

Futur collisionneur circulaire (FCC)

Rapport d'étude de faisabilité

Volume 3, chapitre 2

Implantation territoriale

Traduction française du chapitre 2, "Implantation territoriale"

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

En cas de doute, la version anglaise fait foi.

31 mars 2025

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

Note de la rédaction

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

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

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

Remerciements

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

F. Gianotti (Président), CERN
R. Bello, CERN
P. Chomaz, CEA, France
M. 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. Chancés¹, P. Craievich², M. Giovannozzi¹, C. Grojean^{4,5}, J. Gutleber¹, K. Hanke¹, A. Henriques¹, P. Janot¹, C. Lourenço¹, M. Mangano¹, T. Otto¹, J. Poole¹, S. Rajagopalan⁶, T. Raubenheimer⁷, E. Todesco¹, L. Ulrici¹, T. Watson¹, G. Wilkinson^{1,8}.

Liste des contributeurs au 31 mars 2025

A. Abada^{9,10,11}, M. Abbrescia^{12,13}, H. Abdolmaleki^{14,15}, S.H. Abidi⁶, A. Abramov¹, C. Adam^{9,16,17}, M. Ady¹, P.R. Adzic¹⁸, I. Agapov⁴, D. Aguglia¹, I. Ahmed¹⁹, M. Aiba², G. Aielli^{20,21}, T. Akan²², N. Akchurin²³, D. Akturk²⁴, M. Al-Thakeel^{1,25,26}, G.L. Alberghi²⁵, J. Alcaraz Maestre²⁷, M. Aleksa¹, R. Aleksan³, F. Alharthi^{9,10,28}, J. Alimena⁴, A. Alimenti²⁹, S. Alioli^{30,31}, L. Alix^{1,9,16}, B.C. Allanach³², L. Allwicher⁴, A.A. Altintas³³, M. Altinli^{33,34}, M. Alviggi^{35,36}, G. Ambrosio³⁷, Y. Amhis^{9,10,11}, A. Amiri^{38,39}, G. Ammirabile⁴⁰, T. Andeen⁴¹, K.D.J. André¹, J. Andrea^{9,42,43}, A. Andreazza^{44,45}, M. Andreini¹, T. Andriollo⁴⁶, L. Angel⁴⁷, M. Angelucci⁴⁸, S. Antusch⁴⁹, M.N. Anwar^{12,50}, L. Apolinário⁵¹, G. Apollinari³⁷, R.B. Appleby^{52,53}, A. Apresyan³⁷, Aram Apyan⁵⁴, Armen Apyan⁵⁵, A. Arbey^{9,56,57}, B. Argento^{35,36}, V. Ari⁵⁸, S. Arias⁵⁹, B. Arias Alonso¹, O. Arnaez^{9,16,17}, R. Arnaldi⁶⁰, F. Arneodo⁶¹, H. Arnold⁶², P. Arrutia Sota¹, K. Arundell⁶³, M.E. Ascioti^{64,65}, K.A. Assamagan⁶, S. Aumiller⁶⁶, G. Aydın⁶⁷, K. Azizi^{38,68}, P. Azzi⁶⁹, N. Bacchetta⁶⁹, A. Bacci⁴⁴, B. Bai⁷⁰, Y. Bai⁷¹, L. Balconi^{44,45}, G. Baldinelli^{64,65}, B. Balhan¹, A.H. Ball^{1,72}, A. Ballarino¹, S. Banerjee⁷³, S. Banik^{2,74}, D.P. Barber^{4,75}, M.B. Barbero^{9,76,77}, D. Barducci^{40,78}, D. Barna⁷⁹, G.G. Barnaföldi⁷⁹, M.J. Barnes¹, A.J. Barr⁸, R. Bartek⁸⁰, H. Bartosik¹, S.A. Bass⁸¹, U. Bassler^{9,82,83}, M.J. Basso^{84,85}, A. Bastianin^{45,86}, P. Bataillard⁸⁷, M. Battistin¹, J. Bauche¹, L. Baudin¹, J. Baudot^{9,42,43}, B. Baudouy³, L. Bauerdick³⁷, C. Bayındır^{88,89}, H.P. Beck⁹⁰, F. Bedeschi⁴⁰, C. Bee⁶², M. Begel⁶, M. Behtouei⁴⁸, L. Bellagamba²⁵, N. Bellegarde¹, E. Belli^{1,91}, E. Bellingeri⁹², S. Belomestnykh³⁷, A.D. Benaglia³⁰, G. Bencivenni⁴⁸, J. Bendavid¹, M. Benmergui⁹³, M. Benoit⁹⁴, D. Benvenuti^{1,40}, T. Bergauer⁹⁵, N. Bernachot⁹⁶, G. Bernardi^{9,97,98}, J. Bernardi⁹⁹, Q. Berthet^{100,101,102}, S. Bertoni¹⁰³, C. Bertulani¹⁰⁴, M.I. Besana², A. Besson^{9,42,43}, M. Bettelini¹⁰⁵, S. Bettoni², S. Beuvier¹⁰⁶, P.C. Bhat³⁷, S. Bhattacharya¹⁰⁷, J. Bhoj¹⁰⁸, M.E. Biagini⁴⁸, A. Bibet-Chevalier¹⁰⁹, M. Bicerl¹¹⁰, M. Biglietti¹¹¹, G.M. Bilei⁶⁴, B. Bilki^{112,113}, K. Bisgaard Christensen¹, T. Biswas¹¹⁴, F. Blanc¹¹⁵, F. Blekman^{4,116,117}, A. Blondel^{9,102,118}, J. Blümlein⁴, D. Boccanfuso^{35,119}, A. Bogomyagkov¹²⁰, P. Boillon¹⁰⁹, P. Boivin¹⁰¹, M.J. Boland¹²¹, S. Bologna¹²², O. Bolukbasi³³, R. Bonnet¹⁰³, J. Borburgh¹, F. Bordry¹, P. Borges de Sousa¹, G. Borghello¹, L. Borriello³⁵, D. Bortoletto⁸, M. Boscolo⁴⁸, L. Bottura¹, V. Boudry^{9,82,83}, R. Boughezal¹²³, D. Bourilkov¹²⁴, M. Boyd^{84,125}, D. Boye⁶, G. Bozzi^{126,127}, V. Braccini⁹², C. Bracco¹, B. Bradu¹, A. Braghieri¹²⁸, S. Braibant^{25,26}, J. Bramante¹²⁹, G.C. Branco¹³⁰, R. Brenner¹³¹, N. Brisa¹⁰³, D. Britzger¹³², G. Broggi^{1,91}, L. Bromiley¹, E. Brost⁶, Q. Bruant³, R. Bruce¹, E. Bründermann¹³³, L. Brunetti^{9,16,17}, O. Brüning¹, O. Brunner¹, X. Buffat¹, E. Bulyak¹³⁴, A. Burdyko^{44,135}, H. Burkhardt^{1,136}, P.N. Burrows¹³⁷, S. Busatto^{44,91}, S. Buschaert⁸⁷, D. Buttazzo⁴⁰, A. Butterworth¹, D. Butti¹, G. Cacciapaglia^{138,139,140}, Y. Cai⁷, B. Caiffi¹⁴¹, V. Cairo¹, O. Cakir⁵⁸, P. Calafiura¹⁴², R. Calaga¹, S. Calatroni¹, D.G. Caldwell¹⁴³, A. Çaliskan¹⁴⁴, C. Calpini¹⁴⁵, M. Calviani¹, E. Camacho-Pérez¹⁴⁶, P. Camarri^{20,21}, L. Caminada^{2,74}, M. Campajola^{35,36}, A.C. Canbay⁵⁸, K. Canderan¹, S. Candido¹, F. Canelli⁷⁴, A. Canepa³⁷, S. Cantarella⁴⁸, K.B. Cantún-Avila¹⁴⁶, L. Capriotti^{147,148}, A. Caram¹⁴⁹, A. Carbone⁴⁴, J.M. Carceller¹, G. Carini⁶, C. Carli¹, F. Carlier¹, C.M. Carloni Calame¹²⁸, C. Caron¹⁵⁰, F. Carra¹, C. Cartannaz⁸⁷, S. Casenove¹, G. Catalano¹⁵¹, V. Cavaliere⁶, C. Cazzaniga¹⁵², C. Cecchi^{64,65}, F.G. Celiberto¹⁵³, M. Cepeda²⁷, F. Cerutti¹, F. Cetorelli^{30,31}, G. Chachamis⁵¹, Y. Chae⁴, F. Chagnet¹⁵⁴, I. Chaikovska^{9,10,11}, M. Chalhoub⁸⁷, M. Chamizo-Llatas⁶, M. Champagne¹⁵⁵, H. Chanal^{9,156,157}, G. Chapelier¹⁰⁹, P. Charitos¹, C. Charles¹⁰⁶, T.K. Charles¹⁵⁸, C. Charlot^{9,82,83}, S. Chatterjee⁴, A. Chaudhuri¹⁵⁹, R. Chehab^{9,10,11}, S.V. Chekanov¹⁶⁰, H. Chen⁶, T. Chesne¹⁰⁶, F. Chiapponi^{25,26}, G. Chiarello^{161,162}, M. Chiesa¹²⁸, P. Chiggiato¹, Ph. Chomaz³, M. Chorowski¹⁶³, J.P. Chou¹⁶⁴, M. Chruszcz¹⁰⁸, W. Chung¹⁶⁵, S. Ciarlantini^{69,166}, A. Ciarma⁴⁸, D. Cieri¹³², A.K. Ciftci¹⁶⁷, R. Ciftci¹⁶⁸, R. Cimino⁴⁸, F. Ciroto^{35,36}, M. Ciuchini¹¹¹, M. Cobal^{169,170}, A. Coccaro¹⁴¹, R. Coelho Lopes De Sa¹⁷¹, J.A. Coleman-Smith¹, F. Collamati¹⁷², C. Coldelram¹⁷³, P. Collier¹, P. Collins¹, J. Collot^{9,174,175}, M. Colmenero¹, L. Colnot¹⁵¹, G. Coloretti⁷⁴, F.A. Conventi^{35,176}, A. Cook¹, L. Cooley^{177,178}, A.S. Cornell¹⁷⁹, C. Cornella¹, G. Cornette¹⁰⁶, I. Corredoira¹⁸⁰, P. Costa

