

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. 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. 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. Ascoti^{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. Behtoui⁴⁸, 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. Bicrel¹¹⁰, 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. 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. 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. 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. Falchier²⁵, 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. Felgion^{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. Forazi¹, 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. 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. 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. Kröniger²⁴⁶, 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. Lavezzi¹⁶⁰, 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. Möbius⁵⁹⁰, 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. Nicosini¹²⁸, 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. Paretì^{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. Rosazi¹, 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. Shchutskaya¹¹⁵, 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. Syratcev¹, 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. Tsemelis¹, 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. 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^{3,108}, 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. Wiodorski¹, 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 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 - 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 Uludag 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 lié 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.

1Peut 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.

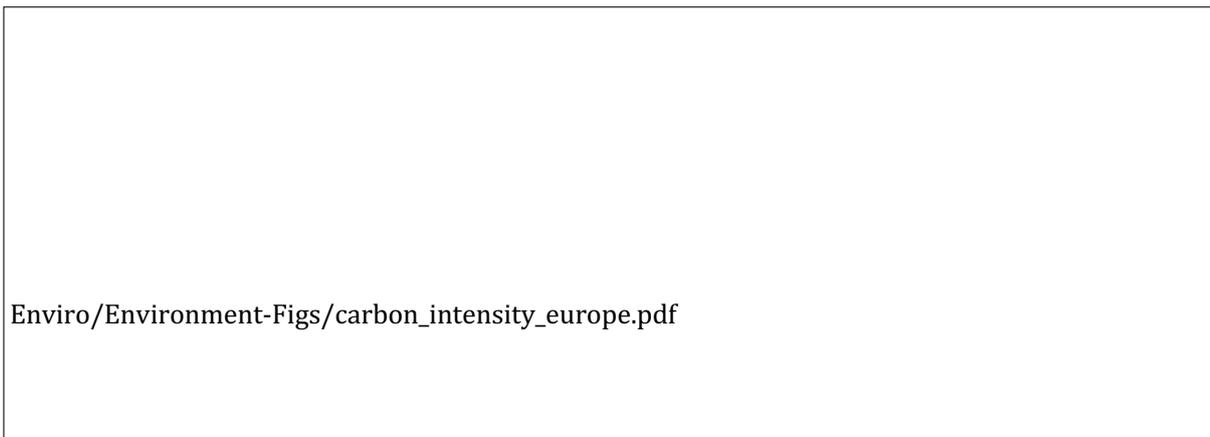


Fig. 3.3 : Évolution de l'intensité carbone des réseaux nationaux en Europe. Source : RTE [68].

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.

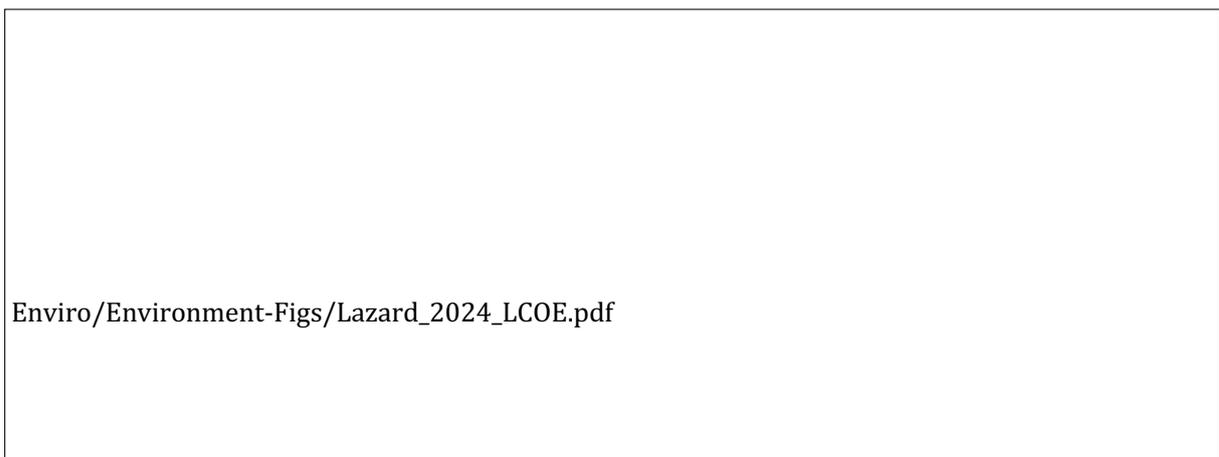


Fig. 3.4 : Évolution du coût actualisé de l'électricité (LCOE, source : *Lazard's Levelized Cost of Energy*, version 17.0)

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.



