des espèces de préoccupation très élevée : le mulot, le putois, la belette, le loup et le loir. La bibliographie mentionne également deux espèces de préoccupation moyenne, le hérisson et la fouine. Ces espèces n'ont toutefois pas été observées.

Les espèces de préoccupation moyenne observées sur le site PD à Nangy sont le castor et le hérisson. Une espèce de préoccupation moindre, le renard, a également été observée. Les données bibliographiques font également état du chat sauvage, du putois, du rat noir, mais ces espèces n'ont pas été observées.

Plusieurs observations ont été enregistrées sur le site PF à Éteaux : le hérisson, de préoccupation moyenne, le renard et le blaireau, de préoccupation très faible. Les données bibliographiques indiquent la présence de quatre espèces à enjeu de conservation moyen : le bouquetin des Alpes, le castor d'Europe, le lapin d'Europe et le chat sauvage.

Les espèces observées sur le site PG à Charvonnex et Groisy sont les suivantes (par ordre de préoccupation, de très faible à faible) : le chevreuil, le renard, l'écureuil, le sanglier, le lièvre et le chamois. Dans les environs, la bibliographie fait également état d'espèces à haut niveau de préoccupation, telles que la loutre d'Europe et le putois, et de préoccupation moyenne, telles que le hérisson et le chat sauvage. Ces espèces n'ont toutefois pas été observées.

Sur le site PH à Cercier et Marlioz, la présence d'espèces de préoccupation moyenne, telles que le castor et l'écureuil, a été recensée. Les espèces de préoccupation moindre sont le cerf, le chevreuil, le sanglier et le renard. La bibliographie mentionne également la présence d'espèces très préoccupantes, telles que le loup gris et la loutre, et moyennement préoccupantes, telles que le chat sauvage et le hérisson. Ces espèces n'ont toutefois pas été observées.

Sur le site PJ à Dingy-en-Vuache et Vulbens, plusieurs observations de mammifères de préoccupation moyenne ont été réalisées. Les espèces dont la conservation est la plus préoccupante ont été retenues, comme le castor d'Europe et le chat sauvage. Une espèce de préoccupation moindre est l'écureuil, et des espèces de préoccupation encore plus faible sont le cerf, le chevreuil, le lièvre, le sanglier, le blaireau, le renard et la grande musaraigne à dents blanches. La bibliographie signale également la présence sur du lynx et de la loutre, de préoccupation très élevée, et du lapin, de préoccupation moyenne. Ces espèces n'ont toutefois pas été observées.

Les espèces de préoccupation très faible observées sur le site PL de Challex comprennent le blaireau, le renard, le chevreuil, et le lièvre. L'analyse de la bibliographie met en évidence quatre espèces moyennement préoccupantes : le chat sauvage, le castor, le lapin et le hérisson. Sont également mentionnés le putois, de préoccupation élevée, et le lynx, de préoccupation très élevée. Ces espèces n'ont toutefois pas été observées.

En résumé, les recherches bibliographiques et les études de terrain relatives aux mammifères réalisées sur l'ensemble des emplacements candidats pour les sites de surface et dans le périmètre étendu autour des sites montrent que, dans l'ensemble, tous les sites présentent une sensibilité importante, même si aucune observation directe d'espèces concernées n'a confirmé la présence de celles-ci. En effet, des mammifères ont été observés dans les environs et dans le périmètre étendu des sites, et ils peuvent actuellement se déplacer sur les sites, mais leurs déplacements seront limités pendant les périodes de construction et une fois les sites construits. Cependant, aucune espèce protégée ou menacée ne sera affectée directement par les sites de surface. Une phase préparatoire ultérieure du projet devra prendre en compte les mammifères présents aux environs du site pour la conception des sites de construction et des sites de surface. Les corridors écologiques devront être pris en compte et préservés. Dans la mesure du possible, ménager des zones tampons vertes et la possibilité que les sites soient traversés par les mammifères permettrait de préserver leur comportement actuel. Intégrer la présence d'animaux en général dans les concepts des sites de surface pourrait également contribuer à améliorer leurs habitats et même, à terme, à favoriser la biodiversité et les conditions qui leur sont favorables.

Chiroptères

Les chiroptères (chauves-souris) sont des mammifères. Le nom de chiroptère, qui vient des mots grecs « kheir » (main) et « pteron » (aile), signifie « main ailée », en référence à la structure unique de leurs ailes, composées de doigts allongés recouverts d'une fine membrane de peau qui leur permet de voler. Les chiroptères font l'objet d'études sur l'environnement en raison de leur importance écologique, de leur vulnérabilité aux modifications de leur habitat et des protections juridiques dont ils bénéficient en France et en Suisse grâce à des lois nationales, ainsi que dans le cadre de la directive Habitats de l'Union européenne, de l'accord « EUROBATS », de la « Convention de Berne » et du « réseau Natura 2000 ». En France, violer les règles de protection des chauves-souris peut entraîner des sanctions importantes, telles que des amendes élevées et des peines d'emprisonnement.

Cette étude a consisté en des études de terrain spécifiques utilisant différentes techniques visant à dresser un inventaire des chauves-souris aux emplacements candidats pour les sites de surface et dans leurs environs, afin d'élaborer des mesures d'évitement, de réduction, de compensation et d'accompagnement au cours d'une phase ultérieure de conception et de préparation du projet.

Il n'a malheureusement pas été possible de réaliser d'analyse bibliographique, car cela nécessite une description détaillée des zones à étudier ; l'emplacement envisagé pour les sites de surface n'était pas suffisamment défini au moment de la demande de données, processus long et faisant intervenir différents propriétaires de données. Ainsi, des recherches indirectes (par exemple, des recherches acoustiques passives et actives réalisées à l'aide de détecteurs d'ultrasons et de microphones, ou des recherches de traces) ont été immédiatement menées dans les zones étendues autour des emplacements candidats pour les sites de surface.

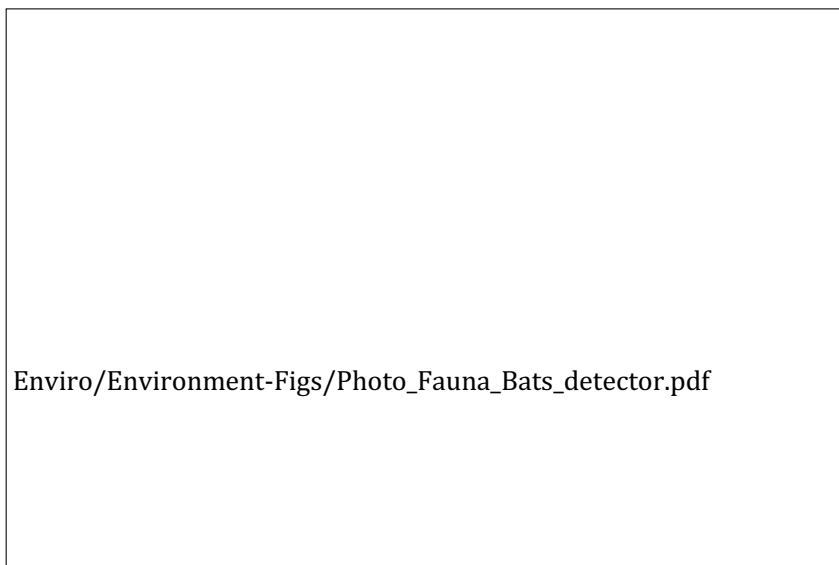


Fig. 3.33 : Détecteurs de chauves-souris utilisés pour relever la présence de chauves-souris en convertissant leurs signaux ultrasonores d'écholocation

Sur le site PA à Ferney-Voltaire, en France, l'existence d'un corridor écologique rend probable le passage de chiroptères dans une bande située à l'extrémité sud du site de surface et en dehors de cette zone. Douze espèces ont été recensées dans la zone étendue autour du site de surface, en particulier dans les bois et bosquets avoisinants. Il n'y a pas eu d'observations sur le site lui-même, probablement parce qu'il s'agit d'un espace ouvert actuellement soumis à la pollution lumineuse pendant la nuit.

Sur le site PB à Presinge, en Suisse, les zones situées en bordure du site de surface, en direction du ruisseau du Nant du Paradis, présentent un intérêt pour les chiroptères, qui peuvent y chasser. Il en va de même pour les buissons individuels, la zone de la Seymaz et les bois avoisinants, ainsi que les jardins du hameau de l'Avenir. Deux espèces ont été observées dans les maisons qui seront retirées pour la construction du site et 18 espèces l'ont été dans la zone étendue. Sept d'entre elles bénéficient d'un statut de préservation. La zone est donc sensible : des mesures doivent être prises pour préserver les habitats et éviter, voire réduire, la pollution lumineuse, dans la mesure du possible.

La zone étendue du site PD à Nangy, en France, présente un intérêt pour les chiroptères, qui peuvent chasser dans les buissons, les arbres et les maisons. Trois espèces ont été observées sur le site et huit dans la zone d'étude étendue. Elles bénéficient d'un statut de protection. Comme pour le site PB, la zone étendue est sensible et nécessite donc des mesures visant à préserver les habitats à et éviter, voire réduire, la pollution lumineuse supplémentaire dans la mesure du possible.

Les zones avoisinant le site PF à Éteaux, en France, présentent un intérêt pour les chiroptères, en particulier celles comportant des haies et des bois. C'est notamment le cas au niveau des limites du site de surface, des maisons et jardins situés le long de la route nationale et des zones humides. Treize espèces ont été observées dans la zone étendue, dont quelques-unes sur le site, à proximité d'arbres. Trois bénéficient d'un statut de protection. La zone étendue représente un intérêt pour cette espèce et nécessite donc des mesures visant à préserver les habitats et à éviter, voire réduire, la pollution lumineuse supplémentaire, dans la mesure du possible.

Sur le site PG à Groisy et Charvonnex, en France, le bois présente un intérêt pour les chiroptères. Ce bois s'étend jusqu'à l'autoroute, au nord. Dans la zone étendue, 18 espèces ont été observées, et 13 espèces l'ont été à certains endroits du site de surface, principalement dans la forêt. Huit d'entre elles bénéficient d'un statut de protection. Du fait de la forte présence de chiroptères dans la forêt, il est nécessaire de limiter l'impact sur ces zones pendant la phase de conception et d'envisager des mesures de compensation et d'accompagnement.

Sur le site PH à Cercier et Marlioz, en France, les chiroptères disposent de zones de chasse et d'un corridor

dans les bois, et entre différents bois. Dans le périmètre du site, 13 espèces ont été observées dans les bois, parmi lesquelles cinq bénéficient d'un statut de protection très élevé et deux sont fortement protégées.

La densité et la diversité des espèces diminuent à mesure que l'on s'approche de la route à l'est du site. D'après ces résultats, il est important d'optimiser davantage le site et de prévoir des mesures de réduction, de compensation et d'accompagnement dans la phase ultérieure.

Sur le site PJ à Dingy-en-Vuache et Vulbens, en France, les bois situés au niveau des ruisseaux et les haies en limite de surface présentent un intérêt pour les chiroptères. Dix espèces ont été observées en bordure du site et 16 dans la zone étendue autour du site. Certaines bénéficient d'un statut de protection particulier. La densité et la diversité des espèces sont plus élevées autour des haies et des arbres proches de l'autoroute. Lors de la conception ultérieure du site, cet emplacement devra faire l'objet d'une certaine attention en matière d'évitement, de réduction, de compensation et d'accompagnement. La pollution lumineuse artificielle est un enjeu à prendre en compte dans cette zone.

Sur le site PL à Challex, en France, les chiroptères trouvent des endroits adaptés dans les bois, les haies, les hameaux, les maisons individuelles et leurs jardins et les vignobles voisins. Deux espèces ayant un statut de protection moyen à faible ont été enregistrées dans les maisons qui devraient être enlevées pour construire le site de surface.

En résumé, les enjeux concernant les chiroptères directement sur les sites de surface sont faibles sur les sites PA, PB, PD et PL. Dans l'ensemble, le site PJ ne présente pas de sensibilité particulière, à part une petite zone proche des bois, qui nécessite une attention particulière. Les enjeux sont moyens pour le site PF, forts pour PG et très forts pour PH. Les limitations des impacts sur les chiroptères, la préservation et si possible l'amélioration de leurs habitats doivent être intégrées dans la démarche d'écoconception à mettre en œuvre au cours de la phase ultérieure.

Reptiles

Enviro/Environment-Figs/Photo_Fauna_Reptiles_PodarcisMuralis.pdf

Fig. 3.34 : Lézard des murailles (*Podarcis muralis*) observé lors des études de terrain, fournissant des données précieuses sur la faune locale et la dynamique des écosystèmes.

Les études de terrain réalisées aux emplacements candidats pour les sites de surface ont principalement consisté à identifier les populations de reptiles présentes dans des environnements connus pour être des habitats favorables. Il s'agit par exemple de zones semi-ouvertes, de zones de lisière de forêt, de cavités et de tas de pierres ou de bois, ainsi que de zones construites. Ces inventaires ont été réalisés pendant les principales périodes d'activité des reptiles, de mai à juin et de septembre à octobre. Chaque observation a été géolocalisée. Aucune méthode intrusive n'a été utilisée, afin d'éviter de déranger les espèces. Plusieurs limites

méthodologiques, un printemps pluvieux défavorable et un été exceptionnellement chaud, ainsi que des contraintes d'accès, ont limité la qualité et la fiabilité des résultats. Cela concerne principalement les données relatives aux serpents, qui sont plus difficiles à observer que les autres reptiles. En vue d'un projet de phase préparatoire et d'une étude d'impact sur l'environnement complète, il est nécessaire de mettre à jour l'état initial des reptiles à l'aide d'études complémentaires.

Pour les reptiles, les habitats naturels étudiés varient d'un site à l'autre, ce qui se traduit par des espaces de vie et des corridors écologiques plus ou moins adaptés.

Sur le site PA à Ferney-Voltaire, en France, les lisières de forêt et les bandes boisées ont été identifiées comme étant des habitats de grande valeur. Les arbres isolés et les zones cultivées présentent un intérêt moindre. Seule une espèce de faible préoccupation de conservation, le lézard des murailles, a été observée sur le site annexe situé au sud du point 8 du LHC. Les données bibliographiques n'indiquent pas la présence d'espèces de préoccupation élevée.

Sur le site PB à Presinge, en Suisse, les zones de végétation proches du ruisseau du Nant du Paradis, les jardins du hameau de l'Avenir et les petits bois avoisinants présentent un intérêt pour les reptiles, mais pas le site de surface lui-même. Une seule espèce a été trouvée dans la zone étendue autour du site. Aucune espèce n'a été trouvée dans le périmètre du site.

Sur le site PD à Nangy, en France, les endroits présentant un intérêt pour les reptiles se situent à l'extrémité sud du site, dans les haies et en bordure de l'autoroute, mais pas sur le site de surface. Trois espèces ont été observées dans la zone étendue autour du site et à l'extrême limite sud, à l'extérieur du site.

Sur le site PF à Éteaux, en France, les haies en bordure du site de surface présentent un intérêt pour les reptiles. Une seule espèce a été observée dans la zone étendue autour du site. Aucune observation n'a pu être confirmée sur le site ou dans les environs immédiats.

Sur le site PG à Groisy et Charvonnex, en France, la forêt et les lisières des zones boisées présentent un intérêt pour les reptiles. Les zones proches de l'autoroute peuvent également leur être favorables. Deux espèces ont été observées dans la zone étendue autour du site, mais aucune observation n'a pu être confirmée sur le site lui-même.

Sur le site PH à Cercier et Marlioz, en France, l'ensemble de la forêt occupée par le site de surface présente un intérêt pour les reptiles. Deux espèces ont été observées dans la zone située autour du site ; elles entrent parfois dans le périmètre du site. Cependant, il n'a pas été possible de déterminer clairement si leur présence ou leurs déplacements étaient habituels, afin de tirer des conclusions solides sur la présence permanente de reptiles sur le site.

Sur le site PJ à Dingy-en-Vuache et Vulbens, en France, les zones proches des ruisseaux, les buissons, les bosquets et les arbres, y compris la zone proche de l'autoroute, présentent un intérêt pour les reptiles. Sept espèces ont été observées dans la zone étendue autour du site, ce qui permet également de conclure que des espèces pourraient être présentes aux abords du site.

Sur le site PL à Challex, en France, les jardins, les buissons et les arbres présentent un intérêt pour les reptiles, mais pas la majorité du site de surface. Une seule espèce a pu être observée, à une certaine distance du site, près de la forêt, au nord. Aucune observation sur le site n'a pu être confirmée.

En résumé, les sites PA, PB, PD et PL présentent une faible sensibilité en matière de reptiles. À proximité du site PF, il convient de prendre certaines précautions pour préserver les espaces de vie des reptiles. Les sites PG et PH peuvent présenter une sensibilité dans certaines parties de la forêt ; la conception du projet devra donc respecter cette caractéristique. Il est nécessaire de mettre à jour l'état initial à l'aide d'études de terrain complémentaires, afin d'optimiser l'intégration du site de surface en appliquant des mesures d'évitement et de réduction. La conception architecturale des constructions des sites de surface devrait intégrer des concepts favorisant la création d'habitats et contribuant ainsi à augmenter la présence de reptiles.

Insectes

Des recherches bibliographiques et des études de terrain réalisées sur les sites et dans leurs environs par des entreprises spécialisées ont permis d'identifier les enjeux liés aux insectes. Les études sur le terrain ont été menées pendant plusieurs mois par beau temps, avec peu de vent, de jour comme de nuit.

Bien que l'environnement soit fortement urbanisé, une importante population d'insectes a été observée sur le site PA à Ferney-Voltaire, grâce à la présence d'espace de vie et de reproduction favorables. Le site lui-même, une zone agricole, ne connaît pas une importante présence d'insectes et ne présente donc qu'une très faible sensibilité. La proximité de la frontière entre la France et la Suisse, vers l'aéroport de Genève, peut nécessiter la prise en compte de questions transfrontalières, étant donné que certaines espèces observées dans cette zone, en dehors du périmètre du site, sont protégées en Suisse.

Enviro/Environment-Figs/Photo_Fauna_Insects_Butterfly_AporiaCrataegi.pdf

Fig. 3.35 : Gazé (*Aporia crataegi*) observé lors des études de terrain, fournissant des données précieuses sur la faune locale et la dynamique des écosystèmes

Des études de terrain complémentaires seront nécessaires lors d'une phase préparatoire du projet, afin de vérifier si c'est le cas.

Les environs du site PB à Presinge abritent une importante population d'insectes, principalement des espèces liées aux habitats aquatiques. Certaines espèces observées dans cette zone, en dehors du périmètre du site, bénéficient d'un statut de protection particulier en Suisse. Le site lui-même est un espace agricole présentant peu d'enjeux, à l'exception des zones proches du ruisseau voisin.

Les environs du site PD à Nangy sont caractérisés par une faible quantité d'espèces d'insectes. Le site est un espace agricole présentant un faible enjeu en matière d'insectes. Aucune espèce bénéficiant d'un statut de protection n'a été observée.

La zone étendue autour du site PF à Éteaux présente un intérêt pour les insectes. Cependant, sur le site et dans le voisinage immédiat, aucune espèce concernée n'a été identifiée ; la sensibilité du site est donc faible.

La forêt située sur le site PG à Charvonnex et Groisy et dans les environs présente un intérêt modéré pour les insectes, de même que les haies environnantes. Le site lui-même ne présente pas d'enjeux particuliers en matière d'insectes. Les espaces boisés n'ont pas non plus révélé la présence d'insectes concernés.

Les espaces forestiers situés sur le site PH à Cercier et Marlioz et dans les environs offrent, en principe, un habitat favorable aux insectes. Cependant, seule une faible présence d'insectes a été relevée dans le périmètre de l'emplacement candidat pour le site. Quelques espèces ayant été observées en bordure du site, le site présente une sensibilité moyenne.

Le site PJ à Dingy-en-Vuache et Vulbens offre, en principe, des conditions favorables aux insectes, en raison de la présence d'arbres et de haies aux environs. Les enjeux sont donc élevés dans la zone étendue, mais faibles sur le site lui-même.

Les haies et les buissons autour du site PL à Challex constituent également, en principe, un habitat favorable aux insectes. Cependant, le site ne présente que de faibles enjeux en matière d'insectes, bien que la présence

d'insectes ne puisse être totalement exclue. Certaines espèces sont protégées sur le territoire suisse tout proche. Des études complémentaires devront être menées sur le terrain lors d'une phase préparatoire du projet, afin d'examiner les questions transfrontalières qui pourraient se poser.

En résumé, aucun des emplacements candidats pour les sites de surface ne présente de sensibilité particulière en matière d'insectes.

Fig. 3.36 : Cordulégastré annelé (*Cordulegaster boltonii*) observée lors des études de terrain, fournissant des données précieuses sur la faune locale et la dynamique des écosystèmes.

Les environs du site PB constituent un habitat très sensible. Les environs étendus autour du site PF présentent, en principe, une certaine sensibilité. Les sites PG et PH, bien qu'ils soient boisés, offrent des conditions moins favorables aux insectes que prévu. La présence de certaines espèces concernées dans les environs augmente la sensibilité des zones situées à proximité du site. Certaines espèces de sensibilité moyenne ont été observées dans les environs du site PJ, ce qui suggère qu'elles pourraient également être présentes sur le site.

Milieu aquatique

La faune en milieu aquatique a été analysée sur la base d'informations cartographiques et orthophotographiques. Des études systématiques et des analyses de l'eau portant sur tous les aspects aquatiques n'ont pas encore été effectuées à ce stade. Il est prévu de les réaliser si une phase de conception est lancée. Des analyses ont cependant été réalisées sur les eaux de surface proches des sites PF, PG, PH et PJ. L'enjeu relatif aux macro-invertébrés est souvent élevé dans les environs étendus autour des sites de surface. Les macro-invertébrés benthiques en environnement aquatique regroupent des insectes aux stades nymphal et larvaire, des escargots, des vers, des écrevisses et des palourdes qui passent au moins une partie de leur vie dans l'eau. Les lucioles sont une autre espèce dont la conservation est préoccupante que l'on rencontre parfois dans le périmètre étendu autour des sites.

Bien que le site PA et ses environs immédiats ne soient pas concernés par la présence de faune aquatique, son environnement étendu est connu pour être un habitat abritant des espèces vulnérables et en danger. Des espèces protégées et menacées se trouvent à proximité du site PB, mais le site n'affecte pas leur habitat. Les sites PD et PF et leurs environs ne sont pas concernés par la présence de faune aquatique. Les environs du

site PG sont caractérisés par d'importants habitats aquatiques abritant des espèces vulnérables et menacées que le projet devra éviter, et visera à ne pas affecter. Le périmètre du site a déjà été ajusté à la suite des différents enjeux identifiés lors de l'analyse de l'état initial. Bien que le site PH se situe dans une forêt et à proximité d'un ruisseau, la présence d'espèces aquatiques remarquables est faible, et le site lui-même n'est pas concerné. Les sites PJ et PL et leurs environs ne présentent pas non plus d'enjeux en matière de faune aquatique.

En résumé, aucun macroinvertébré benthique n'a été observé sur le site PJ. Les environs étendus autour des sites PD, PF et PL présentent quelques habitats favorables au développement de macroinvertébrés benthiques, mais seuls quelques taxons sont présents.

Enviro/Environment-Figs/Photo_Aquatic_NantDHiver_PJ-JP_2.pdf

Fig. 3.37 : Cours d'eau photographié lors des études de terrain

De même, le site PH ne présente aucun taxon préoccupant ; cependant, ses environs comportent des habitats variés et une grande diversité taxonomique, mais celle-ci présente un niveau de préoccupation très bas. Le site PG abrite des taxons de préoccupation moyenne, mais, à proximité de la limite du site, les habitats sont variés et la diversité taxonomique est élevée. Dans les environs étendus autour du site PA, des espèces de préoccupation élevée ont été observées, mais les habitats sont pauvres et présentent peu d'intérêt pour la macrofaune benthique. Dans les environs étendus autour du site PB, plusieurs taxons de préoccupation très élevée ont été observés. Aucun site de surface n'est concerné par la présence de poissons, bien que certains sites (PB, PF, PG, PH et PJ) se situent à proximité de petits ruisseaux.

Forêt

Dans le cadre de la présente étude, des entreprises spécialisées et des consultants en évaluation forestière ont réalisé une analyse complète et détaillée de la qualité et de la valeur des forêts. Cette analyse a porté sur la perte potentielle de biodiversité, d'habitat et de revenus économiques sur une période prolongée de plusieurs décennies. Les résultats ont également été intégrés dans l'évaluation socio-économique globale. La méthode française de l'indice de biodiversité potentielle (IBP) a été appliquée [87, 88]. Le projet n'affectera aucun espace forestier existant en Suisse. Des forêts se trouvent à proximité des sites PA, PB, PD, PF, PG, PJ et PL. Seuls les sites PG et PH nécessiteront des défrichements.

La forêt qui serait affectée par le site PG présente un caractère assez diversifié. Les forêts xériques situées au sud-est sont principalement constituées de chênaies peuplées d'arbres de petit diamètre, présentant un enjeu fort à faible selon la zone. Les forêts de ravins, à l'ouest, sont constituées de grands et très grands arbres riches en microhabitats dendrologiques, abritant potentiellement une biodiversité riche et diversifiée. La zone centrale de la forêt est plus facilement exploitable pour les propriétaires forestiers. Cela se traduit par des peuplements plus ou moins diversifiés selon les parcelles.

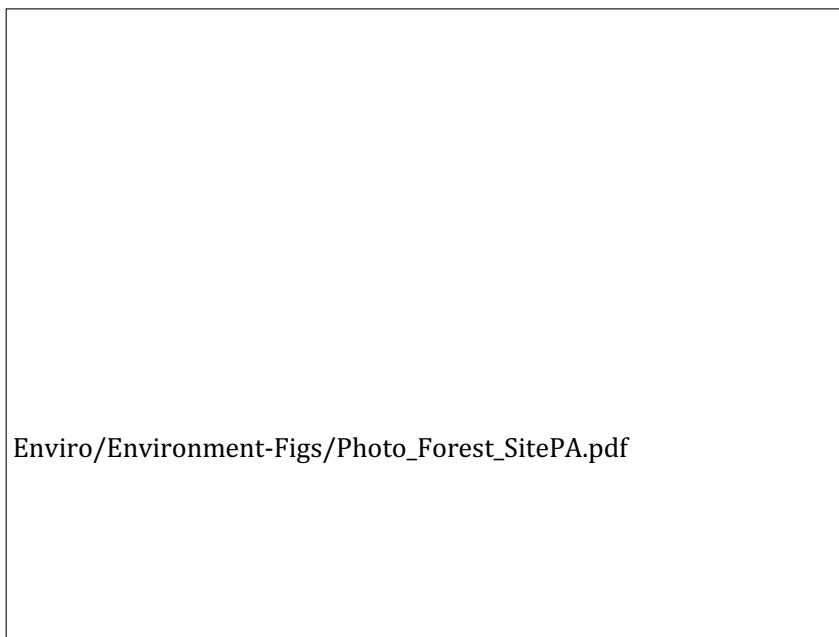


Fig. 3.38 : Bois photographié lors des études de terrain

La présence de gros bois mort est globalement moins importante. L'enjeu en matière de biodiversité varie de fort à faible en fonction de l'âge des arbres. En conséquence, le site de surface a été adapté de façon à réduire au maximum la surface de forêt affectée et en sélectionnant, pour les puits d'accès, un emplacement dont la qualité est inférieure à celle des environs. Au total, environ 2,4 ha de forêt pourraient être affectés par le développement du site de surface.

La forêt du site PH se caractérise par des zones boisées relativement jeunes résultant de l'abandon de l'agriculture, et présentant donc peu de microhabitats dendrologiques. Les bois situés sur la frange nord du site sont les plus anciens et comportent un cours d'eau temporaire. Les bois moyens sont moins favorables à la biodiversité forestière que les gros et très gros bois. Au total, jusqu'à 10 ha de forêt pourraient être affectés dans les communes de Cercier et Marlioz. D'autres conceptions des sites de surface sont nécessaires pour déterminer les besoins exacts en surface, en tenant compte de toutes les questions environnementales qui ont été identifiées.

Résumé

Des données détaillées sont fournies dans des paragraphes spécifiques de la section sur la biodiversité. À l'est du site PA se trouvent des zones humides qui servent de halte migratoire à différentes espèces d'oiseaux, et, au sud, près du point 8 du LHCb, se situe une forêt présentant une valeur écologique liée la présence de chauves-souris et d'insectes. Certaines parcelles agricoles proches du site, comprenant des arbres isolés, jouent également un rôle précieux pour les oiseaux. Le site de surface PA présente des enjeux écologiques faibles, mais les futures constructions devront tenir compte des éléments environnants afin de préserver les habitats et espèces clés.

Le site de surface PB présente des enjeux écologiques faibles à modérés. La présence de différentes espèces d'oiseaux, d'insectes aquatiques et de plantes protégées le long du Nant du Paradis met en évidence la valeur écologique des zones proches du site. Les futures constructions devront prendre en compte la sensibilité écologique de ces lieux afin d'assurer la préservation de la biodiversité et des habitats.

Le site PD est entièrement composé de terres agricoles qui présentent des enjeux faibles. De petites zones d'une grande importance écologique sont situées plus au nord du site. Elles comportent des haies et de vieux arbres qui offrent un habitat à des oiseaux et des chauves-souris de préoccupation faible ou modérée. Les futures constructions dans cette zone doivent tenir compte des espèces relevant de la petite faune qui pourraient être présentes sur le site ou le traverser.

Fig. 3.39 : Criquet italien (*Calliptamus italicus*) observé lors des études de terrain, fournissant des données précieuses sur la faune locale et la dynamique des écosystèmes

Le site PF est utilisé comme prairie agricole et présente un état écologique modéré. Cependant, le site se situe dans un corridor écologique pour le passage de la faune, près d'une zone humide et d'une forêt, avec un ruisseau servant d'habitat à différentes d'espèces, y compris des oiseaux, des chauves-souris et des amphibiens. L'aménagement du site doit être soigneusement planifié de manière à éviter de perturber les écosystèmes sensibles et à assurer une bonne fonctionnalité du corridor faunistique.

Le site de surface PG principal se situe en partie dans une zone forestière, qui présente des enjeux importants, et en partie dans des pâturages à faibles enjeux. Le site annexe, situé au nord, près de l'autoroute, présente des enjeux écologiques faibles. La principale contrainte du site PG est liée aux forêts de grande valeur qui abritent différentes espèces de faune et de flore. Il faut donc s'efforcer de limiter la déforestation et de maintenir les habitats actuels.

Le site de surface PH se situe dans une forêt comprenant de petites clairières et une zone humide. Une partie du site de surface présente des enjeux très importants, principalement au nord, du fait de la présence de différentes espèces d'oiseaux (y compris des espèces dont la conservation est très préoccupante), de différentes espèces de chauves-souris (et leur corridor écologique), ainsi que de différentes espèces relevant de la petite faune. Des zones présentant des enjeux importants, avec des parties d'enjeu faible et moyen, sont situées dans la partie sud-ouest du site. Il sera nécessaire de limiter l'utilisation des zones à forts enjeux afin de préserver leur biodiversité et leur valeur écologique.

La majeure partie du site de surface PJ présente des enjeux faibles, à l'exception d'une petite zone humide répertoriée, qui comprend des haies considérées comme ayant un enjeu fort. La configuration actuelle du site prévoit déjà des espaces destinés à accueillir un corridor écologique et des prairies herbeuses, afin de maintenir la connectivité entre les zones naturelles pour la faune et de conserver des zones où les oiseaux puissent chasser.

La majeure partie du site de surface PL se situe sur des terres agricoles présentant des enjeux faibles. Certaines haies situées sur le site et dans ses environs jouent un rôle important pour différentes espèces d'oiseaux et doivent donc être préservées, dans la mesure du possible.

Pour assurer un développement responsable des zones, la construction des sites doit être soigneusement planifiée de manière à limiter les perturbations de l'habitat, à maintenir les corridors écologiques et à préserver la biodiversité. En intégrant dès le début ces considérations dans les plans de conception du projet, il est possible de trouver un équilibre entre les besoins des infrastructures avec la préservation de la biodiversité et de l'intégrité écologique locales.



Fig. 3.40 : Arbres dans le bois photographiés lors des études de terrain.

3.3.6. Fonctionnalité écologique

En France, le réseau écologique, connu sous le nom de « Trame verte et bleue », fait partie intégrante du cadre d'aménagement national et régional. Ce réseau intègre la continuité écologique terrestre et aquatique. Il comprend des réservoirs de biodiversité, des corridors écologiques, des espaces terrestres et aquatiques perméables, ainsi que de vastes zones agricoles. Collectivement, ces éléments favorisent le déplacement des espèces, l'achèvement de leur cycle de vie et la préservation de la biodiversité. En Suisse, le réseau écologique identifie les zones essentielles pour la nature et leurs connexions. Le cadre du REN (Réseau écologique national) comprend des zones nodales (habitats vitaux pour l'achèvement du cycle de vie des espèces), des zones d'extension (zones plus petites ou de moindre qualité), des continuums (zones interconnectées telles que des forêts et des zones humides) et des zones de développement (habitats partiels). Le réseau comprend également des corridors écologiques qui relient des zones clés.

La mise en œuvre et la structure diffèrent entre les deux pays. En France, le réseau écologique met l'accent sur l'intégration de corridors verts et bleus à l'échelle nationale, dans le cadre d'une gouvernance régionale. Le REN suisse adopte, quant à lui, une approche plus localisée, se concentrant sur des zones écologiques spécifiques et sur leur connectivité physique. Par ailleurs, le cadre français inclut les espaces agricoles importants et les fonctions des masses d'eau, tandis que le REN suisse catégorise ses zones en mettant davantage l'accent sur la dynamique écologique interzonale.

Le site PA et la zone adjacente sont des espaces agricoles perméables qui ne présentent qu'un intérêt limité en termes de fonctionnalité écologique. Un corridor écologique d'importance régionale a été identifié au sud du site de surface. Les zones humides situées à proximité du site de surface contribuent à la fonctionnalité écologique dans le contexte de la trame bleue. Le plan local d'urbanisme fait état de trois arbres isolés, situés à l'est du site de surface principal, ainsi que d'arbres implantés au sud-est, qu'il considère comme des éléments du paysage à préserver. L'agencement et la conception des constructions du site de surface devront garantir le maintien de la continuité écologique.

Le site PB est situé sur de vastes terres agricoles avec quelques zones étendues et un continuum de prairies sèches. Ces zones propices à la biodiversité ne sont cependant pas situées sur le site de surface. Deux corridors importants favorisent le déplacement de la grande faune au niveau local : le premier passe à l'ouest du site de surface sans le traverser, le second traverse la partie orientale de la zone du site de surface, près des haies. Ces corridors doivent être pris en compte lors de la phase de conception. Le site de surface PB se trouve à proximité immédiate du continuum bleu, qui suit la ligne de haies au nord-est. Toutefois, l'emplacement du site n'interrompt pas directement la fonctionnalité de ce réseau.

La zone du site de surface PD est située sur des terres agricoles relais perméables. Au sud de la surface du DP,

sous la RD903, a été identifié un corridor secondaire de moyenne faune à prendre en compte dans la phase de conception. Le site de surface n'empiète sur aucun élément lié aux zones humides ou aux zones d'eau et n'affecte donc pas la fonctionnalité de la trame bleue de la région. Selon le plan d'urbanisme

local de Nangy, la zone d'étude ne comprend aucun élément de réservoir de biodiversité ou de corridor écologique.

Le site de surface PF est situé au sein d'espaces agricoles perméables et d'un corridor écologique forestier reliant les zones situées au nord-ouest et au sud-ouest du site. Il s'agit d'une zone isolée utilisée par la grande faune. Le site de surface est proche de deux zones humides de la trame bleue, dont la fonctionnalité n'a pas encore été analysée. Cet aspect doit être pris en compte dans la phase de conception du site de surface. Il sera également nécessaire d'assurer la fonctionnalité des corridors écologiques et des voies de déplacement de la grande faune entre les zones forestières situées au nord et au sud du site de surface, comme l'exige le plan local d'urbanisme de la commune d'Éteaux.

Au nord du site de surface PG, de l'autre côté de l'autoroute, se trouvent deux corridors boisés ; au sud figure un corridor linéaire, également boisé. La zone PG et son annexe sont situées dans des espaces perméables, en partie sur des terres agricoles et forestières, mais la zone de surface PG n'est pas située dans un corridor écologique et aucun réservoir de biodiversité n'y a été inventorié. Le site de surface ne concerne aucun élément de la trame bleue. Selon le plan d'urbanisme local de Groisy, le site de surface et l'éventuelle route d'accès sont situés sur des espaces boisés classés, ce qui impose une préservation ou un reboisement approprié en cas d'abattage, selon la méthode de compensation convenue ; les travaux de construction dans la zone boisée seront donc limités au strict minimum nécessaire.

Le site de surface PH ne concerne que les espaces relais perméables et ne traverse aucun corridor écologique ou ni aucun réservoir de biodiversité. La proximité du site de surface avec le ruisseau de Tabassé, qui rejoint les Usses, est l'un des principaux éléments de la trame bleue de la région. Lors des visites de terrain, la zone humide a été inventoriée sur le périmètre du site de surface, mais elle ne semble pas avoir de rôle fonctionnel majeur dans la structure bleue. Le plan local d'urbanisme du Val des Usses et de Cercier mentionne également un secteur d'intérêt écologique lié au cours d'eau situé au nord, qui sera pris en compte lors de la conception de l'implantation de l'infrastructure.

Le site de surface PJ est situé sur des terres agricoles avec des espaces relais perméables, ainsi que dans un corridor écologique reliant des réservoirs de biodiversité forestiers entre le nord et le sud, qui est également relié à un autre corridor écologique dans la partie la plus éloignée. Le site PJ présente deux petits ruisseaux, à l'ouest et à l'est et une zone humide a été inventoriée sur le site lui-même, mais sa fonctionnalité n'a pas encore été analysée. Conformément aux plans locaux d'urbanisme des deux municipalités concernées, le site de surface est situé entre des zones boisées assurant la continuité écologique, et contient deux lignes de haies protégées. La préservation de la continuité écologique et du corridor écologique sera prise en compte lors de la phase de conception.

Le site de surface PL est situé sur les espaces perméables relais et les espaces agricoles. Au nord du site se trouvent une zone humide régionale inventoriée dans les registres départementaux, ainsi qu'un corridor de déplacement de la grande faune ; ces structures ne traversent cependant pas le site. Selon le plan local d'urbanisme de la commune de Challex, les petites haies qui se trouvent dans le périmètre du site de surface et à proximité sont considérées comme des structures naturelles qui doivent être préservées pour des raisons écologiques.

En résumé, le site PA comprend un corridor écologique régional avec des zones humides et des haies qui doivent être préservées pour maintenir la continuité écologique. Le site PB se trouve à proximité de deux corridors de déplacement de la faune et de la trame bleue le long du côté est. Bien que le site n'ait pas d'impact direct sur la structure bleue, l'aménagement du site de surface doit en tenir compte. Le site PD est constitué d'espaces agricoles comprenant un corridor faunique secondaire au sud, à proximité de la RD903, mais n'empiète ni sur des zones humides ni des réservoirs de biodiversité. Le site PF est situé à proximité de deux zones humides et à l'intérieur d'un corridor écologique, une situation qui devra être prise en compte lors de la phase de conception. Une partie du site PG comprend une zone forestière classée et la coupe de bois doit être réduite autant que possible. La conception du site devra garantir le maintien de la fonctionnalité du corridor écologique et du réservoir de biodiversité situés à proximité. Le site PH est proche du ruisseau et un cours

d'eau plus large doit être envisagé lors de la conception de l'aménagement. On y trouve également quelques zones humides, mais celles-ci jouent un rôle fonctionnel mineur. Le site PJ se trouve dans un vaste corridor écologique, comprenant des zones humides et des haies d'une grande valeur écologique. Enfin, le site PL est constitué de terres agricoles avec des haies qui doivent être préservées ; la zone humide régionale et le corridor faunique situés plus au nord ne sont pas affectés. Globalement, la continuité écologique et les éléments protégés doivent être soigneusement pris en compte lors de la phase de conception afin de garantir leur fonctionnalité.

3.3.7. Urbanisme

Les aspects liés à l'urbanisme comprennent l'ensemble des politiques et des plans locaux et régionaux de développement territorial. Tous les terrains sont soumis à ces plans, qui sont régulièrement révisés et mis à jour au niveau des municipalités et des administrations publiques locale et régionale.

Les aspects urbains des périmètres des sites de surface, des zones élargies et étendues sur plusieurs kilomètres autour des sites de surface, ont été analysés à partir des plans d'urbanisme régionaux et locaux pertinents en France et en Suisse. En outre, les visites de terrain ont permis de compléter et d'enrichir les informations disponibles au public compte tenu de la situation actuelle. Cette étude permet de recenser l'ensemble des contraintes réglementaires liées au développement du territoire et d'anticiper l'évolution prévue du territoire d'un point de vue environnemental, en tenant compte de l'ensemble des lois et règlements applicables. Les documents pertinents et les systèmes d'information géographique et cartes associés comprennent les PLU, PLUi, PLUih, PADD, SCoT en France et les PDCn et PDCm du canton de Genève en Suisse.

Le tableau [3.12](#) montre que tous les périmètres étendus ou élargis autour des sites de surface sont soumis à des enjeux forts ou à d'autres enjeux sur le plan de l'urbanisme et du développement territorial. Ces questions doivent être prises en compte lors de l'élaboration du plan détaillé du projet.

Tableau 3.12 : Résumé des questions d'urbanisme.

Sujet	Périmètre élargi autour du site	Description des enjeux
Enjeux d'urbanisme forts l'agriculture,	PA, PB, PD, PF, PG, PH, PJ, PL	Zones de protection de la nature et de zones humides.
Autres enjeux d'urbanisme	PA, PB, PD, PF, PG, PJ, PL	Architecture protégée ou de valeur à proximité, installations sportives, zones agricoles, routes, autoroutes.
Servitude d'utilité publique	PB, PF, PH	Gazoducs/oléoducs, lignes électriques et tampons de protection autour de ces infrastructures.
Environnement urbain et réglementation applicable	PA, PB, PD, PG, PF, PJ, PL	Covisibilité, exigence d'intégration dans le contexte urbain, contraintes topographiques.

Le tableau 3.13 montre que la moitié des sites sont directement affectés par des contraintes urbaines qui doivent être prises en compte lors de la conception du site et qui requièrent une attention particulière lors du processus d'autorisation du projet.

3.3.8. Mobilité

Des données ont été recueillies et analysées concernant les infrastructures de transport public et le trafic routier, ainsi que la mobilité douce et la mobilité multimodale dans le périmètre du projet.

Transports publics

Le site PA est bien desservi par les transports publics genevois (TPG) qui traversent la frontière franco-suisse et desservent toute la zone. La liaison par bus est directe et une liaison par tramway est assurée à une distance raisonnable. Le site PB en Suisse est également desservi par le réseau TPG, avec un arrêt de bus à proximité immédiate et une liaison par tramway à une distance raisonnable.

Tableau 3.13 : Synthèse des sujets liés à l'urbanisme par site.

Site	Enjeux	Sujets liés à l'urbanisme
PA	Forte	Zone agricole protégée, gazoduc en bordure du site
PB	Forte	Zone agricole protégée (ZAP), corridor écologique, intégration paysagère
PD	Faible	Espace agricole, projet de développement routier
PF	Faible	Espace agricole
PG	Faible	Espace agricole, zone naturelle (forêt)
PH	Forte	Espace agricole, zone naturelle (forêt), gazoduc à la limite nord du site
PJ	Forte	Zone agricole, zone humide, espace agricole protégé, corridor écologique
PL	Moyenne	Zone agricole protégée, zone de protection de la nature

Le site DP en France est bien desservi par les lignes de bus régionales françaises, avec un parc relais reliant Genève. La présence du grand hôpital (CHAL) garantit le maintien et le développement potentiel des liaisons. Le site PF est mal desservi par les transports publics. Cependant, à 2 km de distance, la gare ferroviaire de La Roche-sur-Foron est un important pôle de transport multimodal qui assure une liaison avec Genève par la ligne Léman Express. Le site PG n'est pas desservi par les transports publics. Cependant, la gare ferroviaire de Groisy, située à 2 km, assure des liaisons régulières avec Annecy et Genève par la ligne Léman Express. Le site PH n'est pas desservi par les transports publics et il n'existe aucun réseau de transports publics à proximité. Le site PJ n'est pas desservi par les transports publics, mais à 2 km, une ligne de bus suisse TPG relie Vulbens ; à Valleiry se trouve également une gare sur la ligne entre Bellegarde et Évian en passant par Annemasse. Bien qu'il y ait des arrêts de bus du réseau TPG suisse à Challex à proximité du site PL, la fréquence est modeste. De meilleures liaisons sont assurées à Dardagny, en Suisse. À 4 km de distance, à La Plaine, le réseau est très bien desservi par des lignes de bus et de train.

En résumé, les sites d'expérimentation PA et PD sont bien desservis par les transports publics et les sites d'expérimentation PG et PJ sont raisonnablement reliés à une certaine distance. Les sites techniques PB, PF,

PH et PL sont en revanche mal desservis par les transports publics. Il y aurait lieu d'analyser la demande sur ces sites si un développement du système de transports publics était à envisager dans le cadre du projet FCC. Il pourrait être dans l'intérêt mutuel du projet et des parties prenantes locales de développer les transports publics au moins autour des sites d'expérimentation PG et PJ.

Réseau routier

Les sites d'expérimentation PA, PD, PG et PJ se trouvent à proximité immédiate de grands axes routiers et bénéficieraient d'un accès direct à l'infrastructure autoroutière pour les travaux de construction et d'installation. Cela permettrait d'écarter les éventuels problèmes résiduels liés au trafic local autour des sites au cours de ces phases. Une grande route départementale relie également le site PA aux sites de Prévessin et de Meyrin du CERN. En outre, le site technique PL se trouve à proximité d'une grande route départementale et est également bien relié aux sites existants du CERN. Le site PB est implanté directement sur une bonne route, mais il reste difficile de circuler à travers Genève et en direction d'Annemasse, en France. Le site technique PF est également bien desservi par une grande route départementale. Bien que le site PH soit directement situé sur une route départementale, il est isolé et éloigné des principaux axes de transport. L'accès à l'autoroute la plus proche se trouve à 10 km, à Allonzier-la-Caille. L'installation d'équipements encombrants sur ce site doit être soigneusement étudiée, élaborée et planifiée.

Autres modes de transport

L'étude a également porté sur l'analyse des pistes cyclables dédiées en France et en Suisse. Des voies et des pistes réservées ont été récemment construites à proximité du site PA et sont encore appelées à se développer. Ces voies s'étendent sur la frontière franco-suisse. Une piste cyclable dédiée est également en cours de construction directement sur le site PB. Les sites PD et PF ne sont pas équipés pour la mobilité douce.

Enviro/Environment-Figs/Mobility_Travels_AllReasons.pdf

Fig. 3.41 : Flux de déplacements quotidiens (tous modes confondus) dans le Grand Genève (Source Grand-Genève [\[89\]](#), d'après MRMT - EDGT 2015 - 2016). Bien que Genève demeure un pôle central, l'analyse des flux révèle une organisation plus multipolaire, avec une majorité de déplacements internes aux grands territoires (Genève, Genève français, district de Nyon).

Il n'existe pas de pistes cyclables dédiées autour du site PG, mais la route menant à Groisy est bien adaptée aux cyclistes. Le site PH ne dispose pas d'infrastructures de mobilité douce. Les environs du site PJ sont en cours d'aménagement en vue de renforcer la mobilité douce, visant à relier les communes voisines de Vulbens et Valleiry. La création d'un accès au site PJ permet également de relier Dingy-en-Vuache à ce réseau. Le site PL n'est pas particulièrement équipé pour la mobilité douce. Bien qu'il soit facile de se promener à pied ou à vélo dans la commune, il n'existe aucune liaison dédiée vers d'autres communes en France et en Suisse.

Évolution prévisible

Un plan de transport multimodal est en cours de développement dans la région du Grand Genève, dont le but est d'améliorer l'infrastructure de transport à travers la frontière franco-suisse. La poursuite du développement de l'habitat et de l'évolution démographique (d'environ +1,2 % par an) dans les départements français voisins de l'Ain et de la Haute-Savoie, qui ne sont pas liées aux activités du CERN, impose de tels développements. Environ 1,2 million de trajets quotidiens sont aujourd'hui recensés dans le périmètre du projet, un nombre qui devrait atteindre les 4,2 millions d'ici 2040. Comme nous le verrons plus loin, les activités liées à la construction, à l'installation et à l'exploitation du projet sont insignifiantes par rapport à la mobilité actuelle et future dans la région.

L'élargissement du réseau ferroviaire suisse continue d'augmenter la capacité journalière des trains, principalement grâce aux lignes Léman Express (voir Fig. [3.42](#)).

Enviro/Environment-Figs/autres_projets_extension_souhaitee_du_Leman_express.pdf

Fig. 3.42 : Situation actuelle et extension future potentielle des lignes Léman Express

Cela comprend également une amélioration des services vers la vallée de l'Arve (La Roche-sur-Forton), Groisy et Annecy, qui devrait s'achever en 2030. À plus long terme, des développements sont prévus pour desservir également La Plaine et, plus loin, Bellegarde. Des projets d'extension d'autoroutes ont été prévus en Suisse, mais ont été récemment suspendus. Un projet visant à relier les deux rives du lac Léman par un tunnel sous le lac a été étudié, mais toute mise en œuvre potentielle avant 2050 est peu probable et le projet n'est donc pas pris en compte dans des plans spécifiques. En France, un projet autoroutier prévoit de relier l'A40 (vallée de l'Arve) à l'A412 (Thônon) via une grande route départementale (RD903) rejoignant l'A40 à Nangy. Il est probable que des lignes de bus soient créées entre les principales agglomérations et l'hôpital situé à proximité du site DP.

Trafic induit par le projet

Le trafic induit par le projet comprend plusieurs types de trafic :

1. Les travailleurs qui effectuent les trajets aller-retour sur les chantiers pendant la phase de construction, qui durera environ dix ans.
2. L'évacuation des matériaux excavés à partir des chantiers de construction. Bien qu'il soit nécessaire d'évacuer les matériaux sur l'ensemble des sites au cours des deux premières années, seuls quatre sites seront concernés par le transport de matériaux excavés au cours des 6 à 8 années suivantes, en raison du déploiement des tunneliers.
3. Le transport des matériaux de construction vers les chantiers de construction. Tous les sites connaîtront un afflux modéré de matériaux de construction au cours des deux premières années, mais seuls quatre sites continueront à enregistrer un afflux important de matériaux de construction pendant la période de déploiement des tunneliers. Les matériaux de construction devront également être acheminés lors de la construction des bâtiments du site de surface.
4. Le transport des équipements de l'accélérateur pendant les six à huit années de la phase d'installation, qui chevauche partiellement les activités de construction civile.
5. Le transport des équipements de détection expérimentaux pendant l'installation de l'expérience, qui chevauche les phases d'installation et d'essai de l'accélérateur.
6. Le déplacement des ingénieurs et des scientifiques pendant les phases d'installation et d'essai.
7. Le déplacement des ingénieurs et des scientifiques pendant la phase d'exploitation.
8. Le déplacement des ingénieurs et des scientifiques pendant les périodes de maintenance régulière et dans le cadre des activités de réparation.
9. Le trafic induit par les visiteurs des sites d'expérience les phases d'exploitation et d'arrêt.

Le principal trafic induit par le projet est lié à l'évacuation des matériaux excavés. Il sera limité aux grands axes de transport. L'afflux de matériaux de construction s'ajoute également à ce trafic, mais de façon négligeable. Les déplacements des travailleurs doivent être organisés de manière centralisée, conformément aux meilleures pratiques adoptées sur les chantiers de construction. L'installation d'équipements pour l'accélérateur de particules représente une contribution minimale au trafic. Il en va de même pour le transport des équipements de détection expérimentaux. Dans ce cas, certaines charges exceptionnelles isolées peuvent être nécessaires en raison de la taille des pièces fabriquées sur place. Une fois opérationnels, seuls quelques scientifiques et ingénieurs se rendront quotidiennement sur les sites d'expérience. Les sites techniques sont principalement exploités à distance et ne seront que très peu fréquentés pour les opérations de maintenance et de réparation. Le trafic d'un nombre total estimé à 25 000 visiteurs par an sur un site d'expérience pendant la phase d'exploitation est comparable au trafic induit par un musée ou un site archéologique type, tel que les Grottes de Cerdon dans la région (environ 50 000 visiteurs par an⁹) ou le Château Voltaire à Ferney-Voltaire (environ 50 000 visiteurs par an [90]¹⁰). Ce trafic de visiteurs individuels peut être régulé par une signalisation appropriée en direction du site et à l'aide des transports publics. Les visiteurs en groupe arrivent en bus, ce qui n'entraîne qu'un minimum de trafic supplémentaire.

Les sections 2.7.2 et 2.7.12. fournissent de plus amples informations sur les grandeurs et sur le surcroît de trafic induit. Une première analyse quantitative du trafic a été effectuée pour confirmer que le trafic reste gérable et qu'il ne vient s'ajouter que de façon négligeable au trafic lié aux principaux axes de transport voisins.

3.3.9. Activités humaines

Activités humaines

L'analyse de l'état de l'environnement a permis d'établir la situation des activités humaines autour des sites de surface. L'environnement du site PA à Ferney-Voltaire est dominé par des activités commerciales, les sites de surface existants du LHC point 8 et l'aéroport. La présence d'un nouveau site de surface n'a pas d'incidence sur ces activités humaines. L'environnement du site PB à Presinge est rural et caractérisé par de petits hameaux. La Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève (HEPIA) possède une zone d'activité académique à proximité. Vers l'ouest, la zone commence à être dominée par des activités urbaines.

⁹https://www.ain.cci.fr/sites/g/files/mwbcuj1466/files/2024-02/Chiffres%20cles%202024%20AIN_.pdf

¹⁰<https://www.lemanbleu.ch/fr/Actualite/Archives/Le-chateau-de-Voltaire-entierement-renove.html>

L'environnement du site PD à Nangy est caractérisé par la présence d'activités agricoles, commerciales et industrielles, de zones résidentielles et d'un grand hôpital (le CHAL). En raison de cet environnement mixte et des grands axes de transport disponibles, la localisation est avantageuse pour un site d'expérience où scientifiques et ingénieurs travaillent en permanence. Le site PF à Éteaux est situé sur une voie de transport principale, où se trouvent des zones résidentielles dispersées, des petites entreprises et des artisans, ainsi qu'une grande entreprise de travaux publics, située en face du site. Le site PG à Groisy et Charvonnex ne présentent pas d'activités humaines majeures. La proximité de Groisy, avec ses écoles et son potentiel de développement local, offre la possibilité de développer un site d'expérience principal, caractérisé par la présence de scientifiques et d'ingénieurs. Le site PH à Cercier est très rural, dominé par des activités agricoles (production de fruits) et quelques petits hameaux. On ne compte pas d'activités humaines majeures dans cette zone. L'environnement du site PJ à Digny-en-Vuache et Vulbens est agricole ; quelques activités commerciales se trouvent au nord-est, à Valleiry. Le site PL à Challex se situe dans une zone agricole comptant des zones résidentielles à faible densité. Des activités commerciales ont lieu à La Plaine (Suisse), village qui n'est pas directement lié au site.



Fig. 3.43 : Quartier commercial proche du site PA photographié lors des études de terrain.

Population

La densité de population autour des huit sites de surface varie considérablement. Autour du site PA, la zone est modérément peuplée, avec environ 34 000 habitants dans un périmètre de 2 km. Les principales communes sont Ferney-Voltaire et Prévessin-Moëns en France, et Meyrin et Grand-Saconnex en Suisse. La croissance de la population dans cette région est de 2,4 % par an, mais elle n'est pas liée aux activités du CERN. Autour du site PB, l'environnement est peu peuplé ; on peut compter au maximum 6 000 habitants dans un périmètre de 2 km. Les principales communes sont Presinge, Puplinge, Choulex, Meinier et Jussy, en Suisse, et Ville-La-Grand, en France. La croissance démographique annuelle est nulle côté Suisse (entre -0,3 et +0,3 %). En France voisine, la croissance annuelle est modeste (+1,1 %), comparable à la moyenne de la Haute-Savoie. Le site PD est situé dans un environnement modérément dense, avec environ 4 000 habitants dans un périmètre de 2 km, la majorité étant concentrée à Nangy, Contamine-sur-Arve et Fillinges. La croissance annuelle de la population dans ces communes est très variable, allant de - 0,5 % à Nangy à + 3 % à Contamine-sur-Arve. Le site PF est situé dans une zone modérément peuplée, avec environ 4 000 habitants dans un rayon de 2 km, la majorité des habitants se trouvant à Éteaux et à La Roche-sur-Foron. L'évolution démographique est stable, variant entre -0,6 % et +1,0 % par an. Le site PG se situe dans une zone peu peuplée, comptant environ 4 000 habitants dans un périmètre de 2 km, concentrés à Charvonnex et Groisy. Ces deux communes connaissent une croissance démographique annuelle comprise entre 2,2 et 3,2 %. L'environnement du site PH est très faiblement peuplé. On ne compte que 1 500 habitants dans un périmètre de 2 km à Cercier, Choisy et Marlioz. La croissance de la population est d'environ 1,5 % par an. La zone autour du site PJ est également

peu peuplée, avec environ 6 000 habitants dans un périmètre de 2 km à Vulbens et Dingy-en-Vuache. Valleiry est une commune voisine plus densément peuplée, où la croissance annuelle de la population est de 2 à 3,5 %, supérieure à la moyenne de la Haute-Savoie. Le site PL à Challex se trouve dans une zone peu peuplée, comptant seulement 3 000 habitants dans un périmètre de 2 km comprenant les communes de Challex, en France, et de Dardagny, en Suisse. Les deux communes connaissent une croissance démographique annuelle d'environ 3 % par an.

Logement

Enviro/Environment-Figs/Photo_Urbanism_Housing_GardenParl_SitePA.pdf

Fig. 3.44 : Quartier résidentiel photographié lors des études de terrain

Comme pour la population, la situation en matière de logement varie également de manière notable entre les sites de surface. Dans l'environnement immédiat du site PA, le secteur du logement est dominé par les immeubles d'habitation. La commune de Prévessin compte principalement des maisons individuelles. Autour du site PB, l'habitat est mixte, caractérisé par des maisons individuelles à proximité immédiate et, plus loin, par des immeubles résidentiels. Les communes situées à proximité du site ne sont pas dominées par les maisons individuelles, mais présentent un mélange de maisons et d'immeubles résidentiels. La zone autour du site PD est dominée par des maisons individuelles. Les maisons individuelles sont également prédominantes autour du site PF. Enfin, toute la zone située autour du site PG est dominée par des maisons individuelles, comme c'est le cas pour les sites PH et PJ. Seule la commune de Valleiry fait exception : elle compte un nombre important d'immeubles résidentiels et d'appartements. Aux environs du site PL, le secteur résidentiel très contrasté. On trouve principalement des maisons individuelles dans les communes françaises de Challex, Péron et Saint-Jean-de-Gonville. Dans les communes suisses d'Avully et de Dardagny, ce sont les immeubles résidentiels qui prédominent.

Emploi

D'une manière générale, le marché de l'emploi dans les secteurs nord du FCC est concentré à Genève et ses environs sur le territoire français (voir aussi Fig. [3.45](#)). L'offre d'emploi est nettement moins importante dans la zone sud de la Haute-Savoie, caractérisée par une surcapacité de la main d'œuvre disponible. Selon les régions, le secteur tertiaire n'est que faiblement développé. Le secteur secondaire (activités industrielles) offre des débouchés dans certaines localités. Comme Genève, le département de l'Ain, en France, offre des

possibilités d'emploi plus importantes que le département de la Haute-Savoie.

Autour du site PA, c'est le secteur tertiaire qui offre le plus de possibilités d'emploi. Sur le territoire suisse, le secteur secondaire (industriel) est également une source importante d'emplois. Autour du site PB, le secteur primaire (agriculture) est prédominant et le nombre d'offres d'emploi est légèrement inférieur au nombre de candidats à un emploi. Autour du site PD, les possibilités d'emploi se concentrent dans le secteur industriel et dans le secteur de la santé (hôpital CHAL), même si l'offre est limitée. La zone autour du site PF offre peu d'opportunités d'emploi et celles qui existent sont réparties entre les secteurs secondaire et tertiaire. Le secteur primaire (agriculture) est peu représenté dans cette zone. Les offres d'emploi sont inférieures à la main-d'œuvre disponible.



Fig. 3.45 : Aperçu des possibilités d'emploi dans le périmètre du scénario de référence du FCC.

Ce constat vaut également pour la zone autour du site PG. Le secteur tertiaire, en particulier, n'y est que faiblement développé, comme c'est le cas également pour le site PH, où le secteur primaire (agriculture) est le principal employeur pour près d'un tiers de la population. Autour de la zone du site PJ, la demande d'emploi est supérieure à l'offre, le principal secteur d'emploi étant l'agriculture. Autour du site PL, la situation est plus complexe : les résidents trouvent leur emploi en France et en Suisse.

Agriculture

La surface utilisée pour l'agriculture dans le pays de Gex entre le site PL, à Challex et le site PA, à Ferney-Voltaire, est restée stable au cours des 30 dernières années. En ce qui concerne les parcelles et les exploitations agricoles, l'évolution de la propriété dans les années 1990 a conduit à des exploitations moins nombreuses mais plus grandes. Aujourd'hui, la surface type d'une exploitation est d'environ 90 ha par ferme, couvrant un total d'environ 3 600 ha. Le principal produit de l'agriculture dans cette région reste le lait, bien que ce secteur soit en baisse. Les céréales sont minoritaires. Les zones de libre-échange entre la France et la Suisse dans le secteur laitier facilitent les échanges de marchandises dont profite principalement ce secteur et ses produits dérivés. Sur les 23 millions de litres produits dans le pays de Gex, 14 millions sont vendus aux coopératives genevoises. Le volume de la production laitière dans la région est plus important que le volume total produit en Suisse. Les céréales produites par environ 90 producteurs sont presque entièrement vendues en Suisse. La production de céréales a connu une augmentation constante, avec une croissance supérieure à 60 % entre 2000 et 2010.

La production laitière est également un secteur agricole important en Haute-Savoie. Plusieurs entreprises et groupes majeurs, d'envergure mondiale (par exemple, la Société Laitière des Hauts de Savoie/Lactalis) jouent un rôle économique notable dans la région ; ils produisent également des produits dérivés du lait, en particulier le Reblochon et le fromage d'Abondance. Les espaces verts destinés à l'alimentation du bétail sont importants pour ce secteur. L'urbanisation croissante met cette branche de l'économie sous pression, bien que le potentiel économique soit élevé. La production et la vente de foin pour l'alimentation du bétail constituent l'un des principaux secteurs économiques connexes.

Le secteur agricole autour du site PB, en Suisse, est dominé par la production de céréales. Récemment, à la suite de la construction de serres, différents types d'agriculture ont été mis en place pour favoriser la production locale de produits variés. L'agriculture locale est l'un des piliers économiques du canton, bien que la surface des exploitations individuelles soit beaucoup plus petite qu'en France (généralement inférieure à 50 ha). La viticulture est une autre branche importante du secteur agricole cantonal.

Enviro/Environment-Figs/Photo_Agriculture_SitePB-cropped.pdf

Fig. 3.46 : Terres agricoles photographiées lors des études de terrain.

La consommation de terres exerce une pression sur le secteur : environ 20 hectares d'espace agricole sont perdus chaque année.

Le secteur autour du site PD en Haute-Savoie connaît des conditions climatiques différentes de celles du secteur nord. La campagne est plus montagneuse et les activités agricoles sont plus diversifiées, même si les principaux produits sont le foin et l'herbe liés à la production laitière. Près de 5 000 hectares sont exploités dans cette zone pour la production de lait et de fromage. Une entreprise de Fillinges transforme à elle seule 17 millions de litres de lait.