Pinto¹, F. Couderc³, J. Coupard¹, S. Coussy⁸⁷, R. Crescenzi¹⁸¹, I. Crespo Garrido^{1,182}, T. Critchley^{1,102}, A. Crivellin⁷⁴, T. Croci⁶⁴, C. Cudré¹⁰⁶, G. Cummings³⁷, F. Cuna¹², R. Cunningham¹, B. Curé¹, E. Curtis¹⁸³, M. D'Alfonso¹⁸⁴, L. D'Aloia Schwartzentruber¹⁸⁵, G. D'Amén⁶, 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. Duthel¹, I. Dutta³⁷, J.S. Dutta²⁰⁷, S. Dutta²⁰⁸, F. Duval¹, F. Eder¹, M. Eisterer⁹⁹, Z. El Bitar^{9,42,43}, A. El Saied²⁰⁹, M. Elisei⁴⁴, J. Ellis^{1,210}, W. Elmetenawee¹², J. Elmsheuser⁶, V. Daniel Elvira³⁷, S.C. Eno²¹¹, Y. Enomoto²¹², B.A. Erdelyi^{69,166}, O.E. Eruteya^{102,213}, M. Escobar²¹⁴, O. Etisken²¹⁵, I. Eymard¹⁴⁵, J. Eysermans¹⁸⁴, D. Falchieri²⁵, C. Falkenberg²⁰⁶, F. Fallavollita^{1,132}, A. Afalou^{1,9,10}, J. Faltova¹⁹¹, J. Fanini¹, L. Fanò^{64,65}, K. Fanti¹⁰⁶, R. Farinelli²⁵, M. Farino¹⁶⁵, S. Farinon¹⁴¹, H. Fatehi³⁸, J. Fatterbert¹⁰⁶, A. Faure²¹⁶, A. Faus-Golfe^{9,10,11}, G. Favia¹, L. Favilla^{35,119}, W.J. Fawcett³², A. Federowicz³⁷, L. 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. Foraz¹, R. Fortunati², M. Foudaidy^{9,10,11}, M. Fouaidy^{9,10,11}, A. Foussat¹, A. Fowler¹, J.D. Fox²¹⁸, M. Francesconi³⁵, B. Francois¹, R. Franqueira Ximenes¹, F. Fransesini⁴⁸, A. Frasca^{1,186}, A. Freitas²¹⁹, J.A. Frost⁸, K. Furukawa²¹², A. Gabrielli^{25,26}, A. Gaddi¹, F. Gaede⁴, A. Gallén¹³¹, R. Galler^{220,221}, E. Gallice¹⁰⁶, E. Gallo^{4,116}, H. Gamper¹, G. Ganis¹, S. Ganjour³, S. Gao⁶, A. Garand¹⁴⁹, C. Garaus²⁰⁶, D. Garcia¹, R. García Alía¹, R. García Gil²²², C.M. Garcia Jaimes^{1,115}, H. Garcia Rodrigues^{2,223}, C. Garion¹, M. Garlaschè¹, D. Garnier¹⁵⁴, M.V. Garzelli¹¹⁶, S. Gascon-Shotkin^{9,56,57}, M. Gasior¹, G. Gaudino^{35,119}, G. Gaudio¹²⁸, V. Gaur²²⁴, K. Gautam^{74,117}, V. Gawas¹, T. Gehrman⁷⁴, A. Gehrman-De Ridder^{74,152}, K. Geiger¹, M. Genco¹⁵¹, F. Gerigk¹, H. Gerwig¹, A. Ghribi^{1,9,225}, P. Giacomelli²⁵, S. Giagu^{91,172}, E. Gianfelice³⁷, S. Giappichini¹³³, D. Gibellieri^{1,226}, F. Giffoni¹⁵¹, G. Gil da Silveira²²⁷, S.S. Gilardon¹, M. Giovannetti⁴⁸, T. Girardet¹⁰⁶, S. Girod^{1,106}, P. Giubellino⁶⁰, P. Giubilito^{69,166}, F. Giuli^{20,21}, M. Giuliani¹⁰³, E.L. Gkougkousis^{1,74}, S. Glukhov²²⁸, J. Gluza²²⁹, B. Goddard¹, C. Goffing^{1,133}, D. Goldsworthy¹, T. Golling¹⁰², R. Gonçalo^{51,230}, V.P. Gonçalves^{47,231}, T. Gonçalves Da Silva²¹⁴, J. Gonski⁷, R. Gonzalez Suarez¹³¹, S. Gorgi Zadeh¹, S. Gori²³², E. Gorini^{161,233}, L. Gouskos²³⁴, M. Gouzevitch^{9,56,57}, E. Granados¹, F. Grancagnolo¹⁶¹, S. Grancagnolo^{161,233}, A. Grassellino³⁷, A. Grau¹³³, E. Graverini^{40,78,115}, F.G. Gravili^{161,233}, H.M. Gray^{142,235}, M. Grazzini⁷⁴, Mario Greco^{29,111}, Michela Greco^{60,236}, A. Greljo⁴⁹, J-L. Grenard¹, A.V. Gritsan²³⁷, R. Gröber^{69,166}, A. Grudiev¹, E. Gschwendtner¹, J. Gu²³⁸, D. Guadagnoli^{17,138,239}, G. Guerrieri¹, A. Guiavarch²⁰⁹, G. Guillermo Canton^{1,240}, M. Guinchard¹, Y.O. Günaydin²⁴¹, K. Gurcel⁹³, L.X. Gutierrez Guerrero^{242,243}, D. Gutiérrez Rueda¹, A. Gutiérrez-Rodríguez²⁴⁴, V. Guzey^{199,245}, C. Haber¹⁴², T. Hacheney²⁴⁶, B. Hacıahinoglu³³, K. Hahn¹²³, J. Hajer¹³⁰, T. Hakulinen¹, J.C. Hammersley²⁴⁷, M. Hance²³², J.B. Hansen¹⁸⁹, B. Häner¹³³, 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. Klein⁺¹⁸⁶, 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. Kудay^{1,58}, G. Kuhlmann²⁸⁷, O. Kuhlmann^{1,288}, M. Kuhn²⁸⁹, A. Kulesza²⁹⁰, M. Kumar²⁹¹, F. Kurian⁶, A. Kurtulus^{1,152}, T.H. Kwok⁷⁴, S. La Mendola¹, M. Lackner^{99,292}, T. Ładzinski¹, D. Lafarge¹, P. Laïdouni¹, G. Lamanna^{9,16,17}, N. Lamas¹⁹, G. Landsberg²³⁴, C. Lange², D.J. Lange¹⁶⁵, A. Langner¹, A.J. Lankford²⁹³, M.S. Larson²⁹⁴, K. Lasocha¹, A. Latina¹, S. Lauciani⁴⁸, M. Laufenberg¹⁰⁶, G. Lavezzari¹, L. Lavezzi⁶⁰, L. Lavezzo¹, M. Le Garrec^{1,9,16}, A. Le Jeune¹⁰³, Ph. Lebrun^{1,295}, Y. Léchevin¹, A. Lechner¹, E. Lecointe¹⁰⁶, J.S.H. Lee²⁹⁶, S.W. Lee²⁹⁷, S.J. Lee^{281,298}, T. Lefevre¹, C. Leggett¹⁴², T. Lehtinen²⁹⁹, S. Leone⁴⁰, C. Leonidopoulos³⁰⁰, S. Leontsinis⁷⁴, G. Leprince-Maillère³⁰¹, G. Lerner¹, O. Leroy^{9,76,77}, T. Lesiak¹⁰⁸, P. Levai⁷⁹, A. Leveratto⁹², R. Levi¹⁵⁴, A. Li⁶, S. Li^{302,303}, D. Liberati³⁰⁴, G.L. Lichtenstein⁴⁷, M. Liepe²⁴⁹, Z. Ligeti¹⁴², H. Lin³⁰⁵, S. Linda¹⁴⁵, E. Lipeles³⁰⁶, Z. Liu³⁰⁷, S.M. Liuzzo³⁰⁸, T. Loeliger²⁸⁹, A. Loeschcke Centeno³⁰⁹, A. Lorenzetti⁷⁴, C. Lorin³, R. Losito¹, M. Louka^{12,310}, M.L. Loureiro García¹⁸², I. Low^{123,160}, K. Lubonis¹⁵⁴, M.T. Lucchini^{30,31}, V. Lukashenko⁷⁴, G. Luminati⁴⁸, A.J.G. Lunt^{1,311}, A. Lusiani^{40,312}, M. Luzum³¹³, H. Ma⁶, A. Maas³¹⁴, E. Macchia^{1,91,172}, A. Macchiolo⁷⁴, G.E. Machinet²⁶⁵, R. Madar^{9,156,157}, T. Madlener⁴, C. Madrid²³, A. Magalotti²⁹, M. Maggiora^{60,236}, A.-M. Magnan¹⁸³, M.A. Mahmoud³¹⁵, Y. Mahmoud^{316,317}, F. Mahmoudi^{1,9,56}, H. Mainaud Durand¹, J. Maitre¹⁰⁹, Y. Makhloufi¹⁰², B. Malaescu^{9,118,318}, A. Malagoli⁹², C.H. Malan¹⁰⁹, M. Malekhosseini³⁸, M. Malekhosseini³⁸, A. Maloizel^{1,97,98}, S. Malvezzi³⁰, A. Malzac¹⁴⁹, G. Manco¹²⁸, L.S. Mandacarú Guerra¹⁶⁵, P. Manfrinetti^{92,319}, E. Manoni⁶⁴, J. Mans³⁰⁷, L. Mantani³²⁰, S. Manzoni¹, L. Marafatto¹⁶⁹, C. Marcel¹, T. Marcel¹¹⁰, R. Marchevski¹¹⁵, G. Marchiorin^{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. Mittelz²⁴⁶, M. Mlynarikova¹, S. Möbius⁹⁰, M. Mohammadi Najafabadi^{1,14}, G.B. Mohanty³²⁸, R. N. Mohapatra²¹¹, S. Moneta⁶⁴, P.F. Monni¹, E. Monnier^{9,76,77}, S. Monteil^{9,156,157}, I. León Monzón²⁰⁵, F. Moortgat^{1,329}, N. Morange^{9,10,11}, M. Moretti^{147,148}, S. Moretti⁷², T. Morii²¹², I. Morozov¹²⁰, A. Morozzi⁶⁴, M. Morrone¹, A. Moscariello¹⁰², F. Moscatelli^{64,330}, I. Moulin²¹⁶, N. Mounet¹, A. Mueller³³¹, A.-S. Müller¹³³, B.O. Müller²⁸⁷, J. Mundet²²², E. Musa^{1,4}, V. Musat^{1,8}, R. Musenich¹⁴¹, E. Musumeci³²⁰, M. Mylona¹, V.V. Mytrochenko^{9,10,134}, B. Nachman¹⁴², T. Nakamoto²¹², M. Napsuciale³²⁵, M. Nardecchia^{91,172}, G. Nardini³³², G. Narváez-Arango³³³, S. Naseem⁶¹, A. Navascues Cornago¹, B. Naydenov¹, G. Nergiz¹, A.V. Nesterenko²⁷⁸, C. Neubüser³³⁴, H.B. Newman³³⁵, F. Niccoli^{1,336}, O. Nicrosini¹²⁸, U. Niedermayer²²⁸, G. Niehues¹³³, J. Nielsen¹, G. Nigrelli^{1,91,172}, S. Nikitin¹²⁰, I.B. Nikolaev¹²⁰, A. Nisati¹⁷², N. Nitika^{169,170}, J.M. No³³⁷, M. Nonis¹, Y. Nosochkov⁷, A. Novokhatski^{1,7}, J.M. O’Callaghan³³⁸, S.A. Ochoa-Oregon²⁰⁵, K. Ohmi^{204,212}, K. Oide^{1,102,212}, V.A. Okorokov¹²⁰, C. Oleari^{30,31}, D. Oliveira Damazio^{1,6}, Y. Onel¹¹³, A. Onofre^{339,340,341}, P. Osland³⁴², T. Otto¹, Y.M. Oviedo-Torres^{343,344,345}, A. Ozansoy⁵⁸, F. Ozaydin^{88,346}, K. Ozdemir³⁴⁷, A. Ozturk¹, M.A. Pérez de León²⁰⁵, S. Pacetti^{64,65}, H. Pacey⁸, J. Paciello¹⁰⁹, C.E. Pagliarone^{348,349}, A. Paillex¹⁰⁶, H.F. Pais da Silva¹, F. Palla⁴⁰,