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).

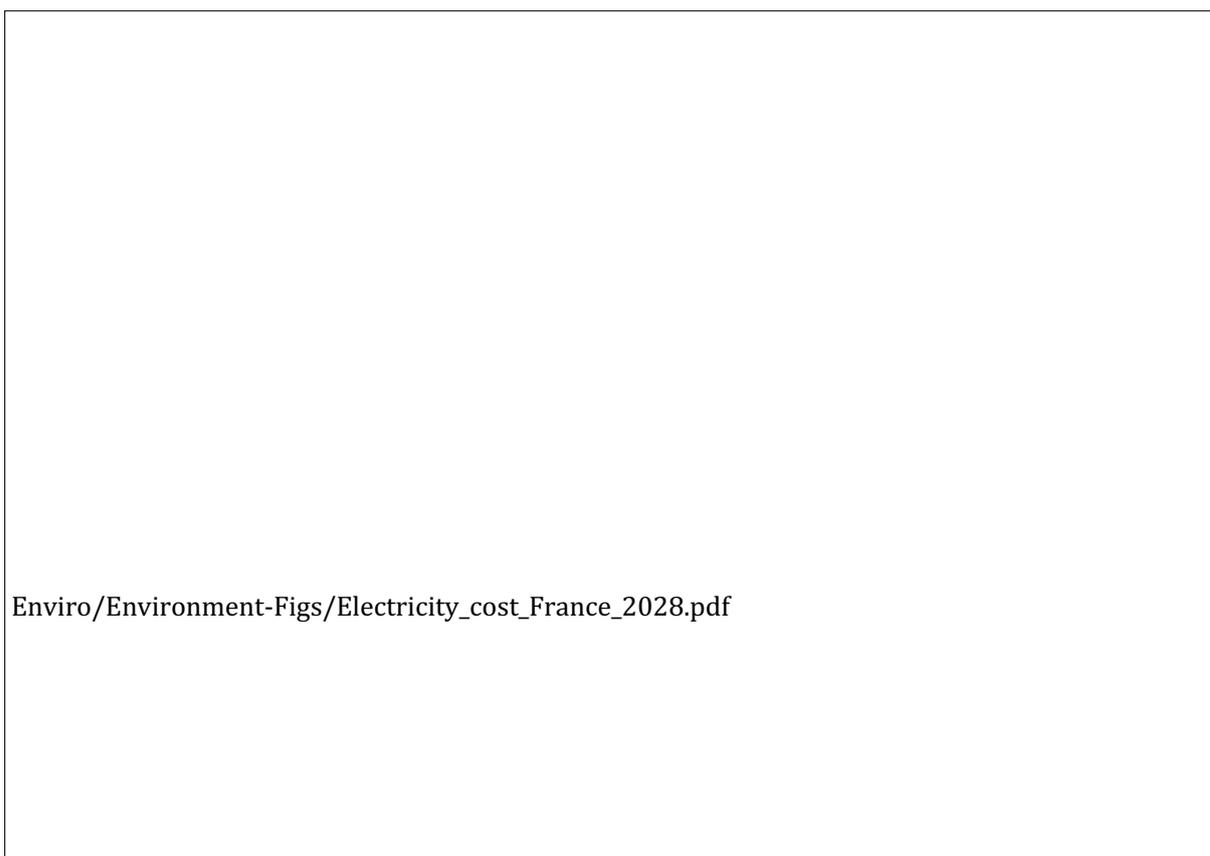


Fig. 3.7 : Objectifs déclarés de prix du marché relatifs à l'électricité pour 2030 publiés par le gouvernement français dans sa Programmation pluriannuelle de l'énergie [66]).