Plus au sud (sites PF et PG), les activités agricoles ont régressé au cours des récentes décennies ; les petites exploitations sont majoritaires. Les activités sont diverses : céréales, élevage bovin, production de viande, production de foin, légumes, volaille et production viticole locale. La production laitière reste l'activité dominante.

En direction du sud-est (site PH), les activités restent la production de lait et de fromage, plus de 12 000 hectares au total leur étant consacrés. Parmi les autres activités importantes figurent la production de fruits (pommes et poires) et de céréales (y compris le maïs). L'ensemble de la zone traite environ 45 millions de litres de lait par an. Le secteur oriental (site PD) traite environ 12 millions de litres de lait par an et compte également des industries de produits laitiers (par exemple, Baiko). L'élevage de bovins pour la production de viande est une activité connexe dans le secteur.

Sylviculture

La sylviculture est importante surtout dans le département français de la Haute-Savoie. Environ 150 000 hectares de forêts sont exploités dans la région. 70 % de ces forêts appartiennent à des propriétaires privés. Le bois produit est issu d'une grande variété d'arbres différents, qu'il s'agisse de feuillus ou de conifères. La sylviculture est également bien développée dans le département français de l'Ain ; l'activité produit principalement du bois pour les travaux de menuiserie et de construction.

Le scénario du projet n'affecte la sylviculture que de manière très limitée, au niveau des sites PG (Groisy) et PH (Cercier et Marlioz) dans le département de la Haute-Savoie, en France. La perte économique a été quantifiée et les effets potentiels sur l'habitat et la biodiversité ont été analysés. Sur la base de cette analyse, des mesures d'atténuation pourront être élaborées lors d'une phase de conception ultérieure.

Enviro/Environment-Figs/Photo_Activite_Vineyards_SitePL.pdf

Fig. 3.47 : Vignobles photographiés lors des enquêtes sur le terrain.

Des vignobles sont présents dans les départements de l'Ain et de la Haute-Savoie, en France, ainsi que dans le canton de Genève. Le scénario d'implantation n'affecte aucun d'entre eux. Des exploitations viticoles se trouvent à proximité du site PL à Challex, tant du côté français que du côté suisse. Du vin est également produit à une certaine distance du site de surface PB, en Suisse.

Tourisme

Le tourisme joue déjà un rôle économique majeur à Genève et dans les environs immédiats du CERN, grâce à son centre de visite, le Portail de la science, et aux nombreuses expositions et visites guidées qu'il propose. Chaque année, plus de 400 000 personnes visitent le CERN, soit individuellement, soit en groupe. L'impact économique dû aux dépenses locales générant des emplois indirects, directs et induits est important, car les visiteurs combinent généralement leur visite avec d'autres activités dans la région, en moyenne pour un séjour de quatre jours. Par exemple, Ferney-Voltaire (site PA) est connu pour le Château de Voltaire, son marché hebdomadaire traditionnel et de nombreuses attractions touristiques dans les environs immédiats (par exemple, les montagnes du Jura, en France, et les villes de Coppet et Nyon, en Suisse). On ne mentionnera pas ici la liste exhaustive des nombreuses attractions touristiques de Genève. À titre d'exemples, on peut toutefois citer l'Office des Nations Unies, l'Organisation internationale de la Croix-Rouge, la vieille ville, le Jet d'Eau, les musées horlogers ou encore la cathédrale. Les retombées économiques actuelles dans ce domaine ont été recensées et les effets à attendre d'un futur projet de collisionneur ont été estimés et sont présentées dans la section consacrée à l'impact socio-économique [voir la section Développement durable : résultats]. Avec l'augmentation des activités du CERN dans la région, le tourisme scientifique de haute qualité devrait s'étendre à la Haute-Savoie, contribuant ainsi au développement local du tourisme.

En ce qui concerne les nouveaux sites, le site PB à Presinge offrirait localement un certain nombre d'attractions touristiques modestes mais pertinentes invitant les touristes à pied ou à vélo à prolonger leurs excursions à travers les vignobles jusqu'au lac, ou vers la France jusqu'à la vallée de l'Arve.

La zone autour du site PD à Nangy, en France, est surtout connue pour son réseau de pistes cyclables, qui sera considérablement étendu d'ici 2030. Une piste reliant le lac au Mont-Blanc est prévue.

Les environs du site PF à Éteaux ne présentent pas encore d'attractions touristiques particulières. Cependant, il existe plusieurs possibilités de découvrir les produits fromagers locaux entre les sites PD et PF. Avec un centre de visite prévu sur le site PG, à Charvonnex et Groisy, l'ensemble de la zone pourrait bénéficier du développement bien planifié d'un tourisme de qualité depuis le lac jusqu'à la vallée de l'Arve et la région d'Annecy, qui est très développée sur le plan touristique. De nombreuses possibilités de randonnées en montagne peuvent être incluses dans ce programme.

La zone autour du site PH à Cercier et Marlioz n'est actuellement pas développée sur le plan touristique et ne dispose pas d'infrastructures notables.

En revanche, la zone proche du Vuache, autour du site PD à Dingy-en-Vuache et Vulbens, possède de nombreuses pistes cyclables (dont la ViaRhôna) attirant les touristes en quête de nature.

Le site PL, à Challex, est intégré dans une zone de tourisme vert et de cyclotourisme, reliant le massif du Jura à la vallée du Rhône. Il propose des chemins de randonnée et des sentiers à travers les vignobles. Le territoire de la commune suisse de Dardagny est reconnu comme l'un des plus beaux de Suisse et est donc particulièrement protégé, de même que le paysage qui l'entoure.

Projets de développement économique

Les projets de développement potentiellement pertinents pour le scénario FCC sont inclus dans le plan directeur cantonal de Genève (PDCn) et concernent la période allant jusqu'à 2030. Un projet de nouveaux appartements sur environ 180 ha à proximité de l'aéroport, supposant d'importants travaux de construction et l'emploi d'environ 5 700 personnes, est potentiellement pertinent pour le site PA en France. Il est également prévu de construire environ 1 300 appartements sur la commune voisine du Grand-Saconnex, ce qui mobilisera jusqu'à 2 400 travailleurs. Aucun projet de développement n'est à noter à proximité du site PL, à Challex, en France, et du site PB, à Presinge, en Suisse.

En France, les principaux développements potentiels se situent à proximité du site PA à Ferney-Voltaire. Une future zone d'activité commerciale (ZAC), s'étendant sur environ 65 ha, et la construction de 2 500 appartements supplémentaires et d'équipements d'enseignement sont prévues pour la période allant jusqu'à 2030.

À proximité du site PD, à Nangy, un projet d'élargissement de la route RD903 et une liaison routière avec l'autoroute A40 devraient être mis en œuvre avant 2030.

Activités scientifiques

Le principal projet scientifique de la région est l'amélioration du Grand collisionneur de hadrons, connu sous le nom de LHC à haute luminosité (HL-LHC). Il garantit la présence de scientifiques et d'ingénieurs au niveau actuel jusqu'aux années 2040. Le scénario d'implantation FCC s'appuie sur cette activité, en tirant parti de l'actuel LHC point 8 pour la création du site de surface PA et en hébergeant l'injecteur sur le site de Préveessin du CERN. Le site PL, à Challex, bénéficie également de la proximité du CERN de Meyrin.

Concernant le site PB, la présence à Lullier de la Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève (HEPIA) peut être pertinente. Cet établissement est proche du site et est susceptible de fournir des services que le site de surface pourrait exploiter pour réduire ses propres besoins. L'HEPIA pourrait également profiter de développements communs dans différents domaines liés au FCC, notamment les études agricoles et les infrastructures techniques. L'étude, le CERN et l'HEPIA ont déjà mis en place une collaboration portant sur la réutilisation des matériaux d'excavation et les aspects agricoles.

L'École nationale des industries du lait et des viandes se trouve à La Roche-sur-Foron, à proximité du site PF d'Éteaux. L'établissement accueille également un lycée technique et scientifique. L'école participe activement à des partenariats scientifiques avec l'INRAE, le CNRS, des universités et des centres de recherche nationaux. Des synergies pourraient, par exemple, s'instaurer pour le développement de solutions permettant de réutiliser l'eau et la chaleur.

3.3.10. Patrimoine

Les analyses effectuées dans le cadre de l'étude des aspects du patrimoine culturel, architectural et archéologique ont d'abord porté sur tous les éléments remarquables qui ont pu être identifiés dans un périmètre de 500 m autour des sites de surface. Par la suite, les éléments situés à proximité immédiate des emplacements candidats des sites de surface ont fait l'objet d'une étude plus approfondie. Ce périmètre a été

établi de manière à comprendre la richesse de chaque site de surface, laquelle devra par la suite être prise en compte dans la conception et l'intégration territoriale des sites.

Les analyses bibliographiques n'ont révélé aucun site archéologique inscrit ni aucun élément d'intérêt archéologique au niveau des sites de surface ou dans les environs immédiats.

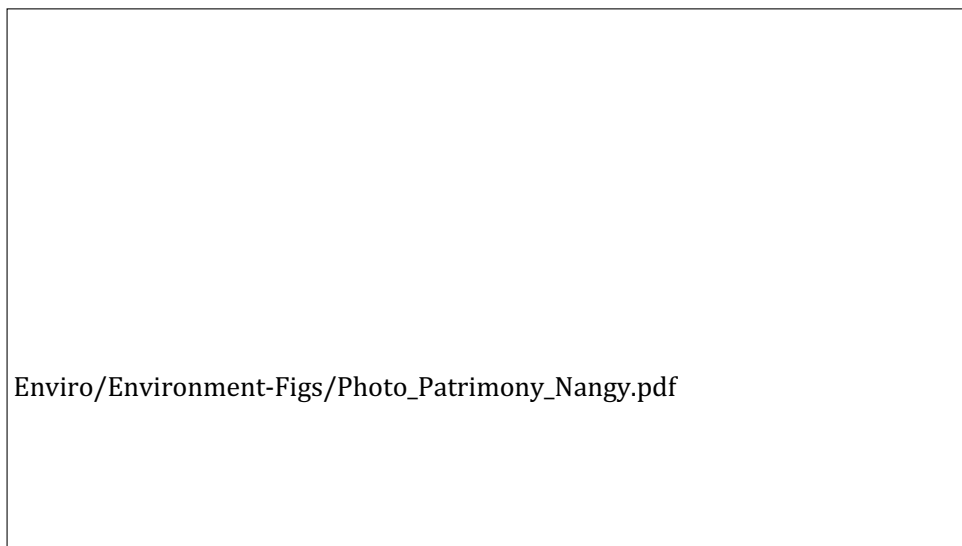


Fig. 3.48 : Objet du patrimoine architectural photographié lors des études de terrain.

On n'a identifié aucun bâtiment ou monument d'importance historique sur les sites de surface ou d'autres qui seraient directement affectés par les constructions potentielles du site de surface en raison de la visibilité ou de la covisibilité. Il existe quelques bâtiments d'importance historique dans le périmètre plus large de certains sites de surface.

La sensibilité du point de vue du patrimoine de la zone du site PA de Ferney-Voltaire, en France, est faible, en particulier au niveau du site de surface proprement dit. Le site serait situé sur des terres agricoles protégées. À l'ouest de la zone d'étude se trouve le bois de la Mouille, classé également comme zone humide. Au nord-est, à proximité du site, on trouve quelques arbres isolés protégés et une zone humide peu fonctionnelle. Ces zones classées et protégées seraient toutefois évitées pour l'implantation du site de surface, même si certaines d'entre elles se trouvent sur des terres agricoles.

La zone autour du site PB à Presinge, en Suisse, possède un fort caractère patrimonial, architectural, culturel et paysager. Le site de surface serait relativement éloigné des sites patrimoniaux mais resterait partiellement visible depuis les hameaux situés au nord et au sud. Les bandes boisées existantes protègent partiellement les vues en direction des villages de Choulex, Puplinge et Presinge, mais laissent une vue dégagée en direction des communes de Jussy et Meinier. Afin de préserver le caractère rural de la zone, il convient d'envisager une bonne intégration paysagère, telle qu'un site de surface semi-enterré, de manière à limiter la visibilité depuis les hameaux voisins.

La sensibilité patrimoniale de la zone d'étude du site de surface PD à Nangy, en France, est considérée comme moyenne à très élevée selon la partie du site. La présence, au nord et à l'ouest, du Château de Pierres et d'un bois classé, à une distance de 180 à 300 m des sites de surface, a influé sur cette évaluation. Dans la zone directement concernée par le site, la sensibilité est très faible. Le site se trouve à proximité immédiate d'une autoroute et d'une route départementale qui sera réaménagée afin d'améliorer la circulation. Aucun enjeu de visibilité pertinent n'a été relevé, la zone étant dominée par un trafic important, un hôpital ou des installations industrielles et commerciales.

La sensibilité patrimoniale dans la zone du site de surface PF à Éteaux, en France, est faible. Des éléments très importants sont toutefois relevés dans un périmètre plus large, au sud et au sud-est, du fait de la présence d'un bois autour d'un ruisseau, tous deux classés et protégés. Au nord-ouest, à une distance d'environ 400 mètres, se trouve un bâtiment remarquable, construit en 1923, qui abritait autrefois une fromagerie. On compte

également plusieurs groupes d'arbres isolés, témoins de l'histoire de l'agriculture. Cependant, l'implantation du site de surface évite tous les espaces sensibles et reste à proximité de la route départementale, juste en face d'une entreprise de construction de travaux publics.

La sensibilité liée au patrimoine du site PG à Groisy et à Charvonnex, en France, est considérée comme étant faible. Certaines zones situées au sud du site principal sont remarquables en raison de la présence de zones humides et de forêts non classées mais de grande qualité. Dans un périmètre plus large de la zone d'étude, on compte quelques vieux bâtiments liés à d'anciens moulins. Le site de surface n'affecte pas directement d'éléments patrimoniaux.

La sensibilité patrimoniale dans les environs immédiats du site de surface PF à Cercier et Marlioz, en France, est considérée comme étant très faible. Cette évaluation tient compte de la présence du Grand Bois et du ruisseau Tabassé au nord du site de surface. Tous deux présentent un intérêt sur le plan écologique, mais ne sont pas considérés comme des sites patrimoniaux.

La sensibilité patrimoniale du site de surface PJ à Dingy-en-Vuache et Vulbens, en France, est considérée comme moyenne à élevée, le site étant localisé dans une zone classée comme zone agricole protégée et comme zone de protection du corridor écologique. L'ensemble de la zone présente un caractère agricole. Au sud-ouest, à proximité immédiate, certaines zones présentent une sensibilité très élevée en raison de la présence de bois classés le long de petits ruisseaux. La configuration actuelle du site en surface respecte l'intégrité des contraintes. Cependant, un soin tout particulier devra être apporté lors de la conception et de l'intégration du site de surface afin de préserver le corridor écologique enregistré et garantir ainsi la libre circulation de la faune dans la zone.

La sensibilité patrimoniale du site de surface PL à Challex, en France, est considérée comme moyenne à élevée. La zone autour du site est constituée en grande partie de terres agricoles protégées et, plus loin, de terres naturelles. Plusieurs groupes d'arbres isolés et alignements d'arbres témoignent de l'histoire de l'agriculture. Le site lui-même est situé dans une zone agricole protégée et borde un corridor écologique protégé inscrit au plan d'urbanisme municipal. Le principal enjeu est la visibilité du site depuis plusieurs endroits dans les villages voisins. On apportera donc une attention particulière à la conception et à l'intégration paysagère du site de surface.

En résumé, les contraintes patrimoniales sont principalement liées au caractère rural et agricole des zones, et à la présence de bâtiments historiques à une certaine distance des sites. Une attention particulière doit être accordée au patrimoine lors de la conception et de l'intégration paysagère des sites PB, PJ et PL.

3.3.11. Paysage

Fig. 3.49 : Paysage faisant apparaître des montagnes et des champs agricoles, photographié lors des études de terrain, et mettant en évidence l'interaction entre les environnements naturels et cultivés.

L'analyse de l'état initial comprenait une analyse détaillée du paysage, qui a été réalisée avec des entreprises spécialisées lors de relevés sur le terrain pendant une année complète. Le paysage a été étudié jusqu'à 5 km autour des sites de surface, car la visibilité des sites dépend fortement de la topographie, de l'environnement urbain et de la végétation. L'analyse détaillée du paysage était assortie de cartes montrant la topographie, les vues depuis et vers les sites, ainsi que les enjeux liés à la visibilité. Ces données serviront de base aux travaux de conception architecturale et aux concepts d'intégration paysagère ultérieurs.

Le site PA et ses environs à Ferney-Voltaire (France) sont dominés par des zones agricoles, l'aéroport de Genève, un environnement commercial fortement urbanisé et un corridor écologique entre les forêts résiduelles qui occupent la zone tampon le long de la frontière franco-suisse. La zone se trouve dans un paysage ouvert bénéficiant d'une vue sur les Alpes et le Mont-Blanc, paysage qui doit être pris en compte lors de la conception architecturale du site de surface. Le LHC point 8 (LHCb), situé à proximité, et son extension prévue offrent une excellente occasion de limiter autant que possible l'empreinte du site PA afin de préserver la vue et le corridor écologique, qui s'étend également de part et d'autre de la frontière.

Le site PB de Presinge (Suisse) est situé en pleine campagne et offre de belles vues sur les Alpes et le Salève. La continuité du paysage est remarquable et les vues depuis les collines voisines sur le paysage et son patrimoine culturel et paysager sont très appréciées. La conception architecturale du site doit faire l'objet d'une grande attention, l'idéal étant d'intégrer le site autant que possible dans le paysage, tout en veillant à ce que la vue sur les montagnes depuis les villages voisins reste dégagée.

Le site PD à Nangy (France) est situé dans un environnement mixte, à la fois urbain, agricole et industriel, dominé par de grands axes de transport. Les vues directes sur les sites sont limitées.

Le site PF à Éteaux (France) est situé dans un environnement naturel, à proximité immédiate d'axes de transport et d'espaces commerciaux très fréquentés. Il n'y a pas de visibilité directe depuis La-Roche-sur-Foron ; toutefois, les vues sur les Alpes devront être prises en compte lors de la conception architecturale du site.

Le site PG à Charvonnex et Groisy (France) est situé dans un environnement très naturel, partiellement boisé, avec des prairies. Les vues sur les montagnes depuis le site sont très appréciées. Une vue directe, mais limitée, du site n'existe que depuis le plateau des Olières.

Le site PH à Cercier et Marlioz (France) est situé dans un environnement rural, qui compte une forêt. Quelques hameaux existent dans les environs, mais, en raison de la forêt et de la topographie, il n'y a pas de vue directe sur le site.

Le site PJ à Dingy-en-Vuache et Vulbens (France) est situé dans un environnement mixte, à la fois naturel et agricole. Le paysage est ouvert et la vue depuis Vulbens doit être prise en compte lors de la conception architecturale.

Le site PL à Challex (France) est situé dans un environnement agricole et viticole, bénéficiant de vues sur le Jura, la vallée du Rhône et les Alpes. Ces vues ouvertes exigent une intégration paysagère soignée, tenant compte notamment de la visibilité du site depuis les hameaux voisins.

3.3.12. Bruit

Le bruit, considéré comme désagréable ou gênant, est un aspect environnemental à prendre en compte lors de la construction des structures de surface et souterraines et lors de l'exploitation du collisionneur de particules. Les réglementations relatives à la protection contre le bruit diffèrent sensiblement entre la France et la Suisse. Cependant, dans tous les cas, l'impact du bruit dépend de la présence de personnes et d'animaux susceptibles d'être affectés par le bruit. Les indicateurs pertinents ne sont pas seulement la fréquence et l'amplitude, mais aussi le moment où se produit l'exposition au bruit et la durée de l'exposition. Ces indicateurs sont les suivants : pendant les heures de travail normales, pendant la nuit, pendant les jours non ouvrables, la présence habituelle de personnes à leur domicile, l'âge, la santé et d'autres conditions sociales des personnes potentiellement affectées (par exemple, le bruit à proximité d'un hôpital, d'une école ou d'une maison de retraite). En règle générale, le bruit généré par les machines est considéré comme ayant des effets notables sur la santé à partir de 40 dB(A). Un bruit allant jusqu'à 30 dB(A) est un niveau généralement ressenti dans un environnement de vie normal (voir le tableau [3.14](#)).

La première étape consiste donc à déterminer le bruit de fond existant à proximité des sites de surface candidats.

Enviro/Environment-Figs/Photo_NoiseMeasurements_Garden.pdf

Fig. 3.50 : Mesures du bruit effectuées sur le terrain afin d'évaluer les niveaux sonores ambiants.

Fig. 3.51 : Mesures du bruit effectuées à proximité d'une zone résidentielle afin de connaître le niveau de bruit actuel.

Cette activité est menée à partir d'estimations du bruit généré sans mesures de protection. On peut ainsi identifier les zones sensibles. Une écoconception est ensuite réalisée pour réduire le bruit là où des impacts potentiels sur l'environnement sont attendus. L'approche consiste à travailler d'abord sur des conceptions à faible bruit. Cela suppose également de repositionner les dispositifs générateurs de bruit sur les sites de surface. Si ce processus s'avère insuffisant, des mesures de protection contre le bruit sont étudiées de manière à réduire les impacts. Le repositionnement des équipements générateurs de bruit ou l'ajustement d'un site de surface complet est une option envisagée si aucune mesure d'atténuation adéquate ne peut être identifiée.

Le bruit de fond a été établi en premier lieu en consultant des bases de données nationales sur les émissions sonores, puis en complétant les données par des mesures sur le terrain. Les mesures ont été effectuées par des sociétés spécialisées pendant plusieurs jours en 2024, à différents endroits et à différentes distances des sites de surface. Une analyse détaillée des fréquences, des amplitudes et des directions des différentes sources de bruit a été effectuée de manière à pouvoir mélanger, à un stade ultérieur, les sources de bruit potentielles sur les sites de surface avec le bruit ambiant. On a obtenu le nombre de résidents susceptibles d'être affectés par le bruit en analysant les données collectées à l'aide du système d'information géographique et d'informations statistiques (voir le tableau [3.15](#)).

Tableau 3.14 : Niveaux de bruit types et exemples pratiques.

Bruit	dB(A)	Niveau	Conversation
Décollage d'un avion à réaction < 130		Au-dessus du seuil de douleur	Impossible
Marteau-piqueur à 1 m	< 110	Supportable pour un court moment	
Moto à 2 m	< 90	Génant	
Trafic routier intense	< 80	Très bruyant	Difficile sans crier
Logement proche d'une autoroute	< 70		Possible en parlant fort
Travail sur ordinateur	< 60	Modéré	Possible en parlant normalement
Niveau de bruit en ville, en journée	< 50	Très calme	
Bruit dû à des travaux de construction à une distance de 100 à 200 m d'un site de surface	40 - 45	-	
Niveau de bruit en campagne, en journée	< 40	Calme	Possible en parlant à voix basse
Niveau de bruit en campagne, la nuit, en l'absence de vent	< 30	Très calme	
Chute de neige à la montagne, studio d'enregistrement	< 15	Silence	

Les mesures indiquent que la majorité des sites sont affectés par un bruit de fond significatif, sans présence d'individus dans un périmètre de 200 à 300 mètres. Par conséquent, ni le bruit généré par la construction, ni celui généré par l'exploitation, qui seront maintenus à un niveau aussi bas que possible grâce à des mesures de protection contre le bruit, ne devraient avoir d'impact sur la population des sites PA (Ferney-Voltaire), PD (Nangy), PF (Éteaux), PG (Charvonnex et Groisy) et PJ (Dingy-en-Vuache et Vulbens). Sur le site PL (Challex), les activités de construction pendant la nuit pourraient entraîner un excès de bruit de fond et il conviendrait donc d'adapter le calendrier de construction si une conception technique détaillée du chantier du point de vue de la protection contre le bruit s'avérait insuffisante. Sur les sites PB (Presinge) et PH (Cercier et Marlioz), le bruit de fond est particulièrement faible (environ 35 dB(A)) par rapport à tous les autres sites. Dans tous les cas, le bruit lié à l'exploitation peut être maintenu en dessous du seuil pour les résidents potentiellement affectés dans les environs, mais, pour la planification de la construction, la protection, il faudra veiller à respecter les périodes pendant lesquelles l'exposition au bruit est plus importante (par exemple, la nuit, les week-ends et les jours non ouvrables). Pour le site PH, 3 à 4 maisons à une distance de 100 m seraient affectées et pour le site PB, deux maisons situées à une distance de 200 m seraient affectées. Le bruit induit par la construction ne devrait donc pas dépasser le bruit de fond de manière significative pendant les périodes de repos dans ces lieux.

Tableau 3.15 : Bruit de fond type mesuré à proximité des sites de surface et nombre de personnes potentiellement affectées dans la limite des distances indiquées par rapport au site.

Site	Bruit de fond dB(A)	Bruit de fond dB(A)	Personnes potentiellement affectées	Distance au site
	7h-22h	22h-7h		
PA	55	45	0	100 - 200 m
PB	36	36	0 [†] (< 10 [‡])	100 m
PD	48	44	0	100 - 200 m
PF	48	40	< 10	100 - 200 m
PG	36 - 48	37 - 45	0	100 - 300 m
PH	35	29	< 10	100 m
PJ	39 - 47	35 - 44	0	300 m
PL	40	30	< 5	200 m

† Personnes exposées selon les limites suisses, DS III

‡ Personnes exposées selon les émissions sonores autorisées en France

3.3.13. Vibrations

Les vibrations sont des mouvements oscillants rapides qui se propagent à travers des voies solides et peuvent être transmises au corps humain, notamment par contact direct avec le sol ou la structure concernée. Il s'agit donc de phénomènes physiques caractérisés par une onde en amplitude et en fréquence.

L'endommagement des bâtiments et la gêne pour les personnes constituent les principaux risques associés aux vibrations. Les vibrations peuvent être dues aux activités sismiques, aux mouvements du sol, aux conditions météorologiques et aux sources artificielles telles que les activités de construction et les machines. L'analyse environnementale a révélé que dans l'ensemble du périmètre du projet, les activités sismiques ont un potentiel très faible à faible de créer des vibrations importantes, malgré des probabilités d'occurrence différentes pour les événements sismiques de faible ampleur. En ce qui concerne les vibrations causées par les glissements de terrain, les sites de surface PA, PB, PD, PH, PJ et PL se trouvent à des distances significatives des zones à risque et aucune cavité souterraine n'est présente à une distance pertinente des sites de surface. Une zone de risque potentiel liée à des glissements de terrain n'est présente qu'à une distance de 500 m du site PF, mais la probabilité d'événement est très faible. À une distance de 250 m se trouve une cavité faisant partie d'une infrastructure de défense, dont l'effondrement est cependant peu probable. Les phénomènes météorologiques tels que les vents violents et la foudre peuvent provoquer des vibrations qui affectent les arbres et les structures des bâtiments. Toutefois, de tels événements sont peu fréquents dans le périmètre du scénario. Diverses sources de vibrations induites par l'activité humaine ont été identifiées au cours des dix prochaines années à proximité des sites de surface PA, PD et PF. Le trafic routier est une autre source de vibrations permanentes, qui doit être prise en considération pour les sites PA, PD, PF, PG et PJ. Aucune autre source notable de vibrations n'a pu être identifiée à proximité des sites de surface.

3.3.14. Lumière

La pollution lumineuse désigne l'excès de lumière artificielle ou la mauvaise gestion de cette lumière dans l'environnement nocturne. Ce phénomène est de plus en plus préoccupant, tant pour ses effets sur la biodiversité que sur la santé humaine. On observe deux types de pollution lumineuse. La première, la pollution lumineuse directe, se rapporte à l'impact de la lumière directement produite. La seconde, la pollution lumineuse indirecte, résulte d'une accumulation de lumière, créant un halo qui obscurcit les étoiles et dégrade la qualité du ciel nocturne. En ce qui concerne les sites de surface, la pollution lumineuse est une question environnementale pertinente qui doit être évaluée pendant la phase de conception détaillée en ce qui concerne les activités de construction et la phase d'exploitation ultérieure. Par conséquent, à ce stade, la pollution lumineuse existante à proximité des sites candidats aux sites de surface a été analysée et documentée afin de servir de référence pour l'élaboration de la conception détaillée.

L'éclairage public le long des routes dans les zones résidentielles constitue la principale source de pollution lumineuse dans les zones concernées par le projet. En outre, les zones commerciales représentent une source de lumière artificielle, en particulier lorsqu'elles utilisent des écrans publics de grande taille. L'éclairage n'est généralement pas contrôlé. Certains éclairages extérieurs de résidences privées entraînent une pollution lumineuse. Enfin, les installations industrielles destinées à fonctionner la nuit et à assurer la sécurité sont une source importante de pollution lumineuse.

En l'état actuel, des données ont été achetées auprès de différentes sources ; ces données ont servi à élaborer des cartes pour les zones situées autour des sites de surface. La zone autour du site PA est fortement éclairée la nuit. L'une des sources est l'aéroport de Genève, l'autre la zone commerciale située à proximité immédiate. L'éclairage des routes et les nouvelles constructions résidentielles ajoutent également à la pollution lumineuse. Le plan du Grand Genève prévoit une restauration progressive de l'ensemble de la zone afin de protéger les corridors écologiques et la faune. Cependant, aucune mesure de protection n'est actuellement prévue au niveau des plans locaux d'urbanisme français. Le site PB en Suisse est situé à la campagne et n'est entouré que d'un nombre limité de bâtiments voisins. Dans le plan du Grand Genève, le périmètre est classé afin de protéger la « nuit ». En particulier, la zone proche de la route fait l'objet d'une rénovation et la zone le long du ruisseau présente un enjeu. Cependant, aucune mesure de protection n'est mentionnée au niveau local urbain. Le site PD se trouve à proximité immédiate de grands axes de transport et de bâtiments industriels sur un terrain. Aucune mesure de protection particulière n'est envisagée au niveau de l'urbanisme local. Le site PG se trouve dans un environnement naturel et en forêt, avec une pollution lumineuse très limitée. Bien qu'aucune mesure de protection particulière n'ait été prise pour ce site, tout laisse à penser que la situation actuelle doit être maintenue en priorité. De plus, le site PH dans la forêt se trouve dans une zone où la pollution lumineuse est très faible.

Bien qu'aucun niveau de protection particulier ne soit indiqué, on peut supposer que l'état actuel doit, dans la mesure du possible, être préservé. À proximité du site PJ, situé à la campagne, on constate la présence de petites sources lumineuses provenant de quelques constructions urbaines éloignées. La zone est classée comme zone à préserver et les corridors écologiques constituent un enjeu. Des mesures de protection générales sont en vigueur pour interdire l'éclairage artificiel le long des cours d'eau, bien qu'aucune zone de protection ne soit indiquée au niveau des plans d'urbanisme locaux. Le site PL est situé dans une zone agricole et est plutôt isolé à côté de champs, de forêts et de vignobles. En Suisse, les zones de protection de la nature interdisent l'éclairage artificiel. Au niveau local urbain, aucune protection ne s'applique en France.

En résumé, le site PD et ses environs sont situés dans une zone où la nuit doit être préservée en priorité. Cependant, aucune espèce notable n'est affectée et l'enjeu est donc modéré. Le site PA se trouve toutefois dans une zone caractérisée par une forte pollution lumineuse et par des enjeux écologiques dans la zone environnante. Il y a donc une réelle volonté de restaurer l'environnement nocturne et l'enjeu est de taille. L'enjeu est également important pour le site PB en Suisse, car la nuit doit être préservée et la pollution lumineuse devrait même être encore réduite. De plus, l'enjeu pour le site PF est élevé puisque le site est situé dans une zone où la pollution lumineuse est quasiment inexistante à ce jour. Les sites PJ et PL présentent des conditions similaires avec des enjeux élevés. Les sites PG et PH sont situés dans une forêt à faible pollution lumineuse et à proximité de réservoirs de biodiversité remarquables. Les enjeux liés à la pollution lumineuse sont donc très importants. Ces résultats doivent être pris en compte et intégrés dans la conception et la planification des sites de construction, et, s'agissant de la phase d'exploitation, un plan de préservation de la

nuit doit être élaboré pour l'ensemble des sites.

3.3.15. Rayonnement

Les risques éventuels pour la population et l'environnement résultant de l'exposition aux rayonnements non ionisants et ionisants à différents endroits de la surface ont été analysés sur la base des données disponibles dans les deux États hôtes. La Figure 3.52 montre les différents types de rayonnements existants (non ionisants et ionisants).

Les services notifiés des États hôtes chargés de réaliser des mesures pour établir des bases de données nationales auront besoin de données actualisées avant la mise en service d'un accélérateur de particules afin d'établir une ligne de base pour les rayonnements ionisants.

Rayonnements non ionisants

En France, les limites d'exposition varient en fonction de la gamme de fréquences utilisée, généralement entre 28 V/m et 87 V/m pour le champ électrique. La réglementation suisse établit une distinction entre les zones publiques, dans lesquelles les personnes ne séjournent que pendant de brèves périodes (telles que les routes ou les installations sportives), et les zones sensibles, dans lesquelles les personnes peuvent séjourner pendant une période limitée (les maisons et appartements, les écoles et les hôpitaux, par exemple).

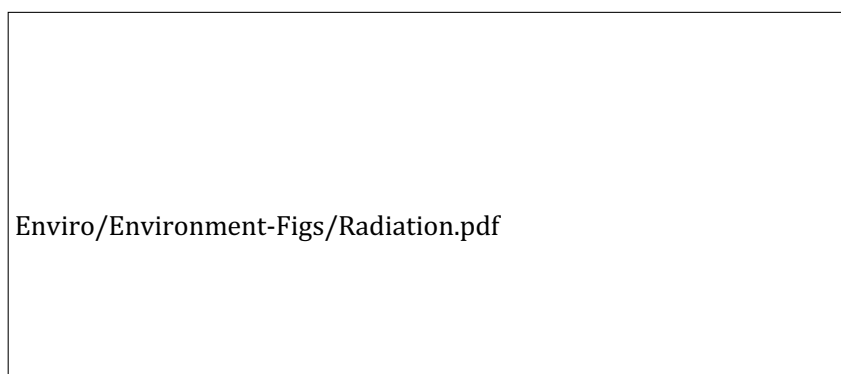


Fig. 3.52 : Types de rayonnements (Source : AIEA [91]).

Les limites d'installation d'équipements radioélectriques sont plus strictes en Suisse qu'en France, avec des valeurs maximales de champ électrique fixées à 4 V/m pour les installations à 900 MHz, 6 V/m pour les installations à 1 800 MHz et 5 V/m pour les installations fonctionnant sur plusieurs fréquences. Cette réglementation suisse vise à renforcer la protection des lieux sensibles par rapport aux directives de la Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants (ICNIRP). Les limites suisses en matière d'immission, qui représentent l'exposition cumulée à tous les émetteurs, s'alignent sur les recommandations européennes et sont identiques à celles de la France. La Figure 3.53 montre les valeurs des champs électriques et magnétiques mesurées sous la ligne, ainsi qu'à 30 m et 100 m de la ligne, pour les lignes aériennes à très haute tension, à haute tension et à basse tension.

Enviro/Environment-Figs/Lines_electromagnetic_field.pdf

Fig. 3.53 : Valeurs moyennes des champs électriques et magnétiques autour des lignes aériennes de transport d'électricité à 50 Hz (Source : DGS [92]).

Aucune ligne électrique n'émet de rayonnement basse fréquence à proximité du site PB en Suisse et des sites PD, PG, PH, PJ et PL en France. Une ligne de 63 kV passe à 250 m à proximité du site PF d'Éteaux, en France, et émet un champ électromagnétique négligeable sur le site de surface candidat. La ligne électrique souterraine de 66 kV qui alimente le Point 8 du LHC à Ferney-Voltaire en France se trouve juste à côté du site PA. Elle induit un champ électromagnétique très faible sur le site.

Certaines stations radio (sources d'ondes radioélectriques) sont présentes à proximité des sites de surface, mais les mesures d'exposition enregistrées sont bien inférieures aux niveaux de référence. Les données recueillies dans les stations de mesure situées à proximité des sites PA, PB, PD, PG, PJ montrent que toutes les mesures d'exposition sont nettement inférieures aux niveaux de référence. Aucune donnée n'a été obtenue pour les mesures effectuées dans un rayon de 5 km autour des sites PF, PH et PL en France. Des mesures détaillées devront être effectuées avant la mise en service de l'installation, mais le risque de dépassement des limites de rayonnements ionisants et non ionisants spécifiées dans la réglementation est considéré comme très faible.

Rayonnements ionisants

Les rayonnements ionisants transportent suffisamment d'énergie pour ioniser les atomes ou les molécules, ce qui entraîne des modifications moléculaires. Des doses élevées peuvent provoquer des dommages cellulaires et représenter un risque de mortalité, tandis que ces rayonnements sont essentiels dans le cadre d'applications contrôlées pour l'industrie, la recherche scientifique et la médecine. Les sources d'exposition sont d'origine naturelle et artificielle :

- Rayonnement cosmique naturel : les particules d'énergie provenant de l'espace contribuent à l'exposition, avec l'influence de l'altitude et de la situation géographique. Rayonnement terrestre : les éléments radioactifs de la croûte terrestre (par exemple, l'uranium, le thorium) émettent un rayonnement qui varie selon les régions en raison de facteurs géologiques.
- Radon naturel : le radon est un contributeur important qui s'accumule dans les espaces intérieurs mal ventilés. Il représente 33 % de l'exposition annuelle en France. Radionucléides incorporés : les radionucléides naturellement présents dans les aliments et l'eau contribuent à hauteur de 12 % à l'exposition annuelle.
- Sources artificielles, accidents et essais nucléaires : les retombées des essais nucléaires historiques et des accidents comme celui de Tchernobyl contribuent de manière marginale à l'exposition actuelle.
- Installations nucléaires : les émissions des installations civiles et militaires sont étroitement réglementées, avec des contributions négligeables (0,001-0,01 mSv/an à proximité des installations).

- Sources artificielles, applications médicales : les utilisations diagnostiques et thérapeutiques dominent l'exposition artificielle, contribuant à 34 % de l'exposition totale en France.
- Sources artificielles, activités de recherche scientifique : les accélérateurs de particules et les collisionneurs exploités par le CERN contribuent pour moins de 0,01 mSv/an.

Le tableau 3.16 donne une vue d'ensemble des conditions actuelles de rayonnement ionisant à l'emplacement des sites de surface.

Tableau 3.16 : Niveau d'exposition aux rayonnements ionisants sur les sites de surface aujourd'hui (Source : Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection (ASNR))

Saisie de données la plus proche	Exposition annuelle	Site de surface
Ferney-Voltaire	5,2 mSv/an	PA (Ferney-Voltaire, France)
Ville-la-Grand	4,0 mSv/an	PB (Presinge, Suisse)
Nangy	4,3 mSv/an	PD (Nangy, France)
Éteaux	4,4 mSv/an	PF (Éteaux, France)
Groisy	4,4 mSv/an	PG (Charvonnex et Groisy, France)
Charvonnex	4,9 mSv/an	PG (Charvonnex et Groisy, France)
Marlioz	4,9 mSv/an	PH (Cercier et Marlioz, France)
Cercier	5,0 mSv/an	PH (Cercier et Marlioz, France)
Dingy-en-Vuache et	5,0 mSv/an	PJ (Dingy-en-Vuache et Vulbens, France)
Vulbens,	5,8 mSv/an	PJ (Dingy-en-Vuache et Vulbens, France)
Challex	5,5 mSv/an	PL (Challex, France)

L'exposition aux rayonnements cosmiques, provenant de particules à haute énergie telles que les protons et les ions lourds de l'espace, présente des risques en raison de sa nature ionisante, qui peut endommager les tissus vivants. L'intensité de l'exposition augmente avec l'altitude ; elle est environ deux fois plus élevée à 1 500 mètres d'altitude qu'au niveau de la mer et encore plus élevée lors des voyages en avion. Alors que le champ magnétique terrestre réduit l'exposition près de l'équateur, les doses reçues sont plus élevées à proximité des pôles. En France, les rayonnements cosmiques représentent environ 7 % de l'exposition annuelle moyenne aux rayonnements ionisants, avec une dose efficace aux sites de surface comprise entre 0,32 et 0,70 mSv/an. En Suisse, la dose associée aux rayons cosmiques à proximité du site est d'environ 0,35 mSv/an.

Les rayonnements telluriques désignent les rayonnements ionisants émis par des éléments naturellement radioactifs, tels que l'uranium, le thorium et le potassium-40 présents dans la croûte terrestre. Les niveaux d'exposition varient en fonction de la géologie régionale, les zones riches en roches granitiques ou volcaniques présentant généralement des niveaux de rayonnement plus élevés. En France, les rayonnements telluriques contribuent à hauteur d'environ 14 % à l'exposition annuelle moyenne aux rayonnements ionisants, avec une dose efficace de l'ordre de 0,51 à 0,55 mSv/an dans les zones des sites de surface en France et de 0,33 mSv/an

à proximité du site de surface en Suisse.

L'exposition aux radionucléides naturels se produit par l'ingestion d'éléments radioactifs, tels que le polonium-210, présents dans les aliments, l'eau et l'air, et qui proviennent de roches terrestres, de sols ou d'interactions cosmiques. Les aliments comme les fruits de mer sont particulièrement riches en radionucléides et l'inhalation de tabac peut également y contribuer de manière significative. En France, cela représente environ 12 % de l'exposition annuelle moyenne aux rayonnements ionisants, avec une dose efficace d'environ 0,55 mSv/an en France, variant entre 0,4 et 3,1 mSv/an selon les habitudes alimentaires. En Suisse, l'exposition est d'environ 0,40 mSv/an. La consommation de tabac représente environ 0,04 mSv/an.

L'exposition au radon, un gaz naturellement radioactif, varie entre la France et la Suisse en raison de différences géologiques et de la diversité des méthodologies de mesure. En France, le radon contribue à hauteur de 33 % à l'exposition annuelle moyenne aux rayonnements ionisants, avec une dose moyenne de 1,5 mSv/an, variant entre 0,54 et 3,2 mSv/an. Les zones spécifiques concernées par les sites de surface dans l'Ain et en Haute-Savoie font état d'expositions légèrement plus faibles, de l'ordre de 1,47 et de 1,14 mSv/an, respectivement. En Suisse, le radon est le plus grand contributeur naturel au rayonnement, avec une dose moyenne de 3,3 mSv/an, ce qui témoigne d'un impact plus important. Cet écart est en partie dû aux différents facteurs de conversion de dose utilisés : la France utilise le coefficient UNSCEAR, tandis que la Suisse utilise les facteurs actualisés du CIPR, qui doublent approximativement les risques estimés. Par conséquent, l'exposition au radon est relativement plus importante en Suisse.

Les accidents nucléaires, les applications médicales, les installations nucléaires et les installations de recherche scientifique participent à l'exposition aux rayonnements ionisants provenant de sources artificielles en France et en Suisse.

Les applications médicales, tant en France qu'en Suisse, sont celles qui contribuent le plus à l'exposition aux rayonnements ionisants artificiels. En France, elles représentent environ 1,5 mSv/an par habitant, soit 34 % de l'exposition totale aux rayonnements. De même, en Suisse, les applications médicales contribuent à hauteur d'environ 1,49 mSv/an par habitant, ce qui souligne l'utilisation répandue de procédures diagnostiques et thérapeutiques faisant appel aux rayonnements ionisants dans les deux pays.

Les deux pays ne recensent désormais qu'une exposition minimale aux rayonnements dus aux accidents et retombées nucléaires passés, tels que Tchernobyl, ainsi qu'aux essais nucléaires atmosphériques. En France, la dose annuelle moyenne est de 0,012 mSv/an, avec des doses légèrement plus élevées dans les zones où les retombées sont importantes. En Suisse, cette exposition est encore plus faible, puisqu'elle ne représente que quelques centièmes de mSv par an, ce qui reflète une diminution de l'impact des retombées résiduelles au fil du temps.

L'exposition liée aux installations nucléaires est négligeable en France et en Suisse, en raison de mesures réglementaires strictes. En France, les personnes vivant dans un rayon de 10 km autour des installations nucléaires reçoivent une dose annuelle de 0,001 à 0,01 mSv dans des conditions d'exploitation fonctionnement normales. En Suisse, l'exposition à proximité des installations nucléaires et des installations scientifiques du CERN est également faible, avec des doses annuelles généralement inférieures à 0,004 mSv, ce qui témoigne de l'efficacité des mesures de sécurité et de surveillance.

En résumé, le contexte des rayonnements ionisants sur les sites de surface est nettement plus important que les rayonnements ionisants résiduels générés par les accélérateurs de particules scientifiques du CERN.

3.3.16. Risques techniques

Risques naturels

Dans le cadre de cette étude, plusieurs types de risques naturels susceptibles d'entraîner des interactions avec le projet ont été identifiés. Ceux-ci seront analysés plus en détail au cours d'une étude d'impact sur l'environnement ultérieure. Les sujets abordés concernent les inondations, les mouvements de terrain, les activités sismiques, les avalanches, les incendies de forêt, les cavités, le radon, le gonflement des argiles et les risques technologiques. Ces risques naturels peuvent également être causés par les effets du changement climatique. L'évolution du climat a été prise en compte dans l'étude de l'état actuel de l'environnement, ainsi que dans l'évolution de l'environnement dans lequel le projet serait intégré.

Inondations et mouvements de terrain

Les risques d'inondations et de mouvements de terrain associés à de nombreux facteurs, tels que la pluie, les eaux souterraines et les rivières, sont peu probables sur l'ensemble des sites. Les effets dus à l'instabilité du sol, tels que les glissements de terrain, les coulées de boue et l'érosion, ont également été pris en compte. Dans l'ensemble, aucun danger significatif ou effet potentiel entraînant des risques importants n'a été identifié sur les sites concernés. Aucun site de surface sur le territoire français n'est exposé à des mouvements de terrain. Pour le site PB à Presinge en Suisse, la zone de terrain potentiellement instable la plus proche est située à 700 m à l'est du site, mais le risque de glissement de terrain est superficiel. L'emplacement du site de surface candidat n'est pas exposé aux risques liés aux inondations ou aux mouvements de terrain.

Séismes

Les risques sismiques varient en fonction de la localisation. La France est divisée en cinq zones d'activité sismique. Les sites étudiés sont situés dans des zones d'activité sismique modérée ou moyenne. En particulier, les sites PA, PL et PJ sont situés dans des zones d'activité modérée (niveau 3), tandis que les sites PG, PF et PD sont situés dans des zones d'activité moyenne (niveau 4). Des principes de construction antisismique doivent donc être appliqués lors de l'élaboration de la conception du site de surface. En outre, certains des sites étudiés sont situés à proximité de failles tectoniques actives. Par exemple, le site PA à Ferney-Voltaire se trouve à environ 400 m d'une faille. En Suisse, le modèle de risque sismique classe les sites en cinq zones ; le site PB de Presinge est situé dans la zone Z1b (niveau 2), caractérisée par une faible activité sismique. D'autres études de terrain sont nécessaires, et une coopération sera entreprise avec des institutions scientifiques afin d'évaluer en détail le risque sismique local et de développer des modèles d'ingénierie spécifiques.

Incendies de forêt

Les incendies de forêt représentent un risque très faible dans les zones concernées par les sites de surface, bien que deux sites se trouvent dans des zones forestières. En France, le plan de prévention des risques d'incendies de forêt (PPRIF), établi au niveau communal ou intercommunal, cible les zones exposées à des niveaux de risque importants et à une forte pression foncière. En outre, le PPRIF peut également imposer le déboisement de zones afin d'isoler les bâtiments. Il peut également exiger de dimensionner les voies d'accès pour permettre le passage des camions de pompiers et l'évacuation des personnes en cas d'incendie. Aucune commune française concernée par les sites de surface n'est soumise à un plan de prévention des risques d'incendie de forêt et aucune des zones entourant les sites de surface en France n'est soumise à l'obligation légale de déboisement. Bien que le site PH de Cercier et Marlioz ne soit pas exposé au risque naturel d'incendie de forêt d'après les différents outils de réglementation et de gestion, il subsiste toujours un risque résiduel et faible d'incendie de forêt dans cette zone en raison de la présence de bois. En Suisse, et plus particulièrement dans le canton de Genève, il n'existe pas de loi, de plan de prévention ou de plan spécifique de gestion des risques d'incendie de forêt. Le site PB de Presinge n'est pas situé à proximité d'une forêt qui présenterait un risque d'incendie de forêt pour le site.

Avalanches

Les avalanches ne sont pas considérées comme représentant un risque pertinent pour les sites de surface en raison du terrain relativement plat et de la faible densité de forêts à proximité des sites analysés.

Cavités

Les cavités naturelles ou artificielles peuvent être considérées comme des dangers pour les activités de construction. L'analyse a porté sur leur présence et leurs effets potentiels en ce qui concerne la mise en œuvre des sites de surface. Aucune cavité n'est présente dans un rayon de 500 m autour des sites de surface français, à l'exception du site PG de Charvonnex où plusieurs cavités liées à des travaux militaires sont situées dans un rayon de plus de 250 m autour de ce site. Hormis leur existence et leur localisation, aucune information supplémentaire n'est disponible. Par conséquent, le risque potentiel lié aux cavités souterraines dans cette zone impose de recueillir des données supplémentaires.

Radon

Le radon est un gaz radioactif incolore et inodore qui provient des chaînes de désintégration de l'uranium et du thorium, tous deux naturellement présents dans les roches terrestres. La géologie, et en particulier la teneur en uranium des couches souterraines, est un facteur clé qui influence les niveaux de concentration de radon dans les bâtiments. Dans certaines régions, des caractéristiques souterraines spécifiques (par exemple, des failles, des travaux miniers, des sources hydrothermales) peuvent exacerber le transfert du radon vers la surface, au point d'augmenter localement son potentiel. Pour les constructions neuves, le transfert de radon peut être limité en améliorant l'étanchéité du bâtiment entre le sol et la structure. En France, la méthode de cartographie permet d'estimer le potentiel radon des formations géologiques en tenant compte des facteurs qui influencent à la fois la production de radon dans le sous-sol et son transport vers la surface. Les zones sont classées comme ayant un potentiel faible, modéré ou élevé. Tous les sites de surface français étudiés sont situés dans des zones à faible potentiel radon.

En Suisse, la carte du radon indique la probabilité en % de dépasser 300 Bq m⁻³ dans les bâtiments, avec une répartition en quatre catégories : 1 %, entre 2 et 10 %, entre 11 et 20 %, et > 20 %. Contrairement à la France, il n'existe pas de campagne nationale d'estimation des seuils de radon dans les bâtiments. Le site PB de Presinge se trouve dans une zone à faible risque, avec une probabilité de 2 à 10 % de dépasser 300 Bq m⁻³.

Retrait-gonflement des argiles

Le retrait-gonflement des argiles est un risque naturel qui a été évalué pour tous les sites de surface. Les sols argileux superficiels ont la capacité de changer de consistance en fonction de leur teneur en eau. Lorsque la teneur en eau d'un sol argileux augmente, son volume s'accroît ; ce phénomène est appelé « gonflement des argiles ». Inversement, une réduction de la teneur en eau provoque l'effet inverse, connu sous le nom de « retrait des argiles ». La Figure 3.54 explique le mécanisme du phénomène de retrait-gonflement. Ce retrait ou gonflement peut causer des dommages structurels aux bâtiments.

À partir du 1^{er} janvier 2024, en France, l'application des règles de construction a été renforcée et un nouveau certificat de comportement au retrait-gonflement des argiles est désormais obligatoire dans les zones moyennement ou fortement exposées. Les sites de surface situés en France sont soumis à une exposition faible à moyenne aux risques de retrait-gonflement. Le site PA de Ferney-Voltaire se trouve principalement dans une zone à faible risque, à l'exception d'une petite partie du site proche du point 8 du LHC (LHCb) où le niveau d'exposition est moyen. Les sites PD, PF, PG et PF sont considérés comme faiblement exposés. Les sites PH et PJ sont situés dans une zone moyennement exposée. Le site de surface PL de Challex est principalement situé dans la zone faiblement exposée, à l'exception d'un petit fragment dans la partie sud du site où l'exposition est moyenne, mais qui n'est pas destiné à accueillir des constructions et servira de tampon vert. En Suisse, une carte lithologique qui donne une vue d'ensemble du sous-sol classé selon des critères lithologiques et pétrographiques indique que le site PB de Presinge est situé dans des sols contenant des argiles. Cependant, la concentration et la profondeur de cet élément argileux dans le sol ne sont pas décrites avec précision. Des études détaillées du sol devront être entreprises au cours d'une phase ultérieure d'étude d'impact environnemental et de conception du site de surface afin de clarifier les conditions et, si nécessaire, d'en tenir compte lors de la conception du site de surface.

Risques technologiques

Les risques technologiques liés aux activités industrielles, environnementales et d'infrastructure peuvent potentiellement avoir des effets sur la santé humaine, la sécurité et le milieu environnant.

Enviro/Environment-Figs/Schema_clay_swelling-shrinking_.pdf

Fig. 3.54 : Gonflement et retrait des argiles. Les dommages causés au bâtiment sont dus, d'une part, à la dilatation induite par la pluie, et, d'autre part, au rétrécissement causé par l'évacuation de l'eau par l'arbre.

Les risques liés à ces dangers et effets proviennent d'installations industrielles, du transport de matières dangereuses et d'autres activités impliquant des substances dangereuses. C'est pourquoi leur présence à proximité des sites de surface candidats a été analysée.

En France, deux catégories d'installations industrielles sont considérées comme étant sources de risques. La première concerne les établissements déclarant des émissions et des transferts de polluants dans l'air, l'eau ou le sol, ainsi que la production de déchets dangereux. Il s'agit d'établissements tels que les grandes installations industrielles, les grandes stations d'épuration municipales et certaines fermes d'élevage. La seconde regroupe les installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE), qui sont des installations industrielles ou agricoles soumises aux réglementations relatives à la prévention des risques environnementaux et qui sont classées selon des régimes allant de la simple déclaration à l'autorisation, en fonction du risque. En outre, la réglementation SEVESO (directive 2012/18/UE) impose des contrôles stricts aux installations traitant des produits chimiques dangereux afin de prévenir les accidents graves.

En Suisse, l'ordonnance sur la prévention des accidents majeurs (OPAM) vise à protéger les personnes et l'environnement contre les dommages graves causés par des événements extraordinaires dans les installations ou lors du transport de matières dangereuses. L'OPAM s'applique aux entreprises qui dépassent des seuils spécifiques de matières dangereuses, aux organismes génétiques soumis à un confinement strict et aux infrastructures de transport telles que les gazoducs/oléoducs, les voies ferrées et les autoroutes utilisées pour les marchandises dangereuses. Il incombe aux autorités chargées de l'aménagement du territoire (cantons et communes) d'intégrer les aspects liés à la prévention des accidents majeurs dans leur plan d'occupation des sols. Bien que la Suisse n'applique pas la directive SEVESO, l'OPAM adopte des seuils encore plus stricts pour les substances dangereuses et inclut dans son champ d'application les voies de transport, les gazoducs/oléoducs et les micro-organismes dangereux.

Un gazoduc traverse le site de surface annexe PA près du LHCb, partant de la Suisse et longeant le site de surface principal PA vers le nord. Cette installation doit être prise en compte lors de la conception de l'infrastructure de surface ; cependant, aucune installation industrielle dangereuse n'est située à proximité du site PA et les principales menaces pourraient provenir de la proximité d'axes de communication majeurs (aéroport et routes départementales) susceptibles de transporter des marchandises dangereuses.

La présence d'un gazoduc à environ 200 m au sud-ouest du site de surface PB présente un risque potentiel d'accident impliquant des matières dangereuses. La route de Jussy, classée comme axe de transit majeur, longe la limite orientale du site. Cette route est soumise à la réglementation concernant le transport de marchandises dangereuses en vertu de l'ordonnance suisse OPAM. Par ailleurs, il n'y a pas d'autres installations industrielles, d'installations déclarant des émissions polluantes ou de périmètres de sécurité à proximité du site PB.

Les sites de surface PD, PF et PG sont situés à proximité d'axes de transport importants (autoroutes et routes départementales) utilisés pour le transport régional et national de marchandises, y compris de matières dangereuses, ce qui crée des risques potentiels d'accidents ou de déversements. Une ligne de chemin de fer actuellement utilisée pour le transport de passagers passe à proximité du site PG. Ni le site PD ni le site PG ne comptent d'autres installations industrielles classées ou sources d'émission de polluants dans un rayon de 500 m, ce qui garantit un risque environnemental relativement faible. La SARL Luc Maulet, une installation classée pour la protection de l'environnement qui traite des déchets inertes, est située à 150 m du site de surface PF près de l'A410, mais ne présente pas de risque car ses activités sont liées au stockage de déchets inertes non valorisables.

Il n'y a pas de grandes routes ou d'autoroutes dans un rayon de 500 m autour du site de surface PH, mais uniquement des routes et chemins locaux, ce qui réduit considérablement les risques liés au transport de matières dangereuses. Il n'y a pas non plus d'installations classées, d'installations émettant des polluants ou d'autres sites industriels à proximité. Toutefois, un gazoduc se trouve à proximité du site de PH et il convient d'accorder une attention particulière aux transports lourds qui traversent le tracé du gazoduc.

Hormis la présence de l'autoroute A40 située à 50 m au sud du site de surface PJ et l'exposition potentielle associée aux risques liés au transport de marchandises dangereuses, il n'y a pas d'installations classées ou d'établissements déclarant des rejets et transferts de polluants à proximité.

De même, pour le site de surface PL, hormis la proximité de la route départementale, aucune installation classée ni aucun établissement déclarant des rejets et transferts de polluants n'ont été identifiés dans un rayon de 500 m, incluant le territoire suisse.

Le risque de rupture de barrage a également été analysé. Un tel événement pourrait entraîner une fuite d'eau du réservoir et une inondation plus ou moins importante des zones environnantes. Aucune des communes françaises où se trouvent les sites de surface n'est exposée à un risque de rupture de barrage. Dans le canton de Genève, il y a deux barrages, chacun situé en aval du site de surface PB ; le site n'est donc pas soumis au risque de rupture de barrage.

Aucune installation nucléaire n'est présente à proximité des sites de surface, en France et en Suisse. Par ailleurs, il n'existe aucune installation soumise à la nomenclature ICPE pour les activités liées au risque pyrotechnique, dans un rayon de 500 m autour des sites, sur le territoire français. Sur le lac Léman, toute la zone géographique du Petit Lac est polluée par la présence de munitions déversées entre 1948 et 1979. Il s'agit de munitions telles que des obus, des cartouches de fusil, des bombes d'avion et d'autres résidus explosifs. Les sites PA et PB sont situés à 4 km des rives du lac. Ces sites de surface ne sont donc pas soumis au risque pyrotechnique associé aux munitions non démantelées qui se trouvent dans le lac.

En résumé, certains sites sont situés à proximité de voies de transport telles que des autoroutes, des routes départementales et des voies ferrées qui transportent ou peuvent transporter des marchandises dangereuses. Seul un gazoduc se trouve à proximité des sites PA, PB et PH, ce qui doit être pris en compte lors de la conception du site de surface afin de minimiser le risque d'accident environnemental. Cependant, il n'y a pas d'installations nucléaires, d'installations polluantes ou d'installations industrielles classées à moins de 500 m d'un site de surface et le risque de rupture de barrage ou de dangers pyrotechniques dus à la présence de munitions dans le lac Léman est minime. Dans l'ensemble, ces sites présentent un risque relativement faible pour l'environnement et la sécurité, une attention particulière étant accordée aux infrastructures situées à proximité des voies de transport.

Sites pollués

En France, les sites et sols pollués sont décrits comme des lieux qui, en raison de l'élimination de déchets ou de l'infiltration de polluants dans le passé, présentent des risques permanents pour les personnes ou l'environnement. Ces problèmes sont souvent dus à des pratiques obsolètes d'élimination des déchets, à des fuites de produits chimiques ou à des accidents. Certaines régions sont également polluées par les retombées atmosphériques qui se sont accumulées pendant de nombreuses années. Elles sont à distinguer de la pollution diffuse, telle que celle liée aux pratiques agricoles ou aux émissions produites par les voitures à proximité des grands axes routiers. Les activités industrielles ou agricoles susceptibles de provoquer des pollutions ou des risques pour la population locale sont considérées comme des installations classées et sont soumises à des réglementations. La politique nationale vise à prévenir la pollution future tout en gérant les sites existants et en veillant à ce qu'ils soient sûrs pour l'usage auquel ils sont destinés. Trois bases de données complémentaires (BASIAS, BASOL, SIS) fournissent des diagnostics complets sur la pollution, avec des inventaires détaillés des sites pollués et de leurs niveaux de risque.

En Suisse, les sites pollués font référence aux lieux où des déchets ont été stockés de manière permanente, comme les décharges, ainsi que les zones où des déchets ont été stockés ou infiltrés. Les sites contaminés sont ceux qui ont des effets nocifs ou perturbateurs sur l'environnement ou qui sont susceptibles d'en avoir à l'avenir. Grâce aux réglementations sur les déchets établies dans les années 1990, la Suisse a empêché la création de nouveaux sites contaminés, en interdisant les décharges de déchets dangereux et les déchets urbains non traités. Elle a mis en place l'infrastructure nécessaire à un traitement adéquat des déchets, ce qui garantit que tous les déchets sont traités de manière responsable.

Pour les sites de surface PA, PD, PG, PH et PB, il existe des sites répertoriés dans les bases de données BASIAS, BASOL, SIS ou Swiss dans un rayon de 500 m. Cependant, aucun site contaminé n'est recensé à proximité immédiate des zones PA, PB, PD, PF, PG, PH, PJ et PL.

3.3.17. Autres projets

Introduction

Dans un environnement soumis à un développement continu, à l'urbanisation et à l'évolution démographique dans un contexte transfrontalier, les contraintes et les opportunités qui peuvent émerger d'autres projets doivent être prises en compte lors de la conception d'une nouvelle infrastructure de recherche ayant des besoins importants en matière de développement territorial. Par conséquent, l'analyse de l'état initial de l'environnement comprenait l'établissement d'un inventaire des projets planifiés et construits qui étaient potentiellement pertinents pour la FCC. Un suivi continu doit être mis en œuvre pour maintenir cet inventaire à jour et agir rapidement en cas de développement d'un nouveau concept de projet, afin de comprendre si des synergies sont possibles et d'éviter l'émergence de conflits potentiels.

Aujourd'hui, les autres projets les plus pertinents à prendre en considération sont les suivants :

- Exploitation géothermique
- Traversée du lac
- Projet de développement du Grand Genève
- Projet de développement du Grand Annecy
- Élargissement de la route départementale D903 et intégration à l'autoroute A40 en France
- Réseau de chauffage urbain en Suisse
- Réseaux de chauffage en France
- Réseaux d'eau en Suisse
- Réseaux d'eau en France
- Développement du réseau ferroviaire Nord Genève

- Développement du réseau ferroviaire en France
- Développement territorial dans le secteur de Digny-en-Vuache, Vulbens, Valleiry
- Développement de Groisy
- Développement de Ferney-Voltaire et du secteur international de Genève

Exploitation géothermique

La stratégie d'approvisionnement en énergie du canton de Genève prévoit un développement important de la récupération de chaleur à partir de sources géothermiques dont la profondeur varie entre 100 m et plusieurs centaines de mètres. Les investigations menées dans le cadre de l'étude de faisabilité ne révèlent aucune incompatibilité entre le FCC et les installations géothermiques existantes aujourd'hui. Compte tenu de la profondeur des structures souterraines du FCC, il n'est pas exclu que d'autres sondages géothermiques conduisent à des conflits potentiels. Il est donc de la plus haute importance de mettre en place un système d'alerte précoce basé sur la trace de référence actuelle, qui permette au CERN, en tant que maître d'ouvrage, de dialoguer avec les personnes qui envisagent de créer de telles installations. Un déplacement mineur de la sonde peut souvent résoudre une incompatibilité. Si une sonde est construite sans qu'on le sache ou si les volumes souterrains ne sont pas correctement protégés contre d'autres projets, la sonde géothermique en conflit devra être enlevée et la perte devra être remplacée. En France, aucune sonde géothermique n'est connue à proximité du scénario de référence actuel et nous n'avons aucune connaissance d'une campagne géothermique à l'échelle d'un département ou d'une région. Cependant, la nécessité de réserver les volumes du sous-sol est tout aussi importante sur le territoire français.