A. Pampaloni¹⁴¹, C. Pancotti¹⁵¹, M. Pandurovic³⁵⁰, O. Panella⁶⁴, G. Panizzo^{169,170}, C. Pantouvakis^{69,166}, L. Panwar^{9,118,318}, P. Paolucci³⁵, Y. Papa¹⁰⁶, A. Papaefstathiou³⁵¹, Y. Papaphilippou¹, A. Paramonov¹⁶⁰, A. Paret^{128,352}, B. Parker⁶, V. Parma¹, F. Parodi^{141,319}, M. Parodi¹, B. Paroli^{44,45}, J.A. Parsons³⁵³, D. Passarelli³⁷, D. Passeri^{64,65}, B. Pattnaik³²⁰, A. Patwa³⁵⁴, C. Paus¹⁸⁴, F. Pauss¹⁵², F. Peauger¹, I. Pedraza²¹⁷, R. Pedro⁵¹, J. Pekkanen¹, G. Peon¹, A. Perez¹¹⁰, E. Perez¹, F. Pérez¹⁷³, J.C. Perez¹, J.M. Pérez²⁷, R. Perez-Ramos^{138,139,355}, G. Pérez Segurana¹, A. Perillo Marcone¹, S. Perna^{35,36}, K. Peters⁴, S. Petracca^{35,356}, A.R. Petri⁴⁴, F. Petriello¹²³, A. Petrovic¹, L. Pezzotti²⁵, G. Piacquadio⁶², G. Piazza¹⁸¹, A. Piccini¹, F. Piccinini¹²⁸, A. Pich³²⁰, T. Pieloni¹¹⁵, J. Pierlot¹, A.D. Pilkington⁵², M. Pillet³²⁶, M. Pinamonti^{169,170}, N. Pinto²³⁷, L. Pintucci^{169,170}, F. Pinzauti¹, K. Piotrkowski²⁷³, C. Pira⁴⁸, M. Pitti¹, R. Pittau¹⁹², S. Pittet¹, P. Placidi^{64,65}, W. Płaczek³⁵⁷, S. Plätzer^{314,358}, M.-A. Pleier⁶, E. Ploerer^{74,117}, H. Podlech^{359,360}, F. Poirier^{9,16,17}, G. Polesello¹²⁸, M. Poli Lener⁴⁸, J. Polinski¹⁶³, Z. Polonsky⁷⁴, N. Pompeo²⁹, M. Pont¹⁷³, G. Alexandru-Popeneciu³⁶¹, W. Porod¹⁹⁷, L. Porta¹, L. Portales³, T. Portaluri³⁰⁹, M.A.C. Potenza⁴⁵, C. Prasse²⁸⁷, E. Premat¹⁸⁵, M. Presilla¹³³, S. Prestemon¹⁴², A. Price³⁵⁷, M. Primavera¹⁶¹, R. Principe¹, M. Prioli⁴⁴, F.M. Procacci¹², E. Proserpio^{44,135}, A. Provino^{92,319}, C. Pueyo¹, T. Puig¹⁹, N. Pukhaeva²⁷⁸, S. Pulawski²²⁹, G. Punzi^{40,78}, A. Pyarelal³⁶², J. Qian³⁰⁵, H. Quack³⁶³, F. S. Queiroz⁴⁷, G. Quintas-Neves³⁰¹, H. Rafique⁷², J.-Y. Raguin², J. Raidal³²², M. Raidal³²², P. Raimondi³⁷, A. Rajabi⁴, S. Ramírez-Urbe²⁰⁵, S. Randles¹⁸⁶, T. Rao⁶, C.Ø. Rasmussen⁶, A. Ratkus³⁶⁴, P.N. Ratoff^{53,365}, P. Razis^{366,367}, P. Rebello Teles^{1,368}, M.N. Rebelo¹³⁰, M. Reboud^{9,10,11}, S. Redaelli¹, C. Regazzoni¹⁰⁶, L. Reichenbach^{1,369}, M. Reissig¹³³, E. Renou¹⁰⁶, A. Rentería-Olivo³²⁰, J. Reuter⁴, S. Rey¹⁰⁶, A. Ribon¹, D. Ricci¹, M. Rignanese^{69,166}, S. Rimjaem³⁷⁰, R.A. Rimmer³⁷¹, R. Rinaldesi¹, L. Rinaldi^{1,295}, O. Rios¹, G. Ripellino¹³¹, B. Rivas³⁷², A. Rivetti⁶⁰, T. Robens³⁷³, F. Robert¹⁸⁵, E. Robutti¹⁴¹, C. Roderick¹, G. Rodrigo³²⁰, M. Rodríguez-Cahuantzi²¹⁷, L. Röhrig^{156,157,246}, M. Roig³⁷⁴, F. Rojati¹⁰⁹, J. Rojo^{203,375}, J. Roloff²³⁴, P. Roloff¹, A. Romanenko³⁷, A. Romero Francia¹, H. Romeyer³⁷⁶, N. Rompotis¹⁸⁶, N. Rongieras¹⁰³, G. Rosaz¹, K. Roslon³⁷⁷, M. Rossetti Conti⁴⁴, A. Rossi^{64,65}, E. Rossi^{35,36}, L. Rossi^{44,45}, A.N. Rossia^{69,166}, S. Rostami³⁸, G. Roy¹, B. Rubik³⁷, I. Ruehl¹, A. Ruiz-Jimeno³⁷⁸, R. Ruprecht¹³³, J.P. Rutherford³⁶², L. Rygaard⁴, M.S. Ryu²⁹⁷, L. Sabato^{1,115}, G. Sadowski^{9,42,43}, D. Saez de Jauregui^{133,379}, M. Sahin³⁸⁰, A. Sailer¹, M. Saito³⁸¹, P. Saiz¹, G.P. Salam^{382,383}, R. Salerno^{9,82,83}, T. Salmi²⁹⁹, B. Salvachua¹, J.P.T. Salvesen^{1,8,137}, B. Salvi³⁰¹, D. Sampsonidis²⁸⁶, Y. Villamizar^{138,139,140}, C. Sandoval³³³, S. Sanfilippo², E. Santopinto¹⁴¹, R. Santoro^{44,135}, X. Sarasola¹¹⁵, L. Sarperi²⁸⁹, I.H. Sarpün³⁸⁴, S. Sasikumar¹, M. Sauvain³⁸⁵, A. Savoy-Navarro^{3,9}, R. Sawada³⁸¹, G. Sborlini³⁸⁶, J. Scamardella^{35,36}, M. Schaer², M. Schaubmann^{1,4}, M. Schenk¹, C. Scheuerlein¹, C. Schiavi^{141,319}, A. Schloegelhofer¹, D. Schoerling¹, A. Schöning²⁶⁶, S. Schramm¹⁰², D. Schulte¹, P. Schwaller^{253,387}, A. Schwartzman⁷, Ph. Schwemling³, R. Schwienhorst³⁸⁸, A. Sciandra⁶, L. Scibile¹, I. Scimemi³⁸⁹, E. Scomparin⁶⁰, C. Sebastiani¹, B. Seeber³⁹⁰, J.T. Seeman⁷, F. Sefkow⁴, M. Seidel^{2,115}, S. Seidel⁷⁵, J. Seixas^{341,391,392}, N. Selimovic⁶⁹, M. Selvaggi¹, C. Senatore¹⁰², A. Senol¹⁹⁶, N. Serra⁷⁴, A. Seryi³⁷¹, A. Sfyrila¹⁰², Pramond Sharma³⁹³, Punit Sharma⁶, C.J. Sharp¹, L. Shchutska¹¹⁵, V. Shiltsev³⁹⁴, M. Siano^{44,45}, R. Sierra¹, E. Silva²⁹, R.C. Silva^{47,345}, L. Silvestrini¹⁷², F. Simon¹³³, G. Simonetti¹, R. Simoniello¹, B.K. Singh³⁹⁵, S. Singh⁶, B. Singhal⁸⁰, A. Siodmok^{1,357}, Y. Sirois^{59,82,83}, E. Sirtori¹⁵¹, B. Sitar³⁹⁶, D. Sittard¹, E. Sitti¹⁵², T. Sjöstrand⁵⁹, P. Skands³⁹⁷, L. Skinnari²⁹⁴, K. Skoufaris¹, K. Skovpen³²⁹, M. Skrzypek¹⁰⁸, P. Slavich^{138,139,140}, V. Slokenbergs²³, V. Smaluk⁶, J. Smiesko^{1,398}, S.S. Snyder⁶, E. Solano¹⁷³, P. Sollander¹, O.V. Solovyanov^{1,9,156}, M. Son³⁹⁹, F. Sonnemann¹, R. Soos^{1,9,10}, F. Sopkova¹⁹¹, T. Sorais⁴⁰⁰, M. Sorbi^{44,45}, S. Sorti^{44,45}, R. Soualah⁴⁰¹, M. Souayah¹, L. Spallino⁴⁸, S. Spanier⁴⁰², P. Spiller²⁶⁰, M. Spira², D. Stagnara¹⁰³, M. Stallmann¹⁸⁸, D. Standen¹, J.L. Stanyard¹, B. Stapf¹, G.H. Stark²³², M. Statera⁴⁴, C. Staudinger^{1,206}, G. Streicher⁴⁰³, N.P. Strohmaier², R. Stroynowski¹⁰⁷, S. Stucci⁶, G. Stupakov⁷, S. Su³⁶², A. Sublet¹, K. Sugita²⁶⁰, M.K. Sullivan⁷, S. Sultansoy²⁴, I. Syrathev¹, R. Szafron⁶, A. Sznajder⁴⁰⁴, W. Tachon⁴⁰⁵, N.D. Tagdulang^{37,173,338}, N.A. Tahir²⁶⁰, Y. Takahashi¹²⁴, J. Tamazirt^{9,10,11}, S. Tang⁶, Y. Tanimoto²¹², I. Tapan²⁷⁶, G.F. Tassielli^{12,406}, A.M. Teixeira^{9,156,157}, V.I. Telnov¹²⁰, H.H.J. Ten Kate^{1,407}, V. Teotia⁶, J. ter Hoeve³⁰⁰, A. Thabuis¹, G.T. Telles¹⁹, A. Tishelman-Charny⁶, S. Tissandier¹⁰⁹, S. Tizchang^{14,408}, J.-P. Tock¹, B. Todd¹, L. Toffolin^{1,169,409}, A. Tolosa-Delgado¹, R. Tomás García¹, T. Tomasini⁴¹⁰, G. Tonelli^{40,78}, T. Tong⁴¹¹, F. Toral²⁷, T. Torims^{1,364}, L. Torino¹⁷³, K. Torokhtii²⁹, R. Torre¹⁴¹, E. Torrence⁴¹², R. Torres^{53,186}, Toshiyuki Mitsuhashi²¹², A. Tracogna¹⁵¹, O. Traver¹⁷³, D. Treille¹, A. Tricoli⁶, P. Trubacova¹, E. Tsesmelis¹, G. Tsiopolitis²⁷⁰, V. Tsulaia¹⁴², B. Tuchming³, C.G. Tully¹⁶⁵, I. Turk Cakir⁵⁸, C. Turrioni¹⁶⁴, J.