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.

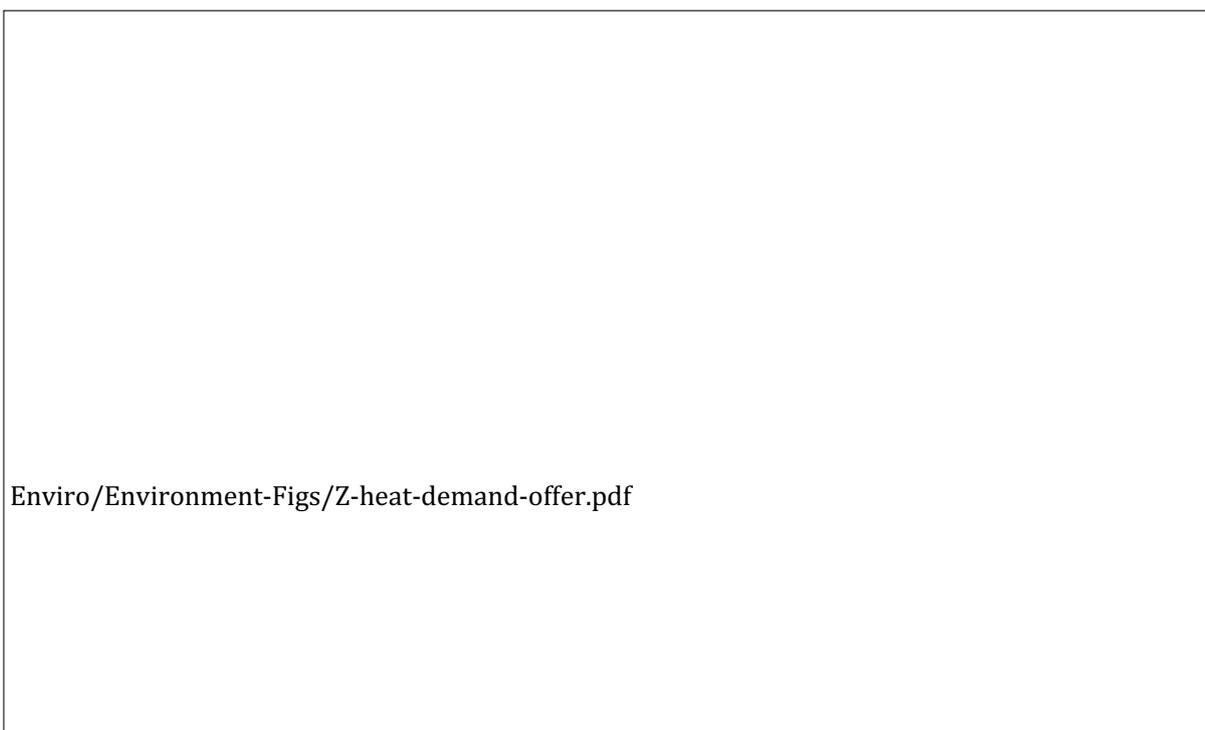
Le scénario « minimal » repose sur l'hypothèse selon laquelle l'exploitation du collisionneur de particules commence en mars et se termine au plus tard en novembre. La figure [3.8](#) montre, à titre d'exemple, l'aperçu hebdomadaire de la demande cumulée de chaleur dans un périmètre de 5 km autour de 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 tCO₂



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.