Traversée du lac

Divers projets de traversée souterraine de lacs ont été conçus sur le territoire suisse au cours des dernières décennies dans le secteur de la FCC, mais ils ne se trouvent pas à proximité immédiate. Plus récemment, un projet de tunnel de métro a été proposé. Un tel projet peut donner lieu à des synergies potentielles, ainsi qu'à d'éventuels conflits. Il y aurait des synergies autour des études souterraines, des technologies de creusement des tunnels et de la gestion des matériaux excavés. Des conflits pourraient naître du chevauchement des calendriers de construction, qui pourrait entraîner une augmentation des nuisances, des difficultés accrues pour la gestion des matériaux excavés, des problèmes de disponibilité pour les entreprises d'ingénierie et les travailleurs, et de l'organisation des chantiers et des activités de construction. La coïncidence des processus d'autorisation de deux projets quasi simultanés pourrait éventuellement entraîner des problèmes d'acceptation sociétale pour les deux projets. Il faut également veiller à ce que les conceptions soient appropriées pour les deux projets, au cas où les deux projets de creusement de tunnels se chevaucheraient, bien que les profondeurs soient différentes.

Projet de développement du Grand Genève

Les documents d'aménagement territorial des deux pays d'accueil intègrent le développement continu d'un « Grand Genève » dans leurs documents d'aménagement. En outre, il s'agit d'un projet transfrontalier qui implique une coordination importante. Le projet comporte de nombreuses améliorations, telles que la mobilité routière et ferroviaire, l'urbanisme, le développement économique, le développement durable, le logement, la cohésion sociale et la gouvernance transfrontalière. Le projet facilite l'extension des activités scientifiques du CERN dans une zone plus vaste. Il crée également des contraintes, puisque le développement urbain implique une préservation plus stricte des zones naturelles et agricoles. Cette évolution rapide doit être prise en compte dans les développements futurs et les processus d'autorisation de l'infrastructure de recherche. Les documents d'aménagement existants couvrent une période allant jusqu'à 2030. Les mises à jour imminentes doivent inclure un futur projet de collisionneur de particules dans la région. Il est donc important de décider à temps de l'intention de faire avancer ou non un projet de construction. Comme l'a montré l'exemple de l'élargissement de la route départementale dans le secteur de Nangy, l'amélioration de la mobilité peut être une opportunité. Toutefois, elle peut également compromettre rapidement la faisabilité du scénario actuel en ce qui

concerne les sites de surface candidats.

Projet de développement du Grand Annecy

Le développement régional autour d'Annecy est pris en compte dans de nombreux documents d'aménagement en France à l'horizon 2050. Il concerne la mobilité, la gestion des ressources naturelles, l'utilisation commune des infrastructures et des services, la préservation de la nature et des espaces agricoles, le soutien à l'innovation et à la transition énergétique, le développement d'un tourisme écoresponsable, le développement de l'offre d'éducation et de formation, la cohésion sociale et la solidarité, et le développement d'une meilleure gouvernance commune entre les municipalités, les acteurs publics et privés, les associations et le public. Ce développement permet de créer des synergies avec le FCC qui, par exemple, vise également à développer l'innovation, l'éducation et la formation, ainsi qu'un tourisme de qualité dans la région, en particulier dans les secteurs de Groisy et de Charvonnex qui accueilleraient un site d'expérimentation. Des conflits pourraient potentiellement émerger du renforcement des mesures de protection.

Élargissement de la RD903 et intégration de l'A40

Le projet de relier l'autoroute A40 à la route départementale 903 et d'élargir considérablement cette route à proximité immédiate du site d'expérimentation PD à Nangy constituait un risque potentiel pour la faisabilité. Une interaction opportune avec l'administration de l'État hôte a permis d'élaborer une solution appropriée pour adapter le site de surface au projet routier. En fonction de la date de début et de la durée des travaux de construction routière, une solide coordination entre les deux projets sera nécessaire.

Réseau de chauffage urbain en Suisse

Le canton de Genève s'est engagé¹¹ à élargir considérablement ses réseaux de distribution de chaleur, en particulier sur les principaux axes de transport de chaleur. L'intégration de la chaleur géothermique, les systèmes GeniLac et GeniTerre assurent des capacités de chauffage et de refroidissement en vue de soutenir la réalisation des objectifs de protection climatique. Ce projet permet de créer des synergies concrètes avec la future infrastructure de recherche qui sera en mesure de fournir des quantités importantes de chaleur résiduelle pouvant être injectées dans ce réseau. Aucun conflit n'a été identifié.

Réseaux de chauffage en France

Plusieurs réseaux de chauffage urbain commencent à être conçus et développés dans les périmètres de divers sites de surface candidats en France. Cela concerne, entre autres, le site PA de Ferney-Voltaire, par exemple. Ce développement ne génère pas de conflits, mais comme le montre le cas de Ferney-Voltaire, il crée des potentiels de synergie concrets. Le réseau de Ferney-Voltaire bénéficie aujourd'hui de la chaleur fournie par le Grand collisionneur de hadrons. Un futur collisionneur de particules permettrait non seulement d'assurer la continuité, mais aussi d'augmenter considérablement la chaleur fournie. Des études spécifiques de la demande ont été réalisées dans le cadre de l'étude de faisabilité et ont confirmé cette synergie potentielle.

Réseaux d'eau en Suisse

Les plans régionaux pour le traitement des eaux dans la région de Genève sont actuellement en cours de révision, mais les détails ne sont pas disponibles. Bien qu'il soit peu probable qu'il y ait des conflits avec le projet FCC, il est prudent de suivre l'évolution du plan régional de gestion de l'eau. L'eau brute utilisée pour refroidir le collisionneur de particules peut contenir une forte proportion de résidus non dissous après plusieurs recirculations. Il est important de s'assurer que les matières résiduelles, y compris les solides dissous totaux (TDS) dans l'eau de refroidissement, peuvent être acceptés et seront acceptés par les stations régionales de traitement des eaux.

Réseaux d'eau en France

Comme en Suisse, la connaissance de la planification et de l'évolution des réseaux d'eau locaux et des installations de traitement des eaux n'est pas disponible au niveau central. Bien qu'il soit peu probable qu'il y ait des conflits avec le projet FCC, il est prudent de suivre l'évolution du plan régional de gestion de l'eau.

¹¹<https://www.ge.ch/installer-remplacer-chauffage/reseaux-thermiques-structurants-rt-s-0>

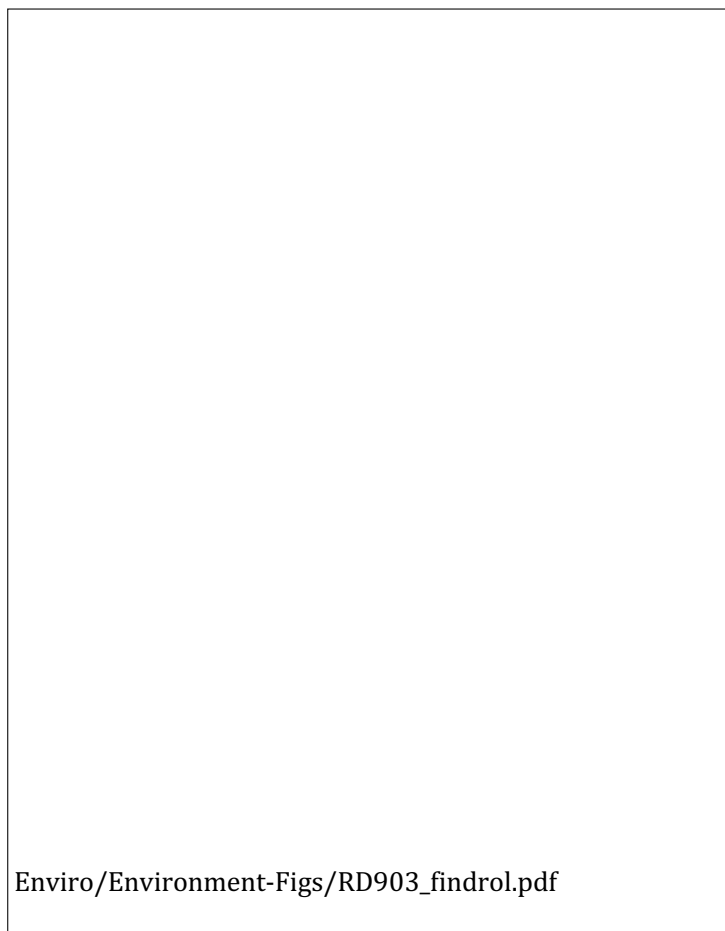


Fig. 3.55 : Vue d'ensemble du projet de réaménagement de la RD903 entre l'échangeur A40 de Findrol et le carrefour des Chasseurs.

Comme indiqué ci-dessus, il est important de s'assurer que l'eau de refroidissement peut être et sera acceptée par les stations régionales de traitement des eaux.

L'installation de traitement des eaux située à proximité du site PD représente une opportunité pour le projet. L'étude a notamment consisté à vérifier la faisabilité de l'extension de l'installation de traitement des eaux avec des infrastructures destinées à accepter l'eau de refroidissement résiduelle du collisionneur de particules. En outre, l'étude a révélé qu'il était, en principe, techniquement et économiquement possible de traiter les eaux usées de la station d'épuration et de les utiliser pour les systèmes de refroidissement de l'eau. Cela permet de réduire la consommation d'eau brute et de créer un avantage socio-économique potentiel en utilisant les eaux usées traitées lorsque le collisionneur de particules n'en a pas besoin.

Développement du réseau ferroviaire Nord Genève

La ligne Léman Express existante atteint déjà sa capacité maximale et la saturation du trafic routier exige un développement supplémentaire de l'infrastructure ferroviaire. Le développement d'un axe de transport ferroviaire nord-sud est une priorité du canton de Genève. Un conflit avec le FCC est peu probable et le transport supplémentaire peut, d'autre part, conduire à des synergies potentielles pour la période d'exploitation de la nouvelle infrastructure du collisionneur de particules.

Développement du réseau ferroviaire en France

L'augmentation continue du trafic routier, accompagnée d'une saturation du trafic et d'impacts sur la qualité de l'air, nécessite également un développement de l'infrastructure ferroviaire en France dans la région concernée par le FCC. Il s'agit principalement des lignes Léman Express qui passent à proximité de certains sites de surface du FCC. Par conséquent, le développement du système ferroviaire présente des opportunités pour le projet et potentiellement pour le territoire.

Développement territorial dans le secteur de Dingy-en-Vuache, Vulbens, Valleiry

La modernisation de l'autoroute A40 dans les secteurs de Dingy-en-Vuache, Vulbens et Valleiry est prévue par la société d'exploitation ATMB entre 2023 et 2028. Il est important que la construction du FCC commence après la rénovation du tunnel du Vuache afin d'éviter les limitations. Si tel est le cas, les travaux prévus sur l'autoroute n'entraînent pas de conflit avec la FCC. Toutefois, il faut prévoir des travaux de conception en temps utile concernant l'accès à l'autoroute pour le site PD pendant la période de construction du FCC. Il faudrait environ 10 ans pour mettre en place un tel accès.

Les développements territoriaux autour de la mobilité locale (p. ex. pistes cyclables), de l'éducation (p. ex. lycée) et des services d'urgence (p. ex. pompiers) représentent des opportunités intéressantes pour développer des synergies avec le FCC. Un engagement opportun avec les parties prenantes locales, départementales et régionales est nécessaire pour tirer parti du projet FCC, soutenir ces projets de développement territorial et les intégrer dans les activités du site de surface PJ.

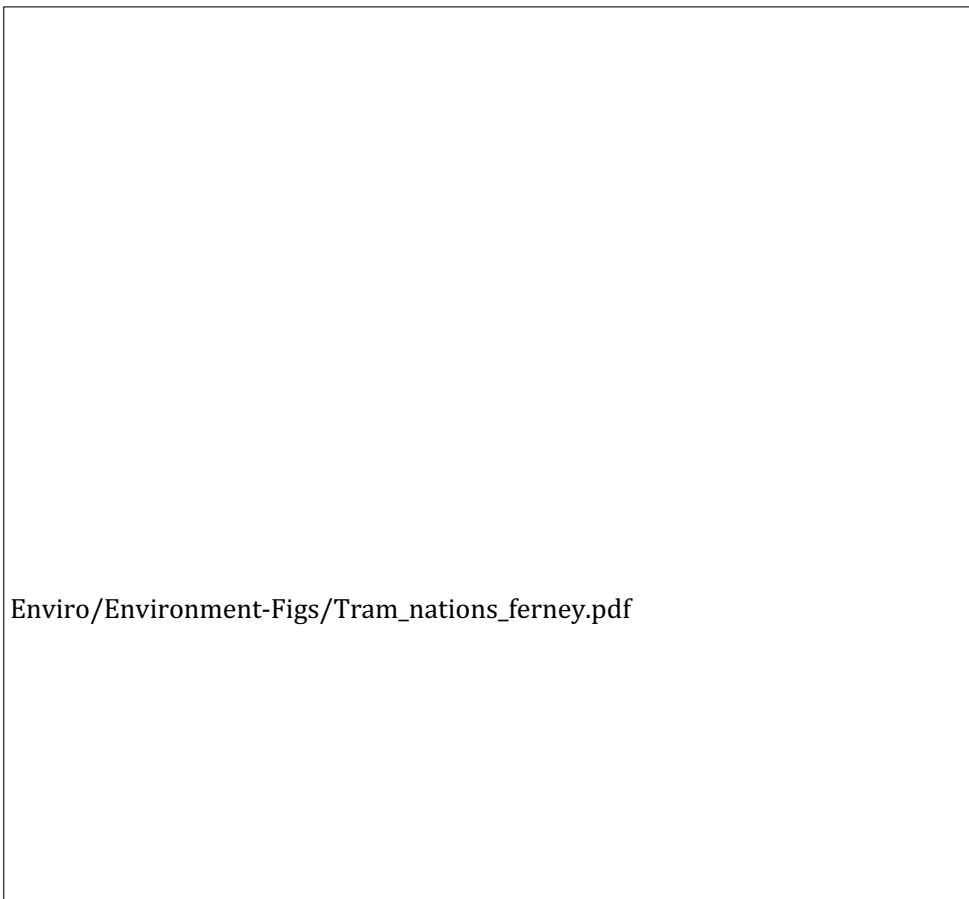
Développement de Groisy

Un projet d'aménagement scolaire a été validé par le département de Haute-Savoie en 2023. Il n'y a pas de conflit avec le projet de la FCC. Cependant, ce projet et d'autres projets de développement connexes à Groisy et à Charvonnex représentent des opportunités intéressantes pour générer des synergies telles que la fourniture de chaleur résiduelle, un tourisme de haute qualité et la création de programmes d'apprentissage et d'autres formes de coopération dans le domaine de l'éducation.

Développement de Ferney-Voltaire et du secteur international de Genève

La commune de Ferney-Voltaire a récemment lancé un vaste programme de réaménagement et de modernisation autour d'une nouvelle zone d'activité commerciale (ZAC) à proximité du site de surface PA. La fourniture de chaleur résiduelle provenant du Point 8 du LHC (LHCb) du CERN est également intégrée dans le développement d'un réseau local de chauffage urbain. Des développements créant des synergies avec l'aéroport de Genève sont également envisagés dans ce secteur. Le plan prévoit également la création d'installations de haute technologie et d'innovation, ainsi qu'une augmentation significative de la capacité de logement. Parallèlement, du côté suisse de la frontière, d'importantes activités de développement ont débuté au Grand Saconnex. Le développement du système de tramway local reliant le secteur international de Genève (Nations unies) à Ferney-Voltaire a été planifié.

Toutes ces activités de développement économique local peuvent potentiellement créer des conflits avec les activités de construction du FCC en raison de la concentration locale de sites de construction et du trafic lié à la construction. Une coordination en temps utile avec les acteurs locaux sur la planification de la construction d'un FCC est donc nécessaire.



Enviro/Environment-Figs/Tram_nations_ferney.pdf

Fig. 3.56 : Le futur projet de ZAC de Ferney Genève avec une extension de la ligne de tram et un terminus situé à moins d'un kilomètre du site PA.

D'autre part, ces développements peuvent conduire à une fertilisation croisée significative en termes de fourniture de chaleur résiduelle, de mobilité, d'éducation et de développements économiques.

3.4. Conclusion

La phase d'étude de faisabilité a anticipé les études et les enquêtes sur le terrain qui font partie du processus d'autorisation environnementale dans les deux pays. Il s'agit, par exemple, de l'établissement d'un état initial de l'environnement, de l'identification et de la hiérarchisation des aspects environnementaux dignes d'intérêt, de l'identification des projets connexes indirects et induits (accès routiers, électricité, eau et traitement de l'eau), ainsi que des engagements informels avec le public et ses représentants. Le processus d'élaboration des scénarios a été documenté, ainsi que les variantes et l'évolution des versions, le scénario de référence et les invariants du projet.

Les études ont permis d'identifier les questions pertinentes et les points nécessitant une attention particulière. Les zones souterraines critiques ont été localisées et la nécessité de poursuivre les investigations souterraines afin d'établir un modèle 3D complet et détaillé a été identifiée. Ce dernier servira de base au processus de construction. Les résultats des études préliminaires du sous-sol fourniront des informations sur l'amélioration de la profondeur et de l'inclinaison du tracé du tunnel. L'analyse de l'état initial a révélé que les différents sites de surface sont soumis à des contraintes environnementales très différentes et présentent des opportunités différentes pour la création de synergies. Le travail de description des éléments du projet et des aspects environnementaux a montré la nécessité d'adopter une approche itérative en raison du développement long et itératif des conceptions techniques. Une description détaillée des travaux de construction souterrains est nécessaire dans un premier temps pour évaluer les impacts environnementaux de la phase de construction. Un plan de gestion adéquate des matériaux excavés, conforme aux meilleures pratiques industrielles et susceptible d'être présenté aux organismes notifiés dans les deux États hôtes, doit être établi dès que les résultats préliminaires des investigations souterraines seront disponibles. Les exigences relatives aux accélérateurs de particules doivent être formellement documentées pour permettre un développement suffisamment détaillé des infrastructures techniques nécessaires à l'évaluation des incidences sur l'environnement. Une stratégie et des lignes directrices en matière d'écoconception ont été élaborées et doivent être intégrées dans le développement ultérieur du projet en mettant en place une approche transversale d'ingénierie des systèmes à l'échelle du projet.

Bien que des défis et des sensibilités environnementales aient été révélés et documentés, aucun obstacle fondamental n'a pu être identifié en ce qui concerne la faisabilité technique, d'ingénierie et environnementale.

Les emplacements de référence des sites de surface nécessiteront des approches d'optimisation, de réduction et d'intégration très différentes. Lorsque ces approches ne permettent pas d'atténuer les impacts résiduels, des mesures compensatoires peuvent être nécessaires. Ces mesures peuvent varier considérablement en termes de type, de taille et d'approche d'un site à l'autre. En cas de perte d'espaces agricoles protégés, une compensation de 1 pour 1 est envisagée pour recréer la zone perdue en transplantant la terre arable dans des friches ou des zones de moins bonne qualité. Le reboisement représente un autre moyen de compenser la perte d'habitats et de biodiversité.

Le reboisement autour des sites de surface où les forêts ont été supprimées est une option, de même que l'établissement de nouvelles forêts dans des zones auparavant non boisées. L'intégration paysagère et la préservation de la visibilité peuvent être assurées par des éléments de site semi-enterrés, par une séparation des sites en différents segments et par un terrassement.

L'utilisation d'énergies décarbonées, y compris d'énergies renouvelables, vise à maintenir les émissions du champ 2 à un niveau faible. Des avantages socio-économiques supplémentaires peuvent, par exemple, être générés par la conclusion de contrats et d'accords de fourniture d'énergie qui prévoient la création de nouvelles sources d'énergie renouvelables et par l'intégration, dès le départ, de la récupération et de la fourniture de chaleur résiduelle. Les projets d'innovation spécifiques à un site peuvent conduire à des réductions supplémentaires de l'empreinte environnementale et à des avantages socio-économiques supplémentaires, tels que l'utilisation d'eaux usées traitées, la création d'infrastructures de mobilité douce, le développement d'un tourisme et de services locaux de haute qualité autour de certains sites de surface et la création d'opportunités de formation et d'éducation dans le cadre du projet dans son ensemble et sur les sites de surface individuels.

Futur collisionneur circulaire (FCC)

Rapport d'étude de faisabilité

Volume 3, chapitre 4

Développement durable

Traduction française du chapitre 4, " Développement durable"

La traduction de cette publication technique/scientifique a été réalisée à l'aide d'outils automatisés. Elle peut différer de la version originale en anglais à divers égards.

En cas de doute, la version anglaise fait foi.

31 mars 2025

Soumis à la revue European Physical Journal ST, publication conjointe de EDP Sciences, de Springer Science+Business Media, et de la Società Italiana di Fisica.

Note de la rédaction

L'une des recommandations de la mise à jour 2020 de la stratégie européenne pour la physique des particules était que « l'Europe et ses partenaires internationaux étudient la faisabilité technique et financière d'un futur collisionneur de hadrons au CERN avec une énergie au centre de masse d'au moins 100 TeV et avec une installation de productions d'électrons-positrons, d'interactions de Higgs et d'interactions électrofaibles dans une première étape ».

En juin 2021, le Conseil du CERN a lancé l'étude de faisabilité du FCC, qui doit être achevée d'ici 2025, à temps pour la prochaine mise à jour de la stratégie européenne pour la physique des particules. Les résultats de l'étude sont rendus publics dans le présent rapport d'étude de faisabilité du FCC, en tant que contribution au processus de mise à jour de la stratégie européenne pour la physique des particules, lancé par le Conseil du CERN en mars 2024. Les études présentées dans le présent rapport d'étude de faisabilité du FCC n'impliquent aucun engagement de la part des États membres ou membres associés du CERN en faveur de la construction du futur collisionneur circulaire.

Le présent rapport et les hypothèses qu'il contient ne préjugent pas des analyses de faisabilité territoriale qui seront menées par les États hôtes, la France et la Suisse, ni des résultats de leurs débats publics et processus de concertation respectifs, ni des décisions futures de leurs autorités compétentes.

Remerciements

Nous tenons à remercier les membres du Comité de pilotage international :

F. Gianotti (Président), CERN
R. Bello, CERN
P. Chomaz, CEA, France
M. Cobal, INFN et Université d'Udine, Italie
B. Heinemann, DESY, Allemagne
T. Koseki, KEK, Japon
M. Lamont, CERN
L. Merminga, FNAL, États-Unis
J. Mnich, CERN
M. Seidel, PSI et EPFL, Suisse
C. Warakaulle, CERN

et les membres du Comité consultatif scientifique :

A. Parker (Président), Université de Cambridge, Royaume-Uni
R. Bartolini, DESY, Allemagne
A. Chabert, SFTRF, France
H. Ehrbar, Heinz Ehrbar Partners LLC, Suisse
B. Gavela Legazpi, UAM Madrid, Espagne
G. Hiller, TU Dortmund, Allemagne
S. Krishnagopal, FNAL, États-Unis
P. Križan, Université de Ljubljana, Slovénie
P. Lebrun, ESI, France
P. McIntosh, STFC, ASTeC, UKRI, Royaume-Uni
M. Minty, BNL, États-Unis
R. Tenchini, INFN Sezione di Pisa, Italie

pour leurs conseils constants et leur révision minutieuse qui ont permis de mener à bien ce rapport.

Les recherches menées par la collaboration internationale pour le FCC, hébergée par le CERN, ont conduit à la présente publication et ont été financées par le programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne sous les numéros de subvention 951754 (FCCIS), 654305 (EuroCirCol), 764879 (EASITrain), 730871 (ARIES), 777563 (RI-Paths) et du FP7 sous le numéro 312453 (EuCARD-2).

Ce travail a également bénéficié du soutien de l'initiative CHART (Swiss Accelerator Research and Technology), fondée en 2016 en tant que collaboration faîtière pour les activités de recherche et de technologie portant sur les accélérateurs. Les partenaires actuels de CHART sont le CERN, l'Institut PSI, l'EPFL, l'ETH-Zurich et l'Université de Genève.

Avis concernant les marques : Toutes les marques commerciales figurant dans le présent rapport sont reconnues comme telles.

Le présent rapport a été édité avec le système collaboratif de rédaction et de publication Overleaf.com. La mise en page et la préparation finale de l'impression ont été réalisées avec pdfTeX 3.14159265-2.6-1.40.17.

Copyright CERN pour le bénéfice de la collaboration FCC 2024, Creative Commons Attribution 4.0

Le transfert de connaissances fait partie intégrante de la mission du CERN.

Le CERN publie ce volume en libre accès sous la licence Creative Commons Attribution 4.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) afin d'en permettre une large diffusion et utilisation. La soumission d'une contribution au serveur de documents du CERN est réputée valoir acceptation, de la part du contributeur, de la présente déclaration de droits d'auteur et de licence. Les contributeurs sont priés d'obtenir les autorisations éventuellement nécessaires à cette fin.

Le présent volume est indexé dans : Serveur de documents du CERN (CDS) :

CERN-FCC-ACC-2025-0003 DOI
10.17181/CERN.I26X.V4VF

<http://cds.cern.ch/record/2928194>

La présente édition du rapport doit être citée de la façon suivante :

Rapport d'étude de faisabilité du futur collisionneur circulaire, Volume 3 : Génie civil, implantation et durabilité, édition préliminaire publiée par M. Benedikt et al, Rapports sur les accélérateurs du CERN,

CERN-FCC-ACC-2025-0003, DOI 10.17181/CERN.I26X.V4VF, Genève, 2025.

Disponible en ligne : <https://cds.cern.ch/record/2928194>

Liste des éditeurs au 31 mars 2025

M. Benedikt¹ (Chef d'étude), F. Zimmermann¹ (Chef d'étude adjoint), B. Auchmann^{1,2}, W. Bartmann¹, J.P. Burnet¹, C. Carli¹, A. Chancé³, P. Craievich², M. Giovannozzi¹, C. Grojean^{4,5}, J. Gutleber¹, K. Hanke¹, A. Henriques¹, P. Janot¹, C. Lourenço¹, M. Mangano¹, T. Otto¹, J. Poole¹, S. Rajagopalan⁶, T. Raubenheimer⁷, E. Todesco¹, L. Ulrici¹, T. Watson¹, G. Wilkinson^{1,8}.

Liste des contributeurs au 31 mars 2025

A. Abada^{9,10,11}, M. Abbrescia^{12,13}, H. Abdolmaleki^{14,15}, S.H. Abidi⁶, A. Abramov¹, C. Adam^{9,16,17}, M. Ady¹, P.R. Adzic¹⁸, I. Agapov⁴, D. Aguglia¹, I. Ahmed¹⁹, M. Aiba², G. Aielli^{20,21}, T. Akan²², N. Akchurin²³, D. Akturk²⁴, M. Al-Thakeel^{1,25,26}, G.L. Alberghi²⁵, J. Alcaraz Maestre²⁷, M. Aleksa¹, R. Aleksan³, F. Alharthi^{9,10,28}, J. Alimena⁴, A. Alimenti²⁹, S. Alioli^{30,31}, L. Alix^{1,9,16}, B.C. Allanach³², L. Allwicher⁴, A.A. Altintas³³, M. Altinli^{33,34}, M. Alviggi^{35,36}, G. Ambrosio³⁷, Y. Amhis^{9,10,11}, A. Amiri^{38,39}, G. Ammirabile⁴⁰, T. Andeen⁴¹, K.D.J. André¹, J. Andrea^{9,42,43}, A. Andreazza^{44,45}, M. Andreini¹, T. Andriollo⁴⁶, L. Angel⁴⁷, M. Angelucci⁴⁸, S. Antusch⁴⁹, M.N. Anwar^{12,50}, L. Apolinário⁵¹, G. Apollinari³⁷, R.B. Appleby^{52,53}, A. Apresyan³⁷, Aram Apyan⁵⁴, Armen Apyan⁵⁵, A. Arbey^{9,56,57}, B. Argiento^{35,36}, V. Ari⁵⁸, S. Arias⁵⁹, B. Arias Alonso¹, O. Arnaez^{9,16,17}, R. Arnaldi⁶⁰, F. Arneodo⁶¹, H. Arnold⁶², P. Arrutia Sota¹, K. Arundell⁶³, M.E. Ascioti^{64,65}, K.A. Assamagan⁶, S. Aumiller⁶⁶, G. Aydin⁶⁷, K. Azizi^{38,68}, P. Azzi⁶⁹, N. Bacchetta⁶⁹, A. Bacci⁴⁴, B. Bai⁷⁰, Y. Bai⁷¹, L. Balconi^{44,45}, G. Baldinelli^{64,65}, B. Balhan¹, A.H. Ball^{1,72}, A. Ballarino¹, S. Banerjee⁷³, S. Banik^{2,74}, D.P. Barber^{4,75}, M.B. Barbero^{9,76,77}, D. Barducci^{40,78}, D. Barna⁷⁹, G.G. Barnaföldi⁷⁹, M.J. Barnes¹, A.J. Barr⁸, R. Bartek⁸⁰, H. Bartosik¹, S.A. Bass⁸¹, U. Bessler^{9,82,83}, M.J. Basso^{84,85}, A. Bastianin^{45,86}, P. Bataillard⁸⁷, M. Battistini¹, J. Bauche¹, L. Baudin¹, J. Baudot^{9,42,43}, B. Baudouy³, L. Bauerdick³⁷, C. Bayındır^{88,89}, H.P. Beck⁹⁰, F. Bedeschi⁴⁰, C. Bee⁶², M. Begel⁶, M. Behtouei⁴⁸, L. Bellagamba²⁵, N. Bellegarde¹, E. Belli^{1,91}, E. Bellingeri⁹², S. Belomestnykh³⁷, A.D. Benaglia³⁰, G. Bencivenni⁴⁸, J. Bendavid¹, M. Benmergui⁹³, M. Benoit⁹⁴, D. Benvenuti^{1,40}, T. Bergauer⁹⁵, N. Bernachot⁹⁶, G. Bernardi^{9,97,98}, J. Bernardi⁹⁹, Q. Berthet^{100,101,102}, S. Bertoni¹⁰³, C. Bertulani¹⁰⁴, M.I. Besana², A. Besson^{9,42,43}, M. Bettelini¹⁰⁵, S. Bettoni², S. Beuvier¹⁰⁶, P.C. Bhat³⁷, S. Bhattacharya¹⁰⁷, J. Bhom¹⁰⁸, M.E. Biagini⁴⁸, A. Bibet-Chevalier¹⁰⁹, M. Bicerli¹¹⁰, M. Biglietti¹¹¹, G.M. Bilei⁶⁴, B. Bilki^{112,113}, K. Bisgaard Christensen¹, T. Biswas¹¹⁴, F. Blanc¹¹⁵, F. Blekman^{4,116,117}, A. Blondel^{9,102,118}, J. Blümlein⁴, D. Boccanfuso^{35,119}, A. Bogomyagkov¹²⁰, P. Boillon¹⁰⁹, P. Boivin¹⁰¹, M.J. Boland¹²¹, S. Bologna¹²², O. Bolukbasi³³, R. Bonnet¹⁰³, J. Borburgh¹, F. Bordry¹, P. Borges de Sousa¹, G. Borghello¹, L. Borriello³⁵, D. Bortoletto⁸, M. Boscolo⁴⁸, L. Bottura¹, V. Boudry^{9,82,83}, R. Boughezal¹²³, D. Bourilkov¹²⁴, M. Boyd^{84,125}, D. Boye⁶, G. Bozzi^{126,127}, V. Braccini⁹², C. Bracco¹, B. Bradu¹, A. Braghieri¹²⁸, S. Braibant^{25,26}, J. Bramante¹²⁹, G.C. Branco¹³⁰, R. Brenner¹³¹, N. Brisa¹⁰³, D. Britzger¹³², G. Broggi^{1,91}, L. Bromiley¹, E. Brost⁶, Q. Bruant³, R. Bruce¹, E. Bründermann¹³³, L. Brunetti^{9,16,17}, O. Brüning¹, O. Brunner¹, X. Buffat¹, E. Bulyak¹³⁴, A. Burdyko^{44,135}, H. Burkhardt^{1,136}, P.N. Burrows¹³⁷, S. Busatto^{44,91}, S. Buschaert⁸⁷, D. Buttazzo⁴⁰, A. Butterworth¹, D. Butti¹, G. Cacciapaglia^{138,139,140}, Y. Cai⁷, B. Cai¹¹, V. Cairo¹, O. Cakir⁵⁸, P. Calafiura¹⁴², R. Calaga¹, S. Calatroni¹, D.G. Caldwell¹⁴³, A. Çalışkan¹⁴⁴, C. Calpini¹⁴⁵, M. Calviani¹, E. Camacho-Pérez¹⁴⁶, P. Camarri^{20,21}, L. Caminada^{2,74}, M. Campajola^{35,36}, A.C. Canbay⁵⁸, K. Canderan¹, S. Candido¹, F. Canelli⁷⁴, A. Canepa³⁷, S. Cantarella⁴⁸, K.B. Cantún-Avila¹⁴⁶, L. Capriotti^{147,148}, A. Caram¹⁴⁹, A. Carbone⁴⁴, J.M. Carceller¹, G. Carini⁶, C. Carli¹, F. Carlier¹, C.M. Carloni Calame¹²⁸, C. Caron¹⁵⁰, F. Carra¹, C. Cartannaz⁸⁷, S. Casenove¹, G. Catalano¹⁵¹, V. Cavaliere⁶, C. Cazzaniga¹⁵², C. Cecchi^{64,65}, F.G. Celiberto¹⁵³, M. Cepeda²⁷, F. Cerutti¹, F. Cetorelli^{30,31}, G. Chachamis⁵¹, Y. Chae⁴, F. Chagnet¹⁵⁴, I. Chaikovska^{9,10,11}, M. Chalhoub⁸⁷, M. Chamizo-Llatas⁶, M. Champagne¹⁵⁵, H. Chanal^{9,156,157}, G. Chapelier¹⁰⁹, P. Charitos¹, C. Charles¹⁰⁶, T.K. Charles¹⁵⁸, C. Charlot^{9,82,83}, S. Chatterjee⁴, A. Chaudhuri¹⁵⁹, R. Chehab^{9,10,11}, S.V. Chekanov¹⁶⁰, H. Chen⁶, T. Chesne¹⁰⁶, F. Chiapponi^{25,26}, G. Chiarello^{161,162}, M. Chiesa¹²⁸, P. Chiggiato¹, Ph. Chomaz³, M. Chorowski¹⁶³, J.P. Chou¹⁶⁴, M. Chrusz¹⁰⁸, W. Chung¹⁶⁵, S. Ciarlantini^{69,166}, A. Ciarma⁴⁸, D. Cieri¹³², A.K. Ciftci¹⁶⁷, R. Ciftci¹⁶⁸, R. Cimino⁴⁸, F.

Cirotto^{35,36}, M. Ciuchini¹¹¹, M. Cobal^{169,170}, A. Coccaro¹⁴¹, R. Coelho Lopes De Sa¹⁷¹, J.A. Coleman-Smith¹, F. Collamati¹⁷², C. Colldelram¹⁷³, P. Collier¹, P. Collins¹, J. Collot^{9,174,175}, M. Colmenero¹, L. Colnot¹⁵¹, G. Coloretti⁷⁴, F.A. Conventi^{35,176}, A. Cook¹, L. Cooley^{177,178}, A.S. Cornell¹⁷⁹, C. Cornella¹, G. Cornette¹⁰⁶, I. Corredoira¹⁸⁰, P. Costa Pinto¹, F. Couderc³, J. Coupard¹, S. Coussy⁸⁷, R. Crescenzi¹⁸¹, I. Crespo Garrido^{1,182}, T. Critchley^{1,102}, A. Crivellin⁷⁴, T. Croci⁶⁴, C. Cudré¹⁰⁶, G. Cummings³⁷, F. Cuna¹², R. Cunningham¹, B. Curé¹, E. Curtis¹⁸³, M. D'Alfonso¹⁸⁴, L. D'Aloia Schwartzentruber¹⁸⁵, G. D'Amen⁶, B. D'Anzi^{12,13}, A. D'Avanzo^{35,36}, D. d'Enterria¹, A. D'Onofrio³⁵, M. D'Onofrio¹⁸⁶, M. Da Col¹⁵¹, M. Da Rocha Rolo⁶⁰, C. Dachauer¹⁸⁷, B. Dagli²⁴, A. Dainese⁶⁹, B. Dalena³, W. Dallapiazza¹⁸⁸, M. Dam¹⁸⁹, H. Damerau¹, V. Dao⁶², A. Das¹⁹⁰, M.S. Daugaard¹, S. Dauphin¹⁰⁹, A. David¹, T. Dávidék¹⁹¹, G.J. Davies¹⁸³, S. Dawson⁶, J. de Blas¹⁹², A. de Cosa¹⁵², S. De Curtis¹⁹³, N. De Filippis^{12,50}, E. De Lucia⁴⁸, R. De Maria¹, E. De Matteis⁴⁴, A. De Roeck¹, A. De Santis⁴⁸, A. De Vita^{1,69,166}, A. Deandrea^{9,56,57}, C.J. Debono¹⁹⁴, M. Deeb¹⁰¹, M.M. Defranchisi¹, J. Degens¹⁸⁶, S. Deghaye¹, V. Del Duca⁴⁸, C.L. Del Pio⁶, A. Del Vecchio⁹¹, D. Delikaris¹, A. Dell'Acqua¹, M. Della Pietra^{35,36}, M. Delmastro^{9,16,17}, L. Delprat¹, E. Delugas¹⁵¹, Z. Demiragli¹⁹⁵, L. Deniau¹, D. Denisov⁶, H. Denizli¹⁹⁶, A. Denner¹⁹⁷, A. Denot¹⁰⁹, G. Deptuch⁶, A. Desai¹⁹⁸, H. Deveci¹, A. Di Canto⁶, A. Di Ciaccio^{20,21}, L. Di Ciaccio^{9,16,17}, D. Di Croce^{1,115}, C. Di Fraia^{35,36}, B. Di Micco^{29,111}, R. Di Nardo^{29,111}, T.B. Dingley⁸, F. Djama^{9,76,77}, F. Djurabekova¹⁹⁹, D. Dockery³⁷, S. Doebert¹, D. Domange^{1,200}, M. Donegà¹⁵², U. Dosselli⁶⁹, H.A. Dostmann^{1,201}, J.A. Dragovich³⁷, I. Drebot⁴⁴, M. Drewes²⁰², T.A. du Pree²⁰³, Z. Duan²⁰⁴, C. Duarte-Galvan²⁰⁵, O. Duboc²⁰⁶, M. Duda², P. Duda¹⁶³, H. Duran Yildiz⁵⁸, H. Durand¹⁰⁶, P. Durand¹⁰⁶, G. Durieux²⁰², Y. Dutheil¹, I. Dutta³⁷, J.S. Dutta²⁰⁷, S. Dutta²⁰⁸, F. Duval¹, F. Eder¹, M. Eisterer⁹⁹, Z. El Bitar^{9,42,43}, A. El Saied²⁰⁹, M. Elisei⁴⁴, J. Ellis^{1,210}, W. Elmetenawee¹², J. Elmsheuser⁶, V. Daniel Elvira³⁷, S.C. Eno²¹¹, Y. Enomoto²¹², B.A. Erdelyi^{69,166}, O.E. Eruteya^{102,213}, M. Escobar²¹⁴, O. Etisken²¹⁵, I. Eymard¹⁴⁵, J. Eysermans¹⁸⁴, D. Falchieri²⁵, C. Falkenberg²⁰⁶, F. Fallavollita^{1,132}, A. Afalou^{1,9,10}, J. Faltova¹⁹¹, J. Fanini¹, L. Fanò^{64,65}, K. Fanti¹⁰⁶, R. Farinelli²⁵, M. Farino¹⁶⁵, S. Farinon¹⁴¹, H. Fatehi³⁸, J. Fatterbert¹⁰⁶, A. Faure²¹⁶, A. Faus-Golfe^{9,10,11}, G. Favia¹, L. Favilla^{35,119}, W.J. Fawcett³², A. Federowicz³⁷, L. Feligioni^{9,76,77}, L. Felsberger¹, Y. Feng²³, A. Fernández Téllez²¹⁷, R. Ferrari¹²⁸, L. Ferreira¹, F. Ferro¹⁴¹, M. Fiascaris¹, C. Fiorio⁴⁵, S.A. Fleury¹, L. Florez¹⁸⁸, M. Florio^{45,151}, A. Fondacci⁶⁴, B. Fontimpe²¹⁴, K. Foraz¹, R. Fortunati², M. Foudaidy^{9,10,11}, M. Fouaidy^{9,10,11}, A. Foussat¹, A. Fowler¹, J.D. Fox²¹⁸, M. Francesconi³⁵, B. Francois¹, R. Franqueira Ximenes¹, F. Franesini⁴⁸, A. Frasca^{1,186}, A. Freitas²¹⁹, J.A. Frost⁸, K. Furukawa²¹², A. Gabrielli^{25,26}, A. Gaddi¹, F. Gaede⁴, A. Gallén¹³¹, R. Galler^{220,221}, E. Gallice¹⁰⁶, E. Gallo^{4,116}, H. Gamper¹, G. Ganis¹, S. Ganjour³, S. Gao⁶, A. Garandi⁴⁹, C. Garaus²⁰⁶, D. Garcia¹, R. García Alía¹, R. García Gil²²², C.M. Garcia Jaimes^{1,115}, H. Garcia Rodrigues^{2,223}, C. Garion¹, M. Garlaschè¹, D. Garnier¹⁵⁴, M.V. Garzelli¹¹⁶, S. Gascon-Shotkin^{9,56,57}, M. Gasior¹, G. Gaudino^{35,119}, G. Gaudio¹²⁸, V. Gaur²²⁴, K. Gautam^{74,117}, V. Gawas¹, T. Gehrman⁷⁴, A. Gehrman-De Ridder^{74,152}, K. Geiger¹, M. Genco¹⁵¹, F. Gerigk¹, H. Gerwig¹, A. Ghribi^{1,9,225}, P. Giacomelli²⁵, S. Giagu^{91,172}, E. Gianfelice³⁷, S. Giappichini¹³³, D. Gibellieri^{1,226}, F. Giffoni¹⁵¹, G. Gil da Silveira²²⁷, S.S. Gilardon¹, M. Giovannetti⁴⁸, T. Girardet¹⁰⁶, S. Girod^{1,106}, P. Giubellino⁶⁰, P. Giubilato^{69,166}, F. Giuli^{20,21}, M. Giuliani¹⁰³, E.L. Gkoukousis^{1,74}, S. Glukhov²²⁸, J. Gluza²²⁹, B. Goddard¹, C. Goffing^{1,133}, D. Goldsworthy¹, T. Golling¹⁰², R. Gonçalves^{51,230}, V.P. Gonçalves^{47,231}, T. Gonçalves Da Silva²¹⁴, J. Gonski⁷, R. Gonzalez Suarez¹³¹, S. Gorgi Zadeh¹, S. Gori²³², E. Gorini^{161,233}, L. Gouskos²³⁴, M. Gouzevitch^{9,56,57}, E. Granados¹, F. Grancagnolo¹⁶¹, S. Grancagnolo^{161,233}, A. Grassellino³⁷, A. Grau¹³³, E. Graverini^{40,78,115}, F.G. Gravili^{161,233}, H.M. Gray^{142,235}, M. Grazzini⁷⁴, Mario Greco^{29,111}, Michela Greco^{60,236}, A. Greljo⁴⁹, J.-L. Grenard¹, A.V. Gritsan²³⁷, R. Gröber^{69,166}, A. Grudiev¹, E. Gschwendtner¹, J. Gu²³⁸, D. Guadagnoli^{17,138,239}, G. Guerrieri¹, A. Guiavarch²⁰⁹, G. Guillermo Canton^{1,240}, M. Guinchard¹, Y.O. Günaydin²⁴¹, K. Gurcel⁹³, L.X. Gutierrez Guerrero^{242,243}, D. Gutiérrez Rueda¹, A. Gutiérrez-Rodríguez²⁴⁴, V. Guzey^{199,245}, C. Haber¹⁴², T. Hacheney²⁴⁶, B. Hacıahinoglu³³, K. Hahn¹²³, J. Hajer¹³⁰, T. Hakulinen¹, J.C. Hammersley²⁴⁷, M. Hance²³², J.B. Hansen¹⁸⁹, B. Härer¹³³, E. Hauzinger²²⁰, M. Haviernik¹⁹¹, B. Hegner¹, C. Helsen¹¹⁵, Ana Henriques¹, C. Hernalsteens¹, H. Hernández-Arellano²¹⁷, R.J. Hernández-Pinto²⁰⁵, M.A. Hernández-Ruíz²⁴⁴, J. Hernández-Sánchez²¹⁷, J.W. Heron¹, L.M. Herrmann¹, R. Hirosky²⁴⁸,

J.F. Hirschauer³⁷, J.D. Hobbs⁶², S. Höche³⁷, M. Hofer¹, G. Hoffstaetter^{6,249}, W. Höfle¹, M. Hohlmann²⁵⁰, F. Holdener²⁵¹, B. Holzer¹, C.G. Honorato²¹⁷, H. Hoorani²⁵², A. Houver¹⁰⁶, E. Howling^{1,8,137}, X. Huang⁷, F. Hug²⁵³, B. Humann¹, P. Hunchak¹²¹, Y. Husein¹, A. Hussain^{1,254}, G. Iadarola¹, G. Iakovidis⁶, G. Iaselli^{12,50}, P. Iengo³⁵, A. Ilg⁷⁴, M. Iodice¹¹¹, A.O.M. Iorio^{35,36}, V. Ippolito¹⁷², U. Iriso¹⁷³, J. Isaacson³⁷, G. Isidori⁷⁴, R. Islam²⁵⁵, A. Istepanyan¹⁰⁶, S. Izquierdo Bermudez¹, V. Izzo³⁵, P.D. Jackson¹⁹⁸, R. Jafari^{1,38}, S.S. Jagabathuni^{1,102}, S. Jana^{256,257}, C. Järmyr Eriksson¹, P. Jausserand¹⁵⁴, M. Jensen²⁵⁸, J.M. Jimenez¹, F.R. Joaquim¹³⁰, O.R. Jones¹, J. Joos¹⁰⁹, E. Jourd'huy^{9,259}, E. Jourdan²¹⁴, J.M. Jowett^{1,260}, A. Jueid²⁶¹, A.W. Jung²⁰⁷, M. Kagan⁷, I. Kahraman⁵⁸, V. Kain¹, J. Kalinowski²⁶², J.F. Kamenik^{263,264}, A. Kanso²⁶⁵, T. Kar²⁶⁶, S.O. Kara²⁶⁷, H. Karadeniz²⁶⁸, S.R. Karmarkar²⁰⁷, V. Karpati²⁶⁹, I. Karpov¹, M. Karppinen¹, P. Karst^{9,76,77}, S. Kartal³³, V.V. Kashikhin³⁷, U. Kaya⁵⁸, A. Kehagias^{1,270}, J. Keintzel¹, M. Kennouche¹, M. Kenzie³², M. Kerréveur-Lavaud⁴⁶, R. Kersevan^{1,271}, V. Keus^{199,272}, H. Khanpour^{14,273,274}, V.V. Khoze²⁷⁵, V.A. Khoze²⁷⁵, P. Kicsiny¹, R. Kieffer¹, C. Kiel¹¹⁵, J. Kieseler¹³³, A. Kilic²⁷⁶, B. Kilminster⁷⁴, S. Kim²⁷⁷, Z. Kirca²⁷⁶, M. Klein¹⁸⁶, A. Klimentov⁶, M. Klute¹³³, V. Klyukhin^{120,278}, M. Knecht^{138,279,280}, B. Knieh¹¹⁶, P. Ko²⁸¹, S. Ko¹, F. Kocak²⁷⁶, T. Koffas²⁸², C. Kokkinos^{283,284}, K. Kołodziej²²⁹, K. Kong²⁸⁵, P. Kontaxakis¹⁰², I.A. Koop¹²⁰, P. Kopciwicz¹, P. Koppenburg²⁰³, M. Koratzinos^{1,2}, K. Kordas²⁸⁶, A. Korsun^{9,10,11}, O. Kortner¹³², S. Kortner¹³², B. Korzh¹⁰², T. Koseki²¹², J. Kosse², P. Kostka^{1,186}, S. Kostoglou¹, A.V. Kotwal⁸¹, G. Kozlov^{1,278}, I. Kozsar¹, T. Kramer¹, P. Krkotic¹, H. Kroha¹³², K. Kröninger²⁴⁶, S. Kuday^{1,58}, G. Kuhlmann²⁸⁷, O. Kuhlmann^{1,288}, M. Kuhn²⁸⁹, A. Kulesza²⁹⁰, M. Kumar²⁹¹, F. Kurian⁶, A. Kurtulus^{1,152}, T.H. Kwok⁷⁴, S. La Mendola¹, M. Lackner^{99,292}, T. Ładzinski¹, D. Lafarge¹, P. Laïdouni¹, G. Lamanna^{9,16,17}, N. Lamas¹⁹, G. Landsberg²³⁴, C. Lange², D.J. Lange¹⁶⁵, A. Langner¹, A.J. Lankford²⁹³, M.S. Larson²⁹⁴, K. Lasocha¹, A. Latina¹, S. Lauciani⁴⁸, M. Laufenberg¹⁰⁶, G. Lavezzari¹, L. Lavezzi⁶⁰, L. Lavezzo¹, M. Le Garrec^{1,9,16}, A. Le Jeune¹⁰³, Ph. Lebrun^{1,295}, Y. Léchevin¹, A. Lechner¹, E. Lecointe¹⁰⁶, J.S.H. Lee²⁹⁶, S.W. Lee²⁹⁷, S.J. Lee^{281,298}, T. Lefevre¹, C. Leggett¹⁴², T. Lehtinen²⁹⁹, S. Leone⁴⁰, C. Leonidopoulos³⁰⁰, S. Leontsinis⁷⁴, G. Leprince-Maillère³⁰¹, G. Lerner¹, O. Leroy^{9,76,77}, T. Lesiak¹⁰⁸, P. Levai⁷⁹, A. Leveratto⁹², R. Levi¹⁵⁴, A. Li⁶, S. Li^{302,303}, D. Liberati³⁰⁴, G.L. Lichtenstein⁴⁷, M. Liepe²⁴⁹, Z. Ligeti¹⁴², H. Lin³⁰⁵, S. Linda¹⁴⁵, E. Lipeles³⁰⁶, Z. Liu³⁰⁷, S.M. Liuzzo³⁰⁸, T. Loeliger²⁸⁹, A. Loeschcke Centeno³⁰⁹, A. Lorenzetti⁷⁴, C. Lorin³, R. Losito¹, M. Louka^{12,310}, M.L. Loureiro García¹⁸², I. Low^{123,160}, K. Lubonis¹⁵⁴, M.T. Lucchini^{30,31}, V. Lukashenko⁷⁴, G. Luminati⁴⁸, A.J.G. Lunt^{1,311}, A. Lusiani^{40,312}, M. Luzum³¹³, H. Ma⁶, A. Maas³¹⁴, E. Macchia^{1,91,172}, A. Macchiolo⁷⁴, G.E. Machinet²⁶⁵, R. Madar^{9,156,157}, T. Madlener⁴, C. Madrid²³, A. Magalotti²⁹, M. Maggiora^{60,236}, A.-M. Magnan¹⁸³, M.A. Mahmoud³¹⁵, Y. Mahmoud^{316,317}, F. Mahmoudi^{1,9,56}, H. Mainaud Durand¹, J. Maitre¹⁰⁹, Y. Makhloufi¹⁰², B. Malaescu^{9,118,318}, A. Malagoli⁹², C.H. Malan¹⁰⁹, M. Malekhosseini³⁸, M. Malekhosseini³⁸, A. Maloizel^{1,97,98}, S. Malvezzi³⁰, A. Malzac¹⁴⁹, G. Manco¹²⁸, L.S. Mandacarú Guerra¹⁶⁵, P. Manfrinetti^{92,319}, E. Manoni⁶⁴, J. Mans³⁰⁷, L. Mantani³²⁰, S. Manzoni¹, L. Marafatto¹⁶⁹, C. Marcel¹, T. Marcel¹¹⁰, R. Marchevski¹¹⁵, G. Marchiori^{9,97,98}, F. Mariani^{44,91}, V. Mariani^{64,65}, S. Marin¹, C. Marinas³²⁰, V. Marinozzi³⁷, S. Mariotto^{44,45}, C. Marquis¹⁰⁶, J. Martelain³²¹, G. Martelli^{64,65}, A. Martens^{9,10,11}, I. Martin-Melero¹, V.I. Martinez Outschoorn¹⁷¹, F. Martinez²¹⁷, C.M. Jardim²⁷, L. Marzola^{322,323}, S. Masciocchi^{260,266}, A. Mashal¹⁴, A. Masi¹, I. Masina^{147,148}, P. Mastrapasqua²⁰², V. Mateu³²⁴, S. Mattiazzo^{69,166}, M. Maugis¹⁰³, D. Mauree¹⁴⁵, G.H.I. Maury-Cuna³²⁵, A. Mayoux¹, E. Mazzeo¹, S. Mazzoni¹, M. McCullough¹, M. Meena^{9,42,43}, E. Meftah¹⁰², Andrew Mehta¹⁸⁶, Ankita Mehta¹, B. Mele¹⁷², R. Mena-Andrade¹, M. Mentink¹, D. Mergelkuhl¹, V. Mertinger²⁶⁹, L. Mether¹, S. Meylan¹⁰⁶, T. Michel¹⁰³, T. Michlmayr², M. Migliorati^{91,172}, A. Milanese¹, C. Milardi⁴⁸, G. Milhano⁵¹, C. Mirabelli³²⁶, T. Miralles^{9,156,157}, L. Miralles Verge¹, D. Mirarchi¹, K. Mirbaghestan⁷⁴, N. Mirian^{4,327}, V.A. Mitsou³²⁰, D.S. Mitzel²⁴⁶, M. Mlynarikova¹, S. Möbius⁹⁰, M. Mohammadi Najafabadi^{1,14}, G.B. Mohanty³²⁸, R. N. Mohapatra²¹¹, S. Moneta⁶⁴, P.F. Monni¹, E. Monnier^{9,76,77}, S. Monteil^{9,156,157}, I. León Monzón²⁰⁵, F. Moortgat^{1,329}, N. Morange^{9,10,11}, M. Moretti^{147,148}, S. Moretti⁷², T. Mori^{1,212}, I. Morozov¹²⁰, A. Morozzi⁶⁴, M. Morrone¹, A. Moscariello¹⁰², F. Moscatelli^{64,330}, I. Moulin²¹⁶, N. Mounet¹, A. Mueller³³¹, A.-S. Müller¹³³, B.O. Müller²⁸⁷, J. Mundet²²², E. Musa^{1,4}, V. Musati⁸, R. Musenich¹⁴¹, E. Musumeci³²⁰, M. Mylona¹, V.V. Mytrochenko^{9,10,134}, B. Nachman¹⁴², T. Nakamoto²¹², M. Napsuciale³²⁵, M.

Nardecchia^{91,172}, G. Nardini³³², G. Narváez-Arango³³³, S. Naseem⁶¹, A. Navascues ,
 Cornago¹, B. Naydenov¹, G. Nergiz¹, A.V. Nesterenko²⁷⁸, C. Neubüser³³⁴, H.B.
 Newman³³⁵, F. Niccoli^{1,336}, O. Nicrosini¹²⁸, U. Niedermayer²²⁸, G. Niehues¹³³, J. Nielsen¹,
 G. Nigrelli^{1,91,172}, S. Nikitin¹²⁰, I.B. Nikolaev¹²⁰, A. Nisati¹⁷², N. Nitika^{169,170}, J.M. No³³⁷,
 M. Nonis¹, Y. Nosochkov⁷, A. Novokhatski^{1,7}, J.M. O'Callaghan³³⁸, S.A. Ochoa-Oregon²⁰⁵,
 K. Ohmi^{204,212}, K. Oide^{1,102,212}, V.A. Okorokov¹²⁰, C. Oleari^{30,31}, D. Oliveira Damazio^{1,6},
 Y. Onel¹¹³, A. Onofre^{339,340,341}, P. Osland³⁴², T. Otto¹, Y.M. Oviedo-Torres^{343,344,345}, A.
 Ozansoy⁵⁸, F. Ozaydin^{88,346}, K. Ozdemir³⁴⁷, A. Ozturk¹, M.A. Pérez de León²⁰⁵, S.
 Pacetti^{64,65}, H. Pacey⁸, J. Paciello¹⁰⁹, C.E. Pagliarone^{348,349}, A. Paillex¹⁰⁶, H.F. Pais da Silva¹,
 F. Palla⁴⁰, A. Pampaloni¹⁴¹, C. Pancotti¹⁵¹, M. Pandurovic³⁵⁰, O. Panella⁶⁴, G.
 Panizzo^{169,170}, C. Pantouvakis^{69,166}, L. Panwar^{9,118,318}, P. Paolucci³⁵, Y. Papa¹⁰⁶, A.
 Papaefstathiou³⁵¹, Y. Papaphilippou¹, A. Paramonov¹⁶⁰, A. Paret^{128,352}, B. Parker⁶, V.
 Parma¹, F. Parodi^{141,319}, M. Parodi¹, B. Paroli^{44,45}, J.A. Parsons³⁵³, D. Passarelli³⁷, D.
 Passeri^{64,65}, B. Pattnaik³²⁰, A. Patwa³⁵⁴, C. Paus¹⁸⁴, F. Pauss¹⁵², F. Peauger¹, I. Pedraza²¹⁷, R.
 Pedro⁵¹, J. Pekkanen¹, G. Peon¹, A. Perez¹¹⁰, E. Perez¹, F. Pérez¹⁷³, J.C. Perez¹, J.M. Pérez²⁷,
 R. Perez-Ramos^{138,139,355}, G. Pérez Segurana¹, A. Perillo Marcone¹, S. Perna^{35,36}, K. Peters⁴,
 S. Petracca^{35,356}, A.R. Petri⁴⁴, F. Petriello¹²³, A. Petrovic¹, L. Pezzotti²⁵, G. Piacquadio⁶², G.
 Piazza¹⁸¹, A. Piccini¹, F. Piccinini¹²⁸, A. Pich³²⁰, T. Pieloni¹¹⁵, J. Pierlot¹, A.D. Pilkington⁵²,
 M. Pillet³²⁶, M. Pinamonti^{169,170}, N. Pinto²³⁷, L. Pintucci^{169,170}, F. Pinzauti¹, K.
 Piotrkowski²⁷³, C. Pira⁴⁸, M. Pitt¹, R. Pittau¹⁹², S. Pittet¹, P. Placidi^{64,65}, W. Płaczek³⁵⁷, S.
 Plätzer^{314,358}, M.-A. Pleier⁶, E. Ploerer^{74,117}, H. Podlech^{359,360}, F. Poirier^{9,16,17}, G.
 Polesello¹²⁸, M. Poli Lener⁴⁸, J. Polinski¹⁶³, Z. Polonsky⁷⁴, N. Pompeo²⁹, M. Pont¹⁷³, G.
 Alexandru-Popeneciu³⁶¹, W. Porod¹⁹⁷, L. Porta¹, L. Portales³, T. Portaluri³⁰⁹, M.A.C.
 Potenza⁴⁵, C. Prasse²⁸⁷, E. Premat¹⁸⁵, M. Presilla¹³³, S. Prestemon¹⁴², A. Price³⁵⁷, M.
 Primavera¹⁶¹, R. Principe¹, M. Prioli⁴⁴, F.M. Procacci¹², E. Proserpio^{44,135}, A. Provino^{92,319},
 C. Pueyo¹, T. Puig¹⁹, N. Pukhaeva²⁷⁸, S. Pulawski²²⁹, G. Punzi^{40,78}, A. Pyarelal³⁶², J.
 Qian³⁰⁵, H. Quack³⁶³, F. S. Queiroz⁴⁷, G. Quintas-Neves³⁰¹, H. Rafique⁷², J.-Y. Raguin², J.
 Raidal³²², M. Raidal³²², P. Raimondi³⁷, A. Rajabi⁴, S. Ramírez-Urbe²⁰⁵, S. Randles¹⁸⁶, T.
 Rao⁶, C.Ø. Rasmussen⁶, A. Ratkus³⁶⁴, P.N. Ratoff^{53,365}, P. Razis^{366,367}, P. Rebello Teles^{1,368},
 M.N. Rebelo¹³⁰, M. Reboud^{9,10,11}, S. Redaelli¹, C. Regazzoni¹⁰⁶, L. Reichenbach^{1,369}, M.
 Reissig¹³³, E. Renou¹⁰⁶, A. Rentería-Olivo³²⁰, J. Reuter⁴, S. Rey¹⁰⁶, A. Ribon¹, D. Ricci¹, M.
 Rignanese^{69,166}, S. Rimjaem³⁷⁰, R.A. Rimmer³⁷¹, R. Rinaldesi¹, L. Rinolfi^{1,295}, O. Rios¹, G.
 Ripellino¹³¹, B. Rivas³⁷², A. Rivetti⁶⁰, T. Robens³⁷³, F. Robert¹⁸⁵, E. Robutti¹⁴¹, C. Roderick¹,
 G. Rodrigo³²⁰, M. Rodríguez-Cahuantzi²¹⁷, L. Röhrig^{156,157,246}, M. Roig³⁷⁴, F. Rojati¹⁰⁹, J.
 Rojo^{203,375}, J. Roloff²³⁴, P. Roloff¹, A. Romanenko³⁷, A. Romero Francia¹, H. Romeyer³⁷⁶, N.
 Rompotis¹⁸⁶, N. Rongieras¹⁰³, G. Rosaz¹, K. Roslon³⁷⁷, M. Rossetti Conti⁴⁴, A. Rossi^{64,65}, E.
 Rossi^{35,36}, L. Rossi^{44,45}, A.N. Rossia^{69,166}, S. Rostami³⁸, G. Roy¹, B. Rubik³⁷, I. Ruehl¹, A.
 Ruiz-Jimeno³⁷⁸, R. Ruprecht¹³³, J.P. Rutherford³⁶², L. Rygaard⁴, M.S. Ryu²⁹⁷, L. Sabato^{1,115},
 G. Sadowski^{9,42,43}, D. Saez de Jauregui^{133,379}, M. Sahin³⁸⁰, A. Sailer¹, M. Saito³⁸¹, P. Saiz¹,
 G.P. Salam^{382,383}, R. Salerno^{9,82,83}, T. Salmi²⁹⁹, B. Salvachua¹, J.P.T. Salvesen^{1,8,137}, B.
 Salvi³⁰¹, D. Sampsonidis²⁸⁶, Y. Villamizar^{138,139,140}, C. Sandoval³³³, S. Sanfilippo², E.
 Santopinto¹⁴¹, R. Santoro^{44,135}, X. Sarasola¹¹⁵, L. Sarperi²⁸⁹, I.H. Sarpün³⁸⁴, S. Sasikumar¹,
 M. Sauvain³⁸⁵, A. Savoy-Navarro^{3,9}, R. Sawada³⁸¹, G. Sborlini³⁸⁶, J. Scamardella^{35,36}, M.
 Schaer², M. Schumann^{1,4}, M. Schenk¹, C. Scheuerlein¹, C. Schiavi^{141,319}, A.
 Schloegelhofer¹, D. Schoerling¹, A. Schöning²⁶⁶, S. Schramm¹⁰², D. Schulte¹, P.
 Schwaller^{253,387}, A. Schwartzman⁷, Ph. Schwemling³, R. Schwienhorst³⁸⁸, A. Sciandra⁶, L.
 Scibile¹, I. Scimemi³⁸⁹, E. Scomparin⁶⁰, C. Sebastiani¹, B. Seeber³⁹⁰, J.T. Seeman⁷, F.
 Sefkow⁴, M. Seidel^{2,115}, S. Seidel⁷⁵, J. Seixas^{341,391,392}, N. Selimovic⁶⁹, M. Selvaggi¹, C.
 Senatore¹⁰², A. Senoli¹⁹⁶, N. Serra⁷⁴, A. Seryi³⁷¹, A. Sfyrli¹⁰², Pramond Sharma³⁹³, Punit
 Sharma⁶, C.J. Sharp¹, L. Shchutka¹¹⁵, V. Shiltsev³⁹⁴, M. Siano^{44,45}, R. Sierra¹, E. Silva²⁹, R.C.
 Silva^{47,345}, L. Silvestrini¹⁷², F. Simon¹³³, G. Simonetti¹, R. Simoniello¹, B.K. Singh³⁹⁵, S.
 Singh⁶, B. Singhal⁸⁰, A. Siodmok^{1,357}, Y. Sirois^{9,82,83}, E. Sirtori¹⁵¹, B. Sitar³⁹⁶, D. Sittardi¹, E.
 Sitti¹⁵², T. Sjöstrand⁵⁹, P. Skands³⁹⁷, L. Skinnari²⁹⁴, K. Skoufari¹, K. Skovpen³²⁹, M.
 Skrzypek¹⁰⁸, P. Slavich^{138,139,140}, V. Slokenbergs²³, V. Smaluk⁶, J. Smiesko^{1,398}, S.S.
 Snyder⁶, E. Solano¹⁷³, P. Sollander¹, O.V. Solovyanov^{1,9,156}, M. Son³⁹⁹, F. Sonnemann¹, R.
 Soos^{1,9,10}, F. Sopkova¹⁹¹, T. Sorais⁴⁰⁰, M. Sorbi^{44,45}, S. Sorti^{44,45}, R. Soualah⁴⁰¹, M.