Tynan¹⁰⁶, F.P. Ucci^{128,352}, S. Udongwo⁴¹³, C.S. Ün²⁷⁶, A. Unnervik¹, A. Upegui^{100,101}, J.P. Uribe-Ramírez²⁰⁵, J. Uythoven¹, R. Vaglio^{36,92}, F. Valchkova-Georgieva⁴¹⁴, P. Valente¹⁷², R.U. Valente¹⁷², A.-M. Valente-Feliciano³⁷¹, G. Valentino^{1,194}, C.A. Valerio-Lizarraga^{205,325}, S. Valette¹, J.W.F. Valle³²⁰, L. Valle¹, N. Valle¹²⁸, N. Vallis^{1,2,115}, G. Vallone¹⁴², P. van Gemmeren¹⁶⁰, W. Van Goethem¹, P. van Hees⁵⁹, U. van Rienen⁴¹³, L. van Riesen-Haupt^{1,115}, P. Van Trappen¹, M. Vande Voorde^{415,416}, A.L. Vanel¹, E.W. Varnes³⁶², J.-L. Vay¹⁴², F. Veit²⁸⁷, I. Veliscek⁶, R. Veness¹, A. Ventura^{161,233}, M. Verducci^{40,78}, C.B. Verhaaren⁴¹⁷, C. Vernieri⁷, A.P. Verweij¹, J.-F. Vian⁴¹⁸, A. Vicini^{44,45}, N. Vignaroli^{161,233}, S. Vignetti¹⁵¹, M.C. Villeneuve²²⁰, I. Vivarelli^{25,26}, E. Voevodina^{1,132}, D.M. Vogt⁴¹⁹, B. Voirin⁴²⁰, S. Voiriot¹⁰⁶, J. Voiron¹⁴⁵, P. Vojtyla¹, V. Völk¹, L. von Freeden¹, Z. Vostrel^{1,421}, N. Voumard¹, E. Vryonidou⁵², V. Vysotsky¹²⁰, R. Wallny¹⁵², L.-T. Wang⁴²², Y. Wang^{9,10,11}, R. Wanzenberg⁴, B.F.L. Ward⁴²³, N. Wardle¹⁸³, Z. Wang¹⁰⁸, 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. Widorski¹, 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 - Istanbul Üniversitesi
- 34 Turquie - Eskişehir Teknik Üniversitesi
- 35 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Napoli
- 36 Italie - Università di Napoli Federico II
- 37 États Unis d'Amérique - FNAL, Fermi National Accelerator Laboratory
- 38 Iran - University of Tehran
- 39 Iran- FUM, Ferdowsi University of Mashhad
- 40 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Pisa
- 41 États Unis d'Amérique - University of Texas Austin
- 42 France - IPHC, Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien
- 43 France - Université de Strasbourg
- 44 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Milano
- 45 Italie - Università di Milano
- 46 Suisse - PIBG, Pôle Invertébrés du Basin Genevois
- 47 Brésil - UFRN, Universidade Federal do Rio Grande do Norte
- 48 Italie - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Laboratori Nazionali di Frascati
- 49 Suisse - UNIBAS, University of Basel
- 50 Italie - Politecnico di Bari
- 51 Portugal - LIP, Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas
- 52 Royaume Uni - University of Manchester
- 53 Royaume Uni - CI, Cockcroft Institute
- 54 États Unis d'Amérique - Brandeis University
- 55 Arménie - A. Alikhanyan National Laboratory
- 56 France - IP2I, Institut de Physique des 2 Infinis de Lyon
- 57 France - Université Claude Bernard Lyon 1
- 58 Turquie - Ankara Üniversitesi

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

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

Universidade de Lisboa

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

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

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

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

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

- 389 Espagne - Universidad Complutense Madrid
- 390 Suisse - scMetrology SARL
- 391 Portugal - IST, Instituto Superior Tecnico, Universidade de Lisboa
- 392 Portugal - CeFEMA, Center of Physics and Engineering of Advanced Materials
- 393 Inde - Indian Institute of Science Education and Research Mohali
- 394 États Unis d'Amérique - NIU, Northern Illinois University
- 395 Inde - Banaras Hindu University
- 396 Slovaquie - Comenius University
- 397 Australie - Monash University
- 398 Slovaquie - Slovak Academy of Sciences
- 399 République de Corée - KAIST, Korea Advanced Institute of Science and Technology
- 400 France - Amberg Engineering Chambéry
- 401 Émirats arabes unis - Khalifa University of Science and Technology
- 402 États Unis d'Amérique - University of Tennessee
- 403 Autriche - WIFO, Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung
- 404 Brésil - Universidade do Estado do Rio de Janeiro
- 405 France - Mélica, NATURA SCOP, Études et expertises environnementales
- 406 Italie - Università LUM, Casamassima
- 407 Pays Bas - University of Twente
- 408 Iran - Arak University
- 409 Italie - Università di Trieste
- 410 France - ForestAllia, Cabinet de gestion et d'expertise forestières
- 411 Allemagne - Universität Siegen
- 412 États Unis d'Amérique - University of Oregon
- 413 Allemagne - Universität Rostock
- 414 Suisse - CEGELEC SA
- 415 Suède - KTH, Royal Institute of Technology, Stockholm
- 416 Suède - OKC, Oskar Klein Centre for Cosmoparticle Physics
- 417 États Unis d'Amérique - Brigham Young University
- 418 France - Expert foncier et agricole
- 419 Allemagne - ITSM, Institut für Thermische Strömungsmaschinen und Maschinenlaboratorium, Universität Stuttgart
- 420 France - École Normale Supérieure de Lyon
- 421 République Tchèque - CTU, Czech Technical University
- 422 États Unis d'Amérique - University of Chicago
- 423 États Unis d'Amérique - Baylor University
- 424 Royaume Uni - University of Birmingham
- 425 Royaume Uni - University of Southampton

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

Résumé

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

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

Préface de la Directrice générale du CERN

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

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

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

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

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

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

Fabiola Gianotti CERN,
Directrice générale

Préface du Président du conseil de collaboration FCC

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

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

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

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

Philippe Chomaz CEA,

Président du comité de collaboration internationale FCC

Table des matières

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

2. Implantation territoriale

2.1. Introduction

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

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

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

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

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

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

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

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

pouvoir satisfaire aux trois exigences suivantes :

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

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

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

2.2. Méthodologie pour développer un projet durable

2.2.1. Approche

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

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

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

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

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



Implementation/Implementation-Figs/ERC.pdf

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

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

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

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



Implementation/Implementation-Figs/PDCA.pdf

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



Implementation/Implementation-Figs/ERM.pdf

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

2.2.2. Processus itératif

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



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

2.2.3. Évaluation des scénarios

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



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

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



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

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

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

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

Implementation/Implementation-Figs/100-scenarios.pdf

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

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

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

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

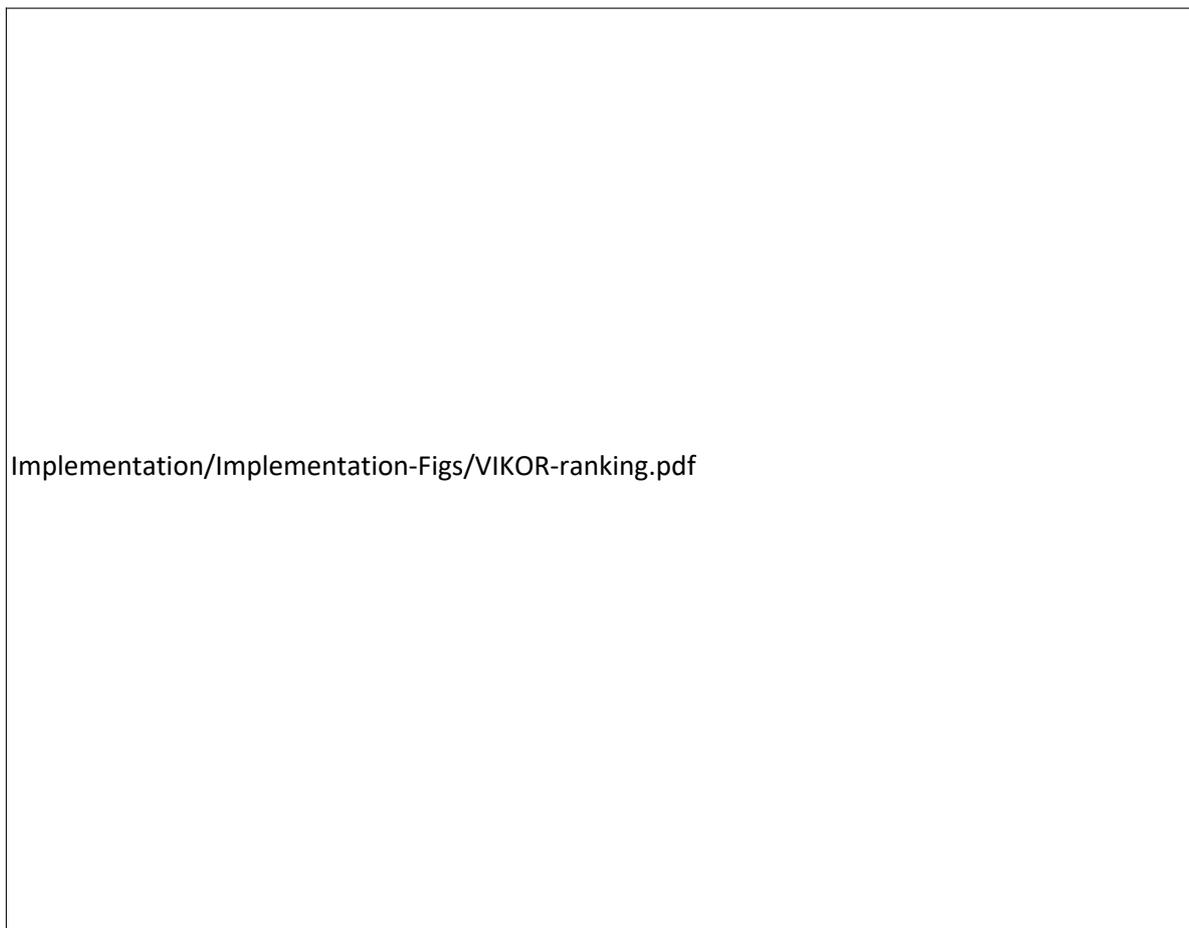


Fig. 2.8 : Classement basé sur une analyse multicritères des scénarios de mise en œuvre les plus prometteurs en 2022 avec les performances des améliorations progressives de la classe de scénario de référence PA31.

2.3. Exigences et invariants

2.3.1. Exigences motivées par la science et la technologie

Configuration

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

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

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



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

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

Circonférence totale

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

Nombre de sites de surface

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

Nombre de points d'interaction

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

Longueur de la cellule d'arc

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

Nombre total de cellules d'arc

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

Longueur totale des arcs

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

Harmoniques du système de radiofréquences

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

Longueur de la section droite aux points d'interaction

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

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

Longueur de section droite aux sites radiofréquences

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

Besoins en eau de refroidissement

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

Besoins en électricité

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

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

Besoins en espace pour les sites de surface techniques

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

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

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

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

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

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

Besoins en espace des sites d'expérience en surface

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

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

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

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

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

Les exigences locales spécifiques sont donc plus élevées.

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

2.3.2. Invariants initiaux

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

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

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

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

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

2.3.3. Objectifs volontaires

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

Exploitation et maintenance durables

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

Protection des terres agricoles

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

Accessibilité des sites de surface par la route

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

Nuisances

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

Intégration paysagère

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

Protection des eaux

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

Forêts

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

Synergies

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

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

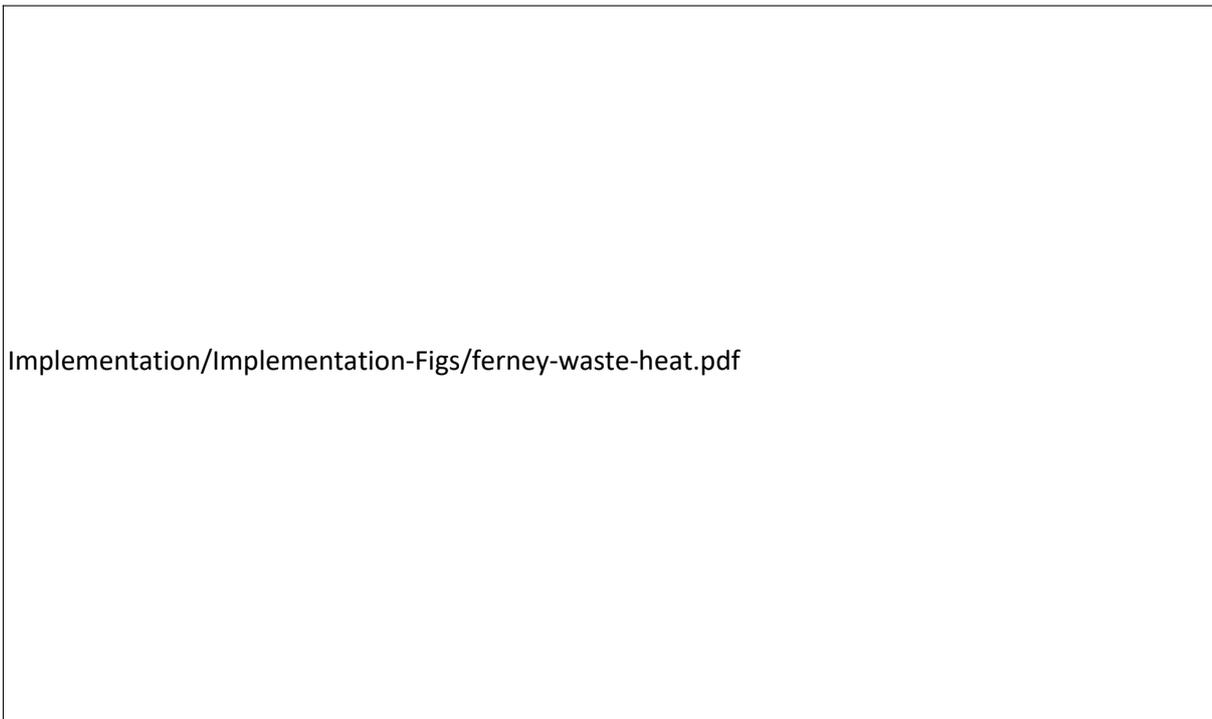


Fig. 2.10 : Réseau de chaleur alimenté par le CERN en cours de construction à Ferney-Voltaire, France.