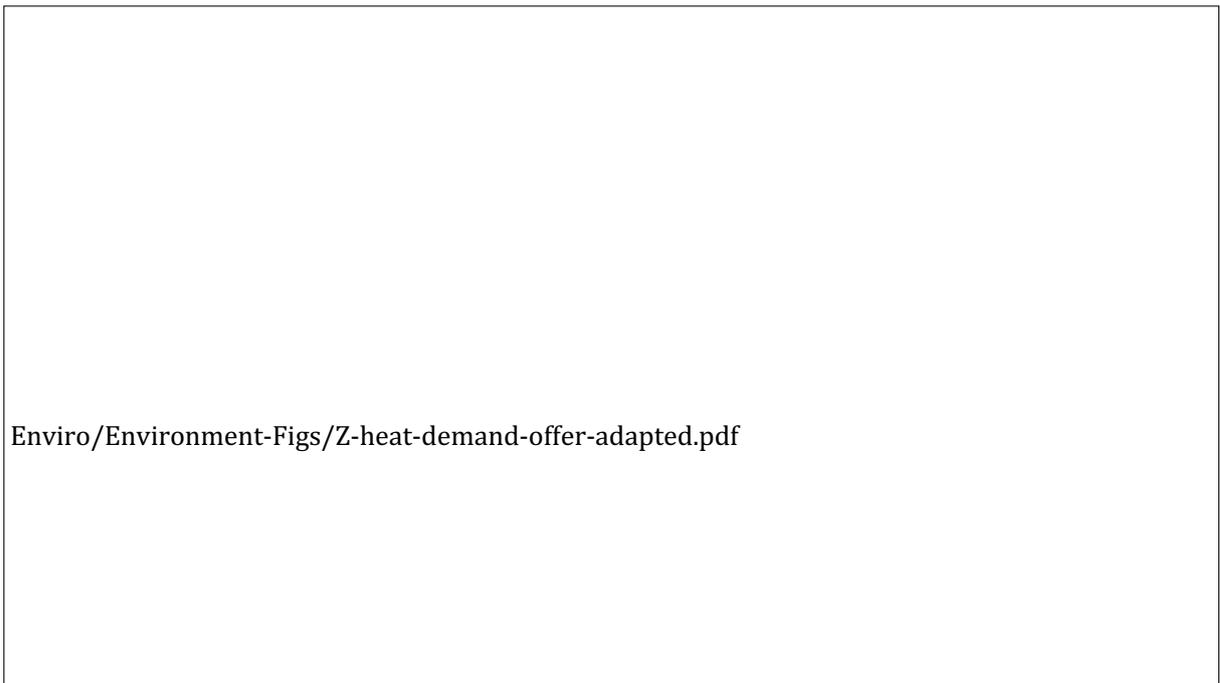


Fig. 3.9 : Demande et fourniture hebdomadaires de chaleur selon un calendrier adapté basé sur le mode d'exploitation Z

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

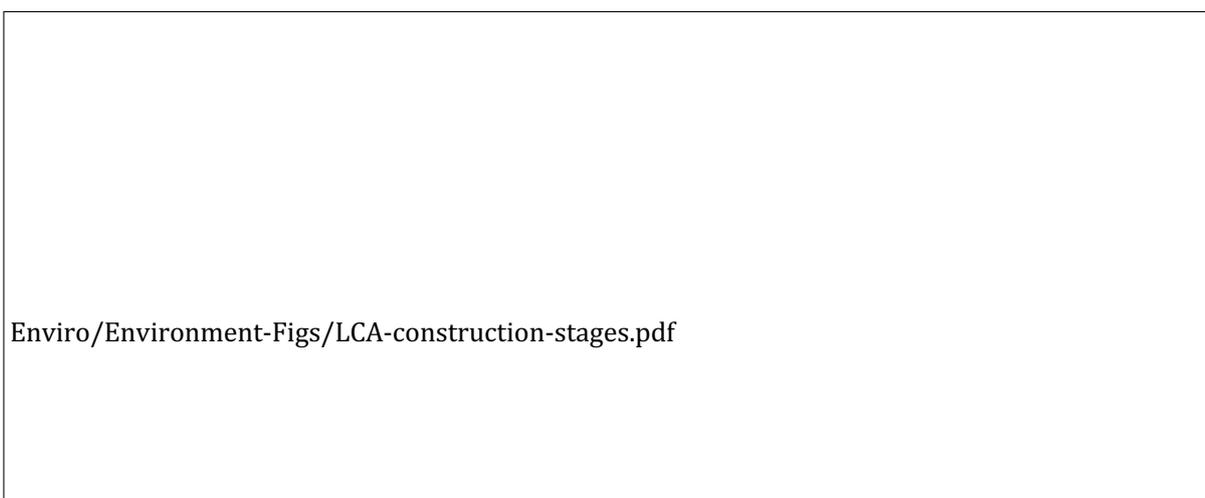
Fig. 3.11 : Exemple extrait de l'étude de la demande de chaleur concernant le site PD à Nangy, concernant un hôpital proche (au sud), un producteur de fromage (au nord) et une zone mixte industrielle/résidentielle (au nord-est)