Souayah¹, L. Spallino⁴⁸, S. Spanier⁴⁰², P. Spiller²⁶⁰, M. Spira², D. Stagnara¹⁰³, M. Stallmann¹⁸⁸, D. Standen¹, J.L. Stanyard¹, B. Stapfi, G.H. Stark²³², M. Statera⁴⁴, C. Staudinger^{1,206}, G. Streicher⁴⁰³, N.P. Strohmaier², R. Stroynowski¹⁰⁷, S. Stucci⁶, G. Stupakov⁷, S. Su³⁶², A. Sublet¹, K. Sugita²⁶⁰, M.K. Sullivan⁷, S. Sultansoy²⁴, I. Syratchev¹, R. Szafron⁶, A. Sznajder⁴⁰⁴, W. Tachon⁴⁰⁵, N.D. Tagdulang^{37,173,338}, N.A. Tahir²⁶⁰, Y. Takahashi¹²⁴, J. Tamazirt^{9,10,11}, S. Tang⁶, Y. Tanimoto²¹², I. Tapan²⁷⁶, G.F. Tassielli^{12,406}, A.M. Teixeira^{9,156,157}, V.I. Telnov¹²⁰, H.H.J. Ten Kate^{1,407}, V. Teotia⁶, J. ter Hoeve³⁰⁰, A. Thabuis¹, G.T. Telles¹⁹, A. Tishelman-Charny⁶, S. Tissandier¹⁰⁹, S. Tizchang^{14,408}, J.-P. Tock¹, B. Todd¹, L. Toffolin^{1,169,409}, A. Tolosa-Delgado¹, R. Tomás García¹, T. Tomasini⁴¹⁰, G. Tonelli^{40,78}, T. Tong⁴¹¹, F. Toral²⁷, T. Torims^{1,364}, L. Torino¹⁷³, K. Torokhtii²⁹, R. Torre¹⁴¹, E. Torrence⁴¹², R. Torres^{53,186}, Toshiyuki Mitsuhashi²¹², A. Tracogna¹⁵¹, O. Traver¹⁷³, D. Treille¹, A. Tricoli⁶, P. Trubacova¹, E. Tsesmelis¹, G. Tsipolitis²⁷⁰, V. Tsulaia¹⁴², B. Tuchming³, C.G. Tully¹⁶⁵, I. Turk Cakir⁵⁸, C. Turrioni⁶⁴, J. Tynan¹⁰⁶, F.P. Ucci^{128,352}, S. Udongwo⁴¹³, C.S. Ün²⁷⁶, A. Unnervik¹, A. Upegui^{100,101}, J.P. Uribe-Ramírez²²⁰⁵, J. Uythoven¹, R. Vaglio^{36,92}, F. Valchkova-Georgieva⁴¹⁴, P. Valente¹⁷², R.U. Valente¹⁷², A.-M. Valente-Feliciano³⁷¹, G. Valentino^{1,194}, C.A. Valerio-Lizarraga^{205,325}, S. Valette¹, J.W.F. Valle³²⁰, L. Valle¹, N. Valle¹²⁸, N. Vallis^{1,2,115}, G. Vallone¹⁴², P. van Gemmeren¹⁶⁰, W. Van Goethem¹, P. van Hees⁵⁹, U. van Rienen⁴¹³, L. van Riesen-Haupt^{1,115}, P. Van Trappen¹, M. Vande Voorde^{415,416}, A.L. Vanel¹, E.W. Varnes³⁶², J.-L. Vay¹⁴², F. Veit²⁸⁷, I. Veliscek⁶, R. Veness¹, A. Ventura^{161,233}, M. Verducci^{40,78}, C.B. Verhaaren⁴¹⁷, C. Vernier⁷, A.P. Verweij¹, J.-F. Vian⁴¹⁸, A. Vicini^{44,45}, N. Vignaroli^{161,233}, S. Vignetti¹⁵¹, M.C. Villeneuve²²⁰, I. Vivarelli^{25,26}, E. Voevodina^{1,132}, D.M. Vogt⁴¹⁹, B. Voirin⁴²⁰, S. Voiriot¹⁰⁶, J. Voiron¹⁴⁵, P. Vojtyla¹, V. Völkl¹, L. von Freeden¹, Z. Vostrel^{1,421}, N. Voumard¹, E. Vryonidou⁵², V. Vysotsky¹²⁰, R. Wallny¹⁵², L.-T. Wang⁴²², Y. Wang^{9,10,11}, R. Wanzenberg⁴, B.F.L. Ward⁴²³, N. Wardle¹⁸³, Z. Wa⁵¹⁰⁸, L. Watrelot¹, A.T. Watson⁴²⁴, M.F. Watson⁴²⁴, M.S. Weber⁹⁰, C.P. Welsch^{53,186}, M. Wendt^{1,6}, J. Wenninger¹, B. Weyer¹, G. White⁴²⁵, S. White³⁰⁸, B. Wicki¹, M. Wadorski¹, U.A. Wiedemann¹, A.R. Wiederhold⁵², A. Wiedl¹³³, H.-U. Wienands¹⁶⁰, A. Wieser¹⁵², C. Wiesner¹, H. Wilkens¹, D. Willi⁴²⁶, P.H. Williams^{53,427}, S.L. Williams³², A. Winter⁴²⁴, R.B. Wittwer⁷⁴, D. Wollmann¹, Y. Wu¹¹⁵, Z. Wu^{9,16,17}, J. Xiao^{9,56,57}, K. Xie³⁸⁸, S. Xie^{37,335}, M. Yalvac²², F. Yaman^{427,428}, W.-M. Yao¹⁴², M. Yeresko^{9,156,157}, A. Yilmaz¹⁹⁶, H.D. Yoo²⁷⁷, T. You²¹⁰, F. Yu^{253,387}, S.S. Yu⁸⁰, T.-T. Yu⁴¹², S. Yue¹, A. Zaborowska¹, M. Zahnd¹⁰⁶, C. Zamantzas¹, G. Zanderighi^{66,132}, C. Zannini¹, R. Zanzottera^{44,45}, P. Zaro¹⁰³, R. Zennaro², M. Zerlauth¹, H. Zhang²⁰⁴, J. Zhang¹⁶⁰, Y. Zhang²⁰⁴, Z. Zhang^{9,10,204}, Y. Zhao¹, Y.-M. Zhong⁴²⁹, B. Zhou³⁰⁵, D. Zhou²¹², J. Zhu³⁰⁵, G. Zick³⁷⁴, M.A. Zielinski¹, E. Zimmermann¹⁰⁶, A. Zingaretti^{69,166}, J. Zinn-Justin³, A.V. Zlobin³⁷, M. Zbov⁴⁸, F. Zomer^{9,10,11}, S. Zorzetti³⁷, X. Zuo¹³³, J. Zurita³²⁰, V.V. Zutshi³⁹⁴, M. Zykova².

1 Suisse - CERN, European Organization for Nuclear Research

2 Suisse - PSI, Paul Scherrer Institute

3 France - CEA/Irfu, Commissariat à l’Energie Atomique et aux Energies Alternatives, Institut de recherche sur les lois fondamentales de l’Univers

4 Allemagne - DESY, Deutsches Elektronen-Synchrotron

5 Allemagne - Humboldt-Universität zu Berlin

6 États Unis d'Amérique - BNL, Brookhaven National Laboratory

7 États Unis d'Amérique - SLAC National Accelerator Laboratory

8 Royaume Uni - University of Oxford

9 France - CNRS/IN2P3, Centre National de la Recherche Scientifique, Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules

10 France - IJCLab, Laboratoire de Physique des 2 Infinis Irène Joliot Curie

- 11 France - Université Paris-Saclay et Université Paris-Cité
- 12 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Bari
- 13 Italie - Università di Bari
- 14 Iran - IPM, Institute for Research in Fundamental Science
- 15 Iran - Malayer University
- 16 France - LAPP, Laboratoire d'Annecy de Physique des Particules
- 17 France - Université Savoie Mont Blanc
- 18 Serbie - University of Belgrade
- 19 Espagne - ICMAB/CISC, Institut de Ciència de Materials de Barcelona, Consejo Superior de Investigaciones Científicas
- 20 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Roma Tor Vergata
- 21 Italie - Università Roma Tor Vergata
- 22 Turquie - Yozgat Bozok Üniversitesi
- 23 États Unis d'Amérique - Texas Tech University
- 24 Turquie - TOBB ETU, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
- 25 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Bologna
- 26 Italie - Università di Bologna
- 27 Espagne - CIEMAT, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas
- 28 Arabie Saoudite - KACST, King Abdulaziz City for Science and Technology
- 29 Italie - Università Roma Tre
- 30 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Milano-Bicocca
- 31 Italie - Università di Milano-Bicocca
- 32 Royaume Uni - University of Cambridge
- 33 Turquie - İstanbul Üniversitesi
- 34 Turquie - Eskişehir Teknik Üniversitesi
- 35 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Napoli
- 36 Italie - Università di Napoli Federico II
- 37 États Unis d'Amérique - FNAL, Fermi National Accelerator Laboratory
- 38 Iran - University of Tehran
- 39 Iran- FUM, Ferdowsi University of Mashhad
- 40 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Pisa
- 41 États Unis d'Amérique - University of Texas Austin
- 42 France - IPHC, Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien
- 43 France - Université de Strasbourg
- 44 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Milano

- 45 Italie - Università di Milano
- 46 Suisse - PIBG, Pôle Invertébrés du Basin Genevois
- 47 Brésil - UFRN, Universidade Federal do Rio Grande do Norte
- 48 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Laboratori Nazionali di Frascati
- 49 Suisse - UNIBAS, University of Basel
- 50 Italie - Politecnico di Bari
- 51 Portugal - LIP, Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas
- 52 Royaume Uni - University of Manchester
- 53 Royaume Uni - CI, Cockcroft Institute
- 54 États Unis d'Amérique - Brandeis University
- 55 Arménie - A. Alikhanyan National Laboratory
- 56 France - IP2I, Institut de Physique des 2 Infinis de Lyon
- 57 France - Université Claude Bernard Lyon 1
- 58 Turquie - Ankara Üniversitesi
- 59 Suède - Lund University
- 60 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Torino
- 61 Émirats arabes unis - New York University Abu Dhabi
- 62 États Unis d'Amérique - Stony Brook University
- 63 Royaume Uni - Springer Nature
- 64 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Perugia
- 65 Italie - Università di Perugia
- 66 Allemagne - Technische Universität München
- 67 Turquie - Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi
- 68 Turquie - Doguş, Üniversitesi
- 69 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Padova
- 70 République Populaire de Chine - Harbin Institute of Technology
- 71 États Unis d'Amérique - University of Wisconsin-Madison
- 72 Royaume Uni - RAL, Rutherford Appleton Laboratory, Science and Technology Facilities Council
- 73 Inde - IMSc, Institute of Mathematical Sciences, Chennai
- 74 Suisse - Universität Zürich
- 75 États Unis d'Amérique - University of New Mexique
- 76 France - CPPM, Centre de Physique des Particules de Marseille
- 77 France - Aix-Marseille Université
- 78 Italie - Università di Pisa

- 79 Hongrie - HUN-REN Wigner Research Centre for Physics
- 80 États Unis d'Amérique - Catholic University of America
- 81 États Unis d'Amérique - Duke University
- 82 France - LLR, Laboratoire Leprince-Ringuet
- 83 France - École Polytechnique, Institut Polytechnique de Paris
- 84 Canada - TRIUMF, Canada's National Laboratory for Particle and Nuclear Physics
- 85 Canada - Simon Fraser University
- 86 Italie - FEEM, Fondazione Ente Nazionale Idrocarburi (ENI) Enrico Mattei
- 87 France - BRGM, Bureau de Recherches Géologiques et Minières
- 88 Turquie - Isık Üniversitesi
- 89 Turquie - Istanbul Teknik Üniversitesi
- 90 Suisse - UNIBE, University of Bern
- 91 Italie - Università di Roma la Sapienza
- 92 Italie - CNR-SPIN, Consiglio Nazionale delle Ricerche
- 93 France - Expert naturaliste et entomologiste
- 94 États Unis d'Amérique - ORNL, Oak Ridge National Laboratory
- 95 Autriche - HEPHY, Institut für Hochenergiephysik
- 96 Suisse - Geos, Bureau d'ingénieurs conseils en géotechnique, génie civil, hydraulique et environnement
- 97 France - APC, Laboratoire AstroParticule et Cosmologie
- 98 France - Université Paris Cité
- 99 Autriche - TUWIEN, Technische Universität Wien
- 100 Suisse - HEPIA, Haute École du Paysage, d'Ingénierie et d'Architecture de Genève
- 101 Suisse - HES-SO University of Applied Sciences and Arts Western Suisse
- 102 Suisse - UNIGE, Université de Genève
- 103 France - SETEC ALS, Société d'ingénierie conseil en infrastructures de transport, génie civil et environnement
- 104 États Unis d'Amérique - East Texas A&M University
- 105 Suisse - Amberg Engineering Ltd
- 106 Suisse - ECOTEC Environnement SA, Bureau d'études et de conseil en environnement
- 107 États Unis d'Amérique - Southern Methodist University
- 108 Pologne - IFJ PAN, Institute of Nuclear Physics, Polish Academy of Sciences
- 109 France - Cerema, établissement public pour l'élaboration, le déploiement et l'évaluation de politiques publiques d'aménagement et de transport
- 110 Royaume Uni - Rendel Ltd, Engineering design consultancy firm

- 111 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Roma Tre
- 112 Turquie - Istanbul Beykent Üniversitesi
- 113 États Unis d'Amérique - University of Iowa
- 114 Inde - Indian Institute of Technology Kanpur
- 115 Suisse - EPFL, École Polytechnique Fédérale de Lausanne
- 116 Allemagne - Universität Hamburg, Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften
- 117 Belgique - VUB, Vrije Universiteit Brussel
- 118 France - LPNHE, Laboratoire de Physique Nucléaire et de Hautes Énergies
- 119 Italie - Scuola Superiore Meridionale
- 120 Affiliated with an institute formerly covered by a cooperation agreement with CERN
- 121 Canada - University of Saskatchewan and the Canadian Light Source
- 122 Royaume Uni - University of Bristol
- 123 États Unis d'Amérique - Northwestern University
- 124 États Unis d'Amérique - University of Florida
- 125 Canada - York University
- 126 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Cagliari
- 127 Italie - Università di Cagliari
- 128 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Pavia
- 129 Canada - Queen's University
- 130 Portugal - CFTP-IST, Centro de Física Teórica de Partículas, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa
- 131 Suède - Uppsala University
- 132 Allemagne - MPP, Max-Planck-Institut für Physik Garching
- 133 Allemagne - KIT, Karlsruher Institut für Technologie
- 134 Ukraine - NSC KIPT, National Science Center Kharkiv Institute of Physics and Technology
- 135 Italie - Università degli Studi dell'Insubria
- 136 Allemagne - Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
- 137 Royaume Uni - JAI, John Adams Institute for Accelerator Science, University of Oxford
- 138 France - CNRS/INP, Centre National de la Recherche Scientifique, Institut de Physique
- 139 France - LPTHE, Laboratoire de Physique Théorique et Hautes Energies
- 140 France - Sorbonne Université
- 141 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Genova
- 142 États Unis d'Amérique - LBNL, Lawrence Berkeley National Laboratory
- 143 Italie - IIT, Istituto Italiano di Tecnologia

- 144 Turquie - Gümüşhane Üniversitesi
- 145 Suisse - WSP Ingénieurs Conseils SA
- 146 Mexique - UADY, Autonomous University of Yucatan
- 147 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Ferrara
- 148 Italie - Università di Ferrara
- 149 France - MARCELEON, Cabinet d'ingénierie juridique et foncière
- 150 Allemagne - Springer Nature
- 151 Italie - CSIL (Economic Research Institute)
- 152 Suisse - ETHZ, Swiss Federal Institute of Technology Zurich
- 153 Espagne - UAH, Universidad de Alcalá Madrid
- 154 France - CIA, Conseil Ingénierie Acoustique
- 155 France - Evinerude, Bureau d'études environnementales
- 156 France - LPCA, Laboratoire de Physique de Clermont Auvergne
- 157 France - Université Clermont Auvergne
- 158 Australie - ANSTO, Australien Synchrotron
- 159 Inde - Brahmananda Keshab Chandra College
- 160 États Unis d'Amérique - ANL, Argonne National Laboratory
- 161 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Lecce
- 162 Italie - Università di Palermo
- 163 Pologne - Wrocław University of Science and Technology
- 164 États Unis d'Amérique - Rutgers University
- 165 États Unis d'Amérique - Princeton University
- 166 Italie - Università di Padova
- 167 Turquie - IUE, İzmir Ekonomi Üniversitesi
- 168 Turquie - Ege Üniversitesi
- 169 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Gruppo Collegato di Udine
- 170 Italie - Università di Udine
- 171 États Unis d'Amérique - University of Massachusetts Amherst
- 172 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Roma
- 173 Espagne - CELLS/ALBA, Consortium for the Construction, Equipment and Exploitation of the Synchrotron Light Laboratory
- 174 France - LPSC, Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie
- 175 France - Université Grenoble Alpes
- 176 Italie - Università degli Studi di Napoli Parthenope
- 177 États Unis d'Amérique - National High Magnetic Field Laboratory

178 États Unis d'Amérique - Florida State University
179 Afrique du Sud - University of Johannesburg
180 Espagne - IGFAE, Instituto Galego de Fisica de Altas Enerxías, Universidade de Santiago de Compostela
181 Royaume Uni - LSE, London School of Economics
182 Espagne - Universidade de Santiago de Compostela
183 Royaume Uni - Imperial College London
184 États Unis d'Amérique - MIT, Massachusetts Institute of Technology
185 France - CETU, Centre d'Etude des Tunnels
186 Royaume Uni - University of Liverpool
187 Suisse - Linde Kryotechnik AG
188 Suisse - ILF Consulting Engineers
189 Danemark - NBI, Niels Bohr Institute
190 Japon - Hokkaido University
191 République Tchèque - CUNI, Charles University
192 Espagne - Universidad de Granada
193 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Firenze
194 Malte - University of Malta
195 États Unis d'Amérique - BU, Boston University
196 Turquie - IBU, Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi
197 Allemagne - Julius-Maximilians-Universität Würzburg
198 Australie - University of Adelaide
199 Finlande - HIP, Helsinki Institute of Physics, University of Helsinki
200 Belgique - ULB, Université Libre de Bruxelles
201 Allemagne - IMA, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart
202 Belgique - CP3, Centre de Cosmologie, de Physique des Particules et de Phénoménologie, Université Catholique de Louvain
203 Pays Bas - NIKHEF, Nationaal instituut voor subatomaire fysica
204 République Populaire de Chine - IHEP, Chinese Academy of Sciences
205 Mexique - UAS, Universidad Autónoma de Sinaloa
206 Autriche - BOKU, Universität für Bodenkultur Wien
207 États Unis d'Amérique - Purdue University
208 Inde - University of Delhi
209 France - Ginger BURGEAP, bureau d'études en environnement
210 Royaume Uni - King's College London
211 États Unis d'Amérique - University of Maryland
212 Japon - KEK, High Energy Accelerator Research Organization

- 213 Suisse - Geoenergy, Reservoir Geology and Basin Analysis Group
- 214 France - SETEC International, Société d'ingénierie en charge des transports et des infrastructures
- 215 Turquie - KÜ, Kırıkkale Üniversitesi
- 216 France - SETEC LERM, Société d'ingénierie conseil en matériaux de construction
- 217 Mexique - BUAP, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
- 218 États Unis d'Amérique - Stanford University
- 219 États Unis d'Amérique - University of Pittsburgh
- 220 Autriche - MUL, Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Subsurface Engineering, Geotechnik und unterirdisches Bauen
- 221 Autriche - MUL-ZaB, Underground Research Center, Zentrum am Berg
- 222 Espagne - IFAE, Institut de Física d'Altes Energies
- 223 Suisse - FHNW, University of Applied Sciences Northwestern Suisse
- 224 Inde - UPES, University of Petroleum and Energy Studies
- 225 France - GANIL, Grand Accélérateur National d'Ions Lourds
- 226 France - Université Caen Normandie
- 227 Brésil - UFRGS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul
- 228 Allemagne - Technische Universität Darmstadt
- 229 Pologne - University of Silesia in Katowice
- 230 Portugal - Universidade de Coimbra
- 231 Brésil - UFPel, Universidade Federal de Pelotas
- 232 États Unis d'Amérique - University of California Santa Cruz
- 233 Italie - Università del Salento
- 234 États Unis d'Amérique - Brown University
- 235 États Unis d'Amérique - University of California Berkeley
- 236 Italie - Università di Torino
- 237 États Unis d'Amérique - Johns Hopkins University
- 238 République Populaire de Chine - Fudan University
- 239 France - LAPTh, Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de Physique Théorique
- 240 République Populaire de Chine - Dongguan University of Technology
- 241 Turquie - Kahramanmaraş, Sütçü İmam Üniversitesi
- 242 Mexique - UNACH, Universidad Autónoma de Chiapas
- 243 Mexique - MCTP, Mesoamerican Centre for Theoretical Physics
- 244 Mexique - UAZ, Universidad Autónoma de Zacatecas
- 245 Finlande - University of Jyväskylä

- 246 Allemagne - Technische Universität Dortmund
- 247 Royaume Uni - Overleaf
- 248 États Unis d'Amérique - University of Virginia
- 249 États Unis d'Amérique - Cornell University
- 250 États Unis d'Amérique - FIT, Florida Institute of Technology
- 251 Suisse - Shirokuma GmbH
- 252 Pakistan - National Centre for Physics
- 253 Allemagne - Johannes Gutenberg Universität Mainz
- 254 Pakistan - PAEC, Pakistan Atomic Energy Commission
- 255 Inde - Mathabhanga College
- 256 Inde - Harish-Chandra Research Institute
- 257 Allemagne - MPIK, Max-Planck-Institut für Kernphysik Heidelberg
- 258 Suède - European Spallation Source ERIC
- 259 France - Centre de calcul de l'IN2P3
- 260 Allemagne - GSI, Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH
- 261 République de Corée - IBS, Institute for Basic Science, Center for Theoretical Physics of the Universe
- 262 Pologne - University of Warsaw
- 263 Slovénie - University of Ljubljana
- 264 Slovénie - Jozef Stefan Institute
- 265 France - Microhumus, Bureau d'étude et d'ingénierie spécialisé dans la gestion des sols dégradés
- 266 Allemagne - Fakultät für Physik und Astronomie, Universität Heidelberg
- 267 Turquie - Nigde Ömer Halisdemir Üniversitesi
- 268 Turquie - Giresun Üniversitesi
- 269 Hongrie - University of Miskolc
- 270 Grèce - NTUA, National Technical University of Athens
- 271 Suisse - Transmutex SA
- 272 Irlande - DIAS, Dublin Institute for Advanced Studies, School of Theoretical Physics
- 273 Pologne - AGH, University of Science and Technology
- 274 Iran - University of Science and Technology of Mazandaran
- 275 Royaume Uni - IPPP, Institute for Particle Physics Phenomenology, Durham University
- 276 Turquie - Bursa Uludağ Üniversitesi
- 277 République de Corée - YU, Yonsei University
- 278 Affiliated with an international laboratory covered by a cooperation agreement with CERN

279 France - CPT, Centre de Physique Théorique
280 France - Aix-Marseille Université et Université du Sud Toulon Var
281 République de Corée - KIAS, Korea Institute for Advanced Study
282 Canada - Carleton University
283 Grèce - FEAC Engineering P.C.
284 Grèce - UPATRAS, University of Patras
285 États Unis d'Amérique - University of Kansas
286 Grèce - AUTH, Aristotle University of Thessaloniki
287 Allemagne - IML, Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik
288 Allemagne - RWTH Aachen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
289 Suisse - ZHAW, Zurich University of Applied Sciences
290 Allemagne - Universität Münster
291 Afrique du Sud - University of the Witwatersrand
292 Autriche - Fachhochschule Technikum Wien
293 États Unis d'Amérique - University of California Irvine
294 États Unis d'Amérique - Northeastern University
295 France - ESI, European Scientific Institute
296 République de Corée - UOS, University of Seoul
297 République de Corée - KNU Kyungpook National University
298 République de Corée - KU, Korea University
299 Finlande - Tampere University
300 Royaume Uni - University of Edinburgh
301 Suisse - BG Ingénieurs Conseils
302 République Populaire de Chine - T.-D. Lee Institute
303 République Populaire de Chine - Shanghai Jiao Tong University
304 Italie - CNR, Consiglio Nazionale delle Ricerche
305 États Unis d'Amérique - University of Michigan
306 États Unis d'Amérique - University of Pennsylvania
307 États Unis d'Amérique - University of Minnesota
308 France - ESRF, European Synchrotron Radiation Facility
309 Royaume Uni - SUSSEX, University of Sussex
310 Italie - Università di Bari Aldo Moro
311 Royaume Uni - University of Bath
312 Italie - Scuola Normale Superiore di Pisa

313 Brésil - Universidade de São Paulo
314 Autriche - Universität Graz
315 Egypte - Center for High Energy Physics, Fayoum University
316 Egypte - Center of theoretical physics, British University in Egypte
317 Egypte - Cairo University
318 France - Sorbonne Université et Université Paris Cité
319 Italie - Università di Genova
320 Espagne - IFIC-CSIC/UV, Instituto de Física Corpuscular, Consejo Superior de Investigaciones Científicas/Universidad de Valencia
321 Suisse - Service de géologie, sols et déchets du canton de Genève
322 Estonie - NICPB, National Institute for Chemical Physics and Biophysics
323 Estonie - UT, University of Tartu
324 Espagne - Universidad de Salamanca
325 Mexique - UGTO, Universidad de Guanajuato
326 Suisse - Edaphos engineering
327 Allemagne - Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf
328 Inde - Tata Institute of Fundamental Research Mumbai
329 Belgique - Universiteit Gent
330 Italie - CNR-IOM, Consiglio Nazionale delle Ricerche
331 Autriche - JKU, Johannes Kepler Universität Linz
332 Norvège - University of Stavanger
333 Colombie - Universidad Nacional de Colombia
334 Italie - Trento Institute for Fundamental Physics and Applications
335 États Unis d'Amérique - Caltech, California Institute of Technology
336 Italie - Università della Calabria
337 Espagne - IFT, Instituto de Física Teórica, Universidad Autónoma de Madrid
338 Espagne - UPC, Universitat Politècnica de Catalunya
339 Portugal - Departamento de Física, Universidade do Minho
340 Portugal - Centro de Física das Universidades do Minho e do Porto
341 Portugal - LaPMET, Laboratory of Physics for Materials and Emergent Technologies
342 Norvège - University of Bergen
343 Chili - SAPHIR, Instituto Milenio de Física Subatómica en la Frontera de Altas Energías
344 Chili - Universidad Andres Bello
345 Brésil - IIP, International Institute of Physics
346 Japon - Tokyo International University

347 Turquie - Izmir Bakırçay Üniversitesi
348 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Laboratori Nazionali del Gran Sasso
349 Italie - Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale
350 Serbie - Vinca Institute of Nuclear Sciences
351 États Unis d'Amérique - Kennesaw State University
352 Italie - Università di Pavia
353 États Unis d'Amérique - Columbia University
354 États Unis d'Amérique - DOE, Department of Energy of the États Unis d'Amérique of America
355 France - IPSA, Institut Polytechnique des Sciences Avancées
356 Italie - Università degli Studi del Sannio
357 Pologne - UJ, Université Jagellonne (Cracovie)
358 Autriche - Universität Wien
359 Allemagne - Goethe-Universität Frankfurt, Institut für Angewandte Physik
360 Allemagne - HFFH, Helmholtz Forschungsakademie Hessen für FAIR
361 Roumanie - INCDTIM, National Institute for Research and Development of Isotopic and Molecular Technologies
362 États Unis d'Amérique - University of Arizona
363 Allemagne - Technische Universität Dresden
364 Lettonie - RTU, Riga Technical University
365 Royaume Uni - Lancaster University
366 Chypre - University of Chypre
367 Chypre - Cosmos Open University
368 Brésil - CBPF, Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas
369 Allemagne - Universität Bonn
370 Thaïlande - CMU, Chiang Mai University
371 États Unis d'Amérique - JLAB, Thomas Jefferson National Accelerator Facility
372 Équateur - ESPOL, Escuela Superior Politécnica del Litoral
373 Croatie - IRB, Rudjer Boskovic Institute
374 France - Air Liquide Advanced Technologies
375 Pays Bas - VU Amsterdam
376 France - INGÉROP ,Groupe d'ingénierie et de conseil en mobilité durable, transition énergétique et cadre de vie
377 Pologne - Warsaw University of Technology
378 Espagne - IFCA, Instituto de Física de Cantabria
379 Allemagne - Institut für Beschleunigerphysik und Technologie
380 Turquie - Uşak Üniversitesi

381 Japon - ICEPP, International Center for Elementary Particle Physics, University of Tokyo
382 Royaume Uni - Rudolf Peierls Centre for Theoretical Physics, University of Oxford
383 Royaume Uni - All Souls College, University of Oxford
384 Turquie - Akdeniz Üniversitesi
385 Suisse - Latitude Durable SARL
386 Espagne - USAL, Universidad de Salamanca
387 Allemagne - PRISMA+ Cluster of Excellence
388 États Unis d'Amérique - Michigan State University
389 Espagne - Universidad Complutense Madrid
390 Suisse - scMetrology SARL
391 Portugal - IST, Instituto Superior Tecnico, Universidade de Lisboa
392 Portugal - CeFEMA, Center of Physics and Engineering of Advanced Materials
393 Inde - Indian Institute of Science Education and Research Mohali
394 États Unis d'Amérique - NIU, Northern Illinois University
395 Inde - Banaras Hindu University
396 Slovaquie - Comenius University
397 Australie - Monash University
398 Slovaquie - Slovak Academy of Sciences
399 République de Corée - KAIST, Korea Advanced Institute of Science and Technology
400 France - Amberg Engineering Chambéry
401 Émirats arabes unis - Khalifa University of Science and Technology
402 États Unis d'Amérique - University of Tennessee
403 Autriche - WIFO, Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung
404 Brésil - Universidade do Estado do Rio de Janeiro
405 France - Mélica, NATURA SCOP, Études et expertises environnementales
406 Italie - Università LUM, Casamassima
407 Pays Bas - University of Twente
408 Iran - Arak University
409 Italie - Università di Trieste
410 France - ForestAllia, Cabinet de gestion et d'expertise forestières
411 Allemagne - Universität Siegen
412 États Unis d'Amérique - University of Oregon
413 Allemagne - Universität Rostock
414 Suisse - CEGELEC SA
415 Suède - KTH, Royal Institute of Technology, Stockholm

416 Suède - OKC, Oskar Klein Centre for Cosmoparticle Physics
417 États Unis d'Amérique - Brigham Young University
418 France - Expert foncier et agricole
419 Allemagne - ITSM, Institut für Thermische Strömungsmaschinen und
Maschinenlaboratorium, Universität Stuttgart
420 France - École Normale Supérieure de Lyon
421 République Tchèque - CTU, Czech Technical University
422 États Unis d'Amérique - University of Chicago
423 États Unis d'Amérique - Baylor University
424 Royaume Uni - University of Birmingham
425 Royaume Uni - University of Southampton
426 Suisse - Swisstopo, Federal Office of Topography
427 Royaume Uni - Daresbury Laboratory, Science and Technology Facilities Council
428 Turquie - IZTECH, Izmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü
429 Hong Kong - City University of Hong Kong
+ décédé(e)

Résumé

Le Volume 3 du rapport de faisabilité du FCC présente des études relatives au génie civil, à l'élaboration d'un scénario d'implantation du projet, ainsi qu'aux aspects environnementaux et de durabilité. Le rapport détaille les améliorations itératives apportées aux concepts de génie civil depuis 2018, en tenant compte des conditions du sous-sol, des exigences en matière d'accélérateurs et d'expériences, ainsi que de considérations de nature territoriale. Il décrit une configuration de génie civil techniquement réalisable et économiquement viable qui sert de base aux études de sous-sol détaillées, à la conception de la construction, à l'estimation des coûts et à la planification de la mise en œuvre du projet. En outre, le rapport met en évidence les études de sous-sol en cours dans des zones clés afin de soutenir le développement d'un modèle souterrain 3D amélioré pour la région.

Le rapport décrit le développement du scénario de projet basé sur l'approche d'optimisation itérative « Éviter-Réduire-Compenser ». Le scénario de référence établit un équilibre entre les performances physiques optimales et la compatibilité territoriale, les risques de mise en œuvre et les coûts. Des études environnementales sur le terrain couvrant près de 600 hectares et portant sur de nombreux aspects urbains, économiques, sociaux et techniques ont confirmé la faisabilité technique du projet et ont contribué à la préparation des documents d'entrée essentiels pour la phase d'autorisation officielle du projet. Le résumé souligne également l'ouverture d'un dialogue public dans le cadre de la procédure d'autorisation. Les résultats d'une évaluation complète de l'impact socio-économique, qui comprend aussi les effets environnementaux significatifs, sont présentés. Même dans les conditions les plus prudentes et les plus strictes, on obtient un ratio coûts-bénéfices positif pour la phase FCC-ee. Enfin, le rapport donne un bref résumé des études menées pour documenter l'état actuel de l'environnement.

Préface de la Directrice générale du CERN

En 2021, en réponse à la mise à jour 2020 de la stratégie européenne pour la physique des particules, le Conseil du CERN a lancé l'étude de faisabilité du futur collisionneur circulaire (FCC).

Le présent rapport résume l'immense travail effectué par la collaboration internationale pour le FCC pendant plusieurs années. Il couvre, entre autres, les objectifs et le potentiel de la physique, la géologie, le génie civil, l'infrastructure technique, l'implantation territoriale, les aspects environnementaux, les besoins en R&D pour les accélérateurs et les détecteurs, les bénéfices socio-économiques et le coût. Il constitue une contribution importante à la mise à jour en cours de la stratégie européenne pour la physique des particules.

L'étude de faisabilité a nécessité la participation active d'un large éventail de parties prenantes. En particulier, tout au long de l'étude, le CERN a été accompagné par ses deux États hôtes, la France et la Suisse et a travaillé avec des entités aux niveaux local, régional et national. Je suis très reconnaissante aux autorités et aux équipes des États hôtes pour leur aide précieuse. En outre, des parties importantes de l'étude ont été soutenues par l'Union européenne dans le cadre des programmes-cadres Horizon 2020 et Horizon Europe. L'étude a également bénéficié des contributions de laboratoires d'accélérateurs et d'universités de toute l'Europe, comme l'initiative CHART (Swiss Accelerator Research and Technology), ainsi que des Amériques, de l'Asie, de l'Afrique et de l'Australie.

Le programme FCC intégré proposé comprend deux étapes possibles : un collisionneur électron-positron servant à la production de bosons de Higgs, d'interactions électrofaibles et de quarks top fonctionnant à différents niveaux d'énergie au centre de masse, suivi ultérieurement par un collisionneur proton-proton fonctionnant à un niveau d'énergie de collision sans précédent d'environ 100 TeV. Les programmes de physique complémentaires de chaque étape correspondent aux priorités dans le domaine de la physique, telles qu'elles sont exprimées dans la mise à jour 2020 de la stratégie européenne pour la physique des particules.

L'une des principales réalisations de l'étude de faisabilité est le choix de l'emplacement de l'anneau du collisionneur et de l'ensemble de l'infrastructure, y compris les sites de surface et les puits d'accès, qui a été développé et optimisé pendant plusieurs années selon le principe « éviter, réduire, compenser ». Des études de durabilité ont évalué l'efficacité énergétique, l'utilisation des sols, la gestion de l'eau et des ressources, ainsi que l'impact socio-économique, garantissant que le FCC soit conçu conformément aux normes environnementales et sociétales les plus actuelles.

Je tiens à remercier toutes celles et tous ceux qui ont contribué à ce rapport pour leur travail acharné et leur engagement, qui ont permis d'obtenir les résultats exceptionnels présentés ici.

Fabiola Gianotti CERN,

Directrice générale

Préface du Président du conseil de collaboration FCC

S'appuyant sur la précédente étude de conception du futur collisionneur circulaire (FCC) menée entre 2014 et 2018, l'étude de faisabilité du FCC (2021-2025) a été réalisée grâce à une solide collaboration internationale, qui comprend désormais plus de 160 instituts dans le monde entier. Le « programme intégré » du FCC, développé dans le cadre de l'étude de faisabilité, consiste en un premier collisionneur électrons-positrons, le FCC-ee, qui pourra être suivi d'un collisionneur protons-protons, le FCC-hh. Cet échelonnement dans le temps tient compte des priorités dans le domaine de la physique, telles que formulées dans les mises à jour de la stratégie européenne pour la physique des particules de 2012 et 2020, ainsi que de l'état de préparation technologique et des coûts relatifs des FCC-ee et FCC-hh.

Au fil des ans, j'ai suivi de près l'avancement régulier de l'étude, en représentant la collaboration FCC au sein du Comité directeur international et en participant aux réunions annuelles de la Semaine FCC, qui comprennent les sessions du Comité de collaboration internationale. L'engagement et l'enthousiasme des membres de la collaboration ont toujours été impressionnants. L'effort collectif est clairement visible. La participation des étudiants et des chercheurs en début de carrière est en augmentation. Il existe vraiment une détermination commune et un élan pour aller de l'avant.

La forte collaboration internationale autour du FCC et son réseau mondial constituent une base solide pour l'avenir de ce projet. La communauté FCC ne cesse de s'agrandir, avec l'engagement croissant de nouveaux instituts et partenaires dans le monde entier. Ce large soutien sera essentiel lorsque le projet entrera dans sa prochaine phase.

L'étude de faisabilité du FCC démontre non seulement la viabilité technique du projet, mais aussi la force de la communauté internationale qui le soutient. Alors que nous passons à l'étape suivante de la phase de prise de décision, cet effort collectif est essentiel pour montrer la voie à suivre. Le FCC promet des opportunités scientifiques de grande envergure et des avantages à long terme pour l'innovation, la formation et la collaboration mondiale dans le domaine de la science et de la technologie.

Philippe Chomaz CEA,

Président du comité de collaboration internationale FCC

Table des matières

4.	<i>Développement durable</i>	27
4.1.	Contexte	27
4.2.	Introduction	28
4.2.1.	Infrastructures de recherche durables	28
4.2.2.	Approche	30
4.2.3.	Le contexte européen	32
4.2.4.	Le contexte en France	34
4.2.5.	Le contexte en Suisse	36
4.3.	Méthodologie	37
4.4.	Facilitateurs de durabilité socio-économique	38
4.4.1.	Voies d'impact	38
4.4.2.	Innovation et R&D	44
4.5.	Évaluation complète des performances de durabilité sur la base d'une analyse des coûts et des bénéfices	45
4.6.	Limites	47
4.7.	Analyse du cycle de vie	50
4.7.1.	Contexte	50
4.7.2.	Méthodologie	51
4.7.3.	Résultats	53
4.8.	Performances socio-économiques	56
4.8.1.	Contexte	56
4.8.2.	Résultats	58
4.8.3.	Couverture des coûts et des bénéfices	61
4.8.4.	Coût et facteurs externes négatifs	62
4.8.5.	Voies d'impact	64
4.8.6.	Bénéfices élargis	71
4.8.7.	Conclusions	79
4.9.	Retours sur investissement pour les pays participants	81
4.9.1.	Vue d'ensemble	81
4.9.2.	Opportunités d'emploi au niveau local	83
4.9.3.	Opportunités de création d'impacts	83
4.10.	Exigences et contraintes pour une phase préparatoire	85
4.11.	Recommandations pour un projet de phase préparatoire	86
5.	<i>Références</i>	89

4. Développement durable

4.1. Contexte

L'engagement de longue date du CERN en faveur du développement durable, intégrant des objectifs scientifiques, environnementaux et sociétaux, est un principe directeur dans la définition d'une future infrastructure de collisionneur de particules. Les résultats présentés dans ce chapitre montrent l'intégration, dans le processus d'élaboration des scénarios, de stratégies conformes aux principes directeurs et aux politiques de l'Organisation, pour que la conception du FCC soit un modèle de développement responsable d'infrastructures scientifiques d'envergure.

Dès le départ, les études et les développements pour le FCC ont intégré les principes directeurs existants du CERN en matière de protection de l'environnement, avec des préoccupations qui vont au-delà de la biosphère et couvrent plusieurs aspects des trois dimensions de la durabilité. Il s'agit, par exemple, d'optimiser l'utilisation des ressources, de limiter les émissions de gaz à effet de serre et de donner la priorité à l'excavation durable et à la réutilisation des matériaux. L'étude de faisabilité a également pris en compte les efforts déployés par le CERN en matière de gestion de la biodiversité et d'utilisation des sols, pour que les activités de construction et d'exploitation respectent les écosystèmes locaux. Elle s'appuie sur les résultats et l'expérience des initiatives passées et présentes du CERN en matière d'efficacité énergétique et de récupération de la chaleur fatale, dans le but de réduire la consommation globale d'énergie, d'utiliser l'énergie de manière responsable et d'apporter une contribution à l'alimentation des réseaux énergétiques régionaux. La conservation de l'eau, la gestion du bruit et la réduction des émissions sont d'autres éléments clés de l'étude, qui renforcent l'objectif du CERN de concilier progrès scientifique de pointe et gestion responsable de l'environnement.

La réalisation de ces objectifs nécessite une coopération étroite avec les autorités des deux États hôtes, ainsi qu'un engagement significatif vis-à-vis du public. L'étude de faisabilité jette les bases du dialogue avec les organismes de réglementation nationaux et régionaux, en veillant à ce que le projet FCC soit conforme à la législation environnementale et aux objectifs de développement durable tant en France qu'en Suisse. En outre, des discussions ouvertes et continues avec les communautés locales seront essentielles pour répondre aux préoccupations, partager les meilleures pratiques et élaborer une approche collaborative afin de parvenir à un cadre environnemental, social et de gouvernance (ESG) capable de garantir la durabilité à long terme de cette nouvelle infrastructure de recherche.

En intégrant les leçons tirées des projets passés et actuels du CERN et en tirant parti des innovations adoptées par d'autres projets d'infrastructure d'envergure dans le domaine scientifique et au-delà, l'étude de faisabilité du FCC vise à établir de nouvelles références en matière de durabilité dans les projets scientifiques d'envergure. Cette étude s'appuie sur les principes énoncés dans les lois et réglementations internationales et nationales, les meilleures pratiques et les politiques et stratégies publiées par le CERN, en intégrant les meilleures pratiques visant à éviter, à réduire et à atténuer les impacts, ainsi que les principes de l'économie circulaire et l'implication des parties prenantes. Ainsi, ce chapitre jette les bases d'un projet potentiel d'implantation du FCC qui non seulement fait progresser la création de connaissances par le biais de la recherche physique fondamentale, mais le fait en s'engageant fermement en faveur d'une durabilité à long terme qui englobe l'excellence scientifique, l'environnement et la société.

4.2. Introduction

4.2.1. Infrastructures de recherche durables

Les infrastructures de recherche (IR) sont des installations qui fournissent des ressources et des services aux organisations de recherche afin qu'elles puissent mener des recherches et favoriser l'innovation [93]. Une IR peut être une installation unique, comme, par exemple l'European Spallation Source (ESS) ou le XFEL européen, ou encore une installation faisant partie d'une organisation qui héberge plusieurs installations, comme le Grand collisionneur de hadrons (LHC) et d'autres accélérateurs de particules au CERN (par exemple, le Décélérateur d'antiprotons, ELENA, PS, SPS) qui offrent des possibilités de recherche scientifique dédiées. Le futur collisionneur circulaire (FCC) sera une infrastructure de recherche hébergée par le CERN, conçue et construite grâce à une collaboration internationale, offrant un accès libre à une communauté mondiale de scientifiques.

Le développement durable, ou « durabilité », fait référence à la capacité de maintenir une activité à un certain rythme ou à un certain niveau. Il intègre trois enjeux : la société, l'économie et l'environnement (Fig. 4.1). Un programme ou un projet scientifique peut être considéré comme durable s'il est en mesure de mener à bien sa mission scientifique de base en respectant trois critères d'exigence : obtenir une « licence sociale » pour opérer [94], maintenir un équilibre écologique en appliquant une séquence « éviter-réduire-compenser » [95] et être abordable à long terme avec des risques bien compris et bien gérés.

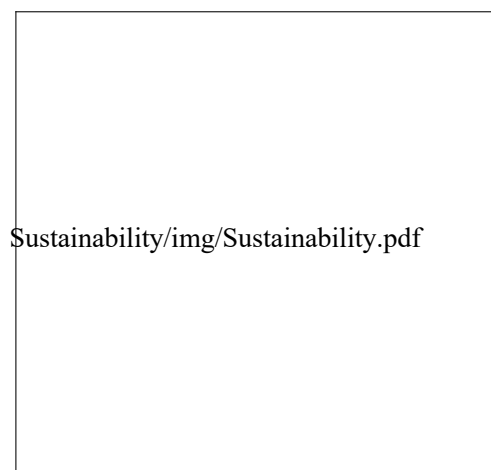


Fig. 4.1 : Les dimensions de la durabilité.

Un processus d'évaluation permet de comprendre si un programme ou un projet est durable et se donne les moyens d'identifier les voies à suivre pour améliorer sa durabilité. Ce processus associe aspects financiers et aspects socio-économiques. Ces derniers comprennent les bénéfices sociaux et environnementaux, ainsi que les effets négatifs, y compris les coûts au plan environnemental. La norme ISO pour l'évaluation monétaire des impacts environnementaux (ISO 14008 [96]) et les lignes directrices pour la détermination des coûts et des bénéfices environnementaux (ISO 14007 [97]) démontrent l'importance de l'application de ces coûts unitaires environnementaux dans les rapports sur l'environnement et le développement durable au niveau de l'organisation et du projet. Les projets scientifiques peuvent atteindre une valeur actuelle nette socio-économique positive. Si leur performance financière est trop faible, le modèle de financement doit être revu. Les projets qui sont financièrement viables, mais qui n'ont pas ou peu de bénéfices socio-économiques, doivent être révisés. Les projets qui sont financièrement et socio-économiquement positifs peuvent être durables (Fig. 4.2).

Une analyse socio-économique complémentaire qui intègre toutes les dimensions du développement durable aide à comparer les variantes et les versions des scénarios de projet et permet de planifier la durabilité à long terme. Une infrastructure de recherche doit périodiquement contrôler et suivre les performances sociales, environnementales et économiques par rapport aux estimations initiales afin de mettre en œuvre un processus d'amélioration continue.

Conformément à la directive européenne 2009/125/CE sur l'écoconception [17], le développement durable exige une prise en compte adéquate des trois éléments de durabilité, y compris l'identification et la comptabilisation des impacts positifs et négatifs tout au long du cycle de vie d'un programme ou d'un projet. Pour les IR effectuant des missions scientifiques, les enjeux suivants doivent au moins être pris en compte :

- Économie :
 - Excellence scientifique ;
 - Coûts totaux (dépenses d'investissement et d'exploitation) ;
 - Risques et risques résiduels après atténuation ;
 - Valeur ajoutée et emplois directs, indirects et induits ;
 - Bénéfices économiques potentiels supplémentaires quantifiés ;
- Société :
 - Potentiel quantifié des bénéfices sociaux supplémentaires ;
 - Valeur du bien commun (la valeur de la mission scientifique telle qu'elle est perçue par les gens)
 - Compatibilité territoriale ;
 - Licence sociale ;
- Environnement :
 - Facteurs externes négatifs quantifiés ;
 - Potentiel quantifié des bénéfices environnementaux supplémentaires.

Sustainability/img/Guide_sustainability_NPV_F_SE.pdf

Fig. 4.2 : Orientations pour la durabilité des projets d'investissement public. Voir Réf. [98].

4.2.2. Approche

Un nouveau collisionneur de particules et son infrastructure technique représentent d'importants investissements à long terme pour les pays participants et les partenaires financiers. Un processus d'évaluation est nécessaire pour comprendre les facteurs de coûts et les bénéfices qu'il est possible de tirer. La réduction des premiers, le développement des seconds et la conception d'un modèle de financement à long terme reposant sur une collaboration internationale sont nécessaires pour assurer la durabilité à long terme dès la phase conceptuelle. Les agences de financement, les organismes de stratégie scientifique (par exemple, l'ESFRI), les organismes notifiés nationaux chargés de délivrer les autorisations, ainsi que les banques d'investissement susceptibles d'accorder des prêts à long terme pour des projets financés par des fonds publics (par exemple, la BEI) exigent des preuves de la viabilité du projet. Le processus structuré d'évaluation de la possibilité de poursuivre un projet de préparation à la mise en œuvre et de validation de la viabilité du projet est appelé « évaluation de projet ».

Ce chapitre rassemble également un ensemble de cadres réglementaires et de lignes directrices d'évaluation existant au niveau européen, en France et en Suisse, afin de fournir un aperçu des exigences de durabilité qui régissent la planification et la mise en œuvre de nouveaux projets d'infrastructure de recherche au CERN ayant une importance stratégique et des besoins en matière de développement territorial. Dans les pays qui font partie de l'espace européen de la recherche (EER), des cadres juridiques régissent le respect des aspects liés au développement durable. D'autres pays, tels que l'Australie, le Royaume-Uni et les États-Unis, appliquent encore largement la prise de décision en matière de projets sur la base de panels, bien que le Royaume-Uni procède à des évaluations a posteriori au cas par cas et que l'Australie évalue de façon périodique la durabilité des infrastructures de recherche. Les critères de durabilité et d'environnement, tels que les considérations climatiques, sont de plus en plus souvent intégrés dans la conception et l'évaluation des propositions. La Suisse a récemment précisé les aspects de durabilité pour les projets d'importance stratégique du CERN comportant un développement territorial, avec la mise à jour de la loi [99,100] en faveur de l'encouragement de la recherche et de l'innovation qui introduit un processus d'autorisation au niveau fédéral. L'« Ordonnance concernant l'approbation des plans des constructions et installations du CERN (OCIC) » [101], qui fixe les modalités de mise en œuvre de ce plan pour la procédure d'autorisation, a été publiée pour examen par le public en février 2025. Outre les thèmes environnementaux courants (par exemple, l'air, l'eau et le sol), il est nécessaire d'évaluer les incidences sur le climat et de prendre des mesures spécifiques pour se conformer aux lois sur la protection du climat.

La prise en compte des facteurs externes environnementaux quantitatifs¹, tant positifs que négatifs, est encore une approche émergente dans le domaine des infrastructures de recherche, à moins qu'elle ne soit explicitement requise par les législations nationales et régie par des lignes directrices nationales. Une telle analyse socio-économique plus large est, cependant, déjà une pratique courante d'évaluation générale des projets d'infrastructure dans de nombreux pays européens dont la France [102], l'Allemagne [103,104], l'Italie et la Suisse, ainsi qu'au niveau de l'UE à travers les conditions de financement de la CE pour de nombreux secteurs, par exemple Connecting Europe [105], le transport [106], l'énergie [107], les projets d'investissement régionaux [108], ainsi que la préservation et la restauration de la nature [109].

Des méthodes d'évaluation des investissements publics et de garantie qu'un projet contribue à l'amélioration du bien-être public² existent dans différents secteurs politiques et institutionnels [110, 111], y compris pour ce qui concerne les impacts environnementaux [112]. Elles sont déjà utilisées pour des projets d'infrastructure de recherche, notamment des accélérateurs de particules comme la source lumineuse ALBA [113], la source lumineuse SOLEIL [114], le synchrotron DESY/PETRA III [115], l'installation de thérapie hadronique CNAO [116], le LHC [117], le LHC à haute luminosité (HL-LHC) [118–120] et l'étude sur le collisionneur linéaire compact (CLIC) [121]. L'étude du futur collisionneur circulaire (FCC) [122] a, notamment, consacré des ressources importantes à ce sujet sur une période de près de dix ans et a contribué à l'avancement du processus d'évaluation des infrastructures de recherche à l'échelle internationale grâce à des contributions scientifiques dans ce domaine et à la participation à des projets collaboratifs d'évaluation de l'impact au niveau de l'UE. L'approche est également utilisée pour d'autres installations scientifiques telles que le télescope Einstein [123], l'installation d'approvisionnement en chaleur de Paris Saclay [124], l'hôpital universitaire de Nantes [125] et par l'Organisation de la recherche scientifique et industrielle du Commonwealth (CSIRO) [126] pour évaluer un certain nombre de programmes scientifiques différents. De plus en plus d'IR, comme le Square Kilometre Array, envisagent cette approche dans l'optique d'une

planification durable [127]. Les facteurs environnementaux sont de plus en plus souvent intégrés dans ces évaluations [98, 128–130]. Une évaluation complète de l'impact socio-économique est nécessaire lorsqu'une nouvelle proposition de projet d'infrastructure de recherche demande à être inscrite sur la feuille de route du Forum stratégique européen sur les infrastructures de recherche (ESFRI) [131] comme l'indique le guide de la feuille de route 2026 (voir page 25 de la Réf. [132]).

¹ Un facteur externe environnemental est un coût ou un bénéfice qui affecte un tiers qui n'a pas choisi de subir ce coût ou de recevoir ce bénéfice, en particulier en ce qui concerne l'environnement.

² Le bien-être public désigne le bien-être collectif de la société qui est assuré par les services et les institutions publiques, dans le but de garantir l'équité, la cohésion sociale et l'accès pour tous aux biens et services essentiels. Résumé paraphrasé de Florio, M. (2019). « Public Enterprises: Resurgence and the Future of the Public Sector ». Springer.

4.2.3. Le contexte européen

La durabilité à long terme des infrastructures de recherche au niveau de l'espace européen de la recherche (EER [133]) est principalement guidée par le Forum stratégique européen sur les infrastructures de recherche (ESFRI) [134,135] 3

Le règlement UE 2021/695 [136] définissant le programme-cadre pour la recherche et l'innovation « Horizon Europe » inclut explicitement des exigences pour relever les défis mondiaux, y compris le changement climatique et les objectifs de développement durable (ODD) des Nations unies.

Les États membres de l'UE traduisent et intègrent généralement les stratégies, les politiques et les lignes directrices dans leurs feuilles de route et leurs plans nationaux, en plus de leurs politiques nationales existantes.

Une solide vision à long terme est une condition préalable à l'exploitation réussie et durable d'une infrastructure de recherche. L'ESFRI a donc défini un certain nombre de recommandations et d'actions [137].

L'excellence scientifique est la condition sine qua non. Toutefois, un financement suffisant et des modèles de financement durables, nécessaires tout au long du cycle de vie, sont indispensables à une stratégie réussie pour une nouvelle infrastructure de recherche. Associé à des ressources humaines adéquates, ce financement est essentiel pour la phase opérationnelle. Une gouvernance efficace est un autre élément clé pour assurer la durabilité à long terme. En outre, les IR doivent contribuer à leur durabilité en contribuant à leur neutralité carbone afin de soutenir les objectifs de neutralité carbone au niveau national. Il convient de mentionner que la comptabilisation de la neutralité carbone intervient au niveau national.

Si les recommandations actuelles mettent explicitement l'accent sur l'excellence scientifique, la viabilité financière et l'acceptation par la société, l'appel à une évaluation globale de la viabilité et de l'impact englobe implicitement tous les aspects environnementaux. Les recommandations précisent également que les IR doivent consacrer des ressources suffisantes à l'évaluation périodique et à la communication de leurs performances socio-économiques aux divers publics. Les activités pionnières du CERN dans ce domaine sont explicitement mentionnées dans le guide de l'ESFRI [138], qui encourage les autorités nationales à soutenir l'approche en coopération avec des experts du domaine.

La note d'orientation de l'ESFRI [139] détaille la nécessité d'adapter l'évaluation d'impact au projet spécifique et demande d'inclure dans la feuille de route du projet des propositions visant une mise en œuvre sur une période de dix ans et de fournir une évaluation d'impact socio-économique élargie. Conformément à la définition de l'OCDE [140], « la mesure dans laquelle l'intervention a engendré ou devrait engendrer des effets à haut niveau, positifs ou négatifs, voulus ou non ». La Commission européenne [141] précise que « le terme "impact" décrit tous les changements qui devraient se produire en raison de la mise en œuvre et de l'application d'une option/intervention politique donnée [telle qu'un investissement dans une infrastructure de recherche et ses activités]. Ces impacts peuvent se produire à différentes échelles de temps, affecter différents acteurs et être pertinents à différentes échelles (locale, régionale, nationale et européenne) ». Une évaluation a posteriori est nécessaire pour déterminer si les objectifs visés et les estimations a priori ont été effectivement atteints.

Le règlement (UE) n° 2021/1060 du Parlement européen et du Conseil du 24 juin 2021 porte dispositions communes relatives au Fonds européen de développement régional, au Fonds social européen Plus, au Fonds de cohésion, au Fonds de transition Juste et au Fonds européen pour les affaires maritimes, la pêche et l'aquaculture, ainsi qu'aux règles financières applicables à ces fonds et au Fonds Asile, migration et intégration, au Fonds pour la sécurité intérieure et à l'instrument de soutien financier à la gestion des frontières et à la politique des visas. Conformément à l'article 100 du règlement (UE) n° 1303/2013 [142], un grand projet est une opération d'investissement comprenant « un ensemble de travaux, d'activités ou de services destiné à remplir par lui-même une fonction indivisible à caractère économique ou technique précis, qui vise des objectifs clairement définis et dont le coût total éligible dépasse 50 000 000 EUR [...] ». Une évaluation de l'impact socio-économique de ces grands projets est recommandée. Le guide d'évaluation économique de la Commission européenne (European Commission Economic Appraisal Vademecum 2021-2027 [143]) reprend les principes généraux et fournit des exemples d'application sectorielle pour l'évaluation d'impact, y compris la recherche et l'innovation en Annexe I. Il étend et complète le règlement portant dispositions communes qui recommande l'analyse coûts-bénéfices conformément au règlement (UE) n° 207/2015 [144].

La méthodologie est expliquée en détail dans le Guide méthodologique de la Commission européenne pour la réalisation de l'Analyse Coûts-Avantages des projets d'investissement (European Commission Guide to Cost-Benefit Analysis of Investment Projects [108]).

L'adaptation au changement climatique, l'atténuation de ses effets et la résilience aux catastrophes sont couvertes par ce Règlement. Par exemple, le facteur externe 4 lié au volume des gaz à effet de serre (GES) et le coût externe du carbone sont explicitement inclus et l'alignement sur les objectifs de décarbonisation de l'UE à l'horizon 2050 est exigé. En ce qui concerne l'adaptation au climat, les coûts des mesures visant à renforcer la résilience du projet par rapport aux effets du changement climatique et qui sont dûment justifiés dans les études de faisabilité doivent être inclus dans l'analyse économique. Les bénéfices de ces mesures, par exemple les mesures prises pour limiter les émissions de GES ou renforcer la résilience, par rapport au changement climatique, aux phénomènes météorologiques extrêmes et aux autres catastrophes naturelles, devront également être évalués et inclus dans l'analyse économique et si possible quantifiés, sinon ils devront être décrits de manière appropriée.

Une analyse du développement durable (protection de l'environnement, utilisation efficace des ressources, atténuation et adaptation au changement climatique, biodiversité et prévention des risques) devra être effectuée. La présence d'une analyse des options tenant compte des critères techniques, opérationnels, économiques, environnementaux et sociaux pour l'emplacement de l'infrastructure est exigée dans une étude de faisabilité. Cela concerne également la description de la cohérence du projet avec la politique environnementale applicable. Il y aura également lieu de traiter l'efficacité de l'utilisation des ressources, la préservation de la biodiversité et des écosystèmes, la réduction des émissions de GES et la résilience, par rapport aux effets du changement climatique. Le processus doit être conforme à la Directive 2011/92/UE qui définit le processus d'évaluation des incidences sur l'environnement (EIE) et garantit que les projets susceptibles d'avoir des incidences notables sur l'environnement feront l'objet d'une évaluation avant d'être agréés. Par conséquent, le coût total des incidences négatives sur l'environnement et de leur compensation doivent être réintégrés. Les bénéfices pour l'environnement peuvent également être évalués et ajoutés. Il s'agit, par exemple de contributions visant à améliorer l'approvisionnement en eau et l'assainissement, la gestion des déchets, la capacité et la stabilité énergétiques, les transports, les ports (aéroports, ports maritimes, intermodalité), la recherche et l'innovation et la communication à large bande.

Le processus d'évaluation vise à déterminer si un projet contribuera au bien-être social global et à la croissance économique, en tenant compte des bénéfices et des coûts pour la société. Les manuels de la CE [108] et de l'ONUDI [145] se concentrent sur les aspects économiques et sociétaux, bien que des aspects tels que l'évaluation des facteurs environnementaux externes fassent généralement partie de l'évaluation du projet, comme l'exige la réglementation de l'UE. Par exemple, le coût fictif du carbone et les émissions de GES sont indiqués dans les exemples d'évaluation de projets. Enfin, les exigences en matière d'évaluation sont définies spécifiquement pour chaque projet par l'organisme notifié pour ce projet. Par exemple, pour obtenir des fonds de la Banque européenne d'investissement (BEI), une étude d'évaluation complète incluant les facteurs externes environnementaux positifs et négatifs est exigée. La BEI a publié un guide [146] consacré à ce sujet, qui comprend des références pour le coût fictif du carbone, ainsi que des exemples de calcul complets et des lignes directrices pour la prise en compte des facteurs externes environnementaux.

D'autres exigences découlent, par exemple d'une demande de financement au titre de la Connecting Europe Facility (CEF). Le règlement InvestEU introduit la durabilité climatique, environnementale et sociale comme éléments du processus de prise de décision lors d'une demande de financement au titre du Fonds InvestEU. Le processus est également une exigence dans le cadre de la phase préparatoire des projets ESFRI. La Banque européenne pour la reconstruction et le développement (BERD) exige une évaluation des projets dont les émissions de gaz à effet de serre (GES) potentiellement pertinentes sont supérieures à 25 000 tonnes d'équivalent CO₂ par an, par rapport à un niveau de référence de 100 000 tonnes d'équivalent CO₂ par an. Les exigences nationales diffèrent considérablement les unes des autres, exigeant des évaluations pour les projets d'investissements bénéficiant d'un financement public pouvant descendre à 300 000 euros, comme c'est le cas en Lituanie, par exemple.