Réduction des besoins en infrastructures électriques

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

Matériaux excavés

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

Utilisation des sols

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

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

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

Biodiversité et nature

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

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

2.4. Contraintes territoriales

2.4.1. Grille de sensibilité territoriale

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

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

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

Implementation/Implementation-Figs/RED.pdf

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

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

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

Implementation/Implementation-Figs/ORANGE.pdf

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

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

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

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

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

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

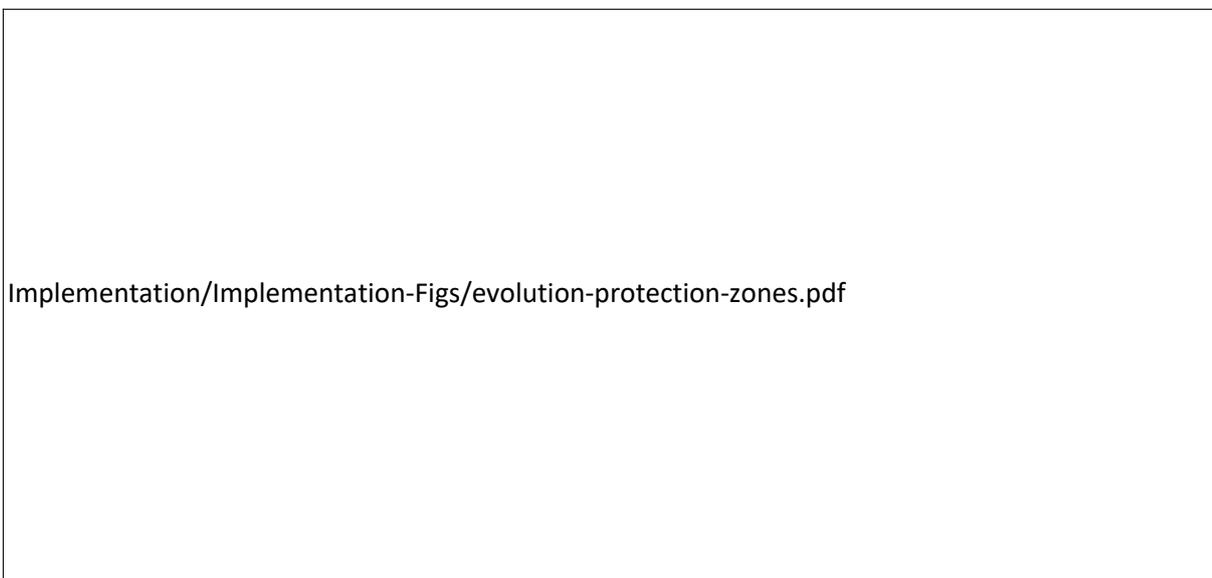


Fig. 2.13 : : Exemples d'évolution du territoire. À gauche : 17 ha de nouvelles zones d'exclusion à Ferney-Voltaire (Ain, France). À droite : 790 ha d'inventaire des tourbières au bord du Rhône en France, en rouge clair les zones précédemment en orange et devenues des zones rouges.

2.4.2. Contraintes souterraines

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

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

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

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

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

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

2.4.3. Topographie, bathymétrie et autres caractéristiques de surface

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

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

2.4.4. Souplesse d'élaboration d'un scénario

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



Implementation/Implementation-Figs/Subsurface_limits.pdf

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

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

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



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

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



Implementation/Implementation-Figs/slopes.pdf

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



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



Fig. 2.18 : : Bathymétrie du lac Léman.

2.5. Variantes initiales

2.5.1. Introduction

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

Implementation/Implementation-Figs/geoconstraints.pdf

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

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

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

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

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

2.5.2. Scénarios à l'ouest du Jura

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

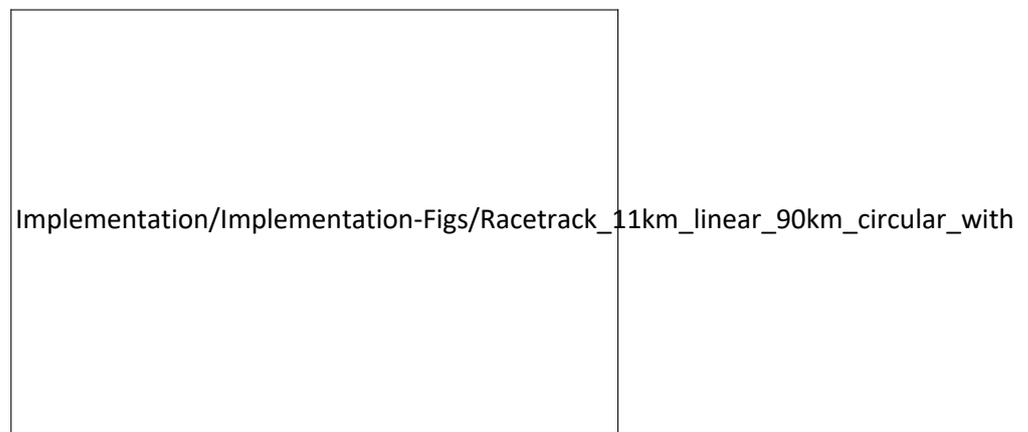


Fig. 2.21 : Scénario de circuit en forme d'hippodrome avec deux sections droites de 11 km de longueur, soit une circonférence totale de 90 km.

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

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

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

Implementation/Implementation-Figs/Racetrack_11km_linear_90km_circular_placement.p

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

Implementation/Implementation-Figs/racetrack_alignment.pdf

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

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

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

2.5.4. Scénarios à l'est du Jura

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

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



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

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

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

Implementation/Implementation-Figs/east-Jura.pdf

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

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

2.6. Scénario de référence

2.6.1. Introduction

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

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

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

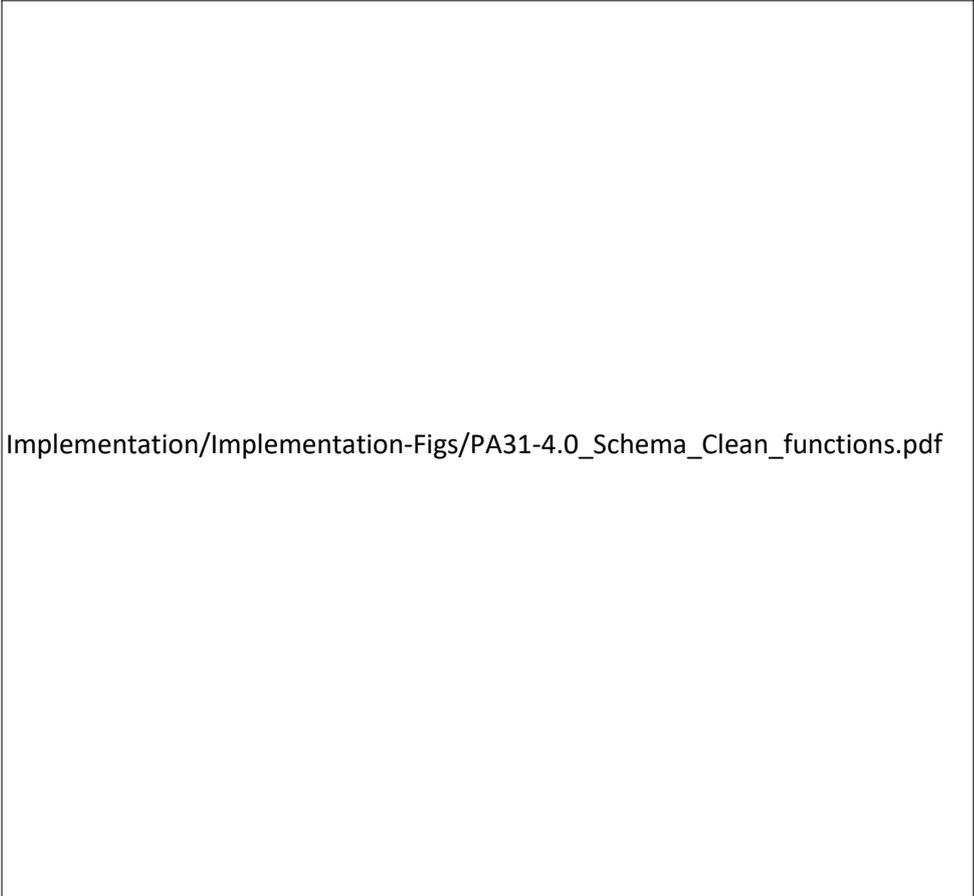
Implementation/Implementation-Figs/EPCI_Communes_PA31-4.pdf

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

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

2.6.2. Caractéristiques du scénario

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



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

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

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

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

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

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

2.6.3. Paramètres du scénario

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

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

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

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

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

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

2.6.4. Performances multicritères du scénario de référence

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

Tableau 2.4 : Paramètres de présentation du collisionneur de particules.

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

2.6.5. Site PA

Description de l'emplacement du site

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

Contraintes connues

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

Tableau 2.5 : Paramètres de présentation du collisionneur de particules.