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	Faible	14 GWh/an	Hôpital, industrie
PF	Moyen	60 GWh/an	Secteur de La Roche-sur-Foron : zones centre d'exposition, écoles
PG	Faible	16 GWh/an	écoles, zones résidentielles
industrielles PG Annecy		Élevé	860 GWh/an Annecy à une zones industrielles, commerciales, résidentielles
PH	Très faible	14 GWh/an	À 8 km de distance : maison de retraite, zones résidentielles
distance de 7 km : 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

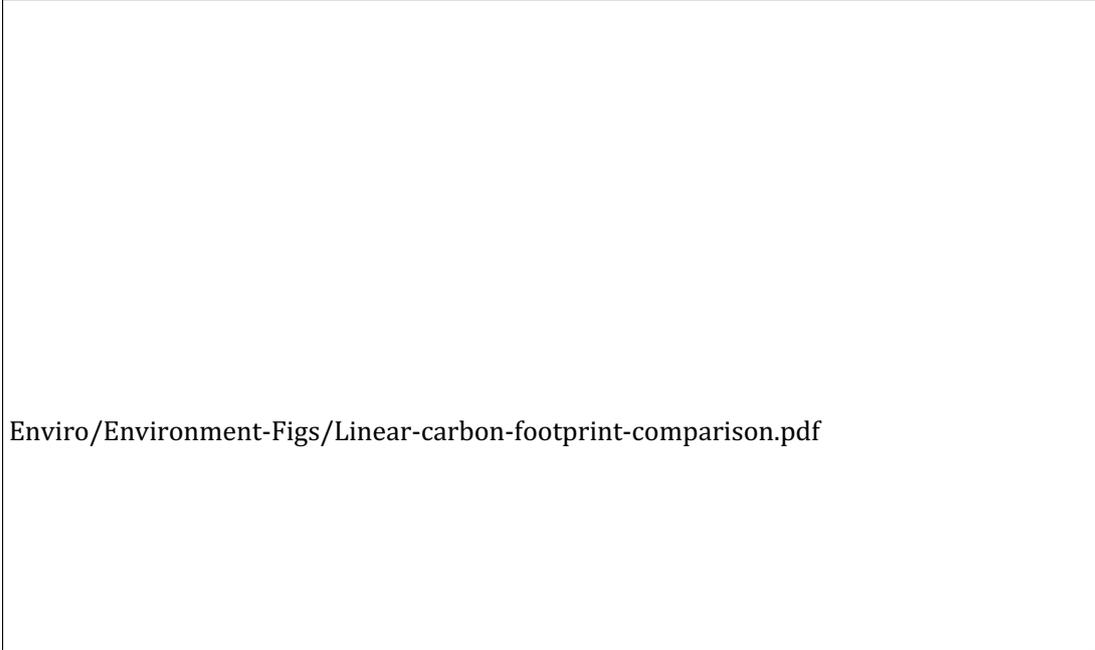
Élément	Empreinte carbone
Sites souterrains	477 388 tCO ₂ (eq)
4 sites techniques	17 600 tCO ₂ (eq)
4 sites d'expérience	31 200 tCO ₂ (eq)
Total	526 188 tCO ₂ (eq)

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 Tchérénkov, et le CF_4 (PRP de 7 390), pour les chambres à fils, les détecteurs Tchérénkov et les détecteurs gazeux à micropistes (MPGD). Ces gaz sont nécessaires pour atténuer les phénomènes de vieillissement, pour servir de radiateur Tchérénkov et pour contenir le développement de charges (grâce à leurs propriétés électronégatives) 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
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 totale 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.

$$70\,900 \text{ GWh} * 14,74 \text{ tCO}_2(\text{eq})/\text{GWh} = 308\,066 \text{ tCO}_2(\text{eq}).$$

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
t̄t	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
t̄t	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 difficile 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.).