⁴Un facteur externe est un coût ou un bénéfice engendré par une partie, mais supporté ou reçu financièrement par une autre. Les facteurs externes peuvent être négatifs ou positifs. Un facteur externe négatif est l'imposition indirecte d'un coût par une partie à une autre. Un facteur externe positif, en revanche, se produit lorsqu'une partie reçoit un bénéfice indirect à la suite d'actions entreprises par une autre partie.

4.2.4. Le contexte en France

En France, le « Code de l'environnement » [147] guide l'approche visant à développer un scénario de projet durable dans le cadre d'un « processus d'évaluation environnementale » qui fait partie de l'autorisation du projet. Le terme « environnement » doit être compris dans son sens premier et dans un sens large : l'environnement et les conditions dans lesquels le projet sera implanté.

L'objectif du processus est de développer un scénario de projet réalisable et durable en suivant la méthode « éviter-réduire-compenser » (ERC), qui est ancrée dans la réglementation européenne et transposée dans le droit français [148]. Par conséquent, le scénario du projet à autoriser vise une valeur nette positive (voir Fig. 4.3).

Sustainability/img/ERC_Principle.pdf

Fig. 4.3 : Approche « Éviter-Réduire-Compenser » pour le développement itératif d'un scénario de projet durable dans le but d'atteindre un équilibre écologique et, dans la mesure du possible, un gain net [13].

Cette approche de développement itératif de variantes et de versions continuellement améliorées est également documentée par la norme internationale ISO 14001 relative au management environnemental. Elle décrit le modèle Planifier-Développer-Contrôler-Ajuster (PDCA) comme un processus itératif permettant d'assurer une amélioration continue (ISO 14001, Pas à pas, Chapitre 1).

Étant donné qu'en France l'évaluation des programmes et des projets est obligatoire pour les investissements publics qui dépassent 20 millions d'euros et qu'une deuxième évaluation est exigée pour les investissements qui dépassent 100 millions d'euros, l'Assemblée nationale suit ces projets chaque année, et en rend compte, en utilisant une approche de fiche d'information standard qui mentionne la valeur actuelle nette comme indicateur global de durabilité, ainsi que les émissions de gaz à effet de serre qui peuvent être évitées. Ces informations sont publiées en annexe de la loi de finances annuelle [149]. En 2023, 13 investissements dans la recherche ont fait l'objet d'évaluations socio-économiques complètes.

L'évaluation porte sur l'ensemble du projet, à toutes les phases du cycle de vie. Il est entendu que les niveaux de détail de la description des différentes phases et des différents segments du projet peuvent être différents au départ. Le processus accompagne le projet pendant toute sa durée de vie. Par conséquent, la documentation doit être régulièrement mise à jour. Le processus enregistre l'état initial de l'environnement, y compris la

nature et une variété d'autres sujets tels que l'urbanisme, la santé publique, la sécurité de la population, les impacts économiques.

Le processus identifie et évalue activement les effets pertinents sur l'environnement du projet (analyse de l'impact environnemental) et contribue au processus de conception en suivant les étapes Éviter, Réduire et Compenser. Le processus comprend la participation de la population, par exemple au moyen d'une phase de dialogue informel et de participation, et d'un processus formel de consultation publique (« débat public ») et d'« enquête publique ». Ces derniers processus sont réalisés par des organismes notifiés nationaux.

Afin d'évaluer correctement les performances en matière de développement durable, le gouvernement français exige une évaluation socio-économique pour chaque projet de plus de 20 millions d'euros financé par des investissements publics. L'évaluation doit être effectuée conformément aux lignes directrices du Secrétariat général pour l'investissement (SGPI) [150]. Les projets dont l'investissement public total est supérieur à 100 millions d'euros font l'objet d'une contre-expertise, sur laquelle le SGPI fournit une évaluation au Parlement français et au Premier ministre, ainsi qu'au ministre compétent pour le projet.

L'évaluation socio-économique comprend une description détaillée du projet, de ses variantes et alternatives, de ses principales caractéristiques, du calendrier de mise en œuvre, d'une liste d'indicateurs socio-économiques pertinents, d'une liste de valeurs d'indicateurs montrant où le projet se situe, par rapport aux politiques publiques (par exemple, les objectifs de réduction de l'impact sur le climat), du plan financier, de la conformité avec les lois et les règlements et d'un registre des risques.

Jusqu'en 2020, les évaluations socio-économiques des programmes et des projets ne portaient que sur des aspects environnementaux limités tels que les habitats et les espaces verts. L'importance croissante de sujets plus globaux a conduit à un élargissement des impacts positifs et des facteurs externes négatifs couverts. Le guide d'évaluation de l'impact pour 2023 en France [150] inclut explicitement tous les aspects environnementaux pertinents pour le projet, tels que les émissions d'équivalent CO₂, le bruit, la pollution de l'air, l'utilisation et la pollution de l'eau, l'utilisation et la pollution des sols, et exige que ces aspects soient associés à des valeurs monétaires et que les contributions positives soient quantifiées en termes monétaires. Par exemple, la valeur légale d'une tonne de CO₂ pour l'évaluation socio-économique a été fixée à 32 euros (année de base 2010) dans la ligne directrice 2023, ce qui correspond à environ 40 euros en 2024. Malgré cette valeur, l'annexe qui indique les lignes directrices de la conversion des biens non échangeables et des facteurs externes en termes monétaires indique une progression du coût fictif du carbone de 250 euros par tCO₂e en 2030 à 775 euros par tCO₂e en 2050. Cette progression est conforme aux recommandations de la BEI concernant le coût fictif du carbone.

L'évaluation socio-économique du FCC est basée sur une analyse des coûts et des bénéfices standard, présentant une valeur actuelle nette et un ratio bénéfices/coûts basés sur la comparaison des coûts et bénéfices totaux actualisés au cours d'une période d'observation définie. Les coûts et les bénéfices ont été quantifiés par rapport à un « scénario contrefactuel » dans lequel le CERN exploite le LHC jusqu'à sa fin de vie prévue et continue à servir de plateforme de recherche scientifique avec le complexe d'accélérateurs de particules existant. Les effets directs et les facteurs externes, positifs et négatifs notables doivent être pris en considération tout au long du cycle de vie du projet, y compris les effets environnementaux.

Pour le taux d'actualisation social (TAS), les lignes directrices 2023 pour l'impact socio-économique en France [151] recommandent d'utiliser généralement une valeur de 3,2 % pour les projets dont la durée de vie s'étend jusqu'à l'année 2070. Toutefois, pour les projets à très long terme et à faible risque tels que les infrastructures de recherche, un taux d'actualisation social plus faible, de l'ordre de 2,5 %, peut être justifié. Pour l'analyse coûts-bénéfices du FCC, les économistes ont choisi un TAS de 2,8 %, qui repose sur la pondération des TAS dans chaque État membre du CERN en tenant compte de sa contribution financière annuelle au CERN.

S'il existe une « déclaration d'utilité publique » (DUP) régissant le processus d'autorisation des projets d'investissement public, l'évaluation socio-économique fait partie des dossiers d'enquête publique exigés par la loi pour obtenir les autorisations nécessaires au projet.

L'évaluation socio-économique doit être mise à jour régulièrement, en suivant l'approche itérative consistant à affiner le scénario du projet et à comparer les effets attendus aux effets réels une fois le projet mis en œuvre (analyse a posteriori).

Un projet peut être considéré comme durable si les valeurs actuelles nettes socio-économique et financière sont positives. En outre, le taux d'actualisation social appliqué doit être supérieur au coût moyen pondéré du capital nécessaire pour financer le projet. Cela peut être vérifié en déterminant le taux de rendement interne (TRI), qui est étroitement lié au calcul de la valeur actuelle nette. Ce taux indique à quelle valeur du taux d'actualisation social la valeur actuelle nette du projet devient nulle. Par exemple, si les prêts pour le projet sont accordés à 3 % alors que la valeur actuelle nette devient nulle à 5 % seulement, la condition est remplie.

Si le projet ne génère pas de revenus, c'est-à-dire dans le cas d'une infrastructure pour la recherche scientifique fondamentale, aucune valeur actuelle nette financière ne peut être fournie, une valeur actuelle nette socio-économique positive et un taux de rendement interne supérieur au coût du capital répondent à la condition de durabilité. Si la valeur actuelle nette socio-économique est négative et la valeur actuelle nette financière positive, l'investissement peut être financièrement viable, mais il n'est pas recommandé d'un point de vue sociétal.

4.2.5. Le contexte en Suisse

Le processus d'autorisation en Suisse est basé sur des principes directeurs qui exigent la démonstration de la conformité du scénario avec toutes les lois et réglementations individuelles applicables. Toutes les lois et réglementations applicables au projet doivent être identifiées et énumérées de manière explicite. Une bonne pratique consiste à suivre l'approche « Éviter-Réduire-Compenser » telle qu'elle est exigée en France et en Europe, avec une participation continue des organismes notifiés, des services de l'administration publique et de la population. Cette approche doit être accompagnée de mesures de suivi et d'amélioration continue.

Avec la récente mise à jour de la loi sur l'encouragement de la recherche et de l'innovation (LERI) [152] et le développement d'un plan spécifique pour les nouvelles constructions et installations du CERN [153], les lignes directrices relatives à la durabilité des infrastructures de recherche deviennent plus spécifiques.

Il convient d'éviter la consommation de terrains, en particulier de terres arables à rotation de cultures de haute qualité, qui sont considérées comme une ressource précieuse. Lorsque cela n'est pas possible, la consommation résiduelle de ces terres enregistrées dans un inventaire national doit, en principe, faire l'objet d'une compensation. Par conséquent, les alternatives et les variantes du projet doivent être documentées et évaluées. Une compensation peut, par exemple, être obtenue en enlevant la couche arable du terrain d'origine concerné et en utilisant cette terre pour créer des terres arables de haute qualité dans un périmètre géographique convenu, par exemple sur des terres en friche ou des sols dégradés. Les autorités facilitent le processus d'identification des zones de compensation appropriées et les procédures administratives.

Le plan sectoriel pour les constructions et installations du CERN ayant des besoins territoriaux (PS CERN) [154] met en évidence un certain nombre de sujets qui doivent être pris en compte lors de l'élaboration de nouveaux projets :

- Les couches aquifères doivent être protégées et ne doivent pas être utilisées pour fournir de l'eau non traitée à des fins de refroidissement. Il faut veiller à ne pas polluer les couches aquifères et à ne pas mélanger les eaux des couches aquifères superposées.
- Des zones tampons d'exclusion à proximité des cours d'eau protègent les habitats.
- Les défrichements sont généralement interdits en Suisse. Une dérogation ne peut être accordée que dans des cas exceptionnels pour des installations d'intérêt public.
- Des mesures doivent être prises pour gérer les eaux de pluie et les eaux usées afin d'éviter les inondations et la pollution de l'environnement. Il en va de même pour la gestion de l'eau utilisée pour éteindre les incendies.
- Les limites d'émissions de poussières et de particules doivent être respectées.
- Les limites des émissions sonores doivent être respectées. En Suisse, les limites d'émission sonore sont absolues et définies pour différentes zones de sensibilité, contrairement à la France, qui considère des limites de bruit relatif par rapport au bruit de fond existant.

- Des mesures doivent être prises pour gérer les déchets de toute nature pendant toutes les phases du projet.
- Les objectifs nationaux et cantonaux en matière d'énergie et de protection du climat doivent être pris en compte lors de la planification, de la construction et de l'exploitation des futures installations de recherche. La consommation d'énergie doit être réduite à un minimum compatible avec la capacité d'atteindre les objectifs de la recherche scientifique.
- Les émissions de gaz à effet de serre doivent être réduites à un minimum dans les limites nécessaires pour atteindre les objectifs scientifiques et répondre aux exigences du projet.
- La conception et la mise en œuvre des systèmes techniques doivent intégrer l'optimisation de l'efficacité énergétique, ainsi que la récupération et l'utilisation de la chaleur fatale. Les capacités et les caractéristiques disponibles pour un usage interne et externe doivent être identifiées et documentées.
- Les bâtiments doivent être conformes aux réglementations nationales en matière d'efficacité énergétique.
- En général, tout effort d'optimisation et de réduction est censé être conditionné par la faisabilité technique et la viabilité économique. Ces efforts doivent toujours être compatibles avec la possibilité d'atteindre les objectifs de recherche scientifique spécifiés.
- Un plan de mobilité qui soutient les plans climatiques nationaux et cantonaux doit être développé. Les places de stationnement doivent être optimisées, conformément aux réglementations en vigueur.

4.3. Méthodologie

L'étude a adopté l'approche et la méthodologie nécessaires à la réalisation d'une évaluation quantitative complète et plus large de la durabilité, basée sur la méthodologie bien établie de l'analyse des coûts et des bénéfices [155] définie par la Commission européenne et la Banque européenne d'investissement et telle qu'elle est décrite dans les lignes directrices nationales du type de celle de la France [150]. Une telle évaluation comprend l'identification et la quantification des coûts, des bénéfices et des facteurs externes positifs et négatifs.

L'objectif est de présenter un scénario d'implantation susceptible d'être durable à long terme et pour lequel les performances en matière de développement durable peuvent être continuellement améliorées par rapport à une prévision initiale servant de référence. L'approche permet d'analyser des variantes et d'établir des conditions limites de durabilité.

Dans le cadre d'une approche fondée sur le cycle de vie, une bonne pratique consiste à élaborer une évaluation initiale des coûts et des bénéfices le plus en amont possible, au stade de la préfaisabilité, et à l'actualiser régulièrement à mesure que les principales caractéristiques du projet continuent d'être ajustées pendant la phase de conception et même pendant la réalisation. Cette approche permet de résoudre la difficulté que représente l'impossibilité de couvrir de manière exhaustive les coûts et les bénéfices et de se concentrer sur une bonne compréhension des principaux facteurs de durabilité et des risques.

L'analyse de la durabilité est une composante nécessaire à une prise de décision éclairée. L'évaluation du projet et de la durabilité du projet de recherche scientifique ne permet, cependant, pas d'appréhender l'opportunité et la valeur de la mission scientifique sous-jacente. Les indicateurs ne doivent donc pas être utilisés pour comparer des projets de recherche ou pour faire un choix d'investissement entre plusieurs projets.

Pour être utile lors de l'autorisation, de la mise en œuvre et de l'exploitation du projet, celui-ci doit prévoir un contrôle et un suivi périodiques de la durabilité tout au long de sa durée de vie et mettre en œuvre un processus d'amélioration itératif suivant le principe standard « Planifier-Développer-Contrôler-Ajuster », que ce soit au niveau de l'infrastructure ou pour les nouveaux programmes et projets.

L'évaluation (ou analyse) du cycle de vie (ACV) [156, 157] est une méthodologie qui convient aux différents segments d'un projet. Elle permet d'évaluer un ensemble d'aspects environnementaux pertinents pour atteindre la durabilité. Son objectif et sa portée doivent être bien définis et ses résultats doivent être intégrés dans l'évaluation globale du projet et de la durabilité. Lors de la réalisation d'une ACV, il faut veiller à être aussi précis que possible et à documenter de manière exhaustive la variante de scénario et la version évaluée, les hypothèses, les paramètres d'entrée, la qualité des données et la procédure d'attribution (algorithmes et outils) afin de garantir que les résultats ont une valeur significative pour l'évaluation. L'ACV n'est pas en

mesure de saisir tous les aspects environnementaux pertinents et ne remplace donc pas une évaluation des incidences sur l'environnement. Elle ne peut donc pas être utilisée pour rendre compte de la performance environnementale globale d'un projet.

Pour une évaluation complète de la durabilité, une méthode quantitative d'analyse coûts-bénéfices (ACB) fondée sur les connaissances économiques les plus récentes et intégrant les coûts totaux, les facteurs externes négatifs (y compris les facteurs externes environnementaux) et les bénéfices industriels, sociaux et environnementaux constitue l'approche privilégiée qui est adoptée. Une description plus complète de l'approche est donnée à la section 4.5.

Les développeurs de projets doivent se tenir au courant des réglementations nationales et internationales et des cadres juridiques au cours de la phase de conception et de la phase préparatoire qui suit. Elles doivent continuellement améliorer leurs connaissances sur les méthodes d'évaluation des projets les plus modernes et le développement d'approches pour convertir les impacts positifs et négatifs et les facteurs externes en termes quantitatifs, afin de présenter un indicateur global de durabilité sous la forme d'une valeur actuelle nette et d'un ratio bénéfices/coûts du projet. C'est pourquoi, tant que des connaissances et des hypothèses supplémentaires sur le scénario du projet et ses principales caractéristiques sont développées, le ratio coûts-bénéfices (BCR) et le taux de rendement interne (TRI) évoluent tout au long des phases du cycle de vie.

4.4. Facilitateurs de durabilité socio-économique

4.4.1. Voies d'impact

Les voies d'impact socio-économique constituent un inventaire précieux des facteurs de durabilité. Basé sur le concept de « théorie du changement » [158], le projet RI-PATHS financé par l'UE a développé une boîte à outils [159], fédérant des infrastructures de recherche dans divers domaines, y compris les installations d'accélérateurs de particules telles que ALBA, CERN et DESY. Les principales voies d'impact caractéristiques pour les installations à base d'accélérateurs de particules sont présentées à la Fig. 4.4. Cette section décrit brièvement comment ces voies peuvent conduire directement à des bénéfices et à des facteurs externes positifs et donne quelques exemples spécifiques.

Sustainability/img/Main_impact_pathways.pdf

Fig. 4.4 : Principales voies d'impact socio-économique favorisant la durabilité des infrastructures de recherche sur les accélérateurs de particules et la physique des particules.

Dans le cadre de futurs projets, la réalisation d'une cartographie complète des potentiels des voies d'impact et un développement des mesures favorisant la durabilité autour d'une telle activité systématique d'exploration et de conception sont vivement encouragés.

Connaissances en physique fondamentale

La science est une connaissance formalisée qui peut être expliquée de manière rationnelle et testée, par rapport à la réalité, à la logique et à l'examen par les pairs, et qui constitue un bien public mondial [160]. En fin de compte, il s'agit du principal extrant des infrastructures de recherche. Dans notre société en mutation, la connaissance est sur le point de devenir la ressource économique de base, remplaçant progressivement le capital, la terre et le travail. Il est prouvé que le secteur public a financé et continue de financer une grande partie de la science innovante qui stimule les réponses du secteur privé [161]. Mais quelle est la valeur des connaissances générées par les projets de science fondamentale ? Les investissements continus dans de nouveaux projets d'accélérateurs de particules pour la recherche scientifique sont-ils durables aux yeux des personnes qui n'utilisent pas directement ces instruments et qui ne profitent pas directement des connaissances générées ? Quels sont les moyens disponibles pour évaluer la valeur de ces investissements ?

Les accélérateurs de particules destinés à la science fondamentale peuvent ou ne peuvent pas générer des connaissances pouvant être utilisées directement par la société. D'autres accélérateurs de particules, tels que les sources de rayonnement synchrotron, servent généralement à la recherche appliquée. Cela signifie qu'une limite inférieure de la valeur des connaissances générées peut être quantifiée en termes de coût des publications, de frais d'utilisation de l'installation et de ressources que les utilisateurs investissent dans cette recherche. L'approche repose sur l'hypothèse que les résultats de la recherche aboutissent finalement à des produits et services utilisés par la société. Un exemple en est la caractérisation de la structure du virus COVID-19 avec le synchrotron BESSY-II [162]. Les accélérateurs de particules et les collisionneurs qui servent la recherche axée sur la curiosité, comme le LHC ou le collisionneur électron-ion, ne peuvent pas utiliser ce modèle, car il n'est pas certain que les connaissances acquises déboucheront sur des applications sociétales directes. Il ne fait toutefois aucun doute que les résultats scientifiques font progresser la société. Ce point de vue est partagé par la majorité des personnes, même si l'actif concerné n'est pas directement utilisé.⁵

La validité de l'approche est démontrée par l'attribution de plusieurs prix Nobel d'économie pour des avancées dans ce domaine. Il est prouvé que ce processus de génération de valeur est d'une importance fondamentale pour la société et l'économie du bien-être [163–168].

Pour saisir la valeur que les missions scientifiques et les infrastructures de recherche représentent pour les profanes qui ne peuvent pas les utiliser directement, il est possible d'avoir recours à des méthodes qui ont été développées à l'origine pour élucider la valeur de bien public des espaces récréatifs en plein air [169], pour identifier les niveaux de valeur appropriés pour les mesures de protection de l'environnement [170], pour déterminer les niveaux adéquats de mesures d'atténuation des incidents environnementaux [171] et pour déterminer les niveaux d'investissement nécessaires pour protéger le patrimoine naturel et culturel. Cette approche a d'abord été utilisée pour estimer la valeur du projet LHC [172], puis pour le projet HL-LHC [173] et elle est maintenant utilisée pour le FCC [174]. Cette approche a récemment été également adoptée par une infrastructure de recherche sur l'atmosphère [175]. En bref, la valeur que les gens associent à un projet scientifique peut être appréhendée en estimant leur volonté de participer financièrement à l'aide d'approches bien établies en économie, telles que l'évaluation contingente, encore appelée « préférence déclarée ».

L'évaluation des impacts non marchands est difficile, mais elle pourrait être entreprise dans la mesure du possible et le « programme de l'Union européenne pour une meilleure réglementation » indique les instruments pour y parvenir [176]. Cela permettra de mieux comprendre la perception du public à l'égard de la vision scientifique et de tester la validité de l'hypothèse de durabilité du financement public, c'est-à-dire de préciser quel est le niveau d'investissement périodique qui est justifié d'après la perception du public. Pour concevoir, planifier et réaliser une estimation de la valeur du bien public, il faut faire appel à des experts du domaine et à des entreprises qualifiées. Il est important de veiller à ce que cette volonté de participer à une analyse, reposant généralement sur des enquêtes, soit effectuée en toute indépendance, sans l'influence du maître d'ouvrage et conformément aux lignes directrices internationales en matière d'éthique et aux normes de qualité exigées pour les analyses basées sur des enquêtes. On trouvera des exemples de cette approche dans les références [174, 177].

En fonction du nombre de pays ou d'organismes de financement à même de réaliser le projet, une telle enquête peut nécessiter des ressources considérables. Les économistes utilisent donc des techniques basées sur la « méthode du transfert de bénéfices » [178] pour estimer la valeur perçue d'une grande population sur la base de l'identification de quelques paramètres significatifs qui peuvent être dérivés d'un nombre limité

d'échantillons. Ces paramètres peuvent varier d'un projet à l'autre. Par conséquent, une telle étude nécessite une phase pilote pour déterminer les paramètres significatifs, suivie d'une enquête de masse pour déterminer la valeur que le public associe à l'investissement.

La notion qui préside à ce concept est celle de « bien public » par opposition au « bien commun » qui est utilisé de façon conjointe. Les réserves halieutiques dans l'océan et les routes maritimes publiques sont des exemples de biens communs. La connaissance, le patrimoine naturel et culturel sont des exemples de biens publics, de même que les logiciels ouverts et les open data, voire les biens matériels tels que l'éclairage public.

Si la volonté estimée de participer financièrement est supérieure à la contribution réelle ou attendue au nouveau projet prévu, la valeur du bien public constitué par l'infrastructure financée peut être considérée comme cohérente avec la participation financière et donc également être considérée comme justifiée. Si le consentement à participer est inférieur à la contribution réelle ou prévue, il y a un écart entre la valeur perçue par les personnes et la contribution fournie. Dans ce cas, le projet doit être revu.

La durabilité par l'éducation et la formation

Les accélérateurs de particules et les infrastructures de recherche en physique expérimentale offrent la possibilité d'engager des personnes à tous les niveaux d'éducation et de formation, des apprentis aux chercheurs postdoctoraux. Si les gens ont la possibilité de participer activement à la conception, à la construction et à l'exploitation de ces projets et programmes, ils bénéficient d'avantages qui se traduisent directement par une prime salariale à vie de 2 à 10 % [122,179], par rapport à leurs pairs inscrits dans des programmes de formation conventionnels dans les écoles et les universités. Un programme spécifique visant à intégrer les personnes, après leur période d'activité dans une installation de recherche, sur le marché du travail de leur pays ou région d'origine peut améliorer de manière significative le retour sur investissement pour le pays ou la région participant au projet [180].

Durabilité grâce à la participation des communautés scientifiques internationales

La participation d'une communauté de scientifiques et d'ingénieurs très importante et en croissance constante, sous la forme de projets de recherche collaboratifs sur de longues périodes, garantit la viabilité à long terme d'un projet ou d'un programme scientifique. Les raisons en sont les suivantes :

- Les frais de personnel sont répartis entre de nombreuses organisations et pays contributeurs ;
- Une génération stable de productions scientifiques [181,182] (c'est-à-dire les livres, les articles évalués par les pairs, les prépublications et les rapports techniques, les actes et les présentations) peut être garantie.
- Les connaissances peuvent être transférées efficacement dans des programmes d'enseignement durables par le biais de publications et d'une formation directe au fil des générations.
- L'impact peut être généré par la formation de professionnels en début de carrière (voir section précédente).

La valeur élevée est principalement obtenue en s'assurant que les productions scientifiques générées directement par le projet ou le programme de recherche sont effectivement repris et cités par une communauté de deuxième niveau encore plus importante. La diffusion en libre accès de publications fiables (évaluées par des pairs) est une condition préalable pour assurer la durabilité de l'infrastructure de recherche par la création de productions scientifiques. Enfin, le concept d'innovation ouverte qui implique un grand nombre de domaines de connaissances autour d'une mission scientifique centrale garantira que la probabilité de génération de connaissances stimulée par les difficultés de la mission scientifique finira par se répercuter sur la société dans des domaines qui sont immédiatement pertinents pour elle [183].

Durabilité grâce aux retombées industrielles

Les retombées industrielles des projets scientifiques génèrent des bénéfices directs pour l'industrie et la société [184–186]. Cette voie d'impact a une efficacité maximale si les projets scientifiques construisent leurs instruments et leurs infrastructures en collaboration avec des partenaires industriels [187–189]. Cela fonctionne mieux lorsque les entreprises travaillent en étroite collaboration avec le projet de recherche pour développer des solutions à forte intensité technologique et fournir des services non standardisés [190]. Cette approche est plus laborieuse qu'une relation client/fournisseur classique car elle nécessite des échanges d'idées et de connaissances, le développement de processus intégrés, l'adaptation mutuelle des méthodologies de travail et un partage des risques. Ce processus conduit toutefois à la création de processus, de produits et de services durables que les partenaires industriels peuvent exploiter sur d'autres marchés, avec des multiplicateurs de gains supérieurs à 3 et des effets qui peuvent durer entre cinq et huit ans. Des effets territoriaux durables ont également été documentés de manière fiable [191,192].

La durabilité dépend également de la conception de la mission scientifique : les programmes de courte durée et non évolutifs entraîneront des retombées industrielles plus faibles et de plus courte durée que les programmes de longue durée caractérisés par des mises à niveau périodiques et des mesures d'amélioration de l'efficacité opérationnelle impliquant des partenaires industriels dans des activités continues basées sur des défis à relever.

Les retombées industrielles peuvent également entraîner des facteurs externes environnementaux positifs durables. La difficulté que représente la réduction de l'empreinte carbone et de l'impact environnemental de la construction d'un nouvel accélérateur de particules crée une opportunité d'innovations industrielles dans de nombreux domaines liés à la construction. Par exemple, elle induit un potentiel de développement ou de mise en place d'installations de production de béton et d'autres matériaux de construction à faible émission de carbone. Cela sert de plateforme pilote pour l'amélioration des techniques de construction, par exemple en utilisant des ressources naturelles telles que le bois et la terre comprimée. La présentation de l'application suscite l'intérêt du marché. La mise au point de procédés et de produits pour l'utilisation des matériaux excavés peut générer des bénéfices allant bien au-delà des besoins du projet d'infrastructure de recherche, car la gestion des déchets de construction est un problème auquel la société est confrontée et pour lequel les projets de construction conventionnels ne disposent généralement pas de suffisamment de temps et de budget. L'architecture industrielle basée sur l'éco-conception est une autre discipline émergente pour laquelle les accélérateurs de particules constituent des adeptes précoces appropriés. Des bénéfices environnementaux peuvent également être générés dans le domaine des infrastructures techniques développées avec des partenaires industriels. Il s'agit notamment :

- de systèmes de réfrigération plus efficaces qui trouvent leur application, par exemple dans la liquéfaction et le transport des gaz ;
- de systèmes de refroidissement par eau plus efficaces (prise d'eau adaptée, utilisation des eaux usées) ;
- de l'amélioration des systèmes électriques (réduction des pertes grâce à des systèmes à courant continu) ;
- de la gestion du contrôle de la puissance à grande vitesse ;
- du stockage d'énergie à court et moyen terme ;
- d'opérations d'infrastructure adaptatives et fondées sur l'apprentissage automatique ;
- du stockage et de la distribution de la chaleur fatale.

Durabilité grâce aux technologies ouvertes de l'information et de l'informatique

Le développement des technologies de l'information et de la communication (TIC) et la production de données largement disponibles ne se limitant pas aux résultats scientifiques (par exemple, les données des essais techniques, le suivi des opérations, les essais des systèmes, etc.) sont des résultats essentiels des infrastructures de recherche basées sur les accélérateurs de particules [193]. La mise en place d'une infrastructure mondiale de partage et de traitement des données a déjà conduit à la création de nombreux

logiciels, plateformes et services en ligne librement accessibles, qui sont également utilisés dans des environnements, autres que la physique, des hautes énergies et qui vont du stockage de données évolutif et des intergiciels de distribution à la gestion des données et aux systèmes de flux de travail, en passant par l'analyse et la visualisation des données. En outre, des logiciels librement accessibles ont été développés, dont la valeur va au-delà des collaborations scientifiques. Parmi les exemples, on peut citer les services innovants d'informatique sur le Cloud (par exemple, Helix Nebula Science Cloud, utilisable dans cinq domaines de recherche scientifique), les logiciels de gestion des réunions et des événements (par exemple, Indico), la modélisation et l'analyse des interactions entre les particules et la matière (par exemple, GEANT4, FLUKA et ACTIWIZ) et les logiciels de bibliothèque électronique et d'accès à l'information (par exemple, Invenio et Zenodo). La conservation des données à long terme est un autre domaine technologique d'une grande importance sociétale qui gagne en importance et qui est principalement stimulé par les infrastructures de recherche en science fondamentale.

Les projets de recherche sur les accélérateurs de particules et la physique des hautes énergies sont vivement encouragés à dresser un inventaire des outils TIC potentiels qui peuvent être mis à la disposition de la société dans son ensemble, de manière ouverte et gratuite. La possibilité de quantifier l'impact sociétal de ces solutions dépend fortement de la comptabilisation de l'adoption et de l'utilisation des logiciels (par exemple, le nombre d'installations, le nombre de fois où il a été intégré dans des logiciels commerciaux et d'autres logiciels ouverts) sur des périodes prolongées. Aujourd'hui, cette comptabilisation fait défaut, ce qui rend l'estimation quantitative de l'impact sociétal difficile et laborieuse.

Cependant, il est important de mettre en place une surveillance et une évaluation systématiques, car les outils TIC développés dans l'environnement scientifique ont un impact majeur avec des potentiels de valeur significatifs et tangibles [194,195].

Les logiciels ouverts et librement accessibles développés et maintenus par les projets et programmes scientifiques sont des facteurs de durabilité pour les infrastructures de recherche. Leurs coûts d'investissement, de développement continu et de maintenance sont marginaux, par rapport aux bénéfices sociétaux qu'ils peuvent générer au fil des décennies. Les futurs projets et programmes d'accélérateurs de particules devraient se concentrer sur la gestion et la promotion adéquates des développements en matière de TIC et s'assurer qu'ils sont adoptés par la société grâce à un processus d'exploitation des compétences technologiques et à une présence en ligne soutenue dans les domaines d'utilisation potentiels.

La durabilité grâce aux biens culturels

Susciter l'intérêt de tous les citoyens pour la science fait partie de la mission de toute infrastructure de recherche. Les projets et les organisations peuvent développer un large éventail d'activités pour attirer les profanes, par exemple au moyen d'expositions permanentes et itinérantes, de journées portes ouvertes, de visites guidées, d'un engagement vis-à-vis des écoles et des enseignants dans des ateliers communs, de projets scientifiques citoyens, de sites web, de médias sociaux, d'un engagement vis-à-vis de blogueurs vidéo, de documentaires en ligne et télévisés, de stages artistiques, de projets artistiques communs, de longs métrages, de livres, de foires scientifiques, d'une présence dans des émissions de radio et de télévision et bien d'autres choses encore. La seule limite de la création de biens culturels est celle de l'imagination d'un groupe de personnes créatives en constante évolution et diversifié, qui est le mieux à même d'être employé sur des périodes prolongées. Chacun de ces biens culturels a la capacité de générer de la valeur pour la société. Le fait de susciter un intérêt constant pour le projet scientifique fait tomber les barrières et les craintes des personnes qui ne font pas partie de la communauté scientifique.

Il est important que les projets d'accélérateurs de particules et de physique fassent participer les profanes de manière ludique et divertissante plutôt que de viser l'éducation et l'enseignement, qui constituent une voie d'impact socio-économique différente. Les deux doivent être séparés, bien qu'une création et un engagement culturels efficaces permettent d'expliquer la science sous-jacente dans une deuxième étape.

L'identification de la valeur des biens culturels peut être très différente pour chaque bien. Par conséquent, les futurs projets et programmes devront se concentrer dans un premier temps sur quelques filières culturelles. Si la valeur estimée d'une filière s'avère avoir un potentiel suffisant, il convient de la développer davantage en vue d'un engagement durable. Un contrôle continu de la valeur doit être effectué.

La valeur des visites sur place représente un bien culturel des infrastructures scientifiques qui peut générer une valeur économique substantielle et durable [196, 197]. Ces visites comprennent la découverte de l'environnement et de la nature [198, 199]. Cette activité devrait donc être la première à être envisagée pour le développement.

La présence sur les réseaux sociaux est celle qui a le plus d'impact sur les biens culturels en ligne à l'heure actuelle et doit donc être considérée comme une priorité [118]. Il est particulièrement important de susciter un intérêt constant pour la science et d'expliquer de quelle manière la science influe sur l'environnement et la vie quotidienne des gens. Différents moyens de communication sont nécessaires pour les différentes générations et les différents groupes socio-économiques [200].

Enfin, les projets scientifiques citoyens à la périphérie de la mission de la science physique sont des outils efficaces pour intéresser les profanes et renforcer la compatibilité environnementale et territoriale de l'infrastructure de recherche. Les initiatives visant à créer des inventaires de la biodiversité sur les sites de surface afin d'améliorer la qualité des habitats sur les sites et tout autour, en sont un exemple.

Durabilité grâce à des facteurs externes environnementaux positifs

Tout projet basé sur un futur accélérateur de particules a la capacité de créer des facteurs externes environnementaux positifs qui peuvent compenser les effets négatifs résiduels et inévitables sur l'environnement qu'il n'est pas possible de réduire davantage. Avant d'élaborer des mesures de compensation et d'accompagnement, il convient d'éviter les effets négatifs sur l'environnement. S'ils ne peuvent être évités, ils doivent être réduits dans la mesure où cela est compatible avec la réalisation des buts et objectifs de l'infrastructure dans le respect des contraintes de coût et de calendrier accepté.

Les cadres juridiques et réglementaires nationaux et internationaux définissent les conditions limites de l'approche d'évitement, de réduction et de compensation. La récente mise à jour de la loi sur l'encouragement de la recherche et de l'innovation en Suisse, par exemple exige explicitement la prise en compte des plans nationaux et régionaux de protection du climat et des aspects liés à l'énergie [201]. D'autres pays, comme la France, ont déjà inscrit la lutte contre le changement climatique, la protection des ressources et de la biodiversité, l'économie circulaire et le développement territorial durable dans les lois de protection de l'environnement (L110-1 [147] et [202]) qui régissent l'autorisation de nouveaux projets [202]. Par conséquent, le terme « environnemental » doit toujours être interprété au sens large. Les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre définis par l'Accord de Paris doivent être intégrés dans les nouveaux projets au niveau de l'UE et en suivant leur transposition dans les lois nationales [203].

Si elle est correctement planifiée, évaluée et contrôlée, la compensation collective peut même avoir un effet positif net [204]. La Suisse ne prévoit pas une telle approche et exige une compensation basée sur une surface et une qualité équivalente en principe dans le canton concerné [205–207]. Malgré cette contrainte, la performance environnementale globale peut encore être neutre ou positive du point de vue de l'évaluation socio-économique si les facteurs externes environnementaux positifs sont correctement évalués et intégrés dans la valeur actuelle nette du projet.

Voici quelques exemples types de facteurs externes environnementaux positifs que les installations d'accélérateurs de particules peuvent intégrer dès le départ dans leur conception :

- Recréation d'espaces agricoles en transférant de la terre arable vers des parcelles de faible qualité et des friches ;
- Création d'espaces verts avec des routes couvertes, fertilisation de friches et de carrières remblayées, création de parcs, végétalisation de toits, reboisement autour des sites, création et amélioration de la qualité d'habitats naturels et de zones humides ;
- Favorisation de la biodiversité par la création de nouveaux habitats sur le domaine de l'infrastructure de recherche ;
- Amélioration ou création de nouveaux corridors écologiques, de continuités vertes et bleues ;
- Création de forêts avec des arbres et des plantes adaptés au changement climatique ;

- Introduction de la gestion forestière en vue de la prévention des incendies de forêt ;
- Amélioration de la gestion des cours d'eau existants, mais de faible qualité ;
- Création de réservoirs d'eau ;
- Création de haies surélevées pour lutter contre l'érosion des sols et créer de nouveaux habitats ;
- Création de concepts de mobilité douce ou multimodale destinés à être utilisés au-delà de l'installation de recherche ;
- Création et amélioration d'habitats naturels et de zones de protection de la nature sur les sites des infrastructures de recherche ;
- Réduction de l'empreinte carbone en contribuant à éviter d'utiliser les combustibles fossiles grâce à la distribution de chaleur fatale ;
- Distribution d'eau non traitée à des fins non potables par la distribution d'eaux usées purifiées lorsqu'elles ne sont pas utilisées par l'installation de recherche ;
- Augmentation des capacités des ressources en énergies renouvelables par le biais de contrats d'achat d'électricité et de communautés d'achat d'énergie à long terme ;
- Développement de produits et de processus qui s'appuient sur les principes de l'économie circulaire et sur des technologies à faible impact environnemental, qui s'étendent au domaine industriel (par exemple, dans les domaines des sous-stations électriques, des matériaux de construction, des solutions architecturales, de la transmission et du stockage de l'énergie, du refroidissement industriel) ;
- Démantèlement des infrastructures qui ne sont plus utilisées pour créer de la valeur environnementale et sociétale.

4.4.2. Innovation et R&D

Les accélérateurs de particules et les détecteurs pour les expériences aux points de collision des collisionneurs de particules sont des projets qui font appel à des technologies de pointe sur des périodes s'étalant sur plusieurs décennies. Par conséquent, ils ont tendance à se développer et à faire appel à des technologies qui n'existent pas au moment de la conception. Ce processus se poursuit pendant toute la durée de l'opération, au fur et à mesure que les détecteurs sont mis à niveau. Les avancées techniques requises peuvent être conçues en interne et/ou dans des institutions partenaires (telles que des universités) en collaboration avec des entreprises externes. Le développement peut prendre la forme d'une conception conjointe ou de l'acquisition de technologies à développer par l'entreprise. Dans les deux cas, les industries bénéficient d'un transfert de connaissances technologiques qui peut déboucher sur des percées technologiques, des brevets ou de nouvelles opportunités commerciales [208,209]. Ces processus sont encouragés et accompagnés par des centres de transfert de connaissances (TC) spécialisés au sein des organisations participantes. [210–213] En tant que catalyseur de la mission scientifique, ce progrès technologique est un résultat précieux, qui influe de manière significative sur la durabilité sociale d'un projet.

Autres potentiels de développement durable

Les projets scientifiques internationaux tels que le FCC offrent également la possibilité de développer les compétences non techniques et la coopération internationale. Ces projets rapprochent les nations dans la poursuite d'un objectif commun et pacifique. Comme on l'a vu récemment lors des cérémonies du 70e anniversaire du CERN, des chefs d'État et des ministres viennent visiter le site et ont des discussions bilatérales qui peuvent ou non être liées à la mission scientifique du projet, ou même à la science. Les médias nationaux ont rendu compte de l'événement en mettant l'accent sur le projet commun et sur ces aspects secondaires. Souvent, la question de savoir qui discute avec qui est considérée comme plus importante que l'événement lui-même. La collaboration menant à plus de collaboration, il y a un intérêt sociétal à rassembler les décideurs pour discuter des questions de l'heure dans un cadre informel. Issu de la recherche scientifique sur les accélérateurs de particules, le projet SESAME en Jordanie [214] a été mis en place dans une optique de collaboration internationale, autant, voire plus, que le projet scientifique proposé. Les installations de

Heidelberg, du CNAO et de MedAustron pour la thérapie du cancer par ions légers sont des exemples concrets de transfert direct de connaissances, d'expertise, de compétences et de technologies à partir de la physique fondamentale des particules et de la recherche sur les accélérateurs de particules vers des applications sociétales significatives. Un futur collisionneur circulaire peut réaliser tout cela pour l'Europe et au-delà.

4.5. Évaluation complète des performances de durabilité sur la base d'une analyse des coûts et des bénéfices

L'approche consiste à créer un inventaire des éléments de coûts négatifs et de bénéfices positifs, y compris les facteurs externes et à les convertir en termes monétaires qui sont combinés pour déterminer une valeur actuelle nette (VAN) de l'investissement à la fin d'une période d'observation choisie (voir Fig. 4.5). Le ratio des bénéfices d'un projet, par rapport à ses coûts (BCR), y compris les facteurs externes, et le taux de rendement interne (TRI) sont deux mesures qui peuvent être dérivées de cette analyse pour fournir des informations précieuses sur la durabilité de l'activité entreprise. Le TRI est le taux d'actualisation qui ramènerait à zéro la VAN de l'ensemble du projet au cours de la période d'observation. Un investissement peut être considéré comme durable s'il est financièrement réalisable (flux de trésorerie net non nul) et rentable d'un point de vue socio-économique. Un BCR positif a été déterminé grâce à une évaluation complète de l'impact socio-économique sur la base des hypothèses les plus prudentes, y compris les coûts totaux, les facteurs externes et les bénéfices et d'un TRI supérieur au coût d'obtention du capital nécessaire. Ces résultats soutiennent la durabilité globale du projet.

Sustainability/img/NPV_formula_image.pdf

Fig. 4.5 : Expression permettant de déterminer la valeur actuelle nette (VAN) d'un projet d'investissement en tenant compte des aspects économiques, sociétaux et environnementaux.

Conformément aux lignes directrices sur l'estimation des coûts des infrastructures de recherche [215], les éléments suivants doivent être établis :

1. Unité d'analyse avec des descriptions claires du champ d'application et des limites ;
2. Période de référence avec une date de début et une date de fin de l'observation en fonction de la durée de vie utile prévue (il est à noter que cette période peut être différente de la durée de vie physique de l'infrastructure et peut conduire à des valeurs d'actif résiduelles) ;
3. Année de référence, c'est-à-dire le moment où l'estimation quantitative est effectuée et qui ne coïncide pas nécessairement avec la date de début de l'investissement ou de la réalisation du projet. Les valeurs passées sont capitalisées et les valeurs futures sont actualisées par rapport à l'année de référence en utilisant la même formule mathématique. Les taux de conversion de l'unité de mesure, par rapport à d'autres devises pertinentes doivent être enregistrés pour l'année de base ;
4. Unité de mesure des coûts et des bénéfices dans une devise monétaire spécifique ;
5. Approche pour la conversion des contributions en nature en termes monétaires ;
6. Définition et description du scénario contrefactuel ;
7. Taux d'actualisation social spécifique au projet, justifié par un comité consultatif d'experts économistes ;
8. Structure des dépenses d'investissement et de fonctionnement ;
9. Prise en compte de la structure des facteurs externes négatifs ;
10. Structure des impacts positifs (bénéfices) pris en compte.

Outre les coûts financiers complets, les facteurs externes négatifs doivent être intégrés dans l'évaluation, dans la mesure où ils peuvent être raisonnablement identifiés, comptabilisés et convertis en termes monétaires.

En ce qui concerne les impacts éventuels sur le climat, la méthodologie comprend la prise en compte des facteurs d'émission pertinents pour le projet, l'estimation des émissions nettes de gaz à effet de serre (GES) (facteur externe négatif) et des émissions évitées (impact ou bénéfice positif) par rapport à un scénario de référence contrefactuel. La quantité résultante d'émissions de GES générées et évitées, exprimée en tonnes d'équivalent dioxyde de carbone (tCO₂e), doit être convertie en termes monétaires à l'aide d'un prix fictif du carbone. Conformément aux orientations techniques de la CE sur l'adaptation des infrastructures au changement climatique [216], il est recommandé, pour le coût fictif du carbone, d'utiliser les valeurs établies par la Banque européenne d'investissement (BEI), qui constituent les meilleures données disponibles sur le coût de réalisation des objectifs de l'Accord de Paris [217]. L'Accord de Paris est un traité international juridiquement contraignant sur le changement climatique. Il a été signé par 196 parties lors de la conférence des Nations Unies sur le changement climatique (COP21) à Paris, le 12 décembre 2015. Il est entré en vigueur le 4 novembre 2016.

L'analyse des entrées-sorties [218] est une méthodologie qui prend en compte uniquement les liens économiques et détermine la valeur ajoutée d'un investissement. Elle peut servir à estimer l'effet sur le marché de l'emploi et dans quels domaines et régions géographiques les activités économiques ont lieu. Cet outil est régulièrement utilisé par les gouvernements et au niveau international (par exemple, l'UE, l'OCDE) pour la recherche économique empirique et l'analyse structurelle. Il est donc largement connu. Il s'agit néanmoins d'un instrument purement économique qui ne doit être utilisé que de la manière suivante :

- En tant qu'outil complémentaire pour documenter les liens économiques, permettant le développement des contributions internationales en espèces et en nature ;
- Pour identifier les secteurs industriels concernés par le projet ;
- Pour développer des activités communes et des synergies ciblées
- Pour comprendre les implications sur le marché du travail ;
- Pour développer des politiques de spécialisation régionale ;
- Pour élaborer des plans de formation ciblés et de mobilité de la main-d'œuvre qualifiée.

Récemment, l'étude du FCC a mis en œuvre la recommandation des économistes d'effectuer une analyse complémentaire de la perception du public [177] en faisant appel à une approche fondée sur les préférences déclarées et le consentement à participer financièrement (WTP) [219].

Une telle analyse peut aider à révéler si les coûts totaux et les impacts cumulés d'une infrastructure de recherche ou d'un investissement scientifique sont au moins justifiés du point de vue de la perception du public.

L'établissement d'un registre des risques, d'une évaluation des risques et d'une évaluation des risques résiduels est important pour les nouvelles missions scientifiques et les projets et programmes d'infrastructure de recherche. Il convient d'y inclure les domaines économique, social et environnemental, en plus des sujets habituels tels que les questions financières et de gestion de projet. Les chapitres sélectionnés doivent être analysés à l'aide d'une procédure d'évaluation simplifiée comportant une ACB limitée et autonome ou une analyse multicritère (AMC). La présentation de plusieurs variantes et versions du projet et de ses différents segments, avec leurs coûts financiers complets et leurs niveaux de performances économique, sociale et environnementale, est considérée comme une bonne pratique d'évaluation de projet et a été mise en œuvre dans le cadre de la présente étude.

Les résultats de l'analyse intégrée et de l'analyse plus large sur le développement durable sont présentés sous forme de résumé à l'aide des indicateurs de performance clés suivants :

La valeur actuelle nette (VAN) est la somme actualisée de tous les bénéfices futurs moins la somme actualisée de tous les coûts futurs sur l'ensemble de la période d'évaluation. Pour estimer correctement la VAN, il faut disposer d'estimations réalistes des flux de bénéfices et de coûts au cours de la période d'évaluation qui peut raisonnablement porter sur une trentaine d'années. Au-delà de cette période, les estimations socio-économiques quantitatives deviennent difficiles à réaliser. Pour déterminer ces deux flux, il est essentiel de connaître les moments où les différents éléments entrent en jeu. Les coûts d'investissement sont généralement encourus avant la date d'ouverture, tandis que les coûts de fonctionnement (par exemple, le personnel et les ressources pour l'exploitation et la maintenance) et les bénéfices pour l'utilisateur interviennent après l'année d'ouverture. Les bénéfices pour les utilisateurs, les coûts et les recettes d'exploitation peuvent être estimés à partir d'une modélisation sur deux ans ou plus, et le flux de bénéfices peut être calculé par interpolation et extrapolation entre les bénéfices pour les années modélisées ;

Le ratio bénéfices/coûts (BCR) est le rapport entre la somme actualisée de tous les coûts et bénéfices futurs. Le BCR est donc une mesure de la valeur de l'argent, qui indique le bénéfice social net pouvant être obtenu en contrepartie de chaque unité d'investissement. Bien que les valeurs soient monétisées, c'est-à-dire converties en unités monétaires dans cette approche, elles ne représentent pas nécessairement des investissements financiers (par exemple, le coût fictif monétaire du carbone n'est pas une somme d'argent payée. Cette notion représente un coût monétaire pour restaurer les effets liés à l'équivalent quantifié de dioxyde de carbone potentiellement émis). Les formules pour la VAN et le BCR se trouvent dans les manuels d'ACB, dont un bon exemple est celui de Pearce et Nash (1981) ;

Le taux de rendement interne (TRI). Alors que les mesures de VAN et de BCR nécessitent la spécification d'un taux d'actualisation de test, le TRI indique le taux de rendement moyen des coûts d'investissement sur la période d'évaluation. Ce taux peut être comparé au taux d'actualisation de test pour déterminer si le projet génère un rendement supérieur ou inférieur à celui qui est nécessaire pour atteindre le seuil de rentabilité en termes sociaux. Le calcul du TRI et les questions qui s'y rapportent sont abordés dans le chapitre 4 de Pearce et Nash et dans les autres manuels sur le ratio coûts-bénéfices.

4.6. Limites

Les installations d'accélérateurs de particules se caractérisent par un ensemble varié de coûts d'investissement et d'exploitation, de facteurs externes négatifs, de bénéfices et de facteurs externes positifs. Les infrastructures de recherche dédiées à la science fondamentale ne génèrent généralement pas de revenus financiers. Contrairement aux entreprises commerciales, les installations de recherche qui explorent des questions fondamentales sur la nature (comme l'origine de la matière ou la structure de l'univers) ne vendent pas de produits ou de services qui génèrent des revenus. Par conséquent, elles ne peuvent pas générer de bénéfices. Il est donc difficile d'évaluer leurs performances à l'aide de mesures commerciales standard telles que le retour sur investissement, les revenus ou les bénéfices d'exploitation.

Cette situation complique l'évaluation globale des projets et l'appréciation de leur viabilité à long terme si l'on

utilise les mesures financières traditionnelles. En l'absence de rendement financier positif direct par définition, la valeur de ces projets se reflète principalement dans leur impact socio-économique élargi. L'évaluation de ces infrastructures repose donc sur l'identification et, si possible, la quantification des bénéfices sociétaux par rapport aux coûts et aux facteurs externes associés.

La valeur du bien public fait référence à l'importance ou au bénéfice d'un bien public fourni sans profit à tous les membres d'une société. Une infrastructure scientifique telle qu'un collisionneur de particules est un exemple de bien public. L'élucidation de sa valeur telle qu'elle est perçue par le public est un élément complémentaire essentiel pour comprendre si la société considère qu'il vaille la peine d'investir dans une telle activité de recherche scientifique. La valeur totale du bien public dans les pays qui pourraient contribuer financièrement à une future infrastructure de recherche basée sur un collisionneur de particules s'est révélée plus importante que la somme de tous les coûts connus, identifiés et quantifiés. Ce résultat soutient l'intention, au moins d'un point de vue sociétal. L'hypothèse selon laquelle seuls les États membres du CERN contribuent à la mise en œuvre du projet n'est pas un scénario probable. Une infrastructure de l'ampleur du FCC attirera la participation et le financement d'autres pays que ceux de l'espace européen de la recherche, comme ce fut le cas pour le Grand collisionneur de hadrons. Par conséquent, pour estimer la valeur du bien public, une sélection a été faite des pays qui, historiquement, ont participé financièrement aux programmes de recherche internationaux du CERN. Il est possible d'élaborer un scénario extrêmement prudent qui n'inclut que les membres du CERN et les États membres associés. Il convient, cependant, de prendre en considération, a minima, l'ensemble de ces pays.

Comme le recommandent l'OCDE [220,221], le gouvernement français [222], le gouvernement britannique [223], et la Commission européenne [143,224], une évaluation complète de la durabilité devrait prendre en compte tous les éléments susmentionnés, c'est-à-dire les coûts totaux, les bénéfices totaux, les facteurs externes négatifs, l'impact positif et les bénéfices potentiels pour l'environnement. Dans la pratique, tous les éléments contributifs ne sont pas pertinents pour un projet d'investissement spécifique, tous les éléments ne peuvent pas être quantifiés de manière fiable et tous les éléments ne sont pas connus ou compris (Fig. 4.6). Les éléments de coûts et de bénéfices sont tous deux affectés d'incertitudes (Fig. 4.7). Les résultats présentés dans ce chapitre doivent être interprétés dans cette optique. Une analyse d'incertitude permettra éventuellement d'éclaircir les plages d'incertitude. Le guide d'ABC de la CE [108] recommande une approche basée sur la méthode de Monte Carlo. Cependant, cette méthode repose également sur la connaissance des distributions de probabilité des composantes individuelles de coûts et de bénéfices, qui sont à leur tour difficiles à obtenir avec un degré de confiance élevé.

Dans la mesure du possible, le rapport d'étude socio-économique approfondi décrit le champ d'application de l'étude de la manière la plus précise possible et les aspects pris en compte sont décrits avec les hypothèses utilisées pour la quantification des aspects et leur conversion en termes monétaires.

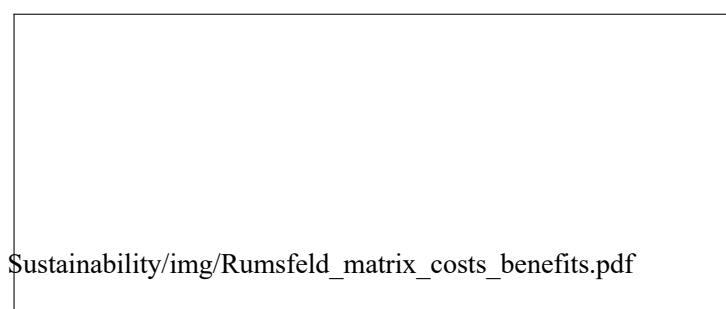


Fig. 4.6 : Matrice de Rumsfeld [225] appliquée à l'identification des coûts et des bénéfices des infrastructures de recherche.

La rationalisation de l'évaluation complète de la durabilité à l'aide d'une analyse standard des coûts et des bénéfices [226] permet d'identifier les aspects limitants et favorisant la durabilité et peut guider la conception et l'évolution itérative de l'infrastructure de recherche afin d'accroître la durabilité à long terme. Dans cette approche, le temps est pris en compte de manière rigoureuse, ce qui est essentiel lorsque l'on considère les effets sur l'environnement dans son ensemble. Alors que les méthodes permettant de quantifier les éléments de coût, y compris les facteurs externes négatifs, sont généralement bien définies dans les lignes directrices existantes, les approches permettant de quantifier et de valoriser les bénéfices et les facteurs externes positifs ne sont pas prises en compte de manière exhaustive dans un catalogue ou une taxonomie de portée générale. Ils sont spécifiques à chaque projet et doivent être identifiés et appréhendés au cas par cas, en faisant appel à différents types de méthodes et de modèles. Cependant, tous les éléments de coût et les facteurs externes négatifs ne sont pas connus à tout moment et, même s'ils le sont, ils ne peuvent pas toujours être quantifiés, valorisés et attribués de manière fiable avec des plages d'incertitude définies. Beaucoup de choses dépendent de l'évolution de l'économie et de la société, comme l'offre et la demande de dépôts de matériaux excavés, l'évaluation des impacts climatiques, l'évolution de l'alimentation en eau et de sa gestion à long terme, et la demande locale et régionale de biens et de services. Une analyse a priori n'est donc valable que dans le contexte actuel, en projetant tous les coûts et bénéfices potentiels futurs dans l'environnement socio-économique d'aujourd'hui, en utilisant les incertitudes actuellement connues. Toutes les hypothèses qui sous-tendent la quantification des coûts et des bénéfices, les modèles utilisés et les méthodes de valorisation doivent être documentés, de même que les résultats d'analyse.

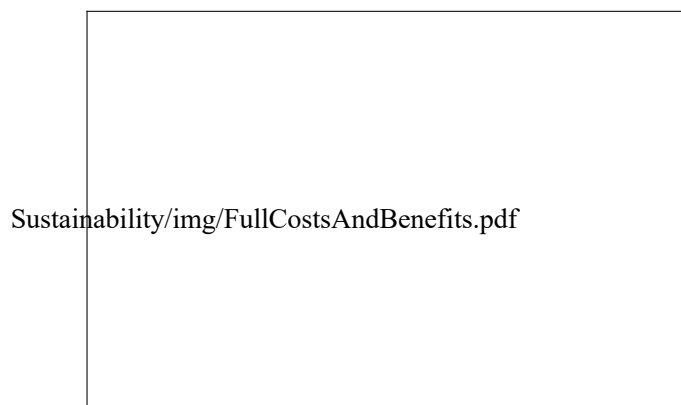


Fig. 4.7 : Exemples de prise en compte de l'ensemble des coûts et des bénéfices dans le cadre d'une analyse intégrée de la durabilité. Seuls les éléments de coûts et de bénéfices identifiés qui peuvent être convertis en termes monétaires ont été pris en compte dans cette évaluation spécifique. La couverture exhaustive de tous les facteurs externes négatifs et positifs est difficile et doit être acceptée dans toutes les évaluations d'impact socio-économique.

La durabilité peut se référer étroitement à la durabilité interne du projet. En réalité, il s'agit plus largement de toute une série de facteurs économiques, sociaux ou environnementaux externes qui peuvent être influencés par le projet. Les 17 objectifs de développement de haut niveau (avec plus de 160 sous-objectifs) parmi les objectifs de développement durable (ODD) des Nations Unies de 2015 (voir Fig. 4.8 illustrent l'ampleur de ces facteurs. L'objectif final est d'identifier et de documenter les impacts positifs et négatifs quantifiés, en considérant les objectifs de développement durable des Nations Unies comme principe directeur pour les différents sujets [227] et en les prenant pour matrice de référence. Étant donné que l'analyse quantitative de la durabilité ne peut pas fournir une couverture complète, les ODD des Nations Unies peuvent être considérés comme un catalogue complémentaire d'impacts négatifs et positifs potentiels qui peuvent être examinés en termes de relation de cause à effet avec le projet. Les indicateurs mondiaux et le cadre de suivi des ODD [228] ont été conçus pour aider les pays, et non les organismes de recherche, à élaborer des stratégies [229]. Ils ne sont donc pas directement utilisables pour les rapports sur les programmes et projets scientifiques. Une infrastructure de recherche peut, toutefois, rendre compte des impacts positifs et négatifs pertinents en termes quantitatifs, dans la mesure où ils ont été évalués pour chaque activité liée aux objectifs des Nations Unies. Cette approche a, par exemple, été mise en œuvre dans le rapport environnemental périodique du CERN, qui

s'appuie sur le cadre des normes GRI [230]. En l'absence de lignes directrices établies, le SDG Tracker [231] et le site d'information de la Commission européenne sur les ODD [232] constituent un bon point de départ pour les recommandations d'indicateurs basées sur la spécification des objectifs ODD de l'ONU. La contribution du FCC aux objectifs de développement durable des Nations Unies n'a pas encore fait l'objet d'un examen approfondi. Il faudra, néanmoins, traiter cet aspect au cours de la phase de conception ultérieure qui comprend la phase d'autorisation du projet.

Une telle analyse qualitative n'est pas censée apporter la preuve du respect d'objectifs nationaux ou internationaux spécifiques. L'objectif est plutôt de montrer comment l'infrastructure de recherche affecte l'environnement de manière négative dans son ensemble et comment elle contribue de manière très tangible à chacun des objectifs.

Le choix du taux d'actualisation social (TAS) influe sur l'intégration des éléments de coûts et de bénéfices. L'utilisation de différents taux de TAS peut servir à effectuer une analyse de sensibilité et à montrer la robustesse de la valeur actuelle nette globale. Pour cette étude, une seule valeur de TAS a été utilisée.

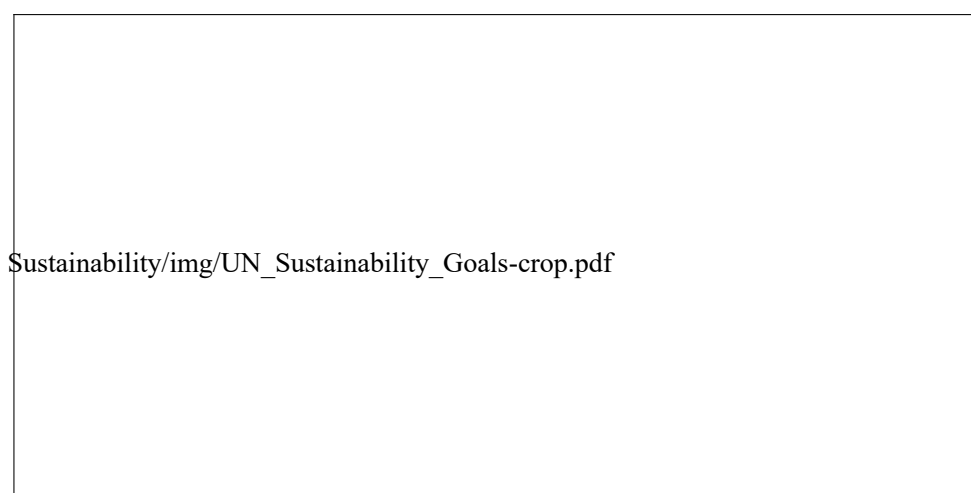


Fig. 4.8 : Les objectifs de développement durable (ODD) des Nations Unies.

4.7. Analyse du cycle de vie

4.7.1. Contexte

La réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) est devenue une priorité absolue à mesure que la lutte contre le changement climatique s'intensifie au niveau mondial. Les infrastructures couvrant les transports, la construction et les instruments scientifiques jouent un rôle essentiel dans cette transition. L'analyse du cycle de vie est un outil essentiel pour analyser les sources d'émissions qui affectent le climat, pour comprendre les causes et pour optimiser le projet en vue d'une meilleure compatibilité environnementale.

Le sujet est vaste et complexe, caractérisé par de nombreuses incertitudes et par le fait que les différents segments du projet ne sont connus que progressivement, au fur et à mesure de l'avancement du développement du concept et de la mise au point. Un projet à long terme comme le futur collisionneur circulaire ne fournit les plans détaillés des infrastructures techniques et des composants de l'accélérateur de particules que peu de temps avant la passation des marchés. Les détecteurs qui constituent les expériences scientifiques ne seront construits et achetés dans le cadre d'un effort de collaboration qu'à un stade beaucoup plus avancé. Pour pouvoir tirer parti des progrès techniques, les plans détaillés ne seront élaborés que lorsque l'équipement du collisionneur de particules sera bien connu, acheté et éventuellement déjà installé.

En plus de cette dépendance temporelle, l'ACV et l'évaluation du bilan carbone qui y est associée dépendent fortement du scénario d'approvisionnement et du scénario des technologies spécifiques. C'est pourquoi l'étude du FCC a pris le parti de se concentrer d'abord sur le segment de projet le mieux connu, à savoir l'empreinte environnementale du génie civil sur la base du concept actuel.