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

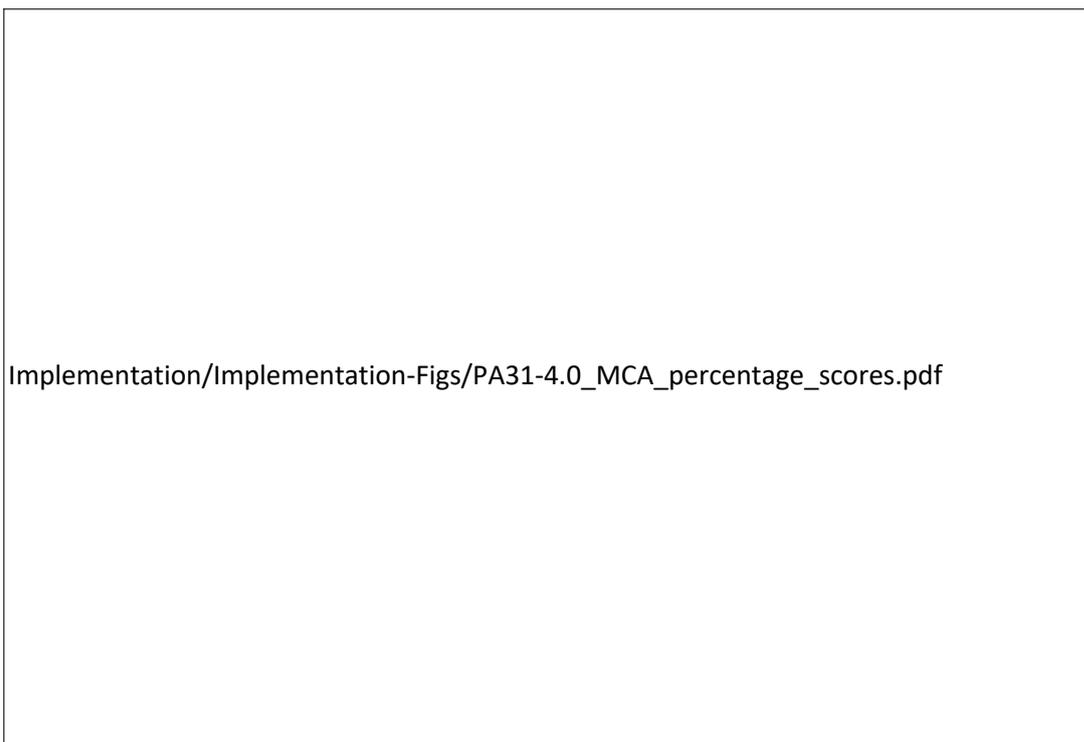


Fig. 2.28 : Analyse multicritères des scores en pourcentage de chaque site de surface et de l'ensemble du tracé du collisionneur pour le scénario PA31-4.0. Il faut noter que les sites PC, PE, PI et PK n'existent pas dans les scénarios à 8 sites. Les lignes bleues indiquent les seuils de performance individuels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

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

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



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

Synergies et potentiels territoriaux

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



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

2.6.6. Site PB

Description de l'emplacement du site

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

Contraintes connues

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

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



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

Synergies et potentiels territoriaux

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



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

2.6.7. Site PD

Description de l'emplacement du site

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

Contraintes connues

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

Synergies et potentiels territoriaux

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

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



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

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

2.6.8. Site PF

Description de l'emplacement du site

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

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



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

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

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

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

Contraintes connues

Site principal à Éteaux :

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

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



Fig. 2.35 : Vue aérienne de l'emplacement candidat pour le site de surface PF.

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

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



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



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

Synergies et potentiels territoriaux

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

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

2.6.9. Site PG

Description de l'emplacement du site



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

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



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

Contraintes connues

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

Synergies et potentiels territoriaux

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

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

2.6.10. Site PH

Description de l'emplacement du site



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

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

Contraintes connues

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



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

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

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

Synergies et potentiels territoriaux

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

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



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

2.6.11. Site PJ

Description de l'emplacement du site

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

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

Contraintes connues

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



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

Synergies et potentiels territoriaux

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

2.6.12. Site PL

Description de l'emplacement du site

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

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

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



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

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

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

Contraintes connues

Option d'emplacement au point nominal

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



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



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

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

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

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

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

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

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



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

Synergies et potentiels territoriaux

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

2.6.13. Site de Prévessin

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

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

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

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

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

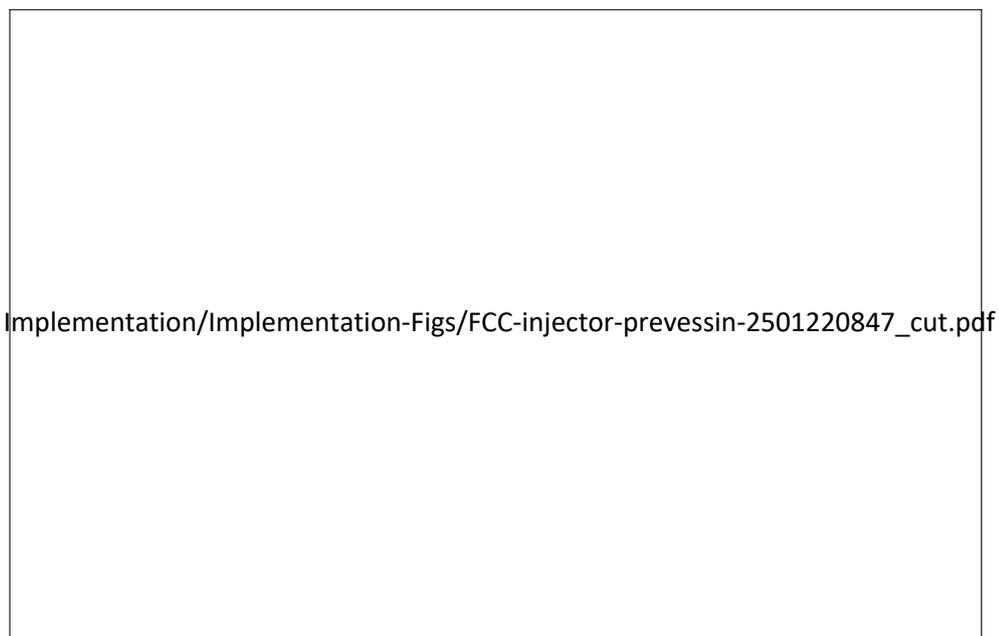


Fig. 2.48 : Croquis de l'hypothèse de travail actuelle pour un injecteur basé sur un accélérateur linéaire d'une longueur d'environ 1,2 km. Un emplacement définitif reste à définir dans le cadre d'une phase de conception, en tenant compte des contraintes liées à l'environnement, aux installations expérimentales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

2.6.14. Conclusion

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

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

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

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

2.7. Besoins en infrastructures territoriales

2.7.1. Introduction

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



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

2.7.2. Accès routier

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

Plusieurs sites de surface peuvent bénéficier d'un accès routier direct (PA, PD, PF, PH) et d'autres nécessitent un renforcement mineur de l'accès routier existant (800 m de chemin forestier à revêtir pour PG, 600 m de chemin rural à revêtir pour PJ). Le site PD nécessite la création d'un accès réservé de 300 m de long. Le site PL nécessite la création d'un accès réservé d'environ 1 300 m de longueur. Au total, moins de 3 km de route doivent être créés.



Fig. 2.50 : Vue d'ensemble du réseau de transport routier et ferroviaire dans le périmètre du scénario de référence.

Une analyse du trafic routier [38] a été effectuée pour tous les sites et la faisabilité de la construction a été vérifiée grâce à ce travail. Les conceptions techniques des accès routiers ont été élaborées pour les sites PB, PD et PF afin de garantir la faisabilité dans des zones soumises à des contraintes particulières en matière de circulation routière, liées à la visibilité et à la sécurité routière dans le cas du site PB, à un important projet d'élargissement de la route et de développement de l'autoroute dans le cas du site PD, et à la sécurité routière dans le cas du site PF. Des conceptions détaillées des accès routiers doivent maintenant être réalisées pour tous les sites afin d'élaborer un ensemble cohérent de conceptions qui est nécessaire pour les évaluations de l'impact sur l'environnement et l'autorisation du projet.

Implementation/Implementation-Figs/road-accesses.pdf

Fig. 2.51 : Vue d'ensemble des concepts d'accès routier pour chacun des sites de surface.

2.7.3. Accès à l'autoroute

L'étude a examiné la faisabilité de raccordements au réseau autoroutier pour l'évacuation des matériaux et l'approvisionnement du matériel pendant la phase de construction [39]. Cette éventualité de raccordements autoroutiers, que ce soit directement, par l'intermédiaire de convoyeurs ou par des chemins en gravier s'inscrit dans un objectif d'intérêt général, visant à limiter les impacts du projet, notamment pendant la phase du chantier. Les choix techniques spécifiques seront faits ultérieurement, lors de la phase d'élaboration et de préparation du projet. Afin de vérifier la faisabilité technique, juridique et financière de l'accès direct aux autoroutes, des dossiers contenant des plans d'aménagement et des descriptions ont été constitués et soumis pour examen le 14 septembre 2022 à l'autorité compétente pour la délivrance des concessions : la Direction générale des infrastructures, des transports et des mobilités (DGITM), la Direction générale des infrastructures, des transports et des mobilités/Direction des mobilités routières/Sous-direction des financements innovants et du contrôle des concessions autoroutières/le Chef du Bureau des services aux usagers et de la comodalité et la Direction générale des infrastructures, des transports et des mobilités/Direction des mobilités routières/Sous-direction des financements innovants et du contrôle des concessions autoroutières/le Chef du Bureau du patrimoine et de l'aménagement.

La faisabilité de quatre nouveaux raccordements au réseau autoroutier a été analysée et son principe a été confirmé (voir Fig. 2.52) pour les sites suivants :

1. site PD à Nangy (sur l'autoroute A40) ;
2. Site PF à Éteaux/La Roche-sur Foron (sur l'autoroute A410),
3. site PG à Charvonnex/Groisy (sur l'autoroute A40) ;
4. site PJ à Dingy-en-Vuache/Vulbens (sur l'autoroute A410).

Les conclusions des interactions avec la DGITM ont été les suivantes :

- Les concepts d'accès et les aires de chargement/déchargement prévues sont en principe acceptables ;
- Des ajustements seront nécessaires, car les décisions finales seront prises avec l'exploitant de l'autoroute en phase de projet ;
- Des plans détaillés doivent être élaborés et présentés ;
- La procédure de demande future a été détaillée ; – Les justifications proposées, au nom de l'intérêt général, sont acceptables ;
- Les entrées-sorties devront être équipées de dispositifs de détection pour gérer les péages.

2.7.4. Accès au réseau ferroviaire

Afin de réduire la circulation des camions, de créer de nouvelles possibilités d'approvisionnement en matériaux de construction de qualité sur de plus grandes distances et d'ouvrir des possibilités de transport des matériaux excavés vers des sites de dépôt appropriés et des lieux de réutilisation d'une manière respectueuse de l'environnement et à haute capacité, des études sur les conditions d'accès ferroviaire ont été réalisées par une société spécialisée dans ce domaine [40–48].

Le scénario de référence actuel a été pris comme hypothèse de travail pour analyser les opportunités et les faisabilités concernant l'accès au système ferroviaire via les installations existantes (installations de chargement et de déchargement des marchandises) et concernant la création de nouveaux accès (appelés ITE, « Installations terminales embranchées »).

Les études ont utilisé une analyse multicritères qui a pris en compte les indicateurs suivants :

- Proximité du site de surface par rapport à une voie ferrée appropriée ;
- Compatibilité technique et administrative pour l'accès aux infrastructures ferroviaires françaises et suisses ;
- Présence d'un service ou d'une ITE existante qui pourrait être exploité ;



Fig. 2.52 : Localisation des raccordements autoroutiers, qui ont été étudiés à partir des aires de service et de repos existantes. Les points bleus correspondent aux aires de repos des autoroutes, les points magenta aux stations-service des autoroutes et les points verts aux gares de péage.

- Faisabilité de la création d'une liaison de transport entre le site et l'accès à la voie ferrée ;
- Exigences minimales d'espace pour l'accès ferroviaire et l'espace disponible ;
- Nombre de convois nécessaires pour évacuer tous les matériaux excavés ;
- Analyse de la capacité disponible et des limitations sur chaque ligne ferroviaire.

Il est important de garder à l'esprit que chaque nouvel accès ferroviaire nécessite un espace d'environ 400 m sur 40 m, soit 1,6 ha de terrain (voir Fig. 2.53).

La ligne de train 890000 passant par Meyrin, Collonges fournit aujourd'hui la capacité libre nécessaire. La ligne 902000 à Vulbens et la ligne 897000 passant à Éteaux et à Groisy n'ont que des capacités limitées.

L'analyse a révélé les possibilités « de principe » suivantes pour les accès ferroviaires :

Sur la base de l'analyse, les accès les plus probables au système ferroviaire sont aujourd'hui la gare existante et inutilisée de Collonges pour le site PL, un nouvel accès au nord de Vulbens pour le site PJ et un nouvel accès à l'ouest de Groisy pour le site PG. Alors que l'ancienne gare de Collonges se trouve à 13 km du site de surface PL à Challex, un raccordement avec une bande transporteuse peut représenter une approche appropriée, évitant le trafic de camions.

La faisabilité de principe de la création d'un accès à La-Roche-sur-Foron sur le site d'une

Implementation/Implementation-Figs/ITE.pdf

Fig. 2.53 : Espace minimum requis pour un nouvel accès ferroviaire pour le transport de marchandises.