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.

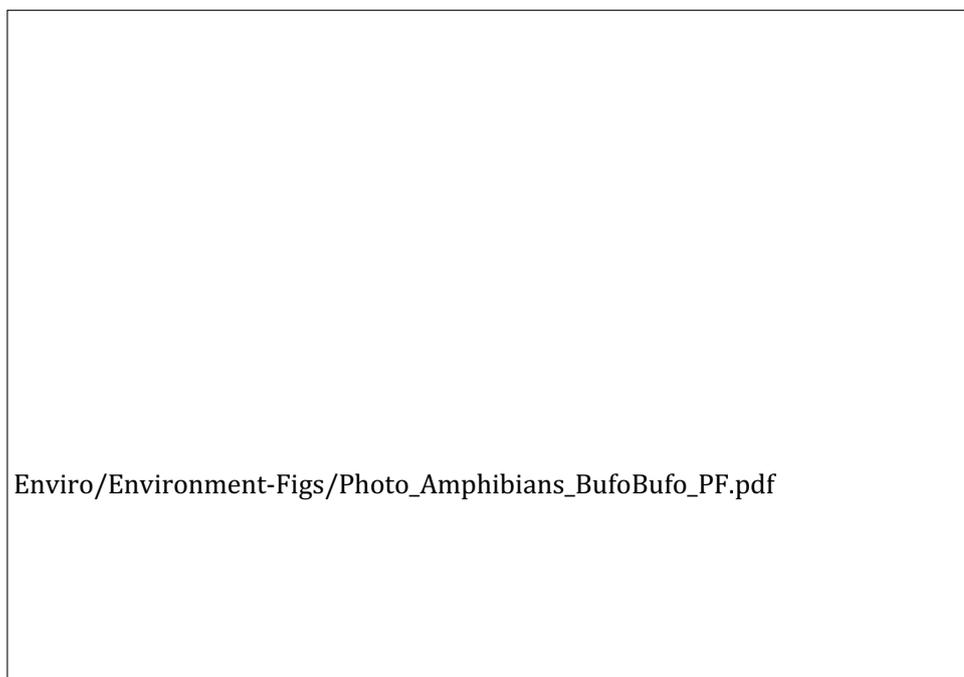


Fig. 3.29 : Crapaud commun (*Bufo bufo*) observé lors des études de terrain, fournissant des données précieuses sur la faune locale et la dynamique des écosystèmes

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'enjeu 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.

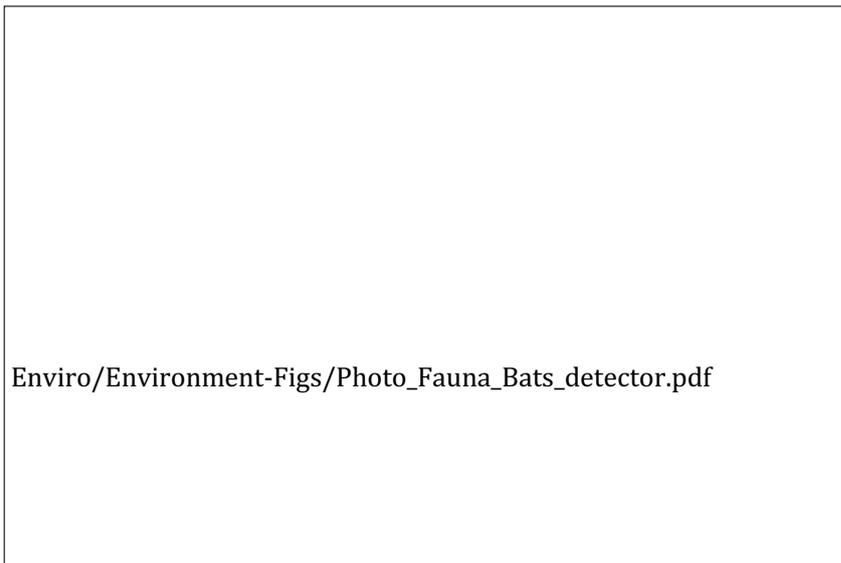


Fig. 3.33 : Détecteurs de chauves-souris utilisés pour relever la présence de chauves-souris en convertissant leurs signaux ultrasonores d'écholocation

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 et à 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'écartier 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 Dingy-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 montagnaise 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 Digny-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.