L'étude comprenait également l'estimation de l'empreinte scope 2 pour l'exploitation, c'est-à-dire les émissions de carbone associées à la consommation d'énergie. En outre, une hypothèse spécifique de passation de marché a dû être prise en compte pour cette analyse.

Il faut comprendre que les résultats présentés ici sont susceptibles d'évoluer tout au long des phases du cycle de vie du projet, si la décision de le poursuivre est prise. En particulier, ils ne tiennent pas compte de certains facteurs externes négatifs liés à la construction des accélérateurs de particules, ni d'expériences et d'optimisations rendues possibles par l'utilisation de technologies, de matériaux et de produits plus avancés, par la production locale, un approvisionnement responsable et les résultats des négociations commerciales au cours des processus d'approvisionnement. Par conséquent, un suivi continu des performances socio-économiques, intégrant une éco-conception basée sur un cycle itératif Planifier-Faire-Vérifier-Agir, est important et devra être mis en place avant d'entrer dans une phase préparatoire de projet.

L'analyse réalisée à l'aide des normes européennes d'ACV ISO/EN 14040 et ISO/EN 14044 visait à estimer le bilan carbone de la construction de l'infrastructure au service de deux collisionneurs de particules installés ultérieurement. Cette analyse vise à établir une référence crédible, en s'appuyant sur l'utilisation des déclarations environnementales de produits (EPD) normalisées selon la norme européenne EN 15804+A2 et la norme française FDES, pour les matériaux et les produits disponibles actuellement. Cette approche garantit une évaluation complète conforme à la norme européenne EN 17472, qui établit des exigences et des lignes directrices pour le calcul et la déclaration des émissions de GES associées aux projets d'infrastructure. Les travaux ont également porté sur les recommandations du Cerema pour l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre des projets routiers, sur les bases de données suisses « Conférence de coordination des services de la construction et des immeubles des maîtres d'ouvrage publics » (KBOB) et françaises « La base de données environnementales et sanitaires de référence pour le bâtiment et la RE2020 » (INIES) pour les empreintes écologiques des produits, et la base de données ecoinvent (ecoinvent est une organisation internationale dont la mission est de soutenir les évaluations environnementales de haute qualité et ayant un fondement scientifique) pour les produits et matériaux pour lesquels aucune EPD n'était disponible. Le travail a révélé quelques pistes réalistes pour réduire davantage les conséquences de la construction et a donné quelques recommandations sur les aspects futurs qui devront être pris en compte au cours de la phase de conception ultérieure.

Les résultats sont intégrés dans l'étude d'impact socio-économique plus large en convertissant les résultats de l'ACV en termes monétaires via l'approche recommandée par la BEI et les normes européennes EN 14007 et EN 14008.

4.7.2.Méthodologie

Le travail d'estimation du potentiel de réchauffement dû à l'effet de serre lié à la construction a comporté les étapes suivantes :

1. Identification des composants : établissement d'un inventaire détaillé des matériaux sur la base du devis quantitatif pour la construction souterraine, les 4 sites d'expérience et les sites techniques. Le projet conceptuel actuel a été pris en compte pour cette étape. Les produits choisis sont utilisés tout au long du cycle de vie de l'infrastructure.
2. Acquisition d'EPD : l'obtention d'EPD pour chaque matériau identifié, garantissant la conformité, par rapport à la norme EN 15804+A2, qui constitue la base de la norme EN 17472. Les matériaux sont sélectionnés sur la base d'une connaissance approfondie de l'environnement local et de la disponibilité des produits. Les solutions mises en œuvre sont donc des solutions de pointe.
3. Outil logiciel : sélection d'un outil certifié compatible avec les déclarations environnementales de produits françaises et suisses (One Click LCA®), garantissant des calculs robustes et précis.
4. Saisie des données : importation des données dans l'outil et saisie des données spécifiques au projet, y compris les quantités de matériaux et les phases du cycle de vie, le transport des matériaux excavés et

des matériaux de construction.

5. Calculs : L'outil a été utilisé pour estimer le budget carbone, en s'appuyant sur les données des EPD pour évaluer les émissions de GES pour chaque phase du cycle de vie.
6. Analyse des résultats : analyse des résultats pour identifier les principales sources d'émission, en les comparant à des points de référence et à des objectifs de réduction.
7. Formulation de recommandations : sur la base des résultats et de l'identification des principaux facteurs d'impact, une série de recommandations a été formulée, qui doit être prise en considération dans la phase de conception suivante afin de réduire davantage l'empreinte environnementale de la construction.

Les étapes suivantes ont été suivies pour l'estimation des émissions Scope 2 :

1. Identification de la consommation : estimation de la consommation d'électricité pour la charge de base et pour chaque phase opérationnelle, et établissement d'un calendrier opérationnel ;
2. Hypothèse d'approvisionnement : élaboration d'un scénario crédible pour l'approvisionnement en énergie sur la base d'une consultation d'experts externes, l'accent étant mis sur l'approvisionnement en énergie à partir de sources d'énergie renouvelables ;
3. Quantification : quantification de l'effet climatique associé en utilisant la base de données française accréditée de l'ADEME (l'Agence de la Transition Écologique. Il s'agit d'une agence publique française placée sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires et du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche) ;
4. Formulation de recommandations : sur la base des résultats et de l'identification des principaux facteurs d'impact, une série de recommandations a été formulée, qui doit être prise en considération dans la phase de conception ultérieure afin de réduire davantage l'empreinte environnementale de l'exploitation.

Dans les deux cas, les résultats ont été convertis en termes monétaires en utilisant le prix fictif du carbone établi par la BEI. Les résultats ont été intégrés dans le temps et actualisés à l'aide d'un taux d'actualisation sociale fixé à 2,8 % pour le projet d'évaluation.

4.7.3. Résultats

Phase de construction

L'ACV [60] a donné la répartition des émissions de GES entre les différentes phases du cycle de vie et les différents matériaux. Il faut souligner que les résultats ont été obtenus avec les produits et matériaux les plus avancés et les plus modernes du marché. Les résultats sont donc crédibles et l'empreinte climatique liée au carbone peut encore être réduite grâce à l'intégration de technologies plus avancées dans le projet. Les principales sources d'émissions sont l'acier armé (14 %), le béton préfabriqué (49 %) et le béton (23 %). Les effets climatiques dus à l'utilisation de l'électricité ont été inclus dans cette analyse. On suppose que l'électricité nécessaire à l'ensemble du processus de construction peut être obtenue à partir de sources d'énergie renouvelables via des fournisseurs locaux en France et en Suisse. Les empreintes carbone officielles de la combinaison actuelle d'énergies renouvelables dans les deux pays hôtes ont été utilisées dans l'étude (voir Tableau 3.5). Les résultats obtenus mettent en évidence les possibilités de réduction des émissions via l'établissement des exigences techniques pour l'infrastructure, la prise en compte de la réduction du carbone, la sélection rigoureuse des matériaux qui répondent aux exigences, l'optimisation du processus de construction et grâce à l'amélioration de l'efficacité énergétique. Les impacts sur les GES du scénario initial et du scénario de référence sont présentés dans le Tableau 4.1.

Tableau 4.1 : Résumé du bilan carbone du processus de construction basé sur l'ACV.

Item	Footprint
Subsurface	477 390 tCO ₂ (eq)
4 technical sites	17 546 tCO ₂ (eq)
4 experiment sites	31 735 tCO ₂ (eq)
Total	526 671 tCO₂(eq)

La valeur obtenue correspond approximativement à trois années du budget carbone annuel du CERN [79] ou à un tiers du budget carbone des Jeux olympiques de Paris en 2024 [80].

D'autres indicateurs de performance environnementale obtenus grâce à l'ACV sont présentés dans le Tableau 4.2. Par rapport aux processus de construction classiques, qui ne sont pas bas carbone, l'indicateur le plus pertinent est l'eutrophisation marine, qui peut être liée à l'utilisation d'acier recyclé.

Les résultats permettent également de comparer la construction de structures souterraines avec des structures conventionnelles, comme, par exemple les tunnels routiers, les tunnels de métro et les lignes de tramway. Ces dernières constructions se caractérisent par une empreinte carbone nettement plus élevée en raison des exigences beaucoup plus strictes imposées par l'utilisation publique. À titre de comparaison, la construction de la ligne de métro U5 à Berlin (Allemagne), ligne de métro type à petit gabarit, a une empreinte carbone de 80 000 tCO₂ (eq) par km. L'empreinte d'une ligne de tramway type représente entre 7 600 et 10 850 tonnes de CO₂ (eq) par kilomètre. La partie linéaire des structures souterraines d'un futur collisionneur circulaire a une empreinte carbone d'environ 5 300 tCO₂ (eq) par km (voir Fig. 4.9).

Tableau 4.2 : Résumé d'autres indicateurs de l'ACV.

Indicator	Value
Potential contribution to ozone layer depletion	19.3 kg CFC 11 eq
Potential acidification	929 t SO ₂ eq
Potential eutrophication - fresh water	96 t (PO ₄) ³⁻
Potential eutrophication - marine	12 t N
Potential eutrophication - land	2.1 x 10 ⁶ mol N

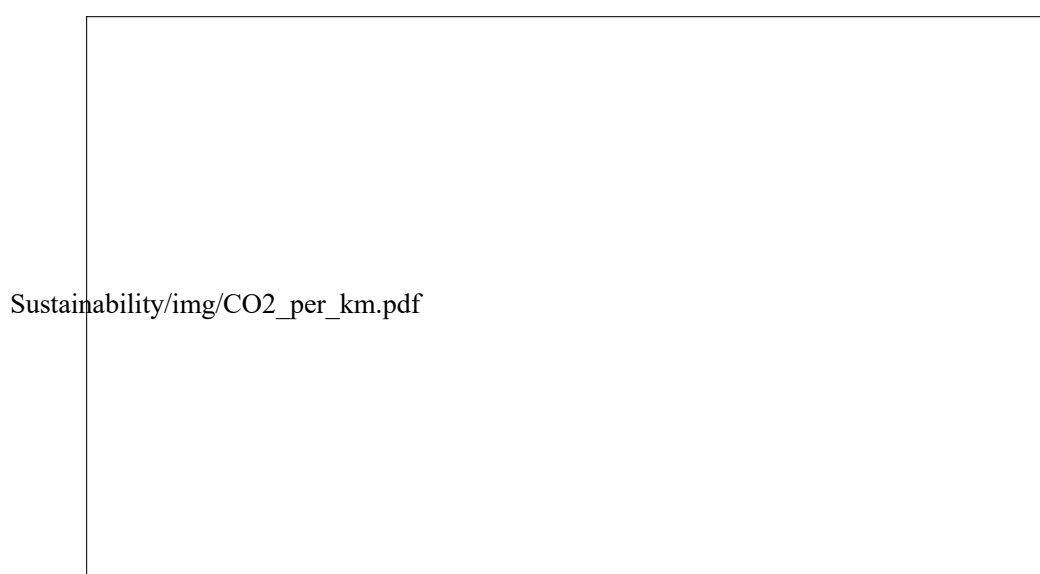


Fig. 4.9 : Comparaison de l'empreinte carbone entre une petite ligne de métro souterrain, une ligne de tramway et le FCC. [60]

Sur la base de ces résultats, les leviers suivants ont été identifiés pour réduire les émissions de GES :

- Documenter les exigences techniques pour les éléments structuraux de surface et souterrains qui correspondent au strict minimum nécessaire pour mener à bien le programme de recherche scientifique ;
- Élaborer une éco-conception qui réponde aux exigences établies en gardant à l'esprit la réduction des émissions de carbone ;
- Apporter des modifications structurales en réduisant l'épaisseur des revêtements intérieurs des structures souterraines de 5 cm, ce qui entraînera une réduction de 16 % de la quantité de béton préfabriqué et d'acier d'armature ;
- Remplacer les matériaux par des matériaux à faible impact dans la mesure du possible, ce qui permet une réduction supplémentaire des émissions de GES ;
- Optimiser le processus de construction pour réduire au maximum les émissions, y compris l'approvisionnement local en matières premières et matériaux recyclés, et la production de matériaux de construction ;
- Des processus de construction et des transports entièrement électrifiés ;
- Réutiliser les matériaux excavés, par exemple dans la production de béton.

Effets sur le climat dus à la consommation d'énergie pendant le fonctionnement

Pour estimer les effets sur le climat liés à la consommation d'énergie (scope 2) pendant la phase d'exploitation, les besoins en électricité ont été estimés pour la charge de base et pour chaque phase d'exploitation (Z, WW, ZH, tt). Pendant la phase d'exploitation, l'énergie nécessaire pour alimenter les infrastructures, les accélérateurs de particules et les expériences proviendra entièrement du réseau électrique français, géré par le gestionnaire du réseau national RTE. Un portefeuille de plusieurs contrats d'électricité et contrats d'achat d'électricité (CAE) facilite la diversification des sources d'électricité et l'approvisionnement auprès de différents opérateurs pouvant fournir des certificats d'origine, ce qui permet d'établir des rapports sur l'empreinte carbone basés sur le marché. Une étude préparatoire réalisée par deux consultants externes indépendants a montré qu'à court terme, avant 2030, 60 % de l'énergie nécessaire pourrait déjà être obtenue à partir de sources d'énergie renouvelables et que dans un délai de 15 ans (vers 2040), un portefeuille permettant de couvrir 80 % des besoins avec des énergies renouvelables pourrait être mis en place. Pour 2050, date à laquelle il est envisagé de faire fonctionner le FCC, on envisage une couverture de 90 % avec un approvisionnement résiduel de 10 % d'énergie nucléaire. Pour l'évaluation des performances socio-économiques, il a été tenu compte d'une utilisation maximale prudente de 80 % d'énergie provenant de sources renouvelables, ce qui entraîne une surestimation de l'empreinte en équivalent carbone. Pour estimer l'intensité carbone du scénario du projet, les valeurs officielles de l'Agence nationale française de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) ont été utilisées, conduisant à un mélange avec une intensité carbone d'environ 15 tCO₂ (eq) par GWh. Pour les calculs de l'évaluation des performances socio-économiques, on a utilisé une intensité de carbone dégressive plus prudente commençant par 26 tCO₂ (eq) par GWh en 2024, 19,10 en 2046 et 18,41 en 2050 en supposant une diminution constante du facteur d'émission de 4 %. Là encore, cette approche conduit à une surestimation de l'empreinte de l'équivalent carbone. Le Tableau 4.3 ci-dessous donne l'indication scope 2 du budget carbone pour chaque phase d'exploitation du collisionneur de particules avec faisceau pour la recherche scientifique et l'empreinte totale pour toutes les phases d'exploitation et d'arrêt pour deux hypothèses différentes d'empreinte carbone conduisant à la fourchette suivante pour l'empreinte carbone prévisible : de 15 tCO₂ (eq) par GWh à 25 tCO₂ (eq) par GWh.

Tableau 4.3 : Résumé de l'empreinte des émissions de carbone Scope 2 liées à l'exploitation, en utilisant deux hypothèses différentes d'intensité de carbone basées sur le marché pour l'électricité achetée. Il convient de noter que l'empreinte carbone intégrale couvre également les émissions Scope 2 pendant les périodes d'arrêt.

Phase	Duration	GWh/year	Footprint all years at 15 tCO₂(eq)/GWh	Footprint all years at 25 tCO₂(eq)/GWh
Z	4 years	1 100	66 000 tCO ₂ (eq)	110 000 tCO ₂ (eq)
WW	2 years	1 300	39 000 tCO ₂ (eq)	65 000 tCO ₂ (eq)
HZ	3 years	1 500	67 500 tCO ₂ (eq)	112 500 tCO ₂ (eq)
tt	5 years	1 770	132 750 tCO ₂ (eq)	221 250 tCO ₂ (eq)
Total		20 350	305 250 tCO₂(eq)	508 750 tCO₂(eq)

L'intégration des exigences en matière de consommation d'énergie au cours des années d'exploitation conduit à un budget carbone intégral qui correspond à environ 2,5 années de l'empreinte carbone annuelle actuelle du CERN. À titre de comparaison, la société Meta, connue pour ses produits Facebook, Instagram et WhatsApp, exploite actuellement au moins trois centres de données aux États-Unis dont la consommation d'électricité est comprise entre 1,2 et 1,4 TWh par an [233]. Leurs émissions Scope 2 individuelles et localisées sont nettement supérieures à 350 000 tCO₂ (eq) par an.

Coût fictif du carbone

La conversion du budget carbone respecte les objectifs globaux de protection du climat et les limites de température qui ont été approuvés par un ensemble de pays lors de la signature de l'Accord de Paris. La Banque européenne d'investissement (BEI) a calculé un « prix fictif du carbone » qui représente les coûts que l'humanité doit associer aux mesures de protection du climat pour atteindre l'objectif convenu. Le prix fictif du carbone augmente au fil des ans, rendant une tonne de CO₂ (ég) de plus en plus chère chaque année pour la société. La valeur actualisée de la conversion monétaire de l'empreinte carbone liée à la construction et à l'exploitation est d'environ 342 millions d'euros. Ce montant est ajouté dans l'évaluation socio-économique intégrée du côté des coûts et sert à estimer la valeur actuelle nette de la future infrastructure de recherche à la fin de son programme d'exploitation scientifique. Le Tableau 4.4 présente le coût fictif du carbone actuellement recommandé pour l'évaluation des projets par la Banque européenne d'investissement (BEI) et sa valeur ajustée dans le temps qui sera utilisée en 2025.

Tableau 4.4 : Coût fictif du carbone en unités monétaires par tonne de CO₂(eq) pour différentes juridictions. Les taux de la première ligne sont également publiés en tant que loi de l'Union européenne 2021/C 280/01. Il convient de noter que le taux d'actualisation de Ramsey de 1,5 % à court terme est appliqué aux taux américains indiqués.

Organisation	Unit	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2060	Source
EIB and EU	Euro 2016	€80	€165	€250	€390	€525	€660	€800	n/a	[234]
EIB and EU	Euro 2024 [†]	n/a	€208	€316	€492	€663	€833	€1010	n/a	
SGPI France	Euro 2018	€87	n/a	€250	n/a	€500	n/a	€775	€1203	[150]
UBA Germany	Euro 2023	€240	n/a	€254	€253	n/a	n/a	€301	n/a	[235]
UK (high)	GBP 2020	£361	£390	£420	£453	£489	£527	£568	n/a	[236]
EPA USA	USD 2020	\$340	n/a	\$380	n/a	\$430	n/a	\$480	\$530	[237]

[†] Adjusted based on EU-27 GDP deflator 100.0 in 2016 and 126.3 in 2023. It measures the amount to which the real value of an economy's total output is reduced by inflation.

4.8. Performances socio-économiques

4.8.1. Contexte

L'objectif de l'analyse complète de l'impact socio-économique, qui inclut un ensemble plus large de composantes telles que les facteurs externes environnementaux, est de mieux comprendre les facteurs de coût et les bénéfices potentiels. Cette approche a été adoptée pour planifier un scénario durable. L'analyse peut également révéler les conditions dans lesquelles les performances socio-économiques globales peuvent être positives, c'est-à-dire peuvent représenter pour la société un investissement durable à long terme. La réalisation d'une telle analyse dès le départ permet au projet d'intégrer les résultats dans la phase de conception ultérieure, lors de laquelle il est plus facile de prévoir les facteurs de durabilité que pendant la construction ou lorsque l'infrastructure est déjà en service.

L'analyse socio-économique repose sur une hypothèse de travail concernant les investissements et les ressources engagés dans le projet par une collaboration internationale. Par conséquent, le travail est basé sur une estimation du coût total du projet effectué en 2024, comprenant tous les coûts d'investissement, les coûts d'exploitation et les facteurs externes négatifs et positifs pertinents pour l'ensemble de la période d'observation. Cette estimation peut différer des estimations du coût du projet réalisé ultérieurement ou présentées ailleurs, car elle représente une situation instantanée des estimations réalisées en juin 2024 et inclut les mobilisations de personnel au niveau mondial, dont le personnel impliqué dans les collaborations internationales, ainsi que les facteurs externes environnementaux négatifs valorisés. Les coûts totaux requis pour l'analyse socio-économique comprennent les coûts d'investissement (dépenses d'investissement et d'exploitation), ainsi que les facteurs externes valorisés tels que les coûts environnementaux et le coût fictif du carbone. Par conséquent, ces chiffres ne doivent pas être utilisés pour déterminer les besoins financiers nécessaires à la mise en œuvre du projet. Ils représentent le coût total des missions scientifiques pour la société pendant toute la période d'observation. Il en va de même pour les bénéfices mentionnés : ces derniers représentent un ensemble d'effets positifs identifiés, quantifiés et valorisés pour la société et ne se limitent pas aux effets économiques directs. Ni les coûts ni les bénéfices ne peuvent être couverts de manière exhaustive

en raison des incertitudes, des ressources disponibles et du temps limité. Toutefois, les résultats présentés ici sont suffisamment complets et détaillés pour établir un ratio coûts-bénéfices stable, qui ne risque pas de diminuer davantage avec l'introduction de coûts supplémentaires mineurs et de facteurs externes négatifs. Les performances socio-économiques nécessitent des mises à jour périodiques au fur et à mesure que le projet est défini de manière plus précise et plus détaillée et à mesure de la disponibilité croissante des modèles et ressources permettant d'estimer les bénéfices supplémentaires.

Un rapport complet sur l'analyse des performances socio-économiques [122] détaille les données, les hypothèses, les méthodologies et les résultats de la première analyse d'impact socio-économique pour la première phase du programme de recherche intégré du FCC : le collisionneur de leptons FCC-ee basé seulement sur deux points d'interaction. L'analyse couvre l'ensemble du cycle de vie du FCC-ee, à savoir sa conception, la construction des structures de surface et souterraines, la création des infrastructures techniques, la construction de l'accélérateur de particules et du détecteur d'expérience, l'exploitation et les phases de mise à niveau progressive de l'énergie des faisceaux. L'ensemble de l'analyse porte sur une durée de 41 ans (de 2024 à 2064), commençant par les dépenses de l'étude de préinvestissement, la décision d'investissement financier et se poursuivant jusqu'à la fin de la phase d'exploitation. L'approche méthodologique est basée sur les lignes directrices réglementaires établies par la Commission européenne (CE) [238], la Banque européenne d'investissement (BEI) [234], les lignes directrices du Forum stratégique européen sur les infrastructures de recherche (ESFRI) [215] et le Secrétariat général pour l'investissement (SGPI) français [150]. Les lignes directrices adoptées sont compatibles avec celles d'autres pays de l'espace européen de la recherche, par exemple le Royaume-Uni [223]. L'étude prend également en compte la littérature la plus récente, les travaux et les résultats de la recherche empirique sur la quantification économique des impacts associés aux infrastructures de recherche.

Lors de l'évaluation du projet FCC-ee, les coûts et les bénéfices sont exprimés par rapport à un scénario dans lequel le projet n'est pas réalisé. Dans ce scénario contrefactuel, le LHC continuerait à fonctionner jusqu'à sa fin de vie prévue vers 2040 et aucun nouveau collisionneur de particules ne serait construit. Le CERN continuerait à exploiter les accélérateurs de particules existants (par exemple, AD, ELENA, LINAC4, PS) et les infrastructures expérimentales qui leur sont liées. Elle est basée sur les méthodes de l'analyse des coûts et des bénéfices (ACB) standard. Tous les coûts et bénéfices sont incrémentaux, c'est-à-dire qu'ils sont exprimés sous la forme d'une différence entre les coûts et bénéfices de l'exploitation de l'infrastructure existante après la fermeture du LHC et les coûts et bénéfices que le FCC-ee induirait. Par conséquent, l'approche considère le changement net, en se concentrant sur les effets en relation de causalité qui peuvent être attribués de manière fiable au projet FCC-ee.

Cette analyse des coûts et des bénéfices sociaux est fondée sur l'hypothèse d'un projet FCC-ee comportant quatre expériences, impliquant collectivement environ 260 000 années-personnes sur la durée de vie du projet. La mobilisation des personnes devrait atteindre un maximum d'environ 15 500 personnes pendant la phase d'exploitation (Fig. 4.10). Ce groupe diversifié comprend des scientifiques, des ingénieurs, des techniciens, du personnel administratif, des chercheurs en thèse et post-doctoraux, des étudiants de premier cycle, des étudiants en master et des apprentis. Sur l'ensemble des participants, environ 11 % sont supposés travailler sur les accélérateurs de particules et les infrastructures techniques, tandis que les 89 % restants s'occuperont des détecteurs et de physique expérimentale.

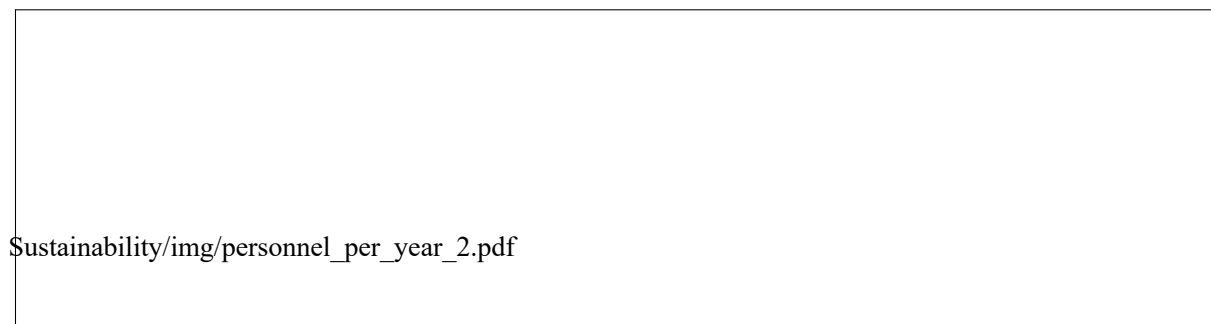


Fig. 4.10 : Nombre de personnes mobilisées dans le projet au fil des années et pendant toutes les phases du projet.

4.8.2. Résultats

L'évaluation initiale de l'impact socio-économique basée sur deux collaborations aux expériences, limitée aux coûts d'investissement, aux coûts d'exploitation et aux principales voies de bénéfices, a donné une valeur actuelle nette positive à la fin de la phase d'exploitation du FCC-ee [122]. L'évaluation complémentaire ultérieure réalisée en 2024 [239] a utilisé un calcul encore plus prudent basé sur une mise à jour de la configuration du projet. Elle n'a pris en compte qu'un ensemble réduit de voies de bénéfices bien justifiables et a étendu l'analyse à des effets plus larges et à des facteurs externes environnementaux négatifs :

- Coûts d'investissement et de fonctionnement révisés, reflétant l'évolution des prix des biens et services entre 2018 et 2024 ;
- Quatre collaborations aux expériences (au lieu des deux prévues dans l'évaluation initiale) ;
- Taux d'actualisation sociale révisé (2,8 %) ;
- Introduction de facteurs externes négatifs notables pour l'environnement ;
- Révision de la valorisation de la principale voie de bénéfices en tenant compte des données supplémentaires rassemblées ;
- Limitation stricte des bénéfices aux principales voies de bénéfices.

Tableau 4.5 : Évaluation des coûts et bénéfices sociaux du projet FCC-ee exprimés sous forme d'un bénéfice supplémentaire par rapport à un scénario contrefactuel dans lequel aucun projet de collisionneur n'est mis en œuvre après la fin de l'exploitation du HL-LHC. Les résultats de l'analyse socio-économique « élargie » comprennent des facteurs externes négatifs et des bénéfices environnementaux notables.

Cost/Benefit	Undiscounted	Discounted
(A) Costs		19 666 MCHF
Investment costs (for 4 experiments, injector and $t\bar{t}$ stage)	16 215 MCHF	10 171 MCHF
Personnel costs	16 802 MCHF	7544 MCHF
Operation costs (materials, consumables, services)	4410 MCHF	1879 MCHF
Dismantling costs	228 MCHF	72 MCHF
(B) Negative externalities		354 MCHF
Shadow cost of carbon	634 MCHF	342 MCHF
Loss of agricultural income, biodiversity & habitat	7.6 MCHF	4.1 MCHF
Social cost of project-related, induced noise	0.02 MCHF	0.02 MCHF
Social cost of project-related, traffic-induced air pollution	0.9 MCHF	0.6 MCHF
Social cost of project-related, traffic-induced GHG externalities	9.8 MCHF	7 MCHF
Social cost of ionising radiation	1.3 MCHF	0.6 MCHF
(C) Core benefits		23 974 MCHF
Scientific production	6507 MCHF	2813 MCHF
Early career researcher training	20 687 MCHF	4986 MCHF
Industrial benefits for suppliers	17 577 MCHF	9569 MCHF
Onsite visitors	4538 MCHF	2129 MCHF
Online and social media	229 MCHF	102 MCHF
Open software (experiments and detectors)	7428 MCHF	4375 MCHF
Total costs including negative externalities	(A + B)	20 020 MCHF
Total core benefits	(C)	23 974 MCHF
Reference net present value (NPV)	(C) - (A + B)	3954 MCHF
Reference Benefit Cost Ratio (BCR)		1.20

Tableau 4.6 : Potentiels de bénéfices supplémentaires non pris en compte dans le calcul de la valeur actuelle nette de référence et du ratio coûts-bénéfices.

Cost/Benefit	Undiscounted	Discounted
(D) Residual asset value for a subsequent collider project	- 7911 MCHF	- 2480 MCHF
(E) Wider benefit potentials		6916 MCHF
Open information platform	5053 MCHF	2681 MCHF
Open collaborative software	7516 MCHF	3487 MCHF
ICT spin-offs	832 MCHF	409 MCHF
Creation of renewable energy sources through contracts	227 MCHF	117 MCHF
Supply of waste heat	313 MCHF	132 MCHF
Avoided greenhouse gas emissions (GHG) by supply of waste heat	170 MCHF	74 MCHF
Rewilding (habitats and biodiversity)	0.4 MCHF	0.2 MCHF
Contributions to regional emergency services	31 MCHF	16 MCHF
Net present value including residual asset value	(C) - (A + B + D)	6 446 MCHF
Total core and wider benefit potentials	(C+E)	30 890 MCHF

Le Tableau 4.5 présente les résultats les plus sûrs et les plus stables de cette évaluation des coûts et bénéfices sociaux additionnels, en montrant les principales voies de coûts et de bénéfices. Un ensemble de voies de bénéfices plus larges est susceptible d'être obtenu, à condition que la planification et la mise en œuvre spécifiques soient intégrées aux phases de conception de projet et que les conditions contextuelles appropriées soient en place (voir Tableau 4.6). Pour agréger la valeur des bénéfices mesurés et les comparer aux coûts et aux facteurs externes négatifs, un taux d'actualisation social (TAS) a été établi spécifiquement pour le projet. Au lieu de s'appuyer sur les TAS existants proposés par les organisations internationales, ce taux spécifique au projet tient compte du niveau de développement et des préférences en matière de consommation et d'investissement des pays contribuant au budget du CERN, ainsi que de la très longue durée du projet. La valeur de TAS considérée par hypothèse est de 2,8 %. Le résultat, strictement limité aux coûts, aux facteurs externes négatifs notables et aux principaux bénéfices, présente une valeur actuelle nette positive d'environ 4 milliards de francs suisses pour le projet, ce qui conduit à un ratio bénéfices/coûts (BCR) d'environ 1,20. Cette valeur ne doit pas être interprétée comme un nombre fixe et certain. Un BCR positif dans le cadre d'hypothèses très prudentes permet d'avoir confiance dans le fait que le scénario du projet pourra apporter une contribution globalement bénéfique à la société. En fonction de la conception du projet et des mesures de mise en œuvre visant à favoriser la génération de bénéfices et à contrôler les coûts et les facteurs externes, le BCR peut être inférieur ou supérieur. Un suivi continu de l'impact généré tout au long des phases ultérieures du projet et un contrôle pendant la mise en œuvre et l'exploitation du projet sont nécessaires pour garantir une performance globale positive.

Les résultats des études menées sur une période d'environ sept ans suggèrent une performance socio-économique nette positive du projet FCC-ee. Ce résultat permet de démontrer la durabilité sociale à long terme de la nouvelle infrastructure de recherche scientifique proposée. L'analyse effectuée jusqu'à présent a permis d'identifier les principales voies d'impact, dans le but de soutenir la conception de l'infrastructure de recherche afin de générer un impact socio-économique durable. Les résultats présentés ici ne sont cependant pas exhaustifs. En ce qui concerne les coûts, les estimations sont susceptibles d'évoluer au cours de la phase de conception jusqu'à ce qu'une décision d'investissement soit prise à titre provisoire et sujette à des mises à jour. L'approche adoptée, consistant à intégrer l'analyse des impacts sur l'environnement, l'économie et la société dans son ensemble, est conforme à la pratique de l'UE en matière d'évaluation des impacts sur la politique et les infrastructures. Une analyse socio-économique complémentaire, avec davantage de temps et de ressources, permettrait de découvrir et de quantifier d'autres impacts positifs et de renforcer la solidité des bénéfices déjà estimés. Études de Flyvbjerg et al. [240–242] soulignent une tendance commune à la sous-estimation des coûts, à la surestimation des revenus et à la mauvaise évaluation des impacts

environnementaux et économiques, ainsi qu'à l'introduction involontaire de biais. La littérature soutient donc la réalisation d'une analyse d'incertitude, en particulier pour les projets d'infrastructure d'envergure. Pour y parvenir, le cadre déterministe existant de l'ACB peut être complété par un modèle probabiliste, couvrant les coûts et les bénéfices. Cette approche permettra d'avoir une vision plus complète des résultats prévisibles du projet.

4.8.3. Couverture des coûts et des bénéfices

L'évaluation socio-économique présentée a permis de bien couvrir les principales voies de coûts et de bénéfices, bien que la couverture exhaustive d'une vaste infrastructure de recherche soit limitée par les connaissances sur les voies d'impact, les modèles permettant de les quantifier, le temps, le personnel et le budget. L'évaluation réalisée comprend la totalité des coûts d'investissement nécessaires aux structures de génie civil, les injecteurs, le booster, le collisionneur jusqu'au stade tt et 4 détecteurs d'expérience. L'ensemble des frais de personnel comprenant le personnel rémunéré par le CERN et le personnel fourni par les collaborations internationales au programme a été pris en compte. Les coûts complets des matériaux, de la maintenance, des consommables et des services pour la phase d'exploitation ont été inclus dans les coûts. Enfin, les coûts de démantèlement du booster de l'anneau principal et du collisionneur ont également été inclus. Ce poste de coûts ne comprend pas l'élimination des équipements qui seront classés comme déchets radioactifs. Une telle estimation ne pourra être réalisée qu'une fois que les études techniques auront été achevées. Il n'est pas non plus tenu compte de la valeur marchande résiduelle des métaux, qui entraînerait une plus-value après démantèlement.

L'établissement d'une valeur résiduelle appropriée pour un investissement proposé est un élément clé pour l'analyse de la viabilité financière d'un tel projet. Selon le Guide méthodologique pour la réalisation de l'Analyse Coûts-Avantages des projets d'investissement de la Commission européenne, la valeur actualisée de tout revenu net futur après l'horizon temporel du projet doit être incluse dans la valeur résiduelle. Le guide indique qu'il « s'agit de la valeur actuelle à l'année n des revenus, nets des coûts d'exploitation, que le projet pourra générer grâce au potentiel de service restant des actifs immobilisés dont la durée de vie économique n'est pas encore complètement épuisée ». Conformément à cette ligne directrice de la CE (p. 45, [224]) que les économistes praticiens utilisent, la valeur résiduelle est mise en évidence en tant que valeur avec un signe négatif dans le décompte des coûts. S'il existe une « valeur d'usage » pour les actifs, la valeur résiduelle est supérieure à zéro. Dans le cas contraire, la valeur résiduelle est considérée comme nulle. Les deux scénarios ont été pris en compte dans l'analyse. Étant donné que l'infrastructure proposée peut desservir successivement deux collisionneurs de particules, la valeur résiduelle des actifs est prise en compte dans cette évaluation. En raison de la très longue durée du programme intégré, cette évaluation des coûts et des bénéfices sociaux ne concerne, cependant, que la première phase, celle du collisionneur de leptons FCC-ee. Une valeur d'actif résiduelle est calculée à la fin de la phase d'exploitation du FCC-ee et peut être mise à la disposition d'un éventuel projet ultérieur de collisionneur de hadrons (FCC-hh) à titre de « cadeau ». La valeur d'actif résiduelle devient nulle si aucun collisionneur de particules n'est installé ultérieurement pour tirer profit des actifs accumulés. Cette approche a également été adoptée pour l'évaluation des coûts et bénéfices sociaux du Grand collisionneur de hadrons [193]. Le calcul de la valeur actuelle nette (VAN) de référence pour le projet de collisionneur de leptons FCC-ee est effectué de manière très prudente : il n'inclut pas la valeur d'actif résiduelle à la fin de la période d'observation. Afin de montrer que d'autres impacts sociétaux sont possibles et qu'un programme intégré comprenant un collisionneur de leptons (FCC-ee) suivi d'un collisionneur de hadrons (FCC-hh) est préférable, ce bénéfice peut être inclus dans une VAN plus large.

La matérialisation des facteurs externes négatifs et des bénéfices dépend largement de la conception d'un cadre de création d'impact et des conditions externes.

Les facteurs externes négatifs tels que l'empreinte carbone et le coût fictif associé du carbone dépendent des mesures d'approvisionnement prises pour la construction, des accords d'achat d'électricité conclus pour la construction et l'exploitation, ainsi que de la tarification nationale du carbone au moment de la génération de l'empreinte carbone. Le coût fictif du carbone indiqué tient compte de la construction et de l'exploitation de l'infrastructure de recherche. Les coûts des accélérateurs et des détecteurs n'ont pas pu être inclus pour le moment, car ils dépendent de la disponibilité d'une conception technique et d'un scénario de passation de marché.

Les effets des perturbations potentielles telles que le bruit et le trafic liés à la construction dépendent de manière significative du nombre réel de personnes affectées. Par ailleurs, certains impacts sont difficiles à prévoir à ce stade précoce en raison d'un manque de modèles prédictifs pour certaines voies de bénéfices, parce qu'ils n'ont pas pu être identifiés, par manque de temps et de ressources ou simplement en raison de grandes incertitudes. Parmi les exemples, on peut citer les facteurs externes positifs élargis qui peuvent découler du développement de nouveaux produits et processus de réutilisation des matériaux excavés, de l'avancement des technologies pour les matériaux de construction à faible teneur en carbone, de la création de synergies locales avec les municipalités qui accueillent les sites de surface, de la création imprévue de retombées technologiques de grande valeur et de l'invention de technologies tout à fait nouvelles.

L'analyse s'est concentrée sur les bénéfices directs actuellement connus et prévisibles sur la base d'éléments factuels antérieurs, par exemple dans le cadre du projet LHC et du projet européen XFEL. Elle a été conclue dès qu'un niveau de confiance élevé a été atteint dans la démonstration d'un seuil de rentabilité entre les bénéfices et les coûts totaux, y compris les facteurs externes négatifs notables. Des hypothèses prudentes ont été retenues pour toutes les estimations. Lorsqu'une relation de cause à effet entre les effets positifs ou négatifs et le projet n'a pas pu être établie de manière fiable, l'élément a été entièrement omis. En ce qui concerne les éléments de coûts et de bénéfices pour lesquels des engagements restent à formuler (par exemple, le développement de plateformes logicielles ouvertes dédiées pour soutenir la diffusion des connaissances et la collaboration internationale, la conclusion de contrats ou de CAE portant sur des énergies renouvelables, la fourniture de chaleur fatale, les projets visant à recréer et à renforcer les habitats perdus, les contributions au fonctionnement des services d'urgence régionaux), les éléments ont été étiquetés afin d'être considérés comme ayant un impact sociétal « plus large ». Ils ont été inclus uniquement dans le calcul d'une valeur actuelle nette plus large.

Les retombées économiques des visiteurs dépendent de l'existence d'un programme de visite, de points de visite dédiés, d'infrastructures et de guides. Les bénéfices signalés pour les visiteurs sur place viennent en addition par rapport au scénario contrefactuel dans lequel aucun projet de futur collisionneur de particules n'est mis en œuvre. Cela signifie qu'il est tenu compte des bénéfices probables en plus des effets générés par les visiteurs qui viennent au CERN après la fin du programme HL-LHC. Ce scénario contrefactuel devrait avoir moins d'impact, puisque le CERN sans nouveau projet phare à l'échelle mondiale est supposé être moins attrayant pour les visiteurs, comme le révèlent les récentes enquêtes menées auprès des visiteurs du CERN au cours du premier trimestre 2025. Certains bénéfices sont intangibles par nature, tels que les progrès de la connaissance scientifique, les impacts liés à la diplomatie scientifique, les considérations éthiques et la confiance dans la science. Bien que les bénéfices créés par les logiciels ouverts et les plateformes collaboratives aient un potentiel de valeur significatif, il est difficile d'estimer quels sont les bénéfices dont profitera la société, quand et de quelle manière, en l'absence d'un programme de création et de transfert d'innovation dédié à ces technologies.

Plusieurs autres bénéfices élargis ont été envisagés, mais n'ont pas été approfondis à ce stade en raison des contraintes de ressources et de temps liées à la clarification sans ambiguïté de la demande. Il s'agit par exemple du renforcement des réseaux électriques et de communication locaux et régionaux, de la création de mobilité douce, de la contribution à l'amélioration des transports publics, de la création de logements et d'infrastructures scolaires, du développement des entreprises et des services locaux. Cependant, l'étude a également porté sur le développement d'un cadre pour commencer à élucider les demandes de potentiels de bénéfices plus larges avec les municipalités dans le périmètre du projet. L'analyse socio-économique en cours et à venir permettra de mieux cerner ces opportunités, une fois que les demandes seront mieux comprises.

4.8.4. Coût et facteurs externes négatifs

Pour les calculs coûts-bénéfices, le FCC a été considéré comme un projet de conception à coût objectif, avec un investissement total comprenant 4 expériences et l'étape tt, estimé à environ 16,2 milliards de francs suisses (non actualisés) avec une marge d'incertitude de -5 % à +20 %. Ce chiffre englobe les études, les activités préparatoires, les travaux de conception, les travaux de génie civil, la création d'infrastructures techniques, tous les accélérateurs de particules (injecteurs, booster et collisionneur) et tous les coûts d'investissement liés aux quatre détecteurs d'expérience.

Les coûts de personnel comprennent toutes les ressources humaines impliquées dans le projet pendant toutes les phases du cycle de vie, quelle que soit l'organisation qui les emploie. Le total des frais de personnel se compose des salaires, des coûts indirects et des coûts liés à l'employeur sans les frais généraux. Il s'agit de moyennes pour différentes catégories de personnel dans les différents pays participant au projet. Au total, les frais de personnel représentent environ 16,8 milliards de francs suisses (non actualisés) et 7,5 milliards de francs suisses (actualisés).

Les coûts de fonctionnement correspondent à toutes les dépenses (tant en nature qu'en dépenses de trésorerie) nécessaires au fonctionnement, à la maintenance et à la réparation de l'infrastructure de recherche pendant toute la durée de l'exploitation scientifique (par exemple, l'électricité, l'eau, les pièces détachées et les ressources humaines pour la maintenance et les réparations). Le scénario probable pour les coûts opérationnels s'élève à un total de 4,4 milliards de francs suisses non actualisés, avec une plage d'incertitude due aux coûts incertains de certaines ressources (par exemple, l'électricité et l'eau), des fournitures et des contrats de service. Les coûts actualisés s'élèvent à environ 1,9 milliard de francs suisses. Cela correspond à un coût annuel moyen non actualisé d'environ 250 millions de francs suisses et d'environ 105 millions de francs suisses actualisés sur la durée d'exploitation qui s'étend de la mise en service à la fin de l'exploitation.

Les chiffres des coûts utilisés pour cette analyse, ainsi que le nombre prévu d'utilisateurs du projet, doivent être considérés comme une hypothèse de travail qui sert à estimer la performance socio-économique qui aide à identifier les principales voies d'impact. Cela permet également de comprendre quels sont les bénéfices potentiels qui peuvent encore être développés. Ces coûts sont formulés sur la base de la compréhension du projet au moment de l'analyse et devraient faire l'objet de révisions et d'affinements au fur et à mesure de l'avancement de la conception.

Les estimations des postes de coûts suivants, couvrant la période allant de la décision d'investissement à la fin de la phase d'exploitation du FCC-ee, ont été incluses dans l'analyse présentée :

- Dépenses d'investissement pour le génie civil, les infrastructures techniques, tous les accélérateurs de particules (injecteur, booster, collisionneur), y compris la mise à niveau pour l'exploitation et quatre expériences ;
- Coût de l'acquisition de tous les terrains pour les sites de surface, les accès et la mise en valeur de la nature autour des sites ;
- Coût de la création ou de la remise en état d'une route d'accès ;
- Création des infrastructures hors site nécessaires à la construction et à l'exploitation (par exemple, accès, approvisionnement en eau, traitement de l'eau, raccordements électriques locaux) ;
- Estimation complète des frais de personnel (CERN et collaboration internationale) nécessaires pour les phases de conception, de construction et d'exploitation couvrant les accélérateurs de particules, les infrastructures techniques et les expériences ;
- Coûts d'exploitation types (consommables, eau et énergie, maintenance, réparation) ;
- Coût du démantèlement du collisionneur de leptons et de ses infrastructures techniques spécifiques qui ne peuvent pas être réutilisées pour un collisionneur de hadrons ultérieur ;
- Valeur résiduelle négative des infrastructures pour un projet ultérieur de collisionneur de particules.

En plus des éléments mentionnés jusqu'à présent, une partie des investissements, impliquant des actifs réutilisables et durables tels que les systèmes de radiofréquence supraconducteurs, les infrastructures électriques, les structures de génie civil et les infrastructures techniques de base, sera utilisée pour un projet ultérieur de collisionneur de particules. Conformément aux lignes directrices de la CE sur l'analyse des coûts-bénéfices (p. 45, [224]), cette valeur résiduelle est présentée comme une valeur actualisée avec un signe moins dans la partie « coûts ». La valeur résiduelle des actifs de la phase initiale est importante et contribue à la durabilité du programme intégré du FCC. La valeur actualisée estimée s'élève à environ 2,5 milliards de francs suisses, ce qui équivaut à 24 % de l'investissement total.

Les estimations des facteurs externes négatifs suivants ont été inclus dans l'analyse présentée :

- Coût de la gestion des matériaux excavés en tant que partie du coût d'investissement ;
- Coût fictif du carbone pour le génie civil et l'énergie utilisée pour le fonctionnement ;
- Coût des mesures de renaturation à proximité des sites de surface (par exemple, préservation et amélioration des zones humides, création d'arbres pour compenser le déboisement et création de prairies et de pâturages) dans le cadre du coût d'investissement ;
- Perte économique (directe, indirecte en amont et induite en aval) causée par la consommation de terres agricoles pendant une période de 30 ans ;
- Valeur économique des forêts défrichées ;
- Valeur économique de la perte d'habitat et de biodiversité ;
- Coût sociétal du bruit lié à la construction et à l'exploitation ;
- Coût sociétal de l'augmentation du trafic et de la pollution de l'air induite par le transport des matériaux excavés ;
- Coût sociétal des rayonnements ionisants supplémentaires ;
- Coût sociétal des déchets radioactifs en tant que partie du coût d'exploitation.

4.8.5. Voies d'impact

Les voies d'impact suivantes ont été incluses dans l'analyse, soit en tant qu'éléments centraux, soit en tant que bénéfices potentiels plus larges :

- Valeur de la production de contenu scientifique ;
- Valorisation professionnelle des scientifiques et ingénieurs en début de carrière ;
- Valeur du tourisme sur place ;
- Valeur de la présence en ligne et des activités sur les réseaux sociaux ;
- Valeur des retombées industrielles liées à la construction d'infrastructures, d'accélérateurs et d'expériences.
- Valeur marchande des entreprises dérivées des TIC sur la base de la fréquence de création d'entreprises dérivées passées et présentes au CERN ;
- Valeur sociétale des produits logiciels ouverts ;
- Valeur marchande de la chaleur fatale fournie et valeur sociétale des émissions de carbone évitées ;
- Valeur marchande des sources d'énergie renouvelable supplémentaires créées à la suite d'accords d'achat d'électricité à long terme ;
- Valeur marchande des eaux usées traitées ;
- Valeur sociétale des zones humides, prairies, pâturages et forêts amendés et recréés ; – Valeur économique des espaces agricoles compensés ;
- Valeur sociétale des services régionaux d'urgence et de lutte contre l'incendie nécessaires à la nouvelle infrastructure de recherche.

Les voies d'impact suivantes sont considérées comme très fiables et constituent donc un ensemble de bénéfices fondamentaux sur lesquels la valeur actuelle nette prudente se fonde :

1. Valeur des publications scientifiques produites et citées ;
2. Prime salariale à vie des chercheurs et ingénieurs en début de carrière âgés de moins de trente ans ;
3. Valeur incrémentale pour les fournisseurs en raison des contrats récurrents qui résultent de leur activité dans le projet ;
4. Valeur des visiteurs sur place basée sur la méthode des coûts de déplacement et les dépenses locales ;
5. Valeur du temps de loisir des personnes qui consomment des contenus liés au projet, en ligne et sur les réseaux sociaux ;
6. Valeur estimée des logiciels ouverts développés dans le domaine des détecteurs de particules et des expériences, utilisés par d'autres instituts scientifiques et secteurs industriels.

La première voie d'impact évaluée est la valeur dérivée de la production de contenu scientifique. Elle découle du flux de connaissances généré par les scientifiques et les ingénieurs engagés dans le collisionneur et ses expériences, ce qui se traduit par diverses productions scientifiques, allant d'articles de revues et de documents de travail, en passant par des comptes rendus de conférences et des présentations. Ces produits peuvent avoir un impact durable, au-delà de la communauté de la physique des particules et des hautes énergies, en influençant éventuellement d'autres domaines de connaissance et en relevant des défis sociétaux plus vastes. Des techniques scientométriques ont été utilisées pour estimer la production scientifique et sa propagation à partir du projet FCC-ee. La méthodologie a consisté à analyser les tendances historiques observées dans des programmes de recherche en physique comparables tels que le Tevatron, le LEP et le LHC. Les concepts économiques de coût d'opportunité et de valeur du temps ont été utilisés pour déterminer la valeur sociale des productions scientifiques. Cette approche considère le temps consacré par les personnes, en fonction de leur implication et de leurs responsabilités, à une collaboration expérimentale pour produire ces résultats et valorise ce temps sur la base de leur salaire horaire moyen. Cette méthode a été appliquée pour estimer la valeur sociale des productions scientifiques produites par les chercheurs directement impliqués dans le programme de recherche (productions dites « de niveau 0 »), celles qui font référence aux connaissances initiales de niveau 0 (productions dites « de niveau 1 »), et les productions qui font référence aux résultats de niveau 1 (productions dites « de niveau 2 »). Entre 34 000 et 38 000 productions scientifiques devraient être réalisées directement dans le cadre du projet FCC-ee (publications de niveau 0), et 538 000 à 618 000 productions de niveau 1 et 2 supplémentaires devraient être générées sur la base de ce corpus jusqu'en 2083 (voir Fig. 4.11).

Sustainability/img/distribution-scientific-products-2.pdf

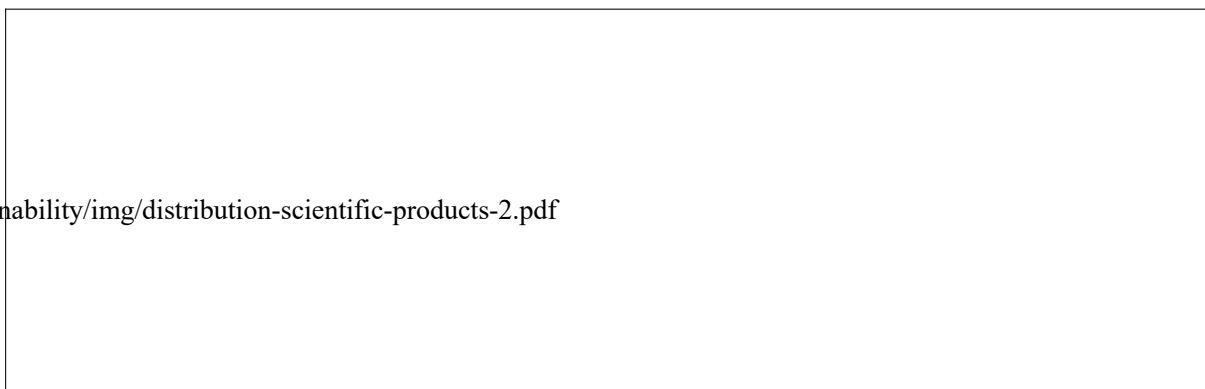


Fig. 4.11 : Distribution attendue des productions scientifiques du FCC-ee au fil du temps.

Si l'on considère qu'environ 55 % du temps passé par les chercheurs est consacré aux activités de recherche scientifique et à la production de résultats scientifiques, mais que seuls 22 % environ peuvent être attribués à des produits scientifiques spécifiques au FCC-ee, le bénéfice estimé de la production scientifique est d'environ

6,51 milliards de francs suisses sans actualisation et d'environ 2,8 milliards de francs suisses avec actualisation. Cette évaluation tient compte de la valeur décroissante des produits de niveaux 1 et 2, par rapport aux produits de niveau 0, étant donné que la connaissance se propage à travers les vagues de production ultérieures et que l'apport initial du FCC-ee diminue progressivement.

La deuxième voie d'impact étudiée est la valeur de la formation à la recherche et à l'ingénierie en début de carrière, qui reflète le rôle du projet dans la transmission des connaissances, l'encouragement au développement des compétences et la création de capacités pour les personnes engagées activement dans le programme de recherche tout au long de son cycle de vie. Cette valeur découle du fait que les personnes qui ont participé au CERN à des projets scientifiques et de haute technologie multisectorielle à grande échelle représentent une valeur plus élevée pour leurs employeurs éventuels que les personnes qui n'ont pas bénéficié d'une telle expérience de formation. Cela se traduit par des salaires de départ plus élevés et une croissance plus rapide des salaires. L'effet persiste jusqu'à ce que les personnes prennent leur retraite et conduit à une valeur ajoutée globale par rapport à leurs pairs qui n'ont pas vécu cette expérience. L'analyse a spécifiquement évalué les bénéfices accumulés par les étudiants des filières techniques, les doctorants, les chercheurs postdoctoraux et le personnel scientifique et technique associé, jusqu'à un âge limite de 30 ans. L'analyse n'a pas pris en compte la valeur de la formation des apprentis et d'autres personnels hautement qualifiés ayant des contrats à durée limitée, de la main-d'œuvre temporaire et des travailleurs sous contrat. Le bénéfice a été quantifié en estimant les améliorations en termes d'évolution de carrière tout au long de la vie pour les participants qui entrent sur le marché du travail, après avoir acquis une expérience professionnelle dans le cadre du programme de recherche. Des études antérieures, validées par une enquête menée auprès d'environ 2 600 personnes, indiquent que l'avantage salarial à vie pour un chercheur en début de carrière travaillant sur le FCC-ee varie d'un minimum de 2 % à 10 % pour la période moyenne de séjour dans l'infrastructure de recherche (3,78 années) (voir Fig. 4.12). Le bénéfice socio-économique total non actualisé est évalué à environ 20,7 milliards de francs suisses et la valeur actualisée à environ 5,0 milliards de francs suisses.

La troisième voie d'impact explore les bénéfices générés par le projet pour les fournisseurs industriels engagés dans la construction de l'infrastructure, des accélérateurs de particules et des détecteurs. Le bénéfice provient de l'augmentation des performances financières des fournisseurs quelques années après qu'ils ont reçu des contrats dans le cadre du projet. Le fait d'être un fournisseur dans un projet d'envergure, en particulier dans des domaines caractérisés par des conceptions, des développements et des adaptations spécifiques au projet de produits et de services disponibles sur le marché, est lié à l'acquisition d'expérience,

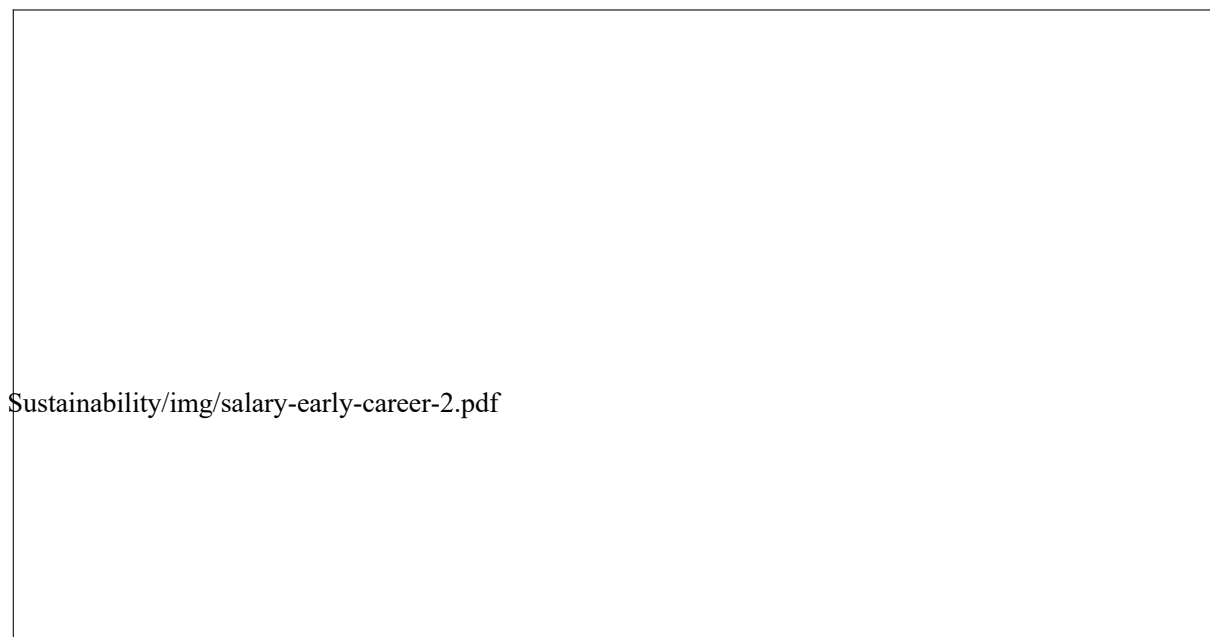


Fig. 4.12 : Salaire à vie des chercheurs en début de carrière par secteur d'emploi.

à l'augmentation de l'efficacité et à un accès élargi au marché. En fait, l'impact découle d'un gain de connaissances acquis grâce à une collaboration étroite avec l'infrastructure de recherche. Ces connaissances contribuent à leur tour à la création et à l'amélioration de nouveaux processus, produits et services que les fournisseurs peuvent exploiter sur d'autres marchés et dans d'autres domaines. Il en résulte des contrats supplémentaires que le fournisseur est en mesure de conclure grâce aux connaissances acquises. Cette succession de causes, d'effets et d'impacts a fait l'objet d'une analyse exhaustive au cours des dernières décennies et s'est révélée robuste et stable. Un multiplicateur de profit a été déterminé, s'élevant à 1,96 pour les achats d'articles à intensité technologique faible ou modérée et à 3,06 pour les achats d'articles à forte intensité technologique. En appliquant ce multiplicateur aux investissements susceptibles de générer d'autres retombées industrielles, les bénéfices non actualisés sont estimés à 17,6 milliards de francs suisses. Les bénéfices actualisés sont estimés à 9,6 milliards de francs suisses (voir Fig. 4.13).

La quatrième voie d'impact concerne les bénéfices générés par les visiteurs sur place. Avant 2020, le CERN accueillait 150 000 visiteurs par an. En 2024, après l'ouverture du nouveau centre d'accueil des visiteurs Portail de la science (Science Gateway), ce nombre est passé à environ 350 000 visiteurs externes (sans compter les visites des personnes participant aux projets du CERN, les visites d'entreprises et les visites des familles des employés, qui représentent environ 40 000 personnes supplémentaires). Alors que pendant la période précédant son ouverture, la participation était également répartie entre les visites de groupes et les visites individuelles, l'augmentation significative de la capacité d'accueil des visites non guidées a entraîné un changement dans la répartition. Aujourd'hui, environ 76 % des personnes visitent le CERN à titre individuel et 24 % font partie de groupes qui profitent de la possibilité de visiter également les installations d'expériences, en particulier celles qui sont liées au LHC. Parmi ces visiteurs, 55 % sont classés comme des visiteurs « motivés par le CERN », dont le but premier du voyage était de visiter le CERN, tandis que 45 % sont des visiteurs « motivés par la région », qui se sont rendus dans la région pour d'autres raisons et ont profité de l'occasion pour visiter également le CERN. Le nombre absolu de personnes faisant partie de groupes de visite est resté relativement stable. Deux campagnes d'entretiens systématiques guidés avec des visiteurs présents sur le site avant et après l'ouverture du Portail de la science ont permis de fidéliser sur plusieurs années le comportement des visiteurs en matière de dépenses (voir Fig. 4.14). Au total, plus de 4 000 personnes ont été interrogées et seules environ

Sustainability/img/benefits-suppliers-2.pdf

Fig. 4.13 : Profil temporel des bénéfices de l'industrie des FCC-ee pour les fournisseurs, par rapport aux coûts des investissements de haute technologie (francs suisses, non actualisés - scénario de base).

3 550 réponses cohérentes et crédibles ont été retenues pour l'analyse. Le séjour moyen des personnes dans la région est de 3,75 jours, ce qui indique qu'une fois qu'elles ont visité le CERN, elles étendent leur visite à d'autres destinations dans les environs.

Les dépenses locales associées à la visite varient entre 625 francs suisses pour les visiteurs en groupe et 713 francs suisses pour les visiteurs individuels, avec une moyenne de 691 francs suisses pour l'ensemble des visiteurs. Sur la base de l'enquête formant un échantillonnage de la répartition des dépenses des visiteurs, la somme des dépenses locales des 35 000 visiteurs annuels sur place se traduit par un bénéfice économique tangible pour la région d'environ 250 à 350 millions de francs suisses par an. Ce chiffre ne tient toutefois pas compte des bénéfices socio-économiques liés au programme FCC-ee. Sur la base de l'enquête actuelle, seule une certaine fraction des futurs visiteurs peut être attribuée à un FCC. Comme indiqué initialement, l'analyse limite les bénéfices potentiels aux effets incrémentaux, c'est-à-dire à la différence entre les effets des visiteurs sur place qui peuvent être attribués à l'existence du FCC et l'évolution du CERN en l'absence du FCC. C'est pourquoi les hypothèses suivantes ont été utilisées pour estimer le bénéfice socio-économique supplémentaire pour le FCC-ee :

- Visites conventionnelles au CERN : une part croissante de ces visiteurs est attribuée au FCC-ee, commençant à 0 % en 2024 et augmentant progressivement jusqu'à 50 % en 2064 ;
- Visiteurs des sites de construction du FCC-ee et des quatre sites d'expérience : ces visiteurs sont entièrement attribués au FCC-ee, car ils n'auraient pas été pris en compte dans un scénario sans FCC-ee ;
- Visites du tunnel LHC désaffecté : si l'on adopte une approche prudente, elles ne sont pas attribuées au FCC-ee car elles seraient justifiées même en l'absence du FCC-ee ;
- Visites des centres de visiteurs des expériences du FCC ;
- Environ 10 % de tous les visiteurs se rendent sur le site principal du CERN ;
- Visiteurs des journées portes ouvertes : ils sont attribués au FCC-ee uniquement pour la capacité supplémentaire créée par le nouvel accélérateur ; tous les autres visiteurs sont exclus du décompte.

Sur la base de ces hypothèses, on estime que sur près de 19 millions de visiteurs pendant toute la période d'observation, seuls 5,5 millions environ devraient être attirés par le FCC-ee (voir Fig. 4.15), les autres étant davantage motivés par l'activité générale du CERN et sa réputation de longue date en matière d'excellence scientifique mondiale.