Tableau 2.7 : Possibilités d'accès ferroviaire pour chaque site de surface.

Site	Distance	Faisabilité	Description
PA	Moins de 5 km	Incertaine	Nécessite le transport transfrontalier de matériaux
PB	Moins de 5 km	Faible	Nécessite le transport transfrontalier de matériaux
PD	Aucune possibilité à moins de 10 km	Irréalizable	
PF	Moins de 1 km	Moyenne	Contraintes d'espace et présence d'une ISDI
PG	Moins de 2 km	Moyenne	Contraintes d'implantation
PH	Aucune possibilité à moins de 10 km	Irréalizable	
PJ	Moins de 5 km	Forte	
PL	Moins de 10 km	Forte	Via la gare existante et inutilisée de Collonges

installation de stockage de déchets inertes (I.S.D.I.) existe dès lors que cette installation aura été remplie. Cependant, les quantités de matières produites sur le site PF sont limitées par rapport à d'autres sites, et les contraintes liées au statut de l'installation (ICPE en France) et à l'espace disponible nécessitent une analyse minutieuse des coûts/bénéfices et de la faisabilité administrative, en plus de l'analyse technique.

La faisabilité technique et administrative d'un accès ferroviaire à l'aéroport de Genève en Suisse pour le site PA en France fait l'objet d'une analyse spécifique qui ne sera réalisée qu'en 2025. Si cela est techniquement possible, une difficulté administrative doit être résolue en ce qui concerne le transport transfrontalier de matériaux dans les deux sens : de la France vers la Suisse pour les matériaux excavés et de la Suisse vers la France pour les matériaux et équipements de construction.

La création d'une nouvelle ITE nécessite une dizaine d'années de planification, d'élaboration détaillée de variantes à présenter pour autorisation, une étude économique de la demande concernant l'utilisation au-delà de la phase de construction du FCC, une évaluation de l'impact environnemental et le processus d'autorisation. La mise en œuvre en vue d'une utilisation nécessite environ 2 ans.

Si l'accès ferroviaire doit être utilisé pour l'évacuation des matériaux et l'approvisionnement en matériaux et équipements de construction, un projet détaillé et commun avec les services d'administration des réseaux ferroviaires nationaux français et suisse devrait être lancé de manière prospective, à partir de 2025.

2.7.5. Liaisons par convoyeurs

Afin de réduire le besoin de chemins temporaires et le trafic de camions dû aux matériaux excavés et aux transports liés aux matériaux de construction entre les sites et les accès à l'autoroute, des études ont été réalisées à titre d'exemples, par une société spécialisée dans le domaine, pour déterminer la faisabilité de liaisons par convoyeurs [45,49]. Deux sites ont été sélectionnés pour l'étude de cas : PJ (Vulbens et Dingy-en-Vuache, France) et PG (Charvonnex et Groisy, France). Il convient de souligner que les conclusions s'appliquent également aux autres sites qui ont fait l'objet d'un examen approfondi, mais pour lesquels aucun projet technique n'a été élaboré. Si une phase de projet préparatoire est lancée, des variantes de conception technique détaillées pour les tracés et les technologies de convoyage dans le cadre d'une hypothèse de construction doivent être élaborées pour les huit sites et soumises pour autorisation dans le cadre de la procédure d'autorisation environnementale du projet.

Les convoyeurs fonctionneraient à l'électricité avec une capacité de 120 kW entre le début et la fin des activités de construction. Sur la base d'une vitesse de 2 à 2,5 m/s et d'une largeur de 650 à 800 mm au maximum, le calendrier suivant a été établi :

- 22 jours par mois ;
- 226 jours par an ;
- Jusqu'à 8 heures par jour ;
- Horaires de service entre 08h00 le matin et 18h00 le soir ;
- Hors service la nuit, les week-ends et les jours fériés.

Différentes technologies pour les systèmes de convoyage ont été analysées et leurs coûts ont été estimés pour les deux sites spécifiques PG et PJ. En fonction des conditions environnementales (topographie, terrain, végétation, contraintes urbaines), différents systèmes de limitation des emprises et du bruit peuvent être envisagés. En général, le choix est toujours déterminé par l'objectif de limiter l'encombrement et les nuisances pour les capacités requises, limitées par les contraintes techniques disponibles. Les espaces publics seront mis à profit dans la mesure du possible. Les nouvelles routes seraient limitées à une largeur de 3 mètres. L'entretien des nouveaux itinéraires est limité : ils ne sont pas permanents et l'espace utilisé sera remis en état après utilisation.

La possibilité de répondre aux exigences de capacité associées à un chantier de construction utilisant 2 tunneliers a été confirmée d'un point de vue technique et environnemental. Les niveaux de bruit se situent entre 65 dB(A) directement au niveau du convoyeur et 47 dB(A) à une distance de 64 m avec la technologie actuelle disponible sur le marché. Des exemples d'itinéraires ont été développés pour confirmer la compatibilité avec les réglementations françaises en matière de bruit pour les deux sites d'étude.

Pour le site PJ, le convoyeur peut être créé jusqu'à la station-service de l'autoroute à Valleiry (distance 700 m) et/ou jusqu'à un nouvel accès ferroviaire au nord de Vulbens (1565 m) en dehors de toute zone résidentielle. Il doit traverser la route départementale RD 1206. Les perturbations dues au bruit peuvent être évitées dans les deux cas.

Pour le site PG, le convoyeur peut être créé jusqu'à l'aire de service de l'autoroute à Groisy (distance d'environ 800 m) et/ou jusqu'à un nouvel accès ferroviaire au nord de l'autoroute (925 m). La plus grande difficulté, quoique techniquement réalisable (voir Fig. 2.54), est la traversée de l'autoroute A40 pendant une période d'environ 8 ans. Il est peu probable que des zones résidentielles soient affectées.

2.7.6. Électricité pour la phase de construction

S'agissant de la fourniture en électricité pendant la phase de construction, les demandes de raccordement aux réseaux locaux doivent être faites directement aux distributeurs nationaux compétents (par exemple, Enedis en France et les SIG en Suisse). Selon les informations fournies par la société Herrenknecht, leader dans la fabrication de tunneliers, les besoins en électricité sont de 3,7 MVA pour un site de construction utilisant un seul tunnelier et de 7,4 MVA pour un site de construction avec deux tunneliers. L'hypothèse de travail présentée dans le Tableau 2.8 sera affinée avec les entreprises de génie civil durant une phase de conception ultérieure avant le début des chantiers. Cette démarche permettra de déterminer la puissance électrique exacte requise pendant la phase de construction. Cela dépendra du nombre et de la configuration des

Implementation/Implementation-Figs/conveyor-road.pdf

Fig. 2.54 : Exemple de convoyeur traversant une route principale.

tunneliers autour de l'anneau et des machines spécifiques utilisées. Toutes ces informations ne seront connues avec certitude que peu de temps avant le lancement des marchés de travaux publics. Il faut cependant tenir compte du fait que la planification, la passation des marchés et la réalisation des raccordements électriques locaux pour la phase de construction prendront plusieurs années et devront faire partie du processus global d'autorisation environnementale.

2.7.7. Électricité pour la phase d'exploitation

Le programme de recherche scientifique du FCC-ee est basé sur différents modes de fonctionnement du collisionneur (Z, WW, ZH, tt et un mode HH en option). Chaque mode utilise une configuration d'équipement différente. Ces équipements (systèmes d'accélération par cavités radiofréquences supraconductrices, systèmes de conversion d'énergie électrique et systèmes de refroidissement cryogénique) seront installés progressivement pendant les phases de maintenance et d'amélioration prévues pour ces activités. Un arrêt prolongé est prévu pour installer les systèmes radiofréquences pour les modes d'exploitation tt et HH en option. Chaque configuration est caractérisée par un besoin différent en puissance électrique (voir Tableau 2.9), qui sert de base aux estimations de consommation moyenne.

Le collisionneur fonctionne selon un programme annuel qui prévoit une période limitée de fonctionnement des faisceaux pour la recherche en physique. Le programme prévoit également des phases d'essai et de mise en fonctionnement de l'équipement, d'optimisation de la performance de la machine et d'entretien régulier. Selon le mode de fonctionnement, la consommation d'énergie électrique varie d'une année à l'autre.

À ce stade de l'étude, il n'est possible de fournir que des chiffres approximatifs de consommation annuelle (voir Fig. 2.55). La consommation annuelle d'électricité varie entre 400 GWh/an pour les services de base qui sont utilisés même en l'absence de faisceau et 1 770 GWh/an pour la phase d'exploitation tt. En moyenne, la consommation annuelle d'électricité pendant la période d'exploitation est légèrement supérieure à 1 200 GWh/an. Les capacités nécessaires pour fournir au collisionneur de particules l'énergie requise existent en France. Cependant, il faudra établir un plan pour un portefeuille spécifique d'accords d'achat d'électricité, en prévoyant un temps de préparation suffisant avant que l'énergie ne soit nécessaire, afin d'obtenir

Tableau 2.8 : Hypothèse de travail pour le raccordement aux réseaux électriques locaux pendant la phase de chantier.

Site	Emplacement	Opérateur	Puissance
PA	Ferney-Voltaire, France	Enedis	7,0 - 13,8 MVA (= 400 A à 20 kV)
PB	Presinge, France	SIG	3,0 - 7,0 MVA (= 200 A à 20 kV)
PD	Nangy, France	Enedis	7,0 - 13,8 MVA (= 400 A à 20 kV)
PF	Éteaux, France	Enedis	3,0 MVA (= 100 A à 20 kV)
PG	Charvonnex, France	Énergie et Services de Seyssel	13,8 MVA (= 400 A à 20 kV)
PH	Cercier, France	Enedis	3,0 MVA (= 100 A à 20 kV)
PJ	Vulbens, France	Enedis	13,8 MVA (= 400 A à 20 kV)
PL	Challex, France	Enedis	3,0 MVA (= 200 A à 20 kV)

Tableau 2.9 : Estimation des besoins en énergie électrique pour la phase d'exploitation. Les études de faisabilité technique ont permis de réduire de près de 45 % les besoins en puissance électrique de 2020 (hypothèse initiale) à 2024.

Mode	Énergie des faisceaux	Fonctionnement	Estimation initiale de la capacité	Estimation de la capacité actuelle
Z	45,5 GeV	4 ans	65 MW - 240 MW	30 MW - 222 MW
WW	80 GeV	2 ans	70 MW - 265 MW	33 MW - 247 MW
ZH	120 GeV	3 ans	70 MW - 294 MW	34 MW - 273 MW
t \bar{t}	175 GeV	5 ans	80 MW - 350 MW	40 MW - 350 MW
HH	182,5 GeV	1 an	50 MW - 384 MW	41 MW - 357 MW

des conditions favorables et de passer un contrat pour un panel d'énergies adéquat avec une faible empreinte carbone [50,51].

À la suite des études préliminaires et exploratoires, il sera nécessaire d'élaborer des concepts plus détaillés, qui permettront d'optimiser la performance énergétique des équipements de l'accélérateur et d'améliorer le fonctionnement en fonction des informations qui seront données par les opérateurs des infrastructures d'électricité et les fournisseurs d'énergie.

Cette approche se fondera sur la méthodologie habituelle, Éviter-Réduire-Compenser.