Enviro/Environment-Figs/Photo_NoiseMeasurements_House.pdf

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	Possible en criant
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)		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).

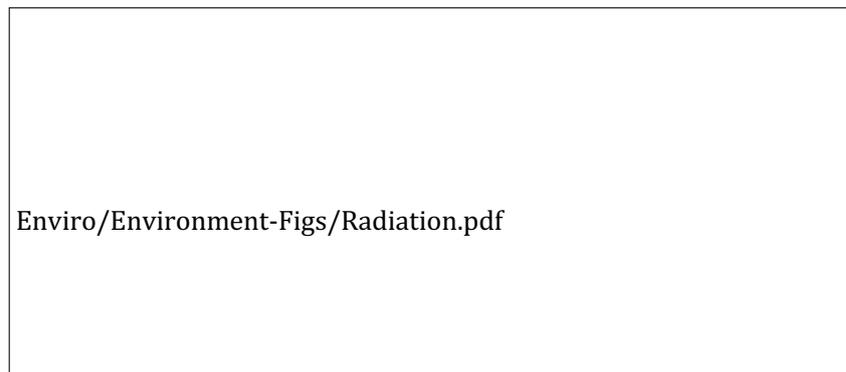


Fig. 3.52 : Types de rayonnements (Source : AIEA [91]).

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 sociale 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.

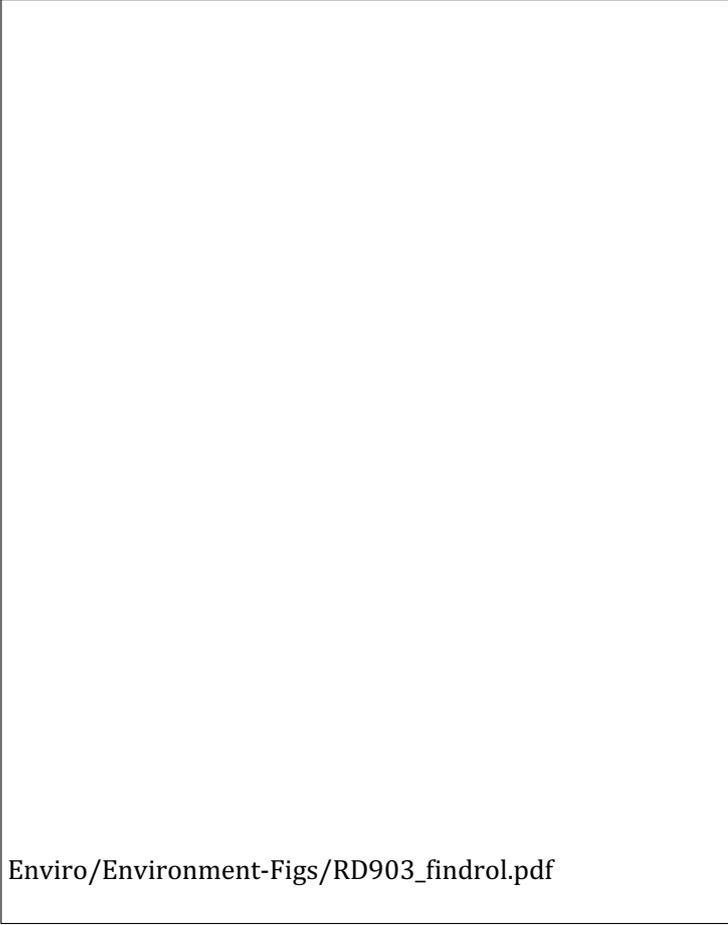
Réseaux d'eau en Suisse

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-rts-0>



Enviro/Environment-Figs/RD903_findrol.pdf

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.