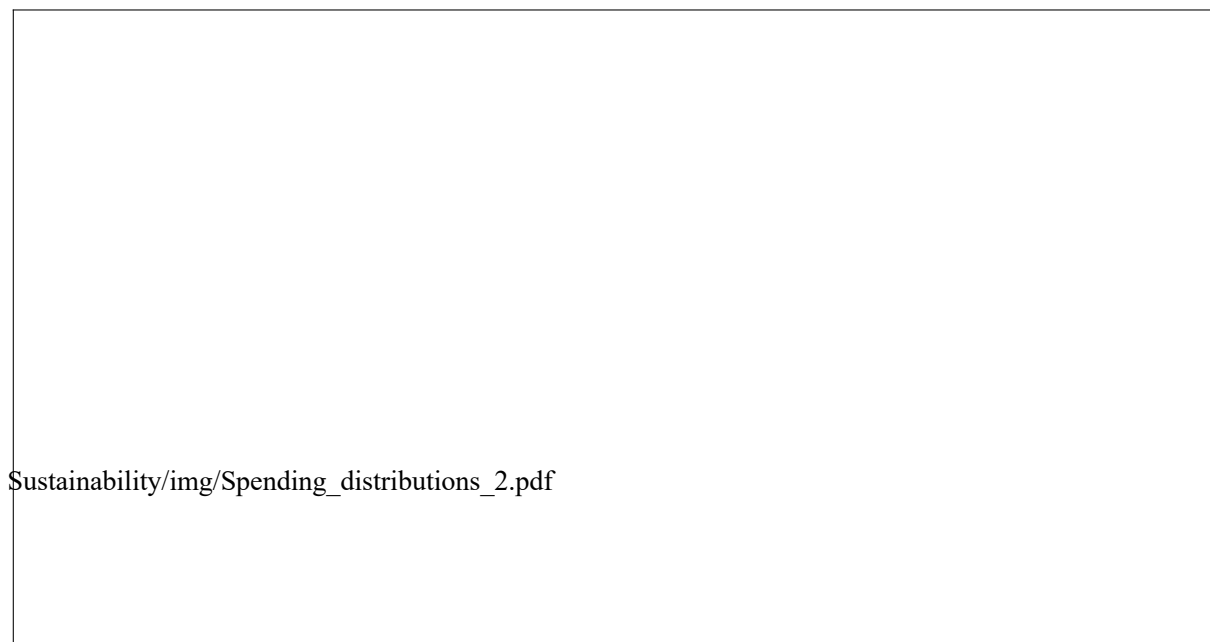


Fig. 4.14 : Répartition des dépenses de tous les visiteurs du site, des visiteurs individuels et des visiteurs qui viennent au CERN en tant que membres d'un groupe.

Si l'on considère que seul le bénéfice différentiel est rapporté ici, la différence entre le nombre de visiteurs que le CERN accueillerait sans et avec un FCC-ee est d'environ 13,5 millions sur la période d'observation.

Le bénéfice pour les visiteurs du site a été valorisé à l'aide de la méthode des coûts de déplacement, qui intègre les coûts supportés par les visiteurs pour se rendre au CERN et au FCC, la valeur économique du temps passé en déplacement, ainsi que les dépenses locales liées à leur visite, sur la base de deux enquêtes réelles menées au CERN sur deux années (avant et après la COVID). Le bénéfice actualisé généré par environ 5,5 millions de visiteurs sur site attribuables au FCC-ee est estimé à environ 2,1 milliards de francs suisses.

La cinquième voie d'impact analysée concerne les visiteurs virtuels qui consomment des pages web et des réseaux sociaux. En raison de la disponibilité limitée des données, les analyses n'ont porté que sur les sites web et les canaux de réseaux sociaux directement gérés par le CERN. L'estimation sous-estime donc considérablement les bénéfices réels générés par les nombreux contenus en ligne mis à disposition à l'échelle mondiale.

Le nombre de visiteurs en ligne estimé est basé sur les données historiques collectées par le groupe de communication du CERN concernant les visites du site web principal du CERN et les comptes de réseaux sociaux. Des hypothèses ont été formulées quant au nombre de visites spécifiquement liées au FCC-ee. Cette estimation a été révisée pour tenir compte des changements survenus dans le calendrier du projet et pour assurer la cohérence avec les révisions apportées à l'estimation des visiteurs sur place, en particulier en ce qui concerne la part d'attribution au FCC-ee. On suppose que la part attribuable la plus élevée des visites est d'environ 50 %, ce qui correspond à l'hypothèse faite pour les visiteurs du CERN.

Sustainability/img/onsite_visitors_2.pdf

Fig. 4.15 : Nombre de visiteurs sur site attirés par le FCC-ee au cours de la période 2024-2064, utilisé pour l'estimation de l'impact.

Dans le scénario sans le FCC, on suppose que le nombre de visites en ligne sur les sites web et les réseaux sociaux suivra les mêmes tendances que les visiteurs sur place en l'absence du FCC-ee. Dans le scénario avec le FCC, le nombre de visites en ligne correspond à la tendance de croissance des publications scientifiques permise par le programme de recherche FCC-ee prévu. La part des visites en ligne pouvant être

attribuée au FCC-ee commence par représenter une part marginale du total des visites en ligne du CERN. Le principal bond en avant des visites en ligne devrait se produire avec le début de l'exploitation. Cette part devrait encore augmenter au cours de la phase opérationnelle. Le nombre de visiteurs en ligne devrait atteindre son maximum quelques années après 2050. Au cours de ces années, on considère de façon prudente que la part du total des visites en ligne du CERN associée au FCC atteint environ 50 % et reste constante. Cette hypothèse est conforme aux résultats de l'enquête menée auprès des visiteurs sur site sur les raisons qui les poussent à visiter le CERN aujourd'hui. – Sur la base de ces hypothèses, pour la période 2024-2064, les impressions sont estimées à 1,7 milliard, les engagements à 79 millions et les visites du site web du CERN à 175 millions. Ces estimations sont très prudentes et ne tiennent pas compte des développements futurs des réseaux sociaux et des plateformes en ligne qui sont susceptibles d'apparaître, mais dont l'existence ne peut être anticipée à l'heure actuelle.

La valorisation de ces visites repose sur l'observation effective d'une présence en ligne d'un peu plus de 3 minutes. Les distributions sont appliquées aux différents types de médias tels que les interactions avec les réseaux sociaux et la consommation de séquences vidéo en ligne liées au FCC. La valeur du temps passé est déterminée à l'aide de la méthode du « coût d'opportunité », qui suggère que le temps passé sur les réseaux sociaux et les sites web représente une occasion manquée de s'engager dans d'autres activités potentiellement rentables. Étant donné que tous les visiteurs virtuels ne font pas nécessairement partie de la main-d'œuvre économiquement active, le coût d'opportunité du temps a été estimé en utilisant le PIB par habitant (au lieu des salaires), ajusté en fonction de la répartition géographique des visiteurs virtuels. Le bénéfice culturel total non actualisé pour les visiteurs en ligne est estimé à environ 229 millions de francs suisses, ce qui correspond à 102 millions de francs suisses actualisés.

La sixième voie d'impact fondamentale englobe les logiciels, systèmes et plateformes libres et gratuits ayant un lien de causalité avec le programme de recherche. On suppose que les logiciels liés aux projets d'expériences et de détecteurs génèrent une valeur sociétale supplémentaire en raison de leur adoption par d'autres projets scientifiques, instituts de recherche et entreprises ayant des besoins particuliers qui ne peuvent pas être facilement satisfaits par des logiciels disponibles dans le commerce. Si la première base d'utilisateurs se trouve généralement dans les domaines de la physique, de l'astronomie et de la recherche médicale, les entreprises qui utilisent ces logiciels peuvent être très diverses. Les exemples récents d'utilisation de logiciels issus des expériences LHC vont des systèmes spatiaux d'observation de la terre à l'imagerie médicale et à l'exploitation minière, en passant par le trafic des conteneurs maritimes et l'analyse des transactions boursières. Essentiellement, dans toutes les applications comportant de très grandes quantités de données à traiter, des modèles devant être identifiés dans des environnements dominés par des données contextuelles, des applications critiques exigeant des solutions personnalisées, et pour lesquelles l'efficacité du traitement des données est la clé du succès, les développements des scientifiques et des ingénieurs en physique des particules sont recherchés.

L'estimation de cette voie de bénéfices repose sur l'utilisation de logiciels de modélisation et de simulation de détecteurs de particules, dont l'utilisation en dehors des principaux intéressés a pu être suivie au cours des dernières années. Cela sert de « proxy » pour des développements comparables dont la nécessité a été confirmée lors du développement de détecteurs et d'expériences FCC. Comme l'analyse des logiciels, les nouveaux logiciels peuvent trouver application au-delà du groupe des principaux intéressés, générant ainsi des retombées positives pour la société. Un certain nombre de développements concerneront l'utilisation de l'intelligence artificielle dans ce domaine, le matériel configurable, l'informatique de pointe et les technologies de communication de données en constante évolution. Bien que plusieurs de ces développements soient entachés d'incertitudes, comme le passé l'a montré, il est probable que les collaborations autour des expériences FCC-ee pourront apporter des contributions significatives dans le domaine des TIC.

Pour les logiciels de modélisation et de simulation des détecteurs, environ 50 centres de recherche, agences spatiales et entreprises ont été identifiés comme utilisant des logiciels développés pour les expériences LHC. Parmi eux, 38 institutions autres que le CERN ont contribué d'une manière ou d'une autre aux développements. On peut citer, par exemple le Laboratoire national de l'accélérateur Fermi (Fermilab), le Laboratoire national de l'accélérateur SLAC, le Centre for Medical Radiation Physics et l'Agence spatiale européenne. En outre, 12 autres laboratoires, instituts et entreprises utilisent ce logiciel sans contribuer à son développement. Il s'agit, par exemple de la NASA, de General Electric, de Philips, de Siemens, de Varian, de

Boeing et de General Motors. Le CERN ne suit pas systématiquement le nombre d'utilisateurs et d'installations, mais les données disponibles en 2023 suggèrent une communauté d'utilisateurs actuelle d'environ 95 instituts contributeurs (à l'exclusion du CERN). En supposant que le rapport de 3:1 entre les institutions contributrices et non contributrices reste stable, le nombre total d'utilisateurs non contributeurs est estimé à environ 30. En l'absence de données plus fiables, cette estimation est considérée comme raisonnable et prudente.

Le bénéfice est estimé en tant que coût évité pour les utilisateurs externes et il est basé sur le coût de production d'un nouveau logiciel comparable. Il a été estimé que le coût de production des logiciels de modélisation et de simulation de détecteurs existants s'est élevé à environ 44,2 millions de francs suisses jusqu'en 2013, couvrant les 20 premières années de leur développement à partir de 1994. Le CERN a contribué à environ 50 % de ce coût (22 millions de francs suisses), le reste étant financé par d'autres contributeurs externes. Les estimations sont basées sur l'hypothèse de chiffres de coûts comparables pour les logiciels liés au FCC-ee et en supposant que la contribution du CERN reste de 50 %. Le coût évité pour chaque organisation contributrice est le coût de production total estimé moins sa contribution spécifique, tandis que le coût évité pour les utilisateurs non contributeurs est le coût de production total. On suppose qu'un nouveau logiciel sera disponible pour la première fois après 5 ans de développement et que les développements se poursuivront au fil des ans, même pendant la phase d'exploitation, en raison de l'intérêt continu des universités et de l'industrie.

Dans ce scénario, le coût évité total cumulé représentant le bénéfice total non actualisé est estimé à environ 7,4 milliards de francs suisses. Le bénéfice actualisé est d'environ 4,4 milliards de francs suisses. En fait, ce bénéfice s'applique en principe à toute une série de développements logiciels potentiels qui ne peuvent pas être étudiés en détail à ce stade précoce. Il est conseillé que tout développement futur prévoie un mécanisme d'accès libre à ces logiciels, qu'il en assure la promotion active dans des domaines scientifiques et industriels en dehors de la communauté de la physique des particules et, surtout, qu'il comprenne un suivi systématique des utilisateurs actifs afin de rendre les estimations de l'impact socio-économique plus précises et plus fiables.

4.8.6. Bénéfices élargis

Un certain nombre de bénéfices élargis ont été analysés en détail en plus des bénéfices principaux présentés dans la section précédente. En raison des incertitudes liées aux possibilités de transformer ces bénéfices potentiels plus larges en impacts tangibles, ils ne sont pas pris en compte dans le calcul de la valeur actuelle nette de la ligne de base de référence. L'analyse et la quantification de ces bénéfices potentiels sont toutefois basées sur des observations factuelles des effets et résultats passés et sont donc solides en ce qui concerne la valorisation. Comme pour les bénéfices fondamentaux, des hypothèses de travail très prudentes ont été établies et seuls les effets pouvant être justifiés de manière crédible ont été inclus. C'est pourquoi une deuxième valeur actualisée nette est présentée, qui inclut ces bénéfices élargis. Pour transformer ces potentiels en impacts tangibles, la phase préparatoire de mise en œuvre du futur projet doit inclure un travail spécifique qui planifie cette création de bénéfices. Des objectifs et des engagements volontaires sont nécessaires de la part des maîtres d'ouvrage pour mettre en place des instruments permettant de transformer les potentiels en impacts. Enfin, un contrôle et un suivi devront être mis en place pour assurer le suivi de l'impact généré.

Les bénéfices plus larges suivants ont été étudiés et sont brièvement présentés dans cette section :

1. Plateforme d'information ouverte ;
2. Logiciel collaboratif ouvert ;
3. Création d'entreprises dérivées dans le secteur des technologies de l'information et de la communication (TIC)
4. Développement de sources d'énergie renouvelables ;
5. Fourniture de chaleur fatale ;
6. Éviter les gaz à effet de serre en remplaçant les sources traditionnelles d'énergie thermique par de la chaleur fatale récupérée et fournie ;
7. Amélioration et création d'habitats et augmentation de la biodiversité ;
8. Renforcement des services d'urgence locaux.

Un futur projet mondial de recherche collaborative repose sur une plateforme d'information scientifique et technique ouverte et à long terme qui permet à la communauté de mettre ses connaissances à la disposition du plus grand nombre afin qu'elles deviennent repérables, accessibles, interopérables et réutilisables (principe FAIR). Le CERN a une longue expérience dans la mise en place de telles infrastructures, dont la plus connue est le World Wide Web. Cette technologie a permis par la suite le développement et la mise à disposition de services supplémentaires comme le serveur documentaire CERN Document Server (CDS) qui est basé sur la plateforme Invenio développée en interne. Cette évolution a conduit à la création du service Zenodo que la Commission européenne a approuvé en tant que référentiel documentaire général pour toutes les recherches financées par l'UE. Le CERN exploite aujourd'hui pour la Commission européenne cette plateforme qui fait entièrement partie de l'European Open Science Cloud (EOSC). En continuant à être à l'avant-garde de la « mégascience », le CERN peut jouer un rôle de premier plan dans la fourniture d'informations scientifiques et techniques en Europe et à l'échelle mondiale. Le lancement d'une nouvelle mission scientifique d'envergure, le FCC, justifie non seulement la poursuite des développements en cours, mais conduira probablement aussi au développement et à la mise en œuvre d'une nouvelle génération de systèmes d'information, à l'instar de ce qui s'est produit dans le passé. Une telle plateforme peut offrir des fonctionnalités qui vont au-delà de la simple gestion des documents et des données et de la conservation des données à long terme. Elle pourra offrir des services qui sont aujourd'hui impossibles à concevoir. Afin d'estimer la valeur potentielle d'un tel développement futur, la valeur de la plateforme Zenodo a été estimée en tant que référence prudente avec une fonctionnalité minimale offerte à la société d'aujourd'hui. Cela a été possible parce que des données historiques de qualité suffisante pour les périodes concernées ont pu être identifiées. Un modèle économétrique a été construit pour estimer l'impact socio-économique de ce référentiel d'informations virtuel, conçu pour répondre aux besoins de stockage et d'utilisation de l'information collaborative. La valorisation estimée est dérivée des bénéfices mesurables associés à des référentiels comparables, comprenant le stockage de données, l'utilisation en ligne et les téléchargements, déduction faite de la valeur actuelle des coûts de développement, d'exploitation et de maintenance.

La valeur non actualisée sur la période d'observation FCC-ee d'une telle plateforme est de 5 milliards de francs suisses et sa valeur actualisée est d'environ 2,7 milliards de francs suisses. Pour que ce potentiel d'impact devienne réalité, plusieurs conditions préalables s'appliquent : la communauté mondiale participant au projet doit avoir une demande pour une telle plateforme, la communauté doit s'engager à utiliser la plateforme, les communautés au-delà du domaine de la physique des hautes énergies et des particules doivent adopter la plateforme (comme ce fut par exemple le cas avec la plateforme Zenodo approuvée par la Commission européenne). Les exigences fondamentales reposent sur l'intention de jouer le rôle de développement et d'exploitation d'une plateforme d'informations pour plusieurs communautés d'utilisateurs. Un engagement soutenu à long terme des ressources et un plan de diffusion des développements au-delà de la communauté de base sont également nécessaires.

Un autre cas typique de plateformes ouvertes dans l'histoire des grandes collaborations internationales du CERN est la création d'outils qui soutiennent le travail collaboratif. Le système de gestion des événements « Integrated Digital Conference » (Indico) est un exemple de ce type de développement. Il a révolutionné la gestion des réunions physiques et virtuelles, des exposés et des conférences et a conduit à une documentation

complète du travail collaboratif. Il peut être considéré comme un catalyseur clé des projets collaboratifs mondiaux. Depuis le début de son développement en 2002, la plateforme s'est étendue à de nombreuses organisations universitaires et internationales dans le monde entier. Un futur projet à grande échelle n'a pas seulement des besoins très similaires, mais il créera des exigences qui vont au-delà de celles qui sont satisfaites avec cette plateforme à l'heure actuelle. L'intégration de l'écriture collaborative, la schématisation, l'assistance de l'IA pour les réunions et la prise de notes, la traduction en différentes langues, la gestion de la collaboration, la vidéoconférence, l'enregistrement et la publication des supports, la messagerie en temps réel, les espaces de travail partagés, l'intégration avec les processus de gestion documentaire, l'approbation et la distribution d'informations sélectionnées ne sont qu'un choix d'exemples pour lesquels le besoin commence dès aujourd'hui à apparaître dans le cadre des études liées au FCC.

Ce sont les raisons pour lesquelles la plateforme Indico actuelle a été choisie comme un exemple conservateur et représentatif de plateforme de collaboration à même d'autoriser et d'améliorer le travail collaboratif futur dans le cadre d'un projet à grande échelle. La valeur générée par le développement d'un nouveau service pour faciliter la collaboration mondiale impliquée dans le projet FCC en termes de réunions, d'appels et de gestion d'événements a été évaluée en considérant le consentement à payer (CAP) des utilisateurs privés pour un ensemble d'outils comparables, totalisant 7,5 milliards de francs suisses sans actualisation et 3,5 milliards de francs suisses avec actualisation. Étant donné que le potentiel d'un tel écosystème nouveau nécessite un engagement de développement, l'adoption par des communautés au-delà de la physique des hautes énergies et des particules, la valeur n'a été considérée que comme un bénéfice élargi.

Les archives des bureaux de transfert de connaissances des deux dernières décennies ont montré qu'un nombre stable d'entreprises ont été créées chaque année par des personnes ayant participé au projet phare de collisionneur de particules du CERN et aux collaborations internationales sur les détecteurs d'expériences. Un exemple frappant est celui de Proton AG, qui emploie plus de 400 personnes, qui compte plus de 100 millions de clients et qui offre des services de courrier électronique sécurisé et de réseau privé virtuel (VPN) sans commune mesure avec les autres fournisseurs de services. D'autres exemples sont Advacam qui s'est spécialisée dans les dispositifs d'imagerie pour diverses applications industrielles basées sur la technologie des détecteurs de particules, LightEye qui travaille sur la technologie LiDAR pour les mesures de vitesse du vent à longue portée afin d'améliorer la sécurité aérienne et PlanetWatch qui s'est spécialisée dans l'acquisition de données environnementales. Sur la base de ces données historiques factuelles, on suppose que le FCC-ee générera environ deux nouvelles entreprises dérivées dans le seul secteur des technologies de l'information et de la communication (TIC) chaque année, depuis la phase de conception et de préparation jusqu'à la fin de la période d'observation. Compte tenu de la probabilité de survie des entreprises chaque année et de la valeur de marché annuelle des entreprises du secteur des TIC, le bénéfice socio-économique est estimé à au moins 832 millions de francs suisses sans actualisation et à 409 millions de francs suisses avec actualisation. Ce chiffre n'inclut pas les bénéfices économiques générés par de nombreuses micro-entreprises et consultants indépendants qui exercent leurs activités grâce à l'expérience et aux compétences qu'ils ont acquises dans le cadre de projets d'accélérateurs de particules et de détecteurs d'expériences à grande échelle.

Certains bénéfices environnementaux que le projet pourrait générer ont également été évalués. Il s'agit, par exemple, de l'objectif volontaire d'alimenter l'infrastructure en électricité produite à partir de sources d'énergie renouvelable. La conclusion de contrats spécifiques d'alimentation en énergie et de contrats d'achat d'électricité (CAE) à long terme sert de levier pour développer de nouvelles sources d'énergie renouvelable, puisque le fournisseur d'électricité peut garantir le financement à long terme de nouveaux projets d'investissement en énergies renouvelables avant de prendre une décision d'investissement financier. Un scénario de portefeuille de contrats complémentaires d'alimentation en énergie pour la construction et l'exploitation du FCC a été analysé en fonction de cette voie de génération de valeur. En supposant qu'après 2050 la société sera largement décarbonisée et en faisant l'hypothèse prudente qu'il n'y aura pas de demande croissante pour un tel instrument de financement sur un horizon temporel de plus de 30 ans, le bénéfice mentionné reste limité : 227 millions de francs suisses sans actualisation et 117 millions de francs suisses avec actualisation. Le développement d'un portefeuille d'énergies renouvelables peut en principe commencer par une décision d'investissement pour un nouveau projet de collisionneur de particules et un engagement du projet à utiliser des sources d'énergie renouvelable. Dans ce cas, le bénéfice potentiel peut rapidement se transformer en un bénéfice économique tangible. Il est suggéré que ce bénéfice soit révisé à ce moment-là et réexaminé en fonction de l'évolution des conditions limites de mise en œuvre du projet.

Une grande partie de l'énergie servant à faire fonctionner le collisionneur de particules et ses expériences est convertie en chaleur. Traditionnellement, la chaleur est dissipée par des systèmes de refroidissement à base d'eau reliés à des tours d'évaporation. Une étude a été menée pour démontrer la faisabilité de la récupération et de la réutilisation de la chaleur fatale. La récupération et la fourniture de chaleur fatale est un concept intégré dès le départ à la conception du collisionneur de particules. La chaleur fatale récupérée sera fournie par des réseaux de chauffage urbain aux consommateurs situés au voisinage des sites FCC-ee. Le bénéfice environnemental provient du fait que l'énergie utilisée par l'infrastructure de recherche du FCC est réutilisée et fournie à des fins de chauffage et de refroidissement, ce qui permet d'éviter le recours à d'autres sources, principalement non renouvelables et à forte intensité de carbone, telles que le gaz, le bois, le pétrole et les sources d'électricité traditionnelles. Le bénéfice environnemental de la réutilisation de la chaleur fatale provient des émissions de gaz à effet de serre évitées dans le scénario du projet, dans lequel le CERN fournit de la chaleur fatale, produite à l'aide d'un mélange d'électricité plus propre, aux réseaux de chauffage urbain desservant les consommateurs à proximité des sites du FCC-ee. Ces émissions sont comparées à celles des autres méthodes de chauffage et de refroidissement généralement utilisées dans la région du CERN. Le bénéfice total est estimé à 170 millions de francs suisses sans actualisation, ce qui correspond à 74 millions de francs suisses après actualisation.

Cependant, pour transformer ce bénéfice potentiel en impacts socio-économiques tangibles, il faut adapter le calendrier d'exploitation à la courbe de la demande, conclure des accords avec les opérateurs de chauffage urbain pour mettre en place des réseaux et les exploiter, et s'assurer que les clients s'engagent à utiliser la chaleur. Étant donné que ces développements prennent généralement du temps, qu'ils impliquent des développements territoriaux qui durent une à deux décennies et qu'ils dépendent également de développements locaux autour des futurs sites de surface, les bénéfices ne sont pas inclus dans le calcul de la valeur actuelle nette de base. Par ailleurs, les bénéfices potentiels découlant de la réduction des émissions de gaz à effet de serre grâce au remplacement des sources de chaleur conventionnelles sont incertains pour la période postérieure à 2050, date à laquelle l'économie vise en principe à être largement décarbonisée. L'ensemble des bénéfices potentiels, c'est-à-dire les coûts économisés en utilisant la chaleur résiduelle au lieu des sources de chaleur conventionnelles et en évitant les émissions de gaz à effet de serre, s'élèvent à environ 313 millions de francs suisses sans actualisation et à 132 millions de francs suisses avec actualisation. Une fois que la décision de réalisation d'un projet aura été prise, une révision de ces impacts pourra avoir lieu, car un engagement plus fort de la part du maître d'ouvrage permet également aux parties prenantes régionales de planifier les réseaux de chaleur fatale, ce qui conduira finalement à une augmentation significative des bénéfices potentiels.

Le projet ne se contente pas de consommer des terres en raison de l'aménagement de huit sites en surface, mais il ouvre également des possibilités de créer de nouveaux espaces naturels dans les environs immédiats des sites. La création ou l'amélioration de ces habitats pour bien intégrer les sites de surface dans leur environnement peut renforcer les espaces naturels autour des sites, les protéger d'une plus grande artificialisation et contribuer à améliorer la biodiversité, en compensant partiellement les effets de la perte d'espace. Si des projets de renaturation sont aujourd'hui prévus pour les sites de surface, ils n'ont pas encore été discutés avec les parties prenantes locales et n'ont pas encore été conçus techniquement. Ce bénéfice reste donc potentiel et n'est pas pris en compte dans le calcul de la valeur actuelle nette de base. La renaturation des habitats et la biodiversité pourraient représenter une valeur non actualisée de 0,4 million de francs suisses, correspondant à une valeur actualisée de 0,2 million de francs suisses.

Le futur collisionneur de particules sera intégré dans un territoire d'une superficie d'environ 30 x 30 km. On a veillé à sélectionner des sites de surface situés à proximité des principaux axes de transport. Néanmoins, le concept actuel mis en œuvre au CERN, qui consiste à fournir des services d'urgence, de secours et de lutte contre l'incendie aux sites de surface des accélérateurs de particules existants à partir d'un corps de pompiers central au CERN, devient irréalisable pour une future infrastructure à l'échelle du FCC. Le concept de sécurité prévoit donc une collaboration étroite et durable avec les services d'urgence locaux. Ce concept peut reposer sur le soutien apporté par l'infrastructure de recherche en termes d'équipement, de formation et de personnel. Il pourra permettre d'accroître l'expertise et les compétences des services d'urgence locaux, de les doter d'équipements de pointe, d'augmenter le nombre de spécialistes dans la région et de renforcer la coopération et la coordination entre les différents services d'urgence. Ce bénéfice potentiel a une valeur non actualisée d'environ 30 millions de francs suisses et représente une valeur actualisée d'environ 16 millions de francs

suisses. Puisqu'il repose sur l'élaboration et la mise en œuvre d'un concept et d'un plan de sécurité au niveau territorial, ce qui peut nécessiter beaucoup de temps et d'ajustements pour rendre le concept réalisable, le bénéfice n'est pas inclus dans le calcul de la valeur actuelle nette de base.

En outre, deux autres catégories de bénéfices décrites dans les sections suivantes n'ont pas été prises en compte de manière adéquate dans la formule globale de détermination de la valeur actuelle nette du projet : la création économique de valeur ajoutée et la valeur du bien public.

Analyse complémentaire de la valeur économique ajoutée

En plus de son impact socio-économique, la valeur économique ajoutée a été estimée en analysant les liens économiques (indirects, directs et induits) pendant toute la période de 30 ans couvrant la conception, la construction et la phase d'exploitation du FCC-ee à l'aide de la méthodologie du tableau des entrées-sorties[243]. L'étude a estimé les effets sur l'économie et l'emploi liés à la construction et à l'exploitation de la nouvelle infrastructure de recherche. Ces effets ne sont pas inclus dans l'analyse incrémentale des coûts et des bénéfices car ils ne représentent pas la création de nouveaux biens et services économiques en dehors de l'infrastructure de recherche, mais conduisent à une valeur économique ajoutée en raison de l'activation de nombreux secteurs économiques dans le cadre des activités liées à l'infrastructure de recherche.

Ces effets découlent principalement de la construction des structures civiles, des accélérateurs de particules et des collisionneurs, des infrastructures techniques, des expériences, des frais d'exploitation et de la consommation liée au personnel impliqué. Cette analyse économique n'a été réalisée que pour une infrastructure comportant deux expériences et n'a pas été actualisée en fonction de la base de référence actuelle.

En utilisant un modèle économique d'entrées-sorties, les dépenses cumulées d'environ 21 milliards de francs suisses sur une période de 30 ans de construction et d'exploitation de la recherche pourraient être liées à quelque 800 000 personnes-années d'opportunités d'emploi, ce qui correspond à près de 30 000 emplois par an par le biais de chaînes de valeur ajoutée mondiales. Outre les quelque 6 000 emplois directement liés aux projets dans les domaines de la science, de l'ingénierie, de l'administration et de la gestion, plus de 20 000 emplois sont nécessaires pour fournir les biens et les services nécessaires à la construction et à l'exploitation. Les pays hôtes, la Suisse et la France, et en particulier le canton de Genève et les départements de l'Ain et de la Haute-Savoie, pourront bénéficier grandement des dépenses liées à la phase d'exploitation. Au total, environ 13000 emplois seront pourvus ou créés chaque année en moyenne en France et en Suisse.

Un investissement initial de 12,1 milliards de francs suisses lié à la construction génère directement une valeur ajoutée globale de 5,4 milliards de francs suisses, générant près de 80 000 personnes-années d'emploi, soit plus de 8 000 emplois par an sur une période d'investissement de dix ans. Si l'on inclut les effets indirects dans le processus de production, la valeur ajoutée liée à l'investissement s'élève à 11,6 milliards de francs suisses, entraînant environ 180000 années-personnes d'emploi, soit 18000 emplois par an pendant la période d'investissement. En élargissant les frontières du système pour inclure l'amortissement (c'est-à-dire le capital social que les entreprises doivent constituer ou reconstituer pour faire face à la production liée au FCC), la valeur ajoutée liée au FCC s'élève à plus de 14 milliards de francs suisses et génère plus de 230 000 années-personnes d'opportunités d'emploi, soit 23 000 emplois par an au cours de la phase d'investissement. Tous les types d'entreprises, grandes, moyennes et petites, peuvent bénéficier de cette valeur ajoutée. Les pays qui peuvent bénéficier de ces bénéfices dépendent de la stratégie d'approvisionnement choisie. C'est le secteur de la construction qui en bénéficie le plus, puisque près de la moitié du volume d'investissement peut être attribuée au génie civil. Cependant, tout au long du cycle, sa part diminue régulièrement et celle de la plupart des autres secteurs augmente.

L'exploitation du FCC génère de la valeur ajoutée par le paiement des salaires et des cotisations de sécurité sociale et par l'amortissement de l'investissement. Aucun excédent d'exploitation (net) n'est pris en compte puisque le CERN, organisme de recherche purement scientifique, n'est pas à but lucratif. La valeur ajoutée directe pendant la phase d'exploitation est estimée à environ 455 millions de francs suisses par an. Pour fonctionner, un ensemble d'intrants (biens intermédiaires et services) est nécessaire, dont l'acquisition offrira aux entreprises appropriées des possibilités de vente et d'emploi et générera ainsi une valeur ajoutée indirecte d'environ 165 millions de francs suisses par an. La valeur ajoutée directe, indirecte et induite pendant la phase d'exploitation, qui s'élève à plus de 620 millions de francs suisses par an, permet de financer 8 400 emplois, la plupart en France et en Suisse. La mise en place et la fourniture de sources d'énergie renouvelable pour le fonctionnement de l'infrastructure de recherche augmenterait la valeur ajoutée de l'Europe de 500 millions de francs suisses supplémentaires, garantissant 7 400 personnes-années d'emploi en Europe. Par secteur économique, la structure des effets de la consommation est nettement différente des effets des dépenses d'investissement et de fonctionnement : les activités immobilières, le commerce (de détail), les services personnels et le secteur de l'hôtellerie et de la restauration sont les principaux bénéficiaires de la consommation des employés liés aux projets.

La limite inférieure des dépenses touristiques imputables au projet dans l'ensemble de la région de Genève est d'au moins 130 millions de francs suisses par an. La Suisse et la France se partagent la plus grande partie du total des effets, avec environ 1 700 emplois liés aux seuls visiteurs. – Cinq cents autres emplois sont européens, le reste, soit environ 600, sont pourvus en dehors de l'Europe. Globalement, les effets du tourisme soutiendraient environ 2 700 emplois.

La consommation d'énergie électrique dans le cadre de contrats d'achat d'électricité à long terme générerait une valeur ajoutée directe d'environ 200 millions de francs suisses, liée à 3 500 personnes-années d'emploi, en raison des activités de renforcement des capacités. Si l'on inclut les intrants intermédiaires et les investissements nécessaires à la production et à l'installation des équipements, la contribution à la valeur ajoutée de l'Europe s'élève à 510 millions de francs suisses, ce qui représente 7 400 personnes-années d'emploi en Europe. Les effets de valeur ajoutée au niveau mondial liés au secteur de l'approvisionnement en électricité s'élèvent à 620 millions de francs suisses ou à 11 600 personnes-années d'emploi.

Ces chiffres doivent être interprétés avec prudence. Ce qui est encore plus important, c'est que les emplois indirects se déduisent dans l'hypothèse d'un régime permanent. Les estimations ne projettent pas dans le futur les principales variables économiques (les taux de change, les niveaux de prix et la productivité étant les plus importants). Par conséquent, les effets sont estimés comme si le FCC avait été construit et fonctionnait à l'heure actuelle. – Cela ne doit pas être considéré comme une lacune, car cela permet aux décideurs de saisir plus facilement les effets des estimations en se référant à un cadre de référence familier : l'économie telle qu'elle est aujourd'hui. Les chiffres relatifs à la valeur ajoutée qui en résultent sont moins compromis par cette simplification, car il est impossible de prévoir l'évolution des principaux paramètres de performance économique à l'échelle d'un projet de FCC dont la construction commence au milieu des années 2030 et qui entre en service à la fin des années 2040. Les chiffres de l'emploi liés aux dépenses représentent des limites supérieures fiables puisque la productivité du travail devrait augmenter. Malgré les conditions économiques changeantes, le FCC restera ce qu'il est aujourd'hui : une entreprise majeure pour la communauté scientifique et la société dans son ensemble, avec des impacts scientifiques, technologiques, techniques et économiques probablement significatifs.

L'analyse montre que les coûts qu'un projet comme le FCC implique sont également liés à des impacts économiques tangibles, en termes d'opportunités de vente pour les entreprises et d'opportunités d'emploi pour les scientifiques et les non-scientifiques. En se concentrant uniquement sur un ensemble de mécanismes de transmission, ces résultats constituent une limite inférieure pour les effets économiques attendus. Par conséquent, même si les liens économiques étroits de la construction et de l'exploitation ne sont pas plus importants que ce que l'on pourrait attendre d'un projet de cette taille, le potentiel de retombées dans des domaines technologiques et commerciaux sans rapport avec le projet est certainement beaucoup plus marqué : par exemple, seuls quelques projets sont capables de susciter un attrait touristique, sans parler des potentiels technologique et scientifique.

Par ailleurs, en estimant la structure régionale des effets liés à la construction et à l'exploitation du FCC, l'analyse a montré que le lien entre la contribution au CERN, les contrats directs et les bénéfices indirects n'est pas toujours évident. Par exemple, on estime que la Chine et les États-Unis, qui ne sont pas membres du CERN, bénéficieront de retombées économiques considérables en raison de leur rôle prépondérant dans les chaînes de valeur mondiales. Ces informations pourraient servir de base à des négociations entre le CERN et des pays comme la Chine en vue d'intensifier et de formaliser des coopérations plus étroites à l'avenir, ce qui serait bénéfique pour les deux parties.

Valeur du bien public

Pour évaluer le volume des bénéfices sociétaux, une enquête approfondie a été menée auprès d'environ 10 500 personnes dans neuf pays [177], y compris des États membres et non membres du CERN susceptibles de contribuer au projet de futur collisionneur de particules du CERN. L'enquête visait à évaluer la notoriété du CERN et de ses activités de recherche, la valeur perçue par le public d'une nouvelle infrastructure de recherche telle que le FCC, et à comparer cette valeur monétaire aux contributions annuelles par habitant versées par les États membres du CERN.

La valeur du bien public ne doit pas être intégrée dans l'estimation de la valeur actuelle nette du projet, puisque la valeur perçue du projet, c'est-à-dire la valeur que les contribuables associent au projet, est orthogonale aux bénéfices supplémentaires réellement estimés. Mesurée par le consentement à payer, la valeur du bien public dépend également de la connaissance du projet, de ses coûts, de ses facteurs externes négatifs et de ses bénéfices incrémentaux probables. Par conséquent, sa valeur est affectée par certains biais cognitifs, comme, par exemple un biais d'information. La présence de tels biais n'est pas négative et ne peut être évitée. Ces biais font partie du mécanisme qui permet aux gens d'associer une valeur à un actif auquel ils n'ont pas directement accès.

Les résultats indiquent que 41 % des personnes interrogées connaissent le CERN et sa mission, ce qui, bien que cette notoriété soit inférieure à d'autres organisations internationales comme la NASA, reste globalement positif. Plus de 80 % des personnes interrogées estiment que la recherche scientifique au CERN fait progresser notre compréhension de l'univers et contribue à améliorer la qualité de la vie. La volonté hypothétique de participer financièrement au développement du nouveau projet d'infrastructure de recherche a été évaluée, révélant des répartitions variables selon les pays. Les valeurs médianes vont de 2 francs suisses par personne et par an en France à 20 francs suisses en Suisse, ces deux pays étant membres du CERN. Pour les pays tiers, le consentement à payer (CAP) médian varie de zéro au Japon à 24 aux États-Unis (bien que la valeur moyenne pour le Japon soit de 10 francs suisses, ce qui signifie qu'une fraction significative de la population adulte japonaise accorde de l'importance à ce type de recherche scientifique). Le bénéfice a été estimé en multipliant le CAP annuel estimé par habitant par une population adulte totale d'environ 380 millions de personnes sur 30 ans dans les États membres du CERN, en commençant par les premiers investissements pertinents.

Dans tous les cas observés, la valeur publique perçue dans les États membres du CERN est supérieure au budget opérationnel annuel du CERN, qui s'élève à 1,4 milliard de francs suisses. La contribution moyenne par habitant dans ces États est d'environ 2,5 euros par an, soit environ 5 euros par contribuable et par an. Le CAP total estimé pour un projet de futur collisionneur au CERN dépasse les coûts totaux estimés du FCC d'un facteur 20 et ses bénéfices quantifiables de plus de 11 fois.

Ces résultats étayent solidement la conclusion selon laquelle la décision d'investir dans un programme de futur collisionneur de particules au CERN peut être considérée comme justifiée d'un point de vue sociétal, étant donné que les personnes susceptibles de financer l'effort en question lui attribuent une valeur supérieure à son coût total.

4.8.7. Conclusions

L'analyse de l'impact socio-économique repose sur une évaluation sociale des coûts et des bénéfices menée sur la première phase du programme FCC, qui s'étend sur une période de 40 ans depuis la décision d'investissement financier jusqu'à la fin de l'exploitation. Le FCC-ee a quantifié les coûts, les facteurs externes négatifs et les potentiels de bénéfices prudents et plus larges dans différents domaines. Des coûts d'environ 20 milliards de francs suisses actualisés et des facteurs externes négatifs d'environ 354 millions de francs suisses peuvent être comparés aux bénéfices que cette infrastructure de recherche peut générer. La valeur actuelle totale des principaux bénéfices socio-économiques valorisés associés aux infrastructures de recherche du FCC-ee a été estimée de manière prudente à une valeur actualisée de 24 milliards de francs suisses. Les bénéfices supplémentaires élargis s'élèvent à environ 7 milliards de francs suisses actualisés. Les infrastructures représentent une valeur résiduelle d'environ 2,5 milliards de francs suisses pour un collisionneur de hadrons ultérieur, mis à disposition à titre de « cadeau » pour ce deuxième projet.

L'estimation prudente de la valeur actuelle nette (VAN) du projet sur l'ensemble de sa période d'observation est d'environ 4 milliards de francs suisses, ce qui donne un ratio bénéfices/coûts positif d'environ 1,20. L'inclusion des valeurs d'actif résiduelles porte la VAN à environ 6,5 milliards de francs suisses. Si l'on étend les estimations à un plus grand nombre de bénéfices potentiels, le projet offre la possibilité d'atteindre une VAN encore plus élevée. Toutefois, pour atteindre une telle performance, il faut concevoir, planifier et mettre en œuvre les bénéfices escomptés, ainsi que prendre des mesures assorties d'engagements et assurer une surveillance et un suivi continu au niveau du CERN et de la collaboration internationale. Une gestion des risques et un contrôle des coûts appropriés doivent être mis en place pour gérer les coûts et les facteurs externes négatifs.

Les coûts ont été basés sur les estimations des coûts d'investissement actuellement disponibles et sur l'expérience de l'exploitation du complexe d'accélérateurs de particules et de collisionneurs du CERN au cours des deux dernières décennies. Les facteurs externes négatifs les plus notables ont été identifiés, quantifiés et valorisés à l'aide de méthodologies d'analyse du cycle de vie et de lignes directrices au niveau européen pour l'évaluation des impacts socio-économiques au sens large et l'évaluation des projets. Les valeurs des coûts ont été ajustées en fonction des taux de change et de la valeur temporelle, avec 2024 comme année de référence.

Les bénéfices ont toujours été évalués selon une méthodologie prudente, fondée sur la compréhension actuelle du projet, les enseignements tirés d'infrastructures de recherche analogues antérieures et les analyses d'impacts socio-économiques du LHC [193] et du HL-LHC [119] qui ont été réalisées en tant que précurseurs, anticipant ainsi la nécessité de produire une étude d'impacts socio-économiques du FCC.

En outre, les données récentes collectées entre 2020 et 2024 ont joué un rôle crucial dans l'élaboration de ces estimations. Pour garantir une perspective globale, les efforts de collecte de données ont porté sur plus de 16000 personnes au moyen d'enquêtes en ligne. Ce groupe diversifié comprenait des membres du public, des visiteurs du CERN, des utilisateurs de plateformes telles que Zenodo et Indico, ainsi que d'anciens chercheurs.

Dans un scénario probable entre les hypothèses optimistes et pessimistes, les bénéfices quantifiés dépassent les coûts totaux associés à la conception, à la construction et à l'exploitation du FCC-ee, ce qui se traduit par un impact socio-économique positif net pour le projet.

Si une décision d'investissement financier est prise pour poursuivre un projet de construction, il sera nécessaire d'actualiser l'évaluation au cours des prochaines années et de rassembler tous les documents nécessaires pour obtenir le financement de la part des pays participants et les autorisations de la part des États hôtes.

L'approche utilisée dans cette analyse exclut intentionnellement et complètement les impacts incertains et imprévisibles sur la société de l'accroissement des connaissances généré par la mission scientifique, en raison de leur imprévisibilité intrinsèque.

L'évaluation de la valeur du bien public de l'infrastructure de recherche pour le public donne un aperçu des bénéfices globaux d'un projet de futur collisionneur de particules au CERN pour la société, mesurés selon le point de vue du public et son consentement à contribuer financièrement à la mise en œuvre d'un projet. Le

fait que la valeur perçue d'un projet de future infrastructure de recherche dépasse les coûts du FCC est une preuve importante que le public accorde à la recherche scientifique une valeur supérieure à son coût réel et contribue ainsi à l'obtention de la licence sociale d'exploitation (Social Licence to Operate - SLO).

Bien qu'il soit nécessaire de l'affiner, cette analyse sert d'outil pour éclairer la prise de décision, optimiser l'engagement des utilisateurs, identifier et atténuer les risques et améliorer les conditions d'acceptation sociale du projet FCC-ee. Les résultats soulignent que le projet FCC-ee promet des retombées positives non seulement pour la communauté scientifique, mais aussi pour l'ensemble de la société, contribuant ainsi à la viabilité à long terme du projet.

4.9. Retours sur investissement pour les pays participants

4.9.1. Vue d'ensemble

Plusieurs organismes d'analyse économique (par exemple, LSE [180], WIFO [244]) ont été consultés afin d'analyser comment les pays potentiellement participants peuvent augmenter la probabilité de bénéficier d'une contribution financière au projet. Des exemples de telles propositions sont rassemblés dans cette section.

Les experts s'accordent à dire que les organisations internationales, y compris le CERN, génèrent des impacts économiques et sociétaux significatifs au-delà de leurs activités principales dans leurs pays hôtes et dans les pays participants.

Un concept existant pour assurer un retour sur investissement continu aux pays participants est l'approche de l'agent de liaison internationale (ALI) pour intégrer les entreprises nationales dans les processus de passation de marchés de l'organisation internationale. Cette approche a été étudiée par des économistes, qui ont constaté que pour un futur projet à grande échelle, une approche plus structurée et plus complète pourrait conduire à de meilleurs résultats pour les pays participants.

Les mesures recommandées [180] pour assurer de bons retours sur investissement aux pays financièrement participants tournent principalement autour de trois thèmes :

1. Bénéfices pour l'industrie ;
2. Bénéfices de formation ;
3. Bénéfices culturels.

L'un des moyens d'assurer de bons retours sur investissement consiste à accroître la durabilité de la diffusion des bénéfices liés à la passation des marchés, en permettant à un plus grand nombre d'entreprises dans les différentes régions de participer avec succès aux futurs marchés publics liés aux collisionneurs et d'exploiter la chaîne de valeur créée par les contrats. Cela concerne :

- l'uniformisation des règles du jeu afin que davantage d'entreprises puissent participer à la procédure de gestion des achats ;
- le soutien aux PME, car ce sont les entreprises les plus susceptibles d'être confrontées à des obstacles dans le cadre de la procédure de passation des marchés ;
- l'intégration d'un plus grand nombre d'entreprises dans la chaîne de valeur des marchés publics ;
- la décarbonisation de la chaîne d'approvisionnement par le biais de contrats globaux d'alimentation en énergie ou de contrats d'achat d'électricité (CAE) et de communautés énergétiques qui permettent de mettre en commun des contrats d'énergie renouvelable pour des groupes de fournisseurs et des marchés plus importants.

Un autre levier consiste à favoriser la circulation des cerveaux. Le CERN est un lieu d'étude et de travail attrayant pour des personnes du monde entier. Cependant, nombre de ces personnes talentueuses finissent par rester à l'étranger une fois leur participation au projet terminée, ce qui entraîne ce que l'on appelle souvent une fuite des cerveaux pour leur pays d'origine. Les politiques suivantes peuvent contribuer à faire en sorte que davantage d'endroits bénéficient de la formation du capital humain dans le cadre d'un processus vertueux de circulation des cerveaux :

- Comprendre les besoins locaux en matière de talents afin que les États membres et leurs régions puissent mieux cibler le rapatriement des personnes ;
- Attirer les anciens stagiaires du CERN grâce à des initiatives personnalisées ;
- Renforcer la connectivité afin que les régions d'origine et de destination bénéficient d'un développement du capital humain.

Un autre levier consiste à étendre les bénéfices du tourisme et à y associer davantage de régions. Grâce au nouveau Portail de la science, 350 000 à 400 000 personnes visitent le CERN chaque année. Cependant, la plupart des bénéfices touchent un petit périmètre géographique en Suisse et en France, où se trouve le CERN. L'un des moyens pour que davantage de régions puissent en tirer parti consiste à veiller à ce que le périmètre élargi du FCC bénéficie des visites sur place. D'autres développements pourront ensuite être réalisés pour faire du CERN une porte d'entrée pour le tourisme scientifique.

Les économistes ont élaboré des propositions qui peuvent être prises en compte lors de la phase de développement du projet afin d'aider les pays participants à tirer le meilleur parti des opportunités offertes par un nouveau projet d'envergure. Une possibilité pour un pays contributeur serait de mettre en place une organisation nationale dotée d'un personnel spécialisé qui viserait à développer les correspondances les plus adéquates entre les compétences et les intérêts du pays et le projet. Une telle activité va au-delà de la liaison industrielle classique. Elle vise à intégrer les écoles, les universités, les centres de recherche, les entreprises de toutes tailles et les agences nationales de financement par le biais de politiques de développement et d'actions concrètes dans le cadre du projet. Cela nécessite une connaissance approfondie du projet, en veillant à ce que le personnel de l'organisation soit impliqué à long terme pour pouvoir établir des liens durables et acquérir une connaissance complète du paysage des compétences et des capacités nationales. Les recettes directes provenant des marchés publics ne sont que la partie émergée d'un iceberg d'impacts potentiels. Les rendements à long terme peuvent dépasser de loin ceux des contrats directs. Cela concerne notamment :

- le rapatriement des personnes et l'acquisition de personnel hautement qualifié et formé dans le cadre du projet ;
- la formation des ressortissants à tous les niveaux pour des périodes limitées à l'étranger ;
- l'utilisation du projet comme une usine pilote, la démonstration de technologies, leur commercialisation et la pénétration de nouveaux marchés ;
- la construction de chaînes des valeurs transnationales durables, en utilisant le projet comme moteur de l'innovation nationale et en tirant parti des fonds nationaux ;
- la mise en réseau d'entreprises de tailles différentes ;
- le décloisonnement de la recherche en réunissant des universités et des instituts de différentes disciplines autour d'un même projet scientifique.

L'ensemble du concept vise à surmonter les asymétries d'informations qui ne privilégient qu'un petit nombre d'entreprises et d'universités bénéficiant de liens historiques leur permettant de profiter des projets scientifiques d'envergure du CERN.

Tous les efforts visant à planifier un bon retour sur investissement pour les pays participant financièrement reposent sur une analyse systématique, un suivi et une évaluation régulière des performances socio-économiques permettant d'adapter le projet. Il existe suffisamment de preuves des bénéfices socio-économiques des activités du CERN par différentes voies, mais il y a encore des lacunes dans la compréhension de ce qui est nécessaire pour accroître et maintenir ces effets. Faire de la collecte et de l'évaluation des données une partie intégrante du projet FCC peut aider à définir les objectifs de la collecte de données et les approches méthodologiques pour en mesurer les effets.

Les recommandations documentées par LSE et WIFO pour assurer de bons retours sur investissement pour les pays participants fournissent des exemples spécifiques et tangibles de cas de réussite pour chaque recommandation politique basée sur des initiatives passées. Un avantage significatif de plusieurs propositions réside dans leur caractère autonome : elles peuvent être mises en œuvre individuellement. Nombre d'entre elles peuvent également être mises en œuvre par des pays et des régions de manière indépendante, ce qui leur permet de tirer profit d'un projet sans avoir à impliquer d'autres pays participants.

4.9.2. Opportunités d'emploi au niveau local

Une future infrastructure de recherche avec un développement territorial supplémentaire peut conduire à des bénéfices territoriaux à travers l'emploi direct, la fourniture de biens et de services, les opportunités d'emploi indirectes et induites dans un périmètre plus large que celui des activités actuelles du CERN. Les impacts indirects et induits ne concernent pas seulement la chaîne de valeur des biens et services fournis au niveau régional, c'est-à-dire les autres fournisseurs de matériaux et de services pour satisfaire les besoins des fournisseurs du FCC et les emplois satisfaisant aux besoins liés à la présence du personnel associé aux activités de construction et d'exploitation du FCC aux environs des sites de surface. La fédération de certaines activités liées à la construction et à l'exploitation, c'est-à-dire les prestations au service des infrastructures de recherche à certains endroits, peut également créer des opportunités d'emploi nouvelles et durables au plan territorial. Ces services comprennent, par exemple, la planification du projet de construction, la gestion du projet, la préparation et l'exploitation du site de construction et les services commerciaux (par exemple, la comptabilité, les ressources humaines, les technologies de l'information, la gestion des parcelles de terrain). Les services de la phase d'exploitation comprennent, par exemple, la surveillance et la sécurité des sites de surface, les services d'exploitation technique, la maintenance technique, l'exploitation des installations de visite et les services commerciaux généraux, comme c'est le cas pour la phase de construction.

Les potentiels d'impact économique, en particulier les effets liés à l'emploi, sont encore en cours d'étude et dépendent des fournitures et des services considérés, ainsi que des lieux où ils pourront se concrétiser. L'analyse préliminaire fait état d'opportunités de l'ordre de 1 000 à 2 000 emplois sur une période prolongée jusqu'à la fin du siècle. Les effets sont principalement liés aux dépenses des ménages dont ces personnes font partie, représentant par an environ 219 millions d'euros pour la région Auvergne-Rhône-Alpes. Les avantages directs liés à la fiscalité sont estimés entre 2,6 (au plan régional) et 3,3 (au plan national) millions d'euros par an. Les impacts fiscaux indirects et induits se situent entre 3,6 (au plan régional) et 4,1 (au plan national) millions d'euros. Les principaux secteurs qui bénéficieraient de ces avantages sont le commerce, le logement, les travaux de construction spécialisés, le génie civil et les travaux publics, le commerce, l'industrie manufacturière et les équipements spécialisés, la transformation des matériaux, les services financiers et d'assurance, la transformation chimique, la production et la distribution d'énergie, les biens et services culturels, la restauration et les télécommunications.

Ces résultats préliminaires sont à prendre avec beaucoup de précaution, car le scénario du projet, l'organisation de la construction et de l'exploitation sont à un stade très précoce et susceptibles d'évoluer.

4.9.3. Opportunités de création d'impacts

Les recommandations politiques suivantes sont des exemples tirés des études réalisées par des organisations de recherche économique indépendantes, visant à générer des retours sur investissement au plan régional dans le cadre d'un projet global.

- Les pays participants mettent en place des organisations nationales de soutien pour mettre en relation différents acteurs (entreprises, universités, centres de recherche, pôles d'innovation, agences nationales de financement) avec le nouveau projet de recherche afin d'obtenir un effet de levier aussi important que possible au-delà de la passation pure et simple d'un contrat ;
- Piloter les technologies ;
- Commercialiser les technologies ;
- Former les personnes ;
- Exploiter les possibilités de recherche scientifique ;
- Obtenir un financement national pour les développements motivés par le nouveau projet ;
- Attirer des personnes hautement qualifiées et formées au moyen de salons de l'emploi ;
- Transférer les connaissances du projet aux universités et aux entreprises.
- Passer à une approche normalisée des appels d'offres, ce qui implique l'adoption de mots-clés et de codes normalisés et la publication des appels d'offres auprès d'un public plus large, par exemple dans le supplément

au Journal officiel de l'Union européenne (TED). Cela permet de réduire les coûts de recherche pour les entreprises et d'augmenter les opportunités pour les petites et moyennes entreprises (PME).

- Utiliser le système de code international standard NACE (La Nomenclature statistique des activités économiques dans la Communauté européenne (NACE) est le système de classification standard industriel utilisé dans l'Union européenne.) pour s'assurer que les entreprises reçoivent des demandes de participation qui correspondent bien à leurs compétences et pour s'assurer que les pays peuvent faire correspondre efficacement leurs spécialisations aux besoins du projet.
- Mettre en place des centres de soutien spécialisés au sein des bureaux des associations professionnelles locales dans les régions où sont concentrés des groupes d'entreprises actives dans les secteurs concernés par le projet. Ces centres offriront un soutien spécialisé aux PME régionales qui souhaitent s'engager dans le processus de passation de marchés.
- Dégrouper les grands contrats afin d'accroître la possibilité pour les PME de participer au processus de passation des marchés tout en renforçant la robustesse de la chaîne d'approvisionnement.
- Réserver aux PME les contrats de moindre valeur, si elles satisfont aux critères de compétitivité en matière de qualité et de prix.
- Réaliser une cartographie de la chaîne de valeur pour les différentes technologies requises afin de comprendre la distribution spatiale des activités de passation de marchés et, pour les régions, afin de mieux comprendre les opportunités de compétitivité locale ;
- Créer des unités de contenu local (LCU) en tant qu'organes ou fonctions distincts à développer au sein des agences de développement régional existantes dans les régions où se trouvent d'importants fournisseurs du CERN. Elles peuvent également être établies et coordonnées directement par le CERN en tant qu'« unité d'accélération des impacts économiques locaux ».
- Créer des alliances entre les régions ayant des secteurs pertinents pour le projet afin de faciliter la collaboration interrégionale et le partage des connaissances.
- Le CERN pourra faciliter la conclusion de contrats d'achat d'électricité (CAE) globaux en agissant en tant que locataire principal ou en encourageant la création de consortiums. Il est également possible de créer des contrats d'alimentation en énergie ou des CAE pour des marchés plus importants et des groupes de fournisseurs dans le cadre d'approvisionnements spécifiques. Par ailleurs, les communautés énergétiques qui existent dans d'autres pays constituent un exemple efficace d'obtention d'électricité à des fins de production et de fabrication à partir de sources d'énergie renouvelables. Certaines conditions peuvent être incluses dans les exigences en matière de passation de marchés.
- Les régions identifiées comme Fournisseurs de talents devraient procéder à une analyse complète du type de compétences que la région doit attirer, en mettant l'accent sur le profil des talents locaux qui ont quitté leur région pour rejoindre le CERN.
- Créer et promouvoir des opportunités au moyen de subventions et de bourses destinées aux personnes hautement qualifiées afin qu'elles s'installent dans leur région.
- Offrir des incitations au rapatriement dans leur région d'origine aux personnes qui ont fait un séjour au CERN.
- S'engager avec le personnel du CERN et les anciens stagiaires à l'étranger, par des programmes d'échange de connaissances et d'entrepreneuriat, des programmes de mentorat et des distinctions.
- Élaborer, en collaboration avec les offices de tourisme et d'autres centres de recherche, des circuits touristiques scientifiques qui présentent des attractions scientifiques supplémentaires dans toute l'Europe et des pôles technologiques combinés à d'autres activités.
- Établir un flux de financement pour l'évaluation de l'impact socio-économique et la collecte de données dès le début du projet FCC.
- Exploiter un portail de données ouvertes qui incite les spécialistes des sciences sociales à utiliser le CERN pour continuer à évaluer l'impact socio-économique de l'investissement dans le domaine scientifique.

4.10. Exigences et contraintes pour une phase préparatoire

La phase ultérieure de conception et de préparation exige une conception plus détaillée des infrastructures techniques sur la base d'exigences systématiquement identifiées et correctement structurées et documentées pour le collisionneur de particules et les expériences. Cette documentation doit être utilisée pour réaliser une ACV conformément aux normes et aux bonnes pratiques déjà utilisées pour l'analyse de l'empreinte de la construction.

En raison de l'absence de conception détaillée, des longues échelles de temps et de la nécessité de développer un scénario d'approvisionnement particulier pour une étude, une approche de plus haut niveau pourra être adoptée pour l'estimation des effets potentiels des accélérateurs de particules et des expériences sur le climat. Il faut cependant veiller à éviter une approche trop simpliste en se concentrant uniquement sur l'analyse générique de l'empreinte carbone des matériaux supposés. Dans la mesure du possible, des systèmes complets doivent être envisagés et, lorsque cela n'est pas possible, des hypothèses raisonnables sur les processus de fabrication, d'assemblage et d'installation doivent être formulées et incluses dans le processus d'analyse.

En ce qui concerne l'utilisation des énergies renouvelables, il est important de mettre en place une équipe chargée des achats d'énergie, en mesure de préparer l'élaboration de contrats d'approvisionnement ou de contrats d'achat. L'équipe doit élaborer une stratégie et préparer la mise en place d'un portefeuille d'approvisionnement en énergie en vue des phases d'essai, de mise en service et d'exploitation. La préparation de l'approvisionnement en énergie pour la phase de construction doit être entamée dès que possible. Un délai de dix ans est considéré comme adéquat pour le processus de préparation et d'acquisition des énergies renouvelables pour la phase d'exploitation.

Les possibilités d'approvisionnement en chaleur fatale et de réduction de la consommation d'eau dépendent de la volonté des parties prenantes nationales de mettre en place des réseaux de chauffage urbain et de travailler avec le CERN sur le traitement de l'eau et l'approvisionnement en eau traitée au niveau régional. Par conséquent, des conceptions locales, des plans d'exploitation et des projets pilotes spécifiques devront être mis en place avant que l'infrastructure de recherche ne soit supposée entrer en phase d'exploitation. Un délai de 20 ans est suffisant, compte tenu des autorisations, du financement, de la mise en place des opérateurs locaux et du raccordement des consommateurs sur le réseau de chauffage urbain.

En ce qui concerne l'intégration paysagère, l'élaboration de projets de renaturation, l'utilisation des matériaux excavés et la conception d'actions de compensation, il faut suffisamment de temps pour travailler avec les parties prenantes locales et régionales. Cela nécessite également l'allocation de ressources internes au projet pour établir des contrats avec des partenaires externes et pour travailler avec eux, ainsi qu'avec les communautés et l'administration publique. Plusieurs années devraient être consacrées au renforcement de ces capacités. Il est donc nécessaire d'établir un calendrier permettant de travailler avec les parties prenantes locales et régionales de manière flexible, en évitant d'accumuler trop de pression. En effet, une telle pression peut nuire à la conclusion d'accords mutuels et à l'obtention d'un consensus sur les projets de développement territorial et la génération de bénéfices socio-économiques à tous les niveaux.

4.11. Recommandations pour un projet de phase préparatoire

Cette section présente une série de recommandations issues des travaux présentés dans cette analyse. Leur objectif est de garantir que les bénéfices pourront être contrôlés et faire l'objet de rapports réguliers afin que les résultats actualisés puissent être intégrés dans les phases de conception, de construction et d'exploitation de l'infrastructure.

L'étude socio-économique a montré qu'il est possible d'atteindre un seuil de rentabilité des coûts et des bénéfices grâce à l'infrastructure de recherche FCC-ee, avec les voies d'impact documentées jusqu'à présent. Toutefois, le potentiel ne peut être pleinement exploité que si un suivi continu des impacts socio-économiques est intégré aux phases de conception, de construction et d'exploitation de l'infrastructure. Pour atteindre cet objectif, le groupe d'experts en économie (CSIL, LSE, WIFO, Université de Milan, Université économique de Vienne) qui a participé aux études socio-économiques jusqu'à présent a formulé neuf recommandations à l'attention des maîtres d'ouvrage du FCC.

1. Affecter des ressources humaines et matérielles adéquates à l'identification, à la conception, à la planification, à la mise en œuvre, au suivi et à l'évaluation de l'impact, afin d'exploiter pleinement les potentiels d'impact et de faire du FCC une entreprise durable sur le plan socio-économique. Le personnel doit être habilité à faire en sorte que les résultats de l'évaluation de l'impact et les recommandations relatives à la génération d'impact soient pris en compte dans la conception, le cas échéant, qu'ils soient mis en œuvre et qu'un suivi continu et systématique en soit assuré. En outre, l'analyse doit être réalisée avec l'aide de tous les membres du projet participant au projet. Cela implique que l'évaluation de l'impact socio-économique soit mise en œuvre dans l'ensemble de l'organisation, avec la participation directe du plus haut niveau de gestion et en rendant compte directement à la principale partie prenante du CERN, le Conseil. Cette approche devrait garantir la durabilité et l'efficacité du processus et contribuer à améliorer l'acceptation du projet par les pays qui y participent financièrement.
2. Encourager les participants à publier leurs travaux scientifiques et techniques par la Voie dorée (ou « Gold Open Access ») (par opposition à l'auto-édition) et par des diffuseurs réputés (par opposition au dépôt d'informations sur des serveurs de prépublication uniquement). Cela permet d'identifier correctement les travaux à des fins de suivi et d'augmenter la probabilité qu'ils soient adoptés. Cette étude d'évaluation de l'impact socio-économique a révélé des difficultés à identifier tous les résultats scientifiques associés aux activités de l'infrastructure de recherche. Il est essentiel de suivre la production scientifique des chercheurs impliqués dans les expériences et de surveiller les citations dans les articles et autres produits scientifiques. Cependant, les résultats scientifiques dépourvus d'identifiants numériques uniques et de références de citation, comme c'est souvent le cas pour les actes d'ateliers et les présentations disponibles sur des plateformes telles qu'Indico, développée par le CERN [245], ne peuvent pas être correctement identifiés et pris en compte pour l'évaluation socio-économique. Ces types de résultats doivent, dans la mesure du possible, être remplacés ou complétés par des rapports ou des documents exploitables. L'établissement de partenariats stratégiques avec des éditeurs de premier plan, comme l'illustre le projet SCOAP3 [246] est une approche convenable pour garantir la présence de publications exploitables. Les plateformes de libre accès utilisées pour la diffusion pourraient intégrer le suivi des téléchargements, des citations et des références si elles n'offrent pas déjà ces fonctions (par exemple, Zenodo[247] et ArXiv [248] n'offrent pas ces fonctions à l'heure actuelle). En outre, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour étendre le contrôle et le suivi du contenu scientifique au-delà des articles et des présentations scientifiques et techniques, afin d'inclure les livres et de mieux comprendre l'assimilation sociétale des connaissances acquises dans le cadre du programme FCC.
3. Prévoir un cadre pour suivre le mouvement des personnes après leur départ du projet, afin de faciliter l'analyse de l'évolution future de leur carrière. Toute personne contribuant au projet pendant une durée minimale devrait être encouragée, sur une base volontaire, à s'engager dans un programme de suivi complet. Grâce à des mécanismes permettant de reprendre contact périodiquement avec ces personnes, cette initiative impliquerait un suivi à long terme et la collecte périodique d'un ensemble d'informations de base concernant leur situation professionnelle actuelle.
4. Pour garantir une analyse efficace des retombées industrielles générées au cours de la mise en œuvre

du projet, il convient d'intégrer un suivi systématique des impacts économiques supplémentaires sur les fournisseurs résultant des actions de passation de marchés sur des périodes pluriannuelles. Étant donné que ces effets peuvent ne pas se manifester immédiatement et se prolonger au-delà de la durée du marché public, il est essentiel d'obtenir un retour d'information de la part des entreprises concernées. Cela nécessite la mise en place d'un cadre complet de suivi des marchés publics en faveur d'un engagement continu. Ce cadre devrait comprendre des dispositions permettant de stocker des informations sur les personnes initialement impliquées dans le contrat, afin de permettre un suivi périodique après la conclusion du contrat. En outre, il devrait faciliter la collecte d'informations essentielles concernant les retombées pour l'entreprise de l'expérience de passation de marchés avec le CERN. Cela peut se faire par le biais de mécanismes tels que de courtes enquêtes en ligne conçues pour recueillir des données pertinentes. En mettant en œuvre cette approche, le programme FCC peut obtenir des informations précieuses sur l'impact économique à long terme de ses activités de passation de marchés, ce qui favorisera l'amélioration continue et renforcera la collaboration avec les partenaires industriels.

5. Les technologies de l'information et de la communication (TIC) ont été identifiées comme une voie d'impact clé qui devra être mieux exploitée par des actions de transmission ciblées à la société, accompagnées d'un suivi systématique de leur adoption. Le CERN et le FCC représentent un environnement unique au monde pour le développement de logiciels et de plateformes destinés à répondre aux besoins des coopérations mondiales, qui sont également très demandés dans les secteurs sociétaux et industriels. En identifiant les exigences spécifiques de ces coopérations et en lançant des projets de développement spécifiques, il est possible de créer un potentiel d'adoption généralisée au-delà du projet FCC. Il faut citer, par exemple la gestion collaborative d'événements, la création de documents, la communication (à la fois individuelle et collective), le partage de fichiers, la gestion de l'information, les réseaux sociaux, les opérations à distance, la cybersécurité, l'informatique distribuée et le traitement des données. Le CERN et les États membres devront veiller à ce que les technologies développées soient accessibles gratuitement aux utilisateurs en dehors de la communauté de la physique des hautes énergies et de la physique des particules, tout en garantissant la maintenance et l'amélioration à long terme. Pour cela, il faut que les logiciels et les outils soient disponibles sur des plateformes qui permettent de suivre le téléchargement et l'installation. Le manque de ces données a été identifié comme l'un des facteurs limitant l'estimation précise de l'impact des TIC.
6. En ce qui concerne l'impact des entreprises dérivées, il est nécessaire d'établir une méthode systématique de suivi des entreprises fondées par d'anciens participants au programme FCC, de suivre leur évolution dans le temps et d'évaluer leur valeur économique. La création de nouvelles entreprises exploitant les connaissances acquises dans le cadre du programme FCC représente un bénéfice sociétal important. Notamment, les entreprises dérivées résultent souvent de l'amalgame des différentes compétences et expériences des participants plutôt que de l'exploitation directe d'une seule technologie sous licence. En particulier, les technologies développées dans le cadre de projets de R&D collaboratifs ne peuvent pas être attribuées au CERN seul et le CERN n'effectue pas de suivi des technologies des partenaires de collaboration. Toutefois, pour évaluer avec précision les bénéfices économiques et sociétaux générés, il est essentiel de mettre en place un mécanisme de suivi volontaire et systématique. Ce cadre de suivi devra faciliter une évaluation complète de l'impact des entreprises dérivées. Il pourra inclure la création d'une base de données centralisée pour enregistrer des informations sur les entreprises dérivées (telles que leurs fondateurs, le pays, le secteur industriel, les produits/services offerts), ainsi que la possibilité de les contacter périodiquement pour être tenu au courant des progrès de leurs entreprises.
7. L'étude a révélé l'importance des bénéfices économiques dus aux visiteurs sur place. Pour assurer un suivi durable de l'impact du tourisme sur le site, le CERN et la collaboration FCC devraient établir un cadre unifié pour collecter en permanence des données essentielles sur les visiteurs des centres d'exposition du CERN, des expériences et de tout autre site de visite pertinent. Un mécanisme de suivi systématique des visiteurs est en effet nécessaire pour rendre compte avec précision des effets des visiteurs sur le site. Les visiteurs devraient être invités à fournir un petit nombre d'informations de base, notamment leur pays d'origine, leur mode de transport jusqu'à Genève, l'objet principal de leur visite, la durée de leur séjour, leurs dépenses et leurs commentaires sur les expositions et les sites de visite (par exemple, leur niveau de satisfaction). En mettant en œuvre ce cadre de suivi, il sera possible de suivre et d'évaluer efficacement l'impact culturel des visiteurs sur le site, ainsi que

- d'améliorer continuellement l'expérience des visiteurs.
8. L'identification et la quantification des bénéfices potentiels pour l'environnement et le développement de projets spécifiques devraient être intensifiés. L'identification et l'analyse des bénéfices environnementaux sont importantes pour l'acceptabilité sociale et pour parvenir à un bilan net à zéro de l'activité de recherche scientifique pour la société. Cela nécessite la mise en place et l'habilitation d'experts en économie et en environnement lors de la prochaine phase de préparation du projet et une coopération renforcée avec les partenaires industriels et les services de l'État hôte, afin d'identifier de manière fiable les bénéfices et les coûts environnementaux potentiels associés au projet. Outre la création de sources d'énergie renouvelable, la réutilisation de la chaleur fatale et la réutilisation des matériaux excavés, d'autres possibilités peuvent être découvertes grâce à des recherches supplémentaires et à des discussions approfondies avec les parties prenantes du projet. Par exemple, les voies d'impact liées à l'utilisation de l'eau, à la gestion des terres, à la conservation de la biodiversité et aux infrastructures de transport doivent faire l'objet d'un examen approfondi. L'évaluation des impacts négatifs potentiels sur l'environnement est tout aussi importante. Il est essentiel de comprendre et d'atténuer les effets négatifs tels que la pollution pour obtenir des résultats durables et garantir une utilisation responsable des ressources naturelles.
 9. Le contrôle continu de ce que l'on appelle la « valeur du bien commun » a été identifié comme une approche appropriée pour valider les investissements par rapport aux attentes des bailleurs de fonds, qui sont en fin de compte les contribuables. Cette approche devrait être renforcée par des enquêtes menées dans tous les pays susceptibles d'être des bailleurs de fonds et répétées régulièrement afin d'améliorer notre compréhension de la manière dont l'acceptation sociale peut non seulement être maintenue mais aussi améliorée. Un cadre de rationalisation de ce processus a été développé dans le cadre de ce projet, ce qui permet de poursuivre l'activité avec des ressources supplémentaires marginales. L'extension de la collecte de données à d'autres pays, en plus de ceux qui ont déjà fait l'objet d'une enquête, peut fournir des indications sur les facteurs qui influencent la perception du programme FCC par la population. Les conclusions devraient être régulièrement communiquées à la direction du CERN et au Conseil, et résumées en vue d'une diffusion plus large auprès de toutes les parties prenantes, y compris le public, par le biais de canaux tels que les plateformes de médias sociaux du CERN et ses principaux sites web.

5. Références

- [1] L. Ulrici. Stratégie de gestion et d'usage des matériaux excavés (2025). <https://doi.org/10.5281/zenodo.14923266>
- [2] L. Ulrici. Excavated materials management and use strategy (2024). <https://doi.org/10.5281/zenodo.13785651>
- [3] Association français des tunnels et de l'espace souterrain. La gestion et l'emploi des matéri-aux excavés. GT35R1F2 (2017). URL <https://www.aftes.fr/fr/product/la-gestion-et-lemploi-des-materiaux-excaves-gt35r1f2/>
- [4] Centre d'Études des Tunnels. Matériaux géologiques excavés en travaux souter-rains. spécificités, scénarios de gestion et rôle des acteurs.CETU information doc-ument (2016).URL https://www.cetu.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/cetu_di_gestion_des_materiaux_05-2016-version_corrige-bd.pdf
- [5] Swiss Federal Council. Ordinance on the avoidance and the disposal of waste. ADWO 814.600 (2016). URL <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2015/891/en>
- [6] Swiss Federal Council. Verordnung über den verkehr mit abfällen (VeVA). AS 2005 4199 (2005). URL <https://www.fedlex.admin.ch/eli/oc/2005/551/de>
- [7] UN Environment Programme. Basel convention on the control of transboundary movements of hazardous wastes and their disposal (2014). URL <https://www.basel.int/portals/4/basel%20convention/docs/text/baselconventiontext-e.pdf>
- [8] European Union. Directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil du 19 novem-bre 2008 relative aux déchets et abrogeant certaines directives. JO L 312 du 22 novembre, pp 3–30 (2008). URL <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/ALL/?uri=celex%3A32008L0098>
- [9] Direction générale de la prévention des risques. Guide de valorisation hors site des terres excavées non issues de sites et sols pollués dans des projets d'aménagement. Ministère de la transition écologique et solidaire (2020). URL https://tex-infoterre.brgm.fr/sites/websites/tex-infoterre.brgm.fr/files/documents/2022-10/2020_04_Guide_TEX_Non_SSP.pdf
- [10] Office cantonal de l'environnement (OCEV). Déchets - guide technique des applications recom-mandées dans le cadre du projet ecomatge. Réduisons nos déchets, Exportation de matéri-aux d'excavation non pollués (2018). URL <https://www.ge.ch/document/dechets-guide-technique-applications-recommandees-dans-cadre-du-projet-ecomatge>
- [11] A. Abada, et al., FCC-ee: The lepton collider. The European Physical Journal Special Topics 228(2), 261–623 (2019). <https://doi.org/10.1140/epjst/e2019-900045-4>. URL <https://doi.org/10.1140/epjst/e2019-900045-4>
- [12] J. Gutleber, P. Laidouni, V. Mertens, A. Bibet-Chevalier, P. Boillon, S. Favre, G. Chapellier, F. Gorgerino, C. Tétrel, C. Malan, J. Joos, S. Tissandier, L. Petitpain, M. Sauvain. Synthèse des contraintes et opportunités d'implantation du futur collisionneur circulaire (fcc) (2025). <https://doi.org/10.5281/zenodo.14773243>. URL <https://doi.org/10.5281/zenodo.14773243>
- [13] Ministère de la transition écologique, Commissariat général au développement durable. Guide pour la mise en oeuvre de l'évitement. concilier environnement et aménage-ment des territoires. <https://www.notre-environnement.gouv.fr/themes/evaluation/article/eviter-reduire-compenser-erc-en-quoi-consiste-cette-demarche> (2021).URL https://www.notre-environnement.gouv.fr/IMG/pdf/guide_evitement_vf.pdf
- [14] Cerema. Évaluation environnementale des projets d'infrastructures (2020). URL <https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/evaluation-environnementale-projets-infrastructures>. Accessed: 2025-03-05

- [15] UN Industrial (2019). Development Organisation. International guidelines for industrial parks URL https://www.unido.org/sites/default/files/files/2019-11/International_Guidelines_for_Industrial_Parks.pdf
- [16] International Organization for Standardization. ISO 14006:2020 Environmental management systems — Guidelines for incorporating ecodesign (2020). Available at: <https://www.iso.org/standard/72644.html>
- [17] Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-related products. EUR-Lex European Union law site (2009). URL <http://data.europa.eu/eli/dir/2009/125/oj>
- [18] N. Gunningham, R.A. Kagan, D. Thornton, Social Licence and Environmental Protection: Why Businesses Go Beyond Compliance. *Law & Social Inquiry* 29(2), 307–341 (2004)
- [19] ISO. Iso 14001:2015 environmental management systems (2015). URL <https://www.iso.org/standards/popular/iso-14000-family>
- [20] International Organization for Standardization. ISO 31000:2018 Risk management — Guidelines (2018). Available at: <https://www.iso.org/standard/65694.html>
- [21] B. Pierre, G. Johannes, L. Patrycja, V. Anne-Laure, Territorial constraint grid for France and Switzerland (2023). <https://doi.org/10.5281/zenodo.8403173>. URL <https://doi.org/10.5281/zenodo.8403173>
- [22] B. Fargevieille, J. Frossard. Bilan des garanties (2025). URL <https://www.debatpublic.fr/projet-de-futur-collisionneur-circulaire-fcc-daccelerateur-de-particules-5952>. Accessed: 2025-03-25
- [23] République et Canton de Genève. Guide d'évaluation environnementale stratégique (2025). URL <https://www.ge.ch/document/guide-evaluation-environnementale-strategique>. Accessed: 2025-03-05
- [24] Confédération suisse. Loi fédérale sur la protection de l'environnement (LPE) (1984). URL https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1984/1122_1122_1122/fr. Accessed: 2025-03-05
- [25] S. Opricovic, G.H. Tzeng, Compromise solution by mcdm methods: A comparative analysis of vikor and topsis. *European Journal of Operational Research* 156(2), 445–455 (2004). [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00020-1](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00020-1)
- [26] DREAL Auvergne-Rhône-Alpes. Schéma Régional des Carrières de la région Auvergne-Rhône-Alpes (2021). URL <https://www.auvergne-rhone-alpes.developpement-durable.gouv.fr/src-documents-approuves-a20759.html>. Accessed: 2025-03-25
- [27] Canton of Geneva. Déchets résultant des activités de construction et de démolition – années 2019 à 2021 (2022). URL <https://www.ge.ch/document/dechets-resultant-activites-construction-demolition-annees-2019-2021>. Accessed March 25, 2025
- [28] Canton of Vaud. Statistiques sur les déchets – matériaux d'excavation inertes (2023). URL <https://www.vd.ch/themes/environnement/dechets/statistiques-sur-les-dechets/#c85800>. Accessed March 25, 2025
- [29] G. Kpamegan, L. Philipson, D. Stagnara, Vision stratégique Environnement, Écoconception et Développement durable (2024). <https://doi.org/10.5281/zenodo.14336970>
- [30] Setec and Ecotec and Marceleon, Futur collisionneur circulaire: Analyse de l'état initial de l'environnement. Tech. rep., Setec, Ecotech and Marceleon (2025). <https://doi.org/10.5281/zenodo.14801007>
- [31] Ministère de la Transition Écologique. Cartographie des projets d'envergure nationale (2024). URL <https://artificialisation.developpement-durable.gouv.fr/mesurer-la-consommation-despaces/cartographie-des-projets-denvergure-nationale>. Accessed: 2025-03-25
- [32] M. de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires. Arrêté du 31 mai 2024 relatif à la mutualisation nationale de la consommation d'espaces naturels, agricoles et forestiers des projets d'envergure nationale ou européenne d'intérêt général majeur (2024). URL <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000049676333>. Consulté le 25 mars 2025
- [33] A. Tudora, J. Osborne, V. Mertens, Feasibility study of a trans-Jura FCC scenario with one transfer line from the LHC (2020). <https://doi.org/10.5281/zenodo.4545604>

- [34] O. Brüning, A. Seryi, S. Andrés, Electron-hadron colliders: Eic, lhec and fcc-eh. *Frontiers in Physics* 10, 886473 (2022). <https://doi.org/10.3389/fphy.2022.886473>
- [35] M. Haas, D. Carraro, D. Ventra, M. Plötze, A.D. Haller, A. Moscariello, Integrated stratigraphic, sedimentological and petrographical evaluation for cern's future circular collider subsurface in-frastructure (geneva basin, switzerland-france). *Swiss Journal of Geosciences* 115(1), 16 (2022). <https://doi.org/10.1186/s00015-022-00407-y>
- [36] J. Stanyard, Y. Loo, V. Mertens, J. Osborne, C. Sturzaker, M. Sykes, in 8th International Particle Accelerator Conference (2017). <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2017-TUPVA127>
- [37] A. Abada, et al., FCC-ee: The Lepton Collider: Future Circular Collider Conceptual Design Report Volume 2. *Eur. Phys. J. ST* 228(2), 261–623 (2019). <https://doi.org/10.1140/epjst/e2019-900045-4>
- [38] J. Gutleber. Futur Collisionneur Circulaire: etude de trafic : etat initial (2025). <https://doi.org/10.5281/zenodo.14992820>
- [39] O. Ancelet, P. Boillon, J. Jobs, C. Malan, S. Tissandier. Faisabilité de connexions au réseau autoroutier (2022). <https://doi.org/10.5281/zenodo.8255742>
- [40] Egis (France) and European Organization for Nuclear Research. Ite - hypothèses et méthodologie de l'étude (2024). <https://doi.org/10.5281/zenodo.10633809>
- [41] Egis (France) and European Organization for Nuclear Research. Ite - classification des sites (2024). <https://doi.org/10.5281/zenodo.10528636>
- [42] E. (France), E.O. for Nuclear Research, Note Technique de faisabilité de création d'un ITE en proximité du site PJ (2024). <https://doi.org/10.5281/zenodo.10534566>. URL <https://doi.org/10.5281/zenodo.10534566>
- [43] Egis (France) and CERN, Note Technique de faisabilité de création d'un ITE en proximité du site PL (2024). <https://doi.org/10.5281/zenodo.10534572>. URL <https://doi.org/10.5281/zenodo.10534572>
- [44] Egis (France) and CERN. Diagnostic Environnemental - Site de Charvonnex (2024). <https://doi.org/10.5281/zenodo.10533655>
- [45] Egis (France) and European Organization for Nuclear Research, Note Technique de faisabilité de création d'un ITE en proximité du site PG (2024). <https://doi.org/10.5281/zenodo.10534517>
- [46] Egis (France) and CERN. Diagnostic environnemental - site de la roche sur foron (2024). <https://doi.org/10.5281/zenodo.10533313>
- [47] Egis (France) and CERN. Diagnostic environnemental - site d'eteaux (2024). <https://doi.org/10.5281/zenodo.10532758>
- [48] Egis (France) and CERN, Note Technique de faisabilité de création d'un ITE en proximité du site PF (2024). <https://doi.org/10.5281/zenodo.10534351>
- [49] Egis (France) and CERN. Bande convoyeuse pour connexion ite des sites pj & pg (2024). <https://doi.org/10.5281/zenodo.10517186>
- [50] J. Gutleber. Renewable energy supply feasibility analysis (2023). <https://doi.org/10.5281/zenodo.10023947>
- [51] S. Auchapt, J. Schabram. Future Circular Collider: Clean Energy Supply Study (2023). <https://doi.org/10.5281/zenodo.7781077>
- [52] Meta. Meta 2024 sustainability report (2024). URL <https://sustainability.atmeta.com/wp-content/uploads/2024/08/Meta-2024-Sustainability-Report.pdf>. Accessed: 2025-01-18
- [53] J.F. Billerot, O. Bonnard. Étude exploratoire pour le raccordement du FCC au Réseau Public de Transport d'électricité français (2024). <https://doi.org/10.5281/zenodo.13364463>
- [54] J.P. Buri, Faisabilité du SIG d'alimentation en eau pour FCC au point LHC Pt8 (2023). <https://doi.org/10.5281/zenodo.10014173>
- [55] P. Charitos, D. Goldsworthy. Mining the future® innovation challenge results (2022). <https://doi.org/10.5281/zenodo.10014173>

<https://doi.org/10.5281/zenodo.7271364>

- [56] D.J. Roche, Carlo Ratti Associati uses excavated earth to form a green roof on a new company canteen for Mutti in Italy's Food Valley. The Architect's Newspaper (2024). URL <https://www.archpaper.com/2024/12/mutti-italys-food-valley-carlo-ratti-associati/>
- [57] UNECE. Aarhus agreement ratification status online (2023). URL <https://unece.org/environment-policy/public-participation/aarhus-convention/status-ratification>
- [58] United Nations. Espoo agreement ratification status online (1989). URL <https://treaties.un.org/pages/showDetails.aspx?objid=080000028002887c&clang=en>
- [59] J. Gutleber and S. Valette and P. Laidouni, Futur collisionneur circulaire: Aspects environnementaux. Tech. rep., CERN (2025). <https://doi.org/10.5281/zenodo.14801032>
- [60] D. Mauree. FCC Construction Carbon Footprint Benchmark and Optimisation Strategies (2024). <https://doi.org/10.5281/zenodo.13899160>
- [61] CERN. Volume 3 CERN Environment Report (2023). <https://doi.org/10.25325/CERN-Environment-2023-003>
- [62] Alliance HQE GBC, France. High-quality environmental certification (1996). URL <https://www.hqegbc.org/>
- [63] CERN's main objectives for the period 2021-2025. Restricted Council - Two-Hundred-and-Fourth Session (2021). URL <https://cds.cern.ch/record/2783560>
- [64] European Organization for Nuclear Research (CERN). Accord relatif à la radioprotection entre le conseil fédéral suisse et l'organisation européenne pour la recherche nucléaire (2010). URL https://legal-service.web.cern.ch/system/files/downloads/Accord%20Radio%20protection%20CERN%20FR%20CH-2010_0.pdf
- [65] J. Gutleber. Renewable energy supply feasibility analysis (2023). <https://doi.org/10.5281/zenodo.8074977>
- [66] RTE. Programmes pluriannuels de l'énergie (PPE). <https://www.ecologie.gouv.fr/programmes-pluriannuels-lenergie-ppe> (2023). Accessed: 2023-10-13
- [67] RTE. Rationalising the way in which the grid is operated (2020). URL <https://www.rte-france.com/en/accelerate-energy-transition/rationalised-use-grid>
- [68] RTE Bilan Electrique 2023, rapport complet. https://assets.rte-france.com/analyse-et-donnees/2024-03/Bilan%20l%27electrique%202023%20rapport%20complet_29fev24.pdf (2024)
- [69] Réseau de Transport d'Électricité (RTE), Schéma décennal de développement du réseau à horizon 2040. Tech. rep., RTE (2025). URL <https://www.rte-france.com/analyses-tendances-et-prospectives/le-schema-decennal-de-developpement-du-reseau>. Accessed: 2025-03-08
- [70] World Resources Institute, GHG Protocol Scope 2 Guidance. <https://ghgprotocol.org/corporate-standard> (2022). URL https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2022-12/Scope2_ExecSum_Final.pdf
- [71] Lazard's levelized cost of energy+, version 2023. URL <https://www.lazard.com/research-insights/levelized-cost-of-energyplus/>. Accessed: 2023-10-13
- [72] International Energy Agency, Managing seasonal and interannual variability of renewables. Tech. rep., IEA (2023). URL <https://www.iea.org/reports/managing-seasonal-and-interannual-variability-of-renewables>
- [73] Ember Energy. Ember Energy Website, European Wholesale Electricity Price Data (2025). URL <https://ember-energy.org/data/european-wholesale-electricity-price-data/>
- [74] GINGER BURGEAP. Étude de valorisation de la chaleur du fcc. partie ii : Étude du processus de valorisation et voies d'optimisation (2024). <https://doi.org/10.5281/zenodo.11192180>
- [75] GINGER BURGEAP. Étude de valorisation de la chaleur du fcc. partie iii : Analyse

- technico-économique et technologies complémentaires (2025). <https://doi.org/10.5281/zenodo.14719832>
- [76] GINGER BURGEAP. Étude de valorisation de la chaleur du fcc. partie i : Étude de la con-sommation du territoire et du potentiel de valorisation. (2024). <https://doi.org/10.5281/zenodo.11192000>
- [77] République et canton de Genève. Réseaux thermiques structurants - rts (2024). URL <https://www.ge.ch/installer-remplacer-chauffage/reseaux-thermiques-structurants-rts-0>. Accessed: 2025-03-26
- [78] X. Yuan, Y. Liang, X. Hu, Y. Xu, Y. Chen, R. Kosonen, Waste heat recoveries in data centers: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 188, 113777 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113777>
- [79] CERN. CERN Environment Report 2021-2022 (2022). URL <https://hse.cern/environment-report-2021-2022>
- [80] Paris 2024 Press Office. Paris 2024 Website (2024). URL <https://presse.paris2024.org/actualites/brief-presse-sur-la-strategie-carbone-de-paris-2024-04f7-e0190.html>
- [81] Dittmer, M. and Geraets, F. and Schwiipps, A. Die Klimabilanz Berliner U-Bahn und Strassenbahn planungen (2023). URL <https://klimabilanz-ubahn-tram.de/download/klimabilanz-ubahn-tram-2023-01.pdf>
- [82] CERN. CERN Environment Report 2021-2022 (2023). URL <https://hse.cern/environment-report-2021-2022>. Online; accessed 26-March-2025
- [83] ENGIE. ENGIE Elec'verte contract carbon footprint, Press release (2021). URL <https://particuliers.engie.fr/content/dam/PDF-CP/Dossier-presse-ENGIE-reduction-impact-carbone.pdf>
- [84] European Union Climate Action. France - eu climate action (2023). URL https://climate.ec.europa.eu/document/download/9e28924b-8d69-4338-957a-5a46d0e4e606_en?filename=fr_2023_factsheet_en.pdf. Accessed: March 26, 2025
- [85] CERN, CERN's strategy with respect to the environment Horizon 2030 objectives. Tech. rep., CERN (2024). URL <https://edms.cern.ch/document/3161491/1>
- [86] Gouvernement Français. Code de l'environnement (2020). URL https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000041599138
- [87] C. Bouget, L. Larrieu, H. Brustel, F. Gosselin, Indice de biodiversité potentielle (ibp) : une méthode simple et rapide pour évaluer la biodiversité potentielle des forêts. Revue Forestière Française 66(2), 145–156 (2014). <https://doi.org/10.4267/2042/28373>
- [88] Centre National de la Propriété Forestière (CNPf). Index of Biodiversity Potential (IBP) (2025). URL <https://www.cnpf.fr/ibp-index-biodiversity-potential>
- [89] Grand Genève, Projet d'agglomération de 4ème génération Grand Genève - Rapport principal. Tech. rep., Grand Genève (2021)
- [90] Lemanbleu TV Suisse. Le château voltaire (2018). URL <https://www.lemanbleu.ch/fr/Actualite/Archives/Le-chateau-de-Voltaire-entierement-renove.html>
- [91] A. Galindo, Qu'est-ce que le rayonnement ? IAEA Agence Internationale de l'énergie atomique (2024). URL <https://www.iaea.org/fr/newscenter/news/quest-ce-que-le-rayonnement>
- [92] Direction generale de la sante (DGS), Champs electromagnetiques d'extremement basse frequence. Tech. rep., Ministère des Affaires so-ciales et de la Sante (2014). URL https://sante.gouv.fr/IMG/pdf/Champs_electromagnetiques_extremement_basse_frequence_DGS_2014.pdf
- [93] European Research Infrastructures. European Commission site on strategy for research and in-novation. URL https://research-and-innovation.ec.europa.eu/strategy/strategy-2020-2024/our-digital-future/european-research-infrastructures_en
- [94] A. Stuart, A. Bond, A.M. Franco, J. Baker, C. Gerrard, V. Danino, K. Jonesf, Conceptu-alising

- social licence to operate. Resources Policy (2023). <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103962>
- [95] T. Schwab, A. Andreadakis, C. Bigard, N. Delille, F. Sarrazin, Approche standardisée du dimensionnement de la compensation écologique. guide de mise en œuvre. Tech. rep., Cerema (2021). URL https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/Approche_standardis%C3%A9e_dimensionnement_compensation_%C3%A9cologique.pdf. Accessed: 2025-03-26
- [96] International Standards Organisation, ISO 1408 – monetary valuation of environmental impacts and related environmental aspects (2019)
- [97] International Standards Organisation, ISO 14007:2019 environmental management — guidelines for determining environmental costs and benefits (2019)
- [98] Commissariat Général à l’Investissement. L’évaluation socio-économique des grands projets d’investissements publics. French Government (2018). URL https://www.info.gouv.fr/upload/media/organization/0001/01/sites_default/files_contenu_piece-jointe_2018_06_2015_11_27_eval_socio-eco_et_eval_fin.pdf
- [99] Encouragement of research and innovation (sectoral plan and plan approval procedure) (2024). URL <https://www.parlament.ch/en/ratsbetrieb/suche-curia-vista/geschaeft?AffairId=20240029>
- [100] Seventeen objects pass the parliament stage (2024). URL https://www.parlament.ch/fr/services/news/Pages/2024/20240927094048215194158159026_bsf042.aspx
- [101] Conseil fédéral. Projet mis en consultation: Ordonnance concernant l’approbation des plans des constructions et installations du CERN (OCIC). Confédération Suisse. Fedlex. La plateforme de publication du droit fédéral. (2025). URL https://fedlex.data.admin.ch/eli/dl/proj/2025/3/cons_1
- [102] Autorité environnementale (CGEDD). Note de l’autorité environnementale sur les évaluations socio-économiques des projets d’infrastructures linéaires de transport. In-spection générale de l’Environnement et du Développement durable (IGEDD) (2017). URL https://www.igedd.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/170913_-_note_evaluation_socio-economique_-_deliberee_cle0bea57.pdf
- [103] BMBF, Guidelines for preparing the draft proposal for a large research infrastructure for the national prioritisation process of the federal ministry of education and research. www.wissenschaftsrat.de (2024). URL https://www.wissenschaftsrat.de/download/2024/FIS_Guidelines_Prioritisation
- [104] J. Ferretti, K. Daedlow, J. Kopfmüller, M. Winkelmann, A. Podhora, et al., Framework for reflection on research with societal responsibility. www.nachhaltig-forschen.de (2023). URL https://www.nachhaltig-forschen.de/assets/lena_nachhaltig-forschen/user_upload/20240216_LeNa-Reflexionsrahmen_ENG_v03_HighRes.pdf
- [105] Connecting Europe Facility. CINEA guide on economic appraisal for CEF-T transport projects. European Commission (2022). URL https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/docs/2021-2027/cef/guidance/cinea-guidance-on-economic-appraisal_cef-t_en.pdf
- [106] Economic Commission for Europe. Cost benefit analysis for transport infrastructure projects. UNECE website (2003). URL <https://unece.org/DAM/trans/doc/2008/wp5/CBAe.pdf>
- [107] European Network of Transmission System Operators for Electricity. ENTSO-E guideline for cost benefit analysis of grid development projects. ENTSOE Website (2024). URL https://eepublicdownloads.blob.core.windows.net/public-cdn-container/clean-documents/news/2024/entso-e_4th_CBA_Guideline_240409.pdf
- [108] European Commission, Guide to Cost-Benefit Analysis of Investment Projects (Publications Office of the European Union, European Commission, B-1160 Brussels, Belgium, 2015). <https://doi.org/doi:10.2776/97516>

- [109] European Commission and Directorate-General for Environment, The economic benefits of the Natura 2000 network – Synthesis report (Publications Office, 2013). [https://doi.org/ 10.2779/41957](https://doi.org/10.2779/41957)
- [110] R. Articolio, M. Florio. CBA in decision-making processes of EU-27). CISL Working Paper N. 01/2023 (2023). URL [https://www.csilmilano.com/wp-content/uploads/2023/12/ WP2023_01.pdf](https://www.csilmilano.com/wp-content/uploads/2023/12/WP2023_01.pdf)
- [111] F. Giffoni, S. Vignetti, Assessing the socioeconomic impact of research infrastructures: A systematic review of existing approaches and the role of cost-benefit analysis. *L'industria, Rivista di economia e politica industriale* 1, 75–102 (2019). <https://doi.org/10.1430/94060>
- [112] OECD, Cost-Benefit Analysis and the Environment (OECD, 2018), p. 456. <https://doi.org/10.1787/9789264085169-en>
- [113] J. Montalvo, J. Raya. Economic and Social Impact of ALBA II (2023). URL https://www.cells.es/en/science-at-alba/alba-ii-upgrade/socioeconomicimpact_albait-eng.pdf
- [114] VertigoLab. Etude d'impact socio-économique de SOLEIL. Site web VertigoLab (2020). URL <https://vertigolab.eu/portfolio/etude-dimpact-socio-economique-de-soleil-methode-multiplificateur/>
- [115] H. Kroll, T. Stahlecker, A. Zenker, Impact-Studie für die Synchrotronstrahlungsquelle PETRA III im Kontext des Forschungs- und Innovationsökosystems DESY. Tech. rep., DESY (Deutsches Elektronen-Synchrotron) (2023). <https://doi.org/10.24406/publica-19299>. Accessed: 2025-03-10
- [116] G. Battistoni, M. Genco, M. Marsilio, C. Pancotti, S. Rossi, S. Vignetti, Cost–benefit analysis of applied research infrastructure. Evidence from health care. *Technological Forecasting and Social Change* 112, 79–91 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2016.04.001>
- [117] M. Florio, S. Forte, E. Sirtori, Cost-Benefit Analysis of the Large Hadron Collider to 2025 and beyond. Tech. rep., CERN (2015). URL <https://cds.cern.ch/record/2036479>
- [118] A. Bastianin, Findings from the LHC/HL-LHC Programme (Springer International Publishing, Cham, 2021), pp. 71–77. https://doi.org/10.1007/978-3-030-52391-6_10
- [119] A. Bastianin, M. Florio, Social Cost Benefit Analysis of HL-LHC. Tech. rep., CERN, Geneva (2018). URL <https://cds.cern.ch/record/2319300>
- [120] A. Bastianin, C. F. Del Bo, M. Florio, F. Giffoni, Projecting the socio-economic impact of a big science center: the world's largest particle accelerator at CERN. *Applied Economics* 55(49), 5768–5789 (2023). <https://doi.org/10.1080/00036846.2022.2140763>
- [121] A. Magazinik, Investigating the Societal Impact of Large Research Infrastructure : A Study on the Compact Linear Collider at CERN. Ph.D. thesis, Tampere U. (2022). URL <https://cds.cern.ch/record/2836841>. Presented on 2022-11-11
- [122] CSIL and CERN. Socio-economic impacts of the lepton collider-based research infrastructure (2024). <https://doi.org/10.5281/zenodo.10653396>
- [123] S. Cuccuru, L. Vargiu, L. Deidda, B. Biagi, G. Atzeni, Einstein Telescope: An Assessment of Its Economic, Social and Environmental Impact in Sardinia (Smashwords, 2021)
- [124] A. Boisdet, J. Maurice. Contre-expertise de l'évaluation socio-économique du projet de réseau de chaleur et de froid sur l'aquifère de l'Albien de l'établissement public Paris-Saclay (2015). URL https://www.info.gouv.fr/upload/media/organization/0001/01/sites_default/files_contenu_piece-jointe_2021_04_ce_chaleur_saclay.pdf
- [125] K. Bouabdallah, S. Larger, P.Y. Steunou. Contre-expertise de l'évaluation socio-économique du projet de construction d'un campus santé à Nantes (2020). URL https://www.info.gouv.fr/upload/media/organization/0001/01/sites_default/files_contenu_piece-jointe_2021_04_rapport_ce_qhu_version_finale_propre.pdf
- [126] A. Walsh, J. Merker, A. de Hernandez, A. O'Connor. The Value of CSIRO: The Broader Impact of CSIRO's Portfolio of Activities. CSIRO Website (2022). URL <https://www.csiro.au/en/about/Corporate-governance/Ensuring-our-impact/Auditing-our-impact/2022->

impact-assessment

- [127] D. Adamst, A. Tiplady, F. Sgard. Integration of socio-economic impact into the development of the square kilometre array (ska) in south africa. OECD Science, Technology and Industry Working Papers, OECD Publishing, Paris (2023). <https://doi.org/10.1787/04438223-en>
- [128] B. Dervaux, L. Rochaix, et al. L'évaluation socioéconomique des effets de santé des projets d'investissement public (2022). URL https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/fs-2022-rapport-sante-mars_0.pdf
- [129] A. Palmisano, Realizzazione di un parco agrivoltaico avanzato di potenza nominale pari a 24 MWp denominato "MACOMER" sito nei comuni di Macomer e Borore (NU). Tech. rep., Enerland Italia s.r.l. (2023). URL <https://va.mite.gov.it/it-IT/Oggetti/Documentazione/9533/14003>
- [130] Linee guida operative per la valutazione degli investimenti in opere pubbliche. Ministero delle infrastrutture e dei trasporti (2022). URL https://www.mit.gov.it/nfsmigtgov/files/media/documentazione/2022-09/LINEE%20GUIDA%20SETTORE%20IDRICO_14.09.2022.pdf
- [131] European Commission. ESFRI roadmap entry submission form on-line (2023). URL https://www.esfri.eu/sites/default/files/ESFRI_Roadmap2026_Proposal_Submission_Questionnaire_FINALv2.pdf
- [132] European Strategy Forum on Research Infrastructures (ESFRI). Esfri roadmap 2026 – public guide (2024). URL https://www.esfri.eu/sites/default/files/ESFRI_Roadmap2026_Public%20Guide_approved_FINAL.pdf. Accessed: 2025-03-16
- [133] European Commission. European Research Area (ERA) website (2023). URL https://research-and-innovation.ec.europa.eu/strategy/strategy-2020-2024/our-digital-future/european-research-area_en
- [134] European Commission. European Strategy Forum on Research Infrastructures (2025). URL <https://www.esfri.eu>
- [135] European Commission. European Research Infrastructure Consortium (ERIC) (2023). URL https://research-and-innovation.ec.europa.eu/strategy/strategy-2020-2024/our-digital-future/european-research-infrastructure/eric_en
- [136] Regulation (EU) 2021/695 of the European Parliament and of the Council establishing Horizon Europe – the Framework Programme for Research and Innovation. EUR-Lex European Union law site (2021). URL <http://data.europa.eu/eli/reg/2021/695/oj>
- [137] ESFRI Long Term Sustainability Working Group, Long-Term Sustainability of Research Infrastructures, vol. 2 (ESFRI Scripta, published by Dipartimento di Fisica - Università degli Studi di Milano, Italy, 2017). URL https://www.esfri.eu/sites/default/files/u4/esfri_scripta_vol2_web.pdf
- [138] ESFRI - European Strategy Forum on Research Infrastructures, Guidelines in cost estimation of research infrastructures. Tech. rep., ESFRI (2020). URL https://www.esfri.eu/sites/default/files/StR-ESFRI2_STUDY_RIs_COST_ESTIMATION_0.pdf
- [139] J. Kolar, G. Lutz, K. Angelieva, J. Angelis, B. Brecko, M. Chamberlain, E. Guittet, F. Karayan-nis, J. Plaskan, M. Ryan, D. Sobczak, P. Wenzel-Constabel, ESFRI policy brief on assessment of impact of research infrastructures. Tech. rep., ESFRI (2023). <https://doi.org/10.5281/zenodo.8091633>
- [140] OECD. Better Criteria for Better Evaluation (2025). URL <https://www.oecd.org/dac/evaluation/revised-evaluation-criteria-dec-2019.pdf>
- [141] European Commission. European Research Infrastructure Consortium (ERIC) (2025). URL <https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/better-regulation-guidelines-impact-assessment.pdf>
- [142] Regulation (EU) No 1303/2013 of the European Parliament and of the Council of 17 December 2013 laying down common provisions on the European Regional Development Fund, the European Social Fund, the Cohesion Fund, the European Agricultural Fund for Rural Development and the European Maritime and Fisheries Fund and laying down general provisions on the European Regional Development Fund, the

European Social Fund, the Cohesion Fund and the European Maritime and Fisheries Fund and repealing Council Regulation (EC) No 1083/2006 – Article 100 (2013). URL <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32013R1303>. Accessed: 2025-03-16

[143] European Commission, Economic Appraisal Vademecum 2021-2027 (Publications Office of the European Union, European Commission, B-1049 Brussels, Belgium, 2021). [https://doi.org/ 10.2776/182302](https://doi.org/10.2776/182302)

[144] Regulation (EU) no 2015/207 of the European Parliament and of the Council for carrying out the cost-benefit analysis. EUR-Lex European Union law site (2015)

[145] United Nations Industrial Development Organization, Guide to practical project appraisals: Social benefit-cost analysis in developing countries (UNIDO Publication, 1980). URL <https://downloads.unido.org/ot/48/06/4806860/Practical%20Appraisal%20of%20Industrial%20Projects,%20application%20of%20so.pdf>

[146] The Economic Appraisal of Investment Projects at the EIB (Publications Office of the European Union, 98-100, boulevard Konrad Adenauer, L-2950 Luxembourg, 2023). [https://doi.org/ 10.2867/076767](https://doi.org/10.2867/076767)

[147] Code de l'environnement. Légifrance (2024). URL https://www.legifrance.gouv.fr/codes/texte_lc/LEGITEXT000006074220/

[148] European Commission. Code de l'environnement: Sous-section 5: Information et participation du public (2019). URL https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000038247366

[149] Évaluation des grands projets d'investissement publics. annexe au projet de loi de finances pour 2024 (jaunes budgétaires). La plateforme des finances publiques, du budget de l'État et de la performance publique (2023). URL <https://www.budget.gouv.fr/documentation/documents-budgetaires/exercice-2024>

[150] R. Guesnerie. Guide de l'évaluation socioéconomique des investissements publics. <https://www.strategie.gouv.fr/publications/guide-de-levaluation-socioeconomique-investissements-publics-edition-2023> (2023). URL <https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/fs-2023-guide-evaluation-investissements-publics-septembre.pdf>

[151] France Stratégie, Guide d'évaluation des investissements publics. Tech. rep., France Stratégie (2023). URL <https://www.strategie.gouv.fr/files/2025-01/fs-2023-guide-evaluation-investissements-publics-septembre.pdf>. Version: septembre 2023

[152] Schweizerische Eidgenossenschaft. Federal act on the promotion of research and innovation (2023). URL <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2013/786/en>

[153] Keystone-SDA. Erstes Ja zu Planungsgrundlagen für Kernforschungszentrum CERN (2024). URL https://www.parlament.ch/de/services/news/Seiten/2024/20240529172502542194158159026_bsd172.aspx

[154] Secrétariat d'État à la formation, à la recherche et à l'innovation (SEFRI), Plan sectoriel cern. Tech. rep., Secrétariat d'État à la formation, à la recherche et à l'innovation (SEFRI) (2025). URL https://www.sbf.admin.ch/dam/sbf/de/dokumente/2024/10/plan_sectoriel_cern.pdf.download.pdf/plan_sectoriel_cern_de.pdf. Consultation document.for-lcaca

[155] M. Florio, S. Forte, C. Pancotti, E. Sirtori, S. Vignetti, Exploring cost-benefit analysis of research, development and innovation infrastructures: An evaluation framework. Tech. rep., Università di Milano (2016). URL <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1603/1603.03654.pdf>

[156] International Standards Organisation, ISO 14040:2006 environmental management — life cycle assessment — principles and framework (2006)

[157] European Commission – Joint Research Centre – Institute for Environment and Sustainability, International reference life cycle data system (ILCD) handbook - general guide for life cycle assessment - detailed guidance (2010). URL <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/ILCD-Handbook-General-guide-for-LCA-DETAILED-GUIDANCE-12March2010-ISBN-fin-v1.0-EN.pdf>

[158] I. Vogel, Review of the Use of 'Theory of Change' in International Development (UK Department for

International Development (DFID), 2012). URL https://www.theoryofchange.org/pdf/DFID_ToC_Review_VogelV7.pdf

[159] Research infrastructures' impact assessment toolkit - RI-PATHS (2024). URL <https://ri-paths-tool.eu>

[160] G. Boulton. Science as a Global Public Good. International Science Council Position Paper. International Science Council (2021). <https://doi.org/10.24948/2021.09>

[161] M. Mazzucato, The entrepreneurial state : debunking public vs. private sector myths. Anthem frontiers of global political economy (Anthem Press, London, 2013). URL <https://www.bibsonomy.org/bibtex/2e9d0215a37508b77b5f48afda5a55c7c/meneteqel>

[162] M. Scudellari, The sprint to solve coronavirus protein structures — and disarm them with drugs. Nature 581, 252–255 (2020). <https://doi.org/10.1038/d41586-020-01444-z>

[163] J. Buchanan, G. Tullock, The calculus of consent, logical foundations of constitutional democracy (University of Michigan Press, Ann Arbor, 1962), p. 361

[164] R. Solow, A guide to modern economics (Routledge, 1996), p. 19. Growth theory

[165] A. Akerlof, J. Spence, J. Stiglitz. Information for the Public, Markets with Asymmetric Information (2001). URL <https://sustainability.atmeta.com/2024-sustainability-report/>. Nobel Prize in Economics documents 2001-1

[166] E. Ostrom. The economics of common-pool resources (2000)

[167] J. Tirole. Market power and regulation (2001). Nobel Prize in Economic Sciences 2014

[168] P. Milgrom, R. Wilson. Improvements to auction theory and inventions of new auction formats (2020). Nobel Prize in Economic Sciences 2020

[169] R. Davis, The Value of Outdoor Recreation: An Economic Study of the Maine Woods (Harvard University., 1963). URL <https://books.google.ch/books?id=jeRxbwAACAAJ>

[170] K. Arrow, Report of noaa panel on contingent valuation. 58 Federal Register 4601 (1993). URL <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/60900>

[171] R. Carson, R. Mitchell, M. Hanemann, R. Kopp, S. Presser, P. Ruud, Contingent valuation and lost passive use: Damages from the Exxon Valdez oil spill. Environmental and Resource Economics 25(3), 257–286 (2003). <https://doi.org/10.1023/A:1024486702104>

[172] G. Catalano, M. Florio, F. Giffoni, Willingness to pay for basic research: A contingent valuation experiment on the Large Hadron Collider. Departmental working papers, Department of Economics, Management and Quantitative Methods at Università degli Studi di Milano (2016). URL <https://EconPapers.repec.org/RePEc:mil:wpdepa:2016-03>

[173] A. Bastianin, M. Florio, LHC upgrade brings benefits beyond physics. CERN Courier (2018). URL <https://cerncourier.com/a/lhc-upgrade-brings-benefits-beyond-physics>

[174] F. Giffoni, M. Florio, Public support of science: A contingent valuation study of citizens' attitudes about CERN with and without information about implicit taxes. Research Policy 52(1), 104627 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.respol.2022.104627>

[175] K. Petrinoli, S. Mirasgedis, N. Mihalopoulos, T. Petäjä, E. Juurola. The impact of act-ris on society: outcome of a contingent valuation study. ACTRIS Website (2023). URL https://www.actris.eu/sites/default/files/Documents/ACTRIS%20IMP/Deliverables/ACTRIS%20IMP_WP3_D3.3_The%20impact%20of%20ACTRIS%20on%20society%20-%20outcome%20of%20a%20Contingent%20Valuation%20study.pdf

[176] European Commission, Better Regulation Toolbox (2023). URL https://commission.europa.eu/law/law-making-process/planning-and-proposing-law/better-regulation/better-regulation-guidelines-and-toolbox/better-regulation-toolbox_en. Accessed: 2025-02-07

[177] L. Secci. The value of particle physics research at CERN as public good (2023). <https://doi.org/10.5281/zenodo.7766949>

- [178] R.J. Johnston, J. Rolfe, R.S. Rosenberger, R. Brouwer, *Introduction to Benefit Transfer Methods* (Springer Netherlands, Dordrecht, 2015), pp. 19–59. https://doi.org/10.1007/978-94-017-9930-0_2
- [179] T. Camporesi, G. Catalano, M. Florio, F. Giffoni, Experiential learning in high energy physics: a survey of students at the LHC. *European Journal of Physics* 38(2), 025703 (2017). <https://doi.org/10.1088/1361-6404/aa5121>
- [180] R. Crescenzi, G. Piazza. Recommendations to increase the socio-economic impact of the Future Circular Collider for member states (2024). <https://doi.org/10.5281/zenodo.13166167>
- [181] CSIL. Assessing scientific knowledge creation and dissemination in an open science world: evidence from the CERN experiments (2024). <https://doi.org/10.5281/zenodo.13920183>
- [182] V. Morretta, D. Vurchio, S. Carrazza, The socio-economic value of scientific publications: The case of earth observation satellites. *Technological Forecasting and Social Change* 180, 121730 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121730>
- [183] J. Gutleber, P. Charitos (eds.), *From Science to Society: The Open Science and Innovation and Network Approach* (Springer Nature Switzerland, Cham, 2025), pp. 1–34. https://doi.org/10.1007/978-3-031-60931-2_1
- [184] E. Griniece, J. Angelis, A. Reid, S. Vignetti, J. Catalano, A. Helman, M. Rami, H. Kroll. *Guidebook for Socio-Economic Impact Assessment of Research Infrastructures* (2020). <https://doi.org/10.5281/zenodo.3950043>
- [185] P. Castelnovo, M. Florio, S. Forte, L. Rossi, E. Sirtori, The economic impact of technological procurement for large-scale research infrastructures: Evidence from the large hadron collider at cern. *Research Policy* 47(9), 1853–1867 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.respol.2018.06.018>
- [186] M. Florio, E. Sirtori, Social benefits and costs of large scale research infrastructures. *Technological Forecasting and Social Change* 112, 65–78 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2015.11.024>
- [187] M. Florio, F. Giffoni, A. Giunta, E. Sirtori, Big science, learning, and innovation: evidence from CERN procurement. *Industrial and Corporate Change* 27(5), 915–936 (2018). <https://doi.org/10.1093/icc/dty029>
- [188] E. Autio, A.P. Hameri, O. Vuola, A framework of industrial knowledge spillovers in big-science centers. *Research Policy* 33(1), 107–126 (2004). [https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(03\)00105-7](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(03)00105-7)
- [189] M. Nordberg, A. Campbell, A. Verbeke, Using customer relationships to acquire technological innovation: A value-chain analysis of supplier contracts with scientific research institutions. *Journal of Business Research* 56(9), 711–719 (2003). [https://doi.org/10.1016/S0148-2963\(01\)00256-9](https://doi.org/10.1016/S0148-2963(01)00256-9).
Interorganizational Relationships and Networks
- [190] E. Sirtori, G. Catalano, F. Giffoni, C. Pancotti, A. Caputo, M. Florio, Impact of CERN procurement actions on industry: 28 illustrative success stories (CERN, Geneva, 2019). URL <https://cds.cern.ch/record/2670056>
- [191] R. Crescenzi, G. Piazza, How to Measure the Local Economic Impact of Large Research Infrastructure Procurement (Springer Nature Switzerland, Cham, 2025), pp. 137–148. https://doi.org/10.1007/978-3-031-60931-2_11
- [192] E. Moretti, Local multipliers. *American Economic Review* 100(2), 373–77 (2010). <https://doi.org/10.1257/aer.100.2.373>
- [193] M. Florio, S. Forte, E. Sirtori, Forecasting the socio-economic impact of the Large Hadron Collider: A cost–benefit analysis to 2025 and beyond. *Technological Forecasting and Social Change* 112, 38–53 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2016.03.007>
- [194] I.d.R. Crespo Garrido, M. Loureiro García, J. Gutleber, The Value of a Collaborative Platform in a Global Project. The Indico Case Study (Springer Nature Switzerland, Cham, 2025), pp. 163–180. https://doi.org/10.1007/978-3-031-60931-2_13
- [195] I.d.R. Crespo Garrido, M. Loureiro García, J. Gutleber, The Value of an Open Scientific Data and

Documentation Platform in a Global Project: The Case of Zenodo (Springer Nature Switzerland, Cham, 2025), pp. 181–200. https://doi.org/10.1007/978-3-031-60931-2_14

[196] C. Garrido, I. del Rosario, M. Loureiro García, J. Gutleber, The Value of Open Science at CERN: An Analysis Based on a Travel Cost Model (Springer Nature Switzerland, Cham, 2025), pp. 63–80. https://doi.org/10.1007/978-3-031-60931-2_5

[197] U.S. National Aeronautics and Space Administration. Nasa texas economic snapshot. <https://comptroller.texas.gov/economy/economic-data/nasa/snapshot.php> (2024). URL <https://comptroller.texas.gov/economy/economic-data/nasa/docs/snapshot.pdf>

[198] D. Weaver, Celestial ecotourism: new horizons in nature-based tourism. *Journal of Ecotourism* 10(1), 38–45 (2011). <https://doi.org/10.1080/14724040903576116>

[199] L. van Wyk-Jacobs, Astro-tourism as a catalyst for rural route development. Ph.D. thesis, University of Pretoria, South Africa (2018). URL <http://hdl.handle.net/2263/70036>. PhD Thesis

[200] F. Blekman, A. Cardini, L.X.C. Saravia, Crowd-sourced particle physics stories from desy-cms (2024). URL <https://arxiv.org/abs/2410.04967>. arXiv:2410.04967 [physics.soc-ph]

[201] Swiss Confederation. Botschaft zur Änderung des bundesgesetzes über die förderung der forschung und der innovation (sachplan und plangenehmigungsverfahren). Fedlex. Die Publikationsplattform des Bundesrechtes (2024). URL <https://www.fedlex.admin.ch/eli/fga/2024/532>

[202] République française. Loi n° 2021-1104 du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets. Légifrance (2024). URL <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043956924>

[203] European Commission. Regulation (EU) 2018/1999 of the European Parliament and of the Council of 11 december 2018 on the governance of the energy union and climate action. EUR-Lex European Union law site (2018). URL <http://data.europa.eu/eli/reg/2018/1999/oj>

[204] G. Alligand, S. Hubert, T. Legendre, F. Millar, A. Müller. Évaluation environnementale. guide d'aide à la définition des mesures etc. Ministère de la transition écologique et solidaire (2018). URL <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/publications/Th%C3%A9ma%20-%20Guide%20d%E2%80%99aide%20%C3%A0%20la%20d%C3%A9finition%20des%20mesures%20ERC.pdf>

[205] Office fédéral du développement territorial (ARE). Plan sectoriel des surfaces d'assolement (sda) (2020). URL <https://www.are.admin.ch/dam/are/fr/dokumente/raumplanung/dokumente/bericht/b1-sachplan-fruchtfolgeflächen-08052020.pdf.download.pdf/b1-plan-sectoriel-des-surfaces-dassolement-08052020.pdf>. Consulté en mars 2025

[206] Office fédéral de l'environnement OFEV. Compensation écologique. BAFU/OFEV website. (2022). URL <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/biodiversite/info-specialistes/utilisation-durable-de-la-biodiversite/compensation-ecologique.html>

[207] Swiss Confederation. Federal Act on the Protection of Nature and Cultural Heritage. Fedlex. The publication platform for federal law. (1966). URL https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1966/1637_1694_1679/en

[208] A. Bastianin, P. Castelnovo, M. Florio, A. Giunta. Technological learning and innovation gestation lags at the frontier of science: from cern procurement to patent (2019). URL <https://arxiv.org/abs/1905.09552>

[209] E. Sirtori, G. Catalano, F. Giffoni, C. Pancotti, A. Caputo, M. Florio, Impact of CERN procurement actions on industry: 28 illustrative success stories (CERN, Geneva, 2019). URL <https://cds.cern.ch/record/2670056>

[210] CERN. Knowledge transfer centre at CERN (2000). URL <https://kt.cern/> [211] DESY. Knowledge transfer centre at DESY (2000). URL <https://innovation.desy.de>

[212] INFN. Knowledge transfer centre at INFN (2000). URL <https://web.infn.it/TechTransfer/> [213] FNAL.

- Knowledge transfer centre at FNAL (2000). URL <https://partnerships.fnal.gov/> [214] SESAME. SESAME, Synchrotron light for experimental science in the Middle East (2003). URL <https://www.sesame.org.jo>
- [215] ESFRI, Guidelines on Cost Estimation of Research Infrastructures (ESFRI, 2019). URL <https://www.esfri.eu/latest-esfri-news/new-study-guidelines-cost-estimation-research-infrastructures-str-esfri>
- [216] European Commission, Commission notice — technical guidance on the climate proofing of infrastructure in the period 2021-2027. Tech. Rep. 373 (2021). URL [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021XC0916\(03\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021XC0916(03))
- [217] United Nations. Paris Agreement. United Nations Treaty Collection (2015). URL <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>
- [218] T. ten Raa, Input-Output Economics: Theory and Applications (World Scientific, 2009). URL <https://doi.org/10.1142/6968>
- [219] R. Johnston, K. Boyle, W. Adamowicz, J. Bennett, R. Brouwer, T. Cameron, M. Hanemann, N. Hanley, M. Ryan, R. Scarpa, R. Tourangeau, C. Vossler, Contemporary guidance for stated preference studies. Journal of the Association of Environmental and Resource Economists 4(2), 319 – 405 (2017). URL <https://EconPapers.repec.org/RePEc:ucp:jaerec:doi:10.1086/691697>
- [220] D. Pearce, G. Atkinson, S. Mourato, Cost-benefit analysis and the environment: recent developments (Organisation for Economic Co-operation and development, 2006)
- [221] OECD, Cost-benefit analysis and the environment: further developments and policy use. OECD Publishing, Paris, (2018). URL https://www.oecd.org/en/publications/cost-benefit-analysis-and-the-environment_9789264085169-en.html
- [222] E. Quinet, L'évaluation socioéconomique des investissements publics. Tech. rep., HAL (2014) [223] HM Treasury and Government Finance Function. HM Treasury guidance on how to appraise and evaluate policies, projects and programmes. the 'green book'. <https://www.gov.uk/government/publications/the-green-book-appraisal-and-evaluation-in-central-government> (2024). URL <https://www.gov.uk/government/publications/the-green-book-appraisal-and-evaluation-in-central-government>
- [224] D. Sartori, G. Catalano, M. Genco, C. Pancotti, E. Sirtori, S. Vignetti, C. Bo, et al., Guide to cost-benefit analysis of investment projects. Economic appraisal tool for cohesion policy 2014-2020 (Regional and Urban Policy, 2014)
- [225] M. Krogerus, R. Tschäppeler, J. Piening, The Decision Book: Fifty Models for Strategic Thinking, 1st American ed. (W.W. Norton & Co., 2012), p. 173
- [226] T. O'Mahony, Cost-benefit analysis and the environment: The time horizon is of the essence. Environmental Impact Assessment Review 89, 106587 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2021.106587>
- [227] United Nations SDG communication materials. UN web site (2024). URL <https://www.un.org/sustainabledevelopment/news/communications-material>
- [228] The SDG transformation center (2024). URL <https://sdgtransformationcenter.org>
- [229] Leadership Council of the Sustainable Development Solutions Network, Indicators and a monitoring framework for the Sustainable Development Goals. Tech. rep., SDSN (2015). URL <https://sdgs.un.org/sites/default/files/publications/2013150612-FINAL-SDSN-Indicator-Report1.pdf>
- [230] CERN environment report 2021-2022 - GRI content index (2023). URL <https://hse.cern/environment-report-2021-2022/gri-content-index>
- [231] Our World in Data team, SDG tracker: Measuring progress towards the Sustainable Development Goals. Our World in Data (2023). URL <https://ourworldindata.org/sdgs>

- [232] Find out more about the SDGs. KnowSDGs (2024). URL <https://knowsdgs.jrc.ec.europa.eu/sdg/\{1-17\}>
- [233] Meta. Meta sustainability report (2024). URL <https://sustainability.atmeta.com/2024-sustainability-report/>
- [234] European Investment Bank, The economic appraisal of investment projects at the EIB – 2nd edition March 2023 (Publications Office of the European Union, 2022). <https://doi.org/10.2867/076767>
- [235] Gesellschaftliche Kosten von Umweltbelastungen. Web site of UBA (2024). URL <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-wirtschaft/gesellschaftliche-kosten-von-umweltbelastungen#gesamtwirtschaftliche-bedeutung-der-umweltkosten>
- [236] Department for Energy Security & Net Zero. Valuation of greenhouse gas emissions: for policy appraisal and evaluation. <https://www.gov.uk> (2021). URL <https://www.gov.uk/government/publications/valuing-greenhouse-gas-emissions-in-policy-appraisal/valuation-of-greenhouse-gas-emissions-for-policy-appraisal-and-evaluation>
- [237] National Center for Environmental Economics, Climate Change Division, Report on the social cost of greenhouse gases: Estimates incorporating recent scientific advances. Tech. rep., U.S. Environmental Protection Agency (2023). URL <https://www.epa.gov/environmental-economics/scghg>
- [238] European Commission, Better Regulation Guidelines (2021). URL https://commission.europa.eu/law/law-making-process/planning-and-proposing-law/better-regulation/better-regulation-guidelines-and-toolbox_en. SWD(2021) 305 final
- [239] J. Catalano, M. Da Col, M. Genco, C. Pancotti, A. Tracogna, S. Vignetti. Complementary socio-economic impact analysis of the lepton collider-based research infrastructure. updated assumptions, input data, results and calculations (2025). <https://doi.org/10.5281/zenodo.14905017>
- [240] F. Bent, B. Nils, R. Werner, Megaprojects and risk: An anatomy of ambition. International Journal of Public Sector Management 17 (2003). <https://doi.org/10.1108/09513550410530199>
- [241] B. Flyvbjerg, in The Sage Handbook of Qualitative Research, ed. by N.K. Denzin, Y.S. Lincoln (Sage Publications, 2011), chap. 17, pp. 301–316
- [242] B. Flyvbjerg, What you should know about megaprojects and why: An overview. Project Management Journal 45 (2014). <https://doi.org/10.1002/pmj.21409>.
- [243] G. Streicher. Building CERN’s Future Circular Collider. An Estimation of its Impact on Value Added and Employment (2023). <https://doi.org/10.5281/zenodo.7986138>
- [244] Austrian Institute of Economic Research (WIFO). Policy recommendations to optimise the national returns relating to fcc contributions. <https://www.wifo.ac.at/en/project/268677/> (2024). Accessed: 2025-03-10
- [245] P. Ferreira, et al., in Proceedings of the 17th International Conference on Computing in High Energy and Nuclear Physics (CHEP 2009) (CERN, 2009). URL <https://indico.cern.ch/event/61310/contributions/1228382/>
- [246] A. Gentil-Beccot, S. Mele, T.C. Brooks, Scoap3: The open access initiative for high-energy physics. Insights 27(3), 264–268 (2014). <https://doi.org/10.1629/2048-7754.171>
- [247] L.H. Nielsen, T. Smith, P. Manghi, N. Manola, Zenodo: An open-access repository for every-one. Bulletin of the IEEE Technical Committee on Digital Libraries (2014). URL <https://zenodo.org/record/13006>
- [248] P. Ginsparg, arXiv at 20. Nature 476(7359), 145–147 (2011). <https://doi.org/10.1038/476145a>