- Éviter : il s'agit surtout de limiter la consommation selon une analyse coût-bénéfice, qui inclut, par exemple, l'aménagement de l'infrastructure de recherche avec quatre expériences, la limitation de la puissance annuelle maximale avec des impacts sur la luminosité et l'allongement de la durée du programme de recherche, ainsi que l'absence de consommation des systèmes en cas de non-utilisation.
- Réduire : la réduction vise à optimiser l'efficacité des systèmes et à réduire les pertes. Cela concerne, par exemple, l'amélioration de l'efficacité de la conversion de l'énergie électrique pour les radiofréquences, la réduction des pertes dans la distribution interne et dans les équipements, la récupération et le stockage d'énergie, la consommation intelligente selon les besoins (par exemple, pour la ventilation et le refroidissement) et la mise au point de systèmes

Implementation/Implementation-Figs/annual-electricity-need.pdf

Fig. 2.55 : Besoins annuels en électricité du collisionneur et de son infrastructure technique. La consommation annuelle moyenne du programme est indiquée par une ligne horizontale bleue.

qui peuvent basculer plus facilement et rapidement d'un mode d'exploitation à l'autre (mode veille ou mode exploitation).

- Compenser : enfin, la compensation vise, d'une part, la récupération, le stockage et la fourniture d'énergie renouvelable pour la société, d'autre part, le développement de synergies pour la transition vers l'énergie provenant de sources renouvelables, l'augmentation des capacités en énergie renouvelable et la coopération à l'échelle internationale pour l'approvisionnement en énergie renouvelable. Parmi les exemples de compensation ayant des retombées économiques directes, on peut citer la création de communautés énergétiques et la mise en commun de l'aide préfinancière à la décision d'investissement pour la mise en place de sources d'énergie renouvelables, l'utilisation de la chaleur résiduelle dans les processus industriels (par exemple, la production de fromage), l'exploitation des serres, les cultures et le chauffage d'établissements publics tels que les hôpitaux, les écoles et les centres commerciaux.

Toutes ces mesures seront à améliorer au cours des quinze ans que dureront les phases de conception technique et de construction. Elles permettraient de limiter la consommation électrique et ses impacts de manière efficace.

En ce qui concerne les différentes phases du collisionneur, les besoins maximaux en énergie électrique ne sont nécessaires que pendant la phase d'exploitation et pendant une phase optionnelle à la fin du programme (hh) quand tous les équipements de radiofréquences sont installés. En moyenne, pendant la phase de recherche scientifique, le FCC-ee consommerait environ 1,3 TWh par an. Sur l'ensemble de sa durée de vie, y compris les périodes d'arrêt et de mise en service, sa consommation moyenne d'électricité serait d'environ 1 TWh par an. Pour contextualiser l'impact de cette consommation d'énergie électrique, on peut la comparer à la consommation d'électricité d'un centre informatique ultramoderne. Par exemple, le centre informatique d'Altoona (IA) aux États-Unis, appartenant à la société Meta, plus connue via les applications Facebook, Instagram et WhatsApp, a une consommation annuelle de 1,24 TWh [52]. L'empreinte carbone de ce centre informatique est de 532 158 tonnes d'équivalent CO₂ par an. Cela correspond à peu près à l'empreinte carbone de l'ensemble de la construction de l'infrastructure du FCC. La consommation de l'ensemble des centres informatiques de la société Meta est de 15 TWh/an, soit dix fois plus que les besoins énergétiques annuels du FCC-ee. L'empreinte carbone annuelle totale de tous les centres informatiques Meta s'élève à environ 5 millions de tonnes d'équivalent CO₂.

Les besoins énergétiques spécifiques ne seront connus qu'après la phase de développement technique détaillé afin de pouvoir profiter des avancées technologiques des systèmes visant à améliorer l'efficacité énergétique.

RTE, qui s'est vu confier la mission de gérer le réseau de transport d'électricité en France¹ par un contrat de service public en date du 24 octobre 2005, qui inclut entre autres l'insertion environnementale du réseau (concertation, protection des paysages et des milieux naturels et urbanisés) et la sécurisation du réseau public, est chargé d'analyser le raccordement en tenant compte des choix techniques, de mener le processus de raccordement et d'effectuer les procédures administratives nécessaires (convention de raccordement, contrat d'accès au réseau). RTE réalise également tous les travaux nécessaires pour réaliser les raccordements entre les points de livraison des sites de surface et le réseau électrique national de grande capacité après la signature de la convention de raccordement².

Selon les résultats de l'étude préalable de faisabilité technique de RTE [53], qui gère le réseau de transport d'électricité en France, le raccordement à l'infrastructure électrique de haute puissance prévoit trois points d'alimentation en France à ce stade. Un point d'alimentation électrique de secours en Suisse peut être envisagé, si cela s'avère nécessaire, sa faisabilité technique et administrative restant à étudier.

À ce stade, le tracé du scénario de référence est traversé par différentes lignes électriques, principalement des lignes de 63 kV et 225 kV. Deux lignes de 400 kV traversent le tracé du PA31 d'ouest en est (voir Fig. 2.56). Les lignes de 400 kV passent à proximité des sites PL (département de l'Ain, France) et des sites PF et PH (département de la Haute-Savoie, France). Une station de distribution importante (Cornier) se trouve à proximité des sites PD et PF en France. Les besoins en électricité sont plus élevés sur les sites PL et PH car ces sites sont destinés à héberger les systèmes radiofréquence qui accélèrent les particules dans le collisionneur.

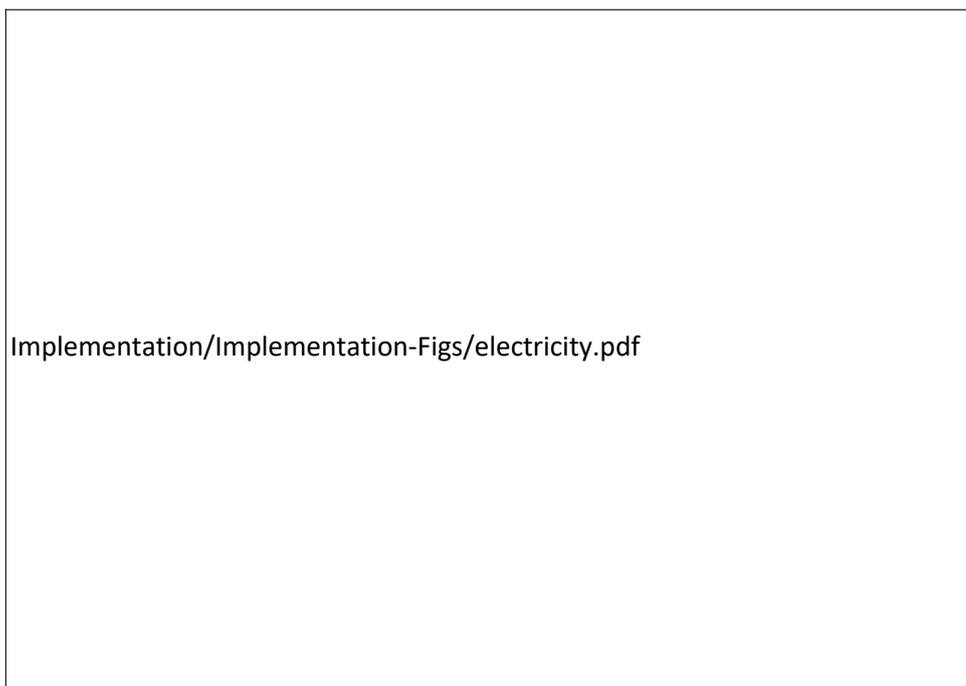


Fig. 2.56 : Réseaux d'électricité existants ou en projet, en France et en Suisse dans le périmètre du FCC. Sources : Couche publique CAD_ELEMENT_CONDUITE de SITG 2023 pour la Suisse (<https://sitg.ge.ch/donnees/cad-element-conduite>) disponible pour consultation et extraction pour un usage libre ; pour la France, Open Data Réseaux Énergies (ODRE, <https://opendata.reseaux-energies.fr>).

Trois points d'approvisionnement sont actuellement envisagés pour parvenir à un scénario d'approvisionnement en électricité bien équilibré. L'un d'entre eux, au site PL, se raccorde à la ligne de 400 kV voisine. Un autre, au site PD, se raccorde à la sous-station de Cornier. Le troisième utilise la

¹Décret n° 2005-1069 du 30 août 2005 approuvant les statuts de la société RTE EDF Transport : <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000000812363>

²RTE, Instruction des demandes de raccordement, version 2, 17 Octobre 2019, https://www.services-rte.com/files/live/sites/services-rte/files/documentsLibrary/DTR%201.4.1%20Procédure%20Racc%20Conso%20L342-2%20v19%2010%2017_fr

connexion au réseau existant du CERN à Bois Tollot (Ain, France). Une étude de conception détaillée est demandée par RTE pour déterminer le tracé et les spécificités des nouveaux raccordements 400 kV. Il peut être avantageux de raccorder le site PF au lieu du site PD à la ligne 400 kV, en profitant de la proximité du point de distribution de RTE à Cornier et en évitant ainsi d'avoir à traverser la rivière L'Arve. Il convient de noter que la planification, l'autorisation, la passation de contrats et la création de raccordements au réseau électrique nécessitent des délais importants. Il faut compter dix ans pour l'ensemble du processus pour un raccordement. En outre, pour l'ensemble de la procédure d'autorisation environnementale du projet de collisionneur de particules, il est nécessaire de disposer d'études d'impact sur l'environnement des raccordements au réseau. Par conséquent, la conception détaillée des raccordements et de leurs variantes de tracé en fonction des contraintes environnementales, de la faisabilité technique et des coûts doit être développée en priorité dès maintenant, même si, en fin de compte, les raccordements ne sont nécessaires qu'après la phase de construction des ouvrages de génie civil.

2.7.8. Approvisionnement en eau non traitée

Les accélérateurs de particules ont besoin d'eau non traitée, principalement pour refroidir les aimants. Le rayonnement synchrotron est la principale source de chaleur, en plus des nombreux composants mécaniques et électriques de l'infrastructure technique. Toute l'eau non traitée peut être prélevée sur une conduite d'alimentation en eau brute existante fournie par la société suisse locale Services Industriels de Genève (SIG) [54] qui prend son approvisionnement en eau dans le lac Léman, comme c'est le cas pour le CERN aujourd'hui. Aucune eau non traitée ne sera consommée à partir de réservoirs d'eau potable ou de couches d'eau souterraines.

Les solutions techniques et les choix d'équipement ne seront connus que peu de temps avant l'achat des infrastructures techniques, à mi-chemin de la phase de construction en sous-sol, afin de tirer pleinement parti des avancées technologiques, notamment en ce qui concerne l'efficacité des systèmes de refroidissement. Des estimations des besoins maximaux en eau, basées sur la consommation des systèmes de refroidissement des accélérateurs existants du CERN et sur les évolutions des concepts techniques actuels, ont été établies (voir Tableau 2.10). Ces valeurs sont le résultat de la mise au point progressive d'un concept qui a permis de réduire les besoins en eau non traitée d'une quantité initiale maximale de 5 000 000 m³ par an pour l'exploitation à environ 3 000 000 m³ par an. La capacité d'eau de référence actuelle nécessaire doit tenir compte de l'utilisation de systèmes de refroidissement par eau en circuit fermé avec des tours d'évaporation. La consommation d'eau non traitée provient de la nécessité de compenser l'eau évaporée dans les circuits secondaires des tours de refroidissement de chaque site de surface.

Tableau 2.10 : Résumé des besoins annuels en eau non traitée.

Mode	Besoins annuels en eau non traitée	Années
Z	1 604 861 m ³	4
WW	1 928 943 m ³	2
HZ	2 165 458 m ³	3
L.S.	163 817 m ³	1
t̄	3 077 591 m ³	5

À titre de comparaison, la consommation d'eau non traitée au CERN en 2022 était la suivante :

Le schéma d'approvisionnement en eau non traitée se base sur l'hypothèse de travail consistant à utiliser les prélèvements d'eau non traitée du lac Léman par les Services Industriels de Genève (SIG) en Suisse, auxquels le CERN recourt actuellement. La capacité disponible de 604 m³/h, soit une capacité totale de plus de 5 000 000 m³ par an, est compatible avec les besoins du FCC. Cela a été confirmé par un échange entre le CERN et les SIG en 2022. Ensuite, en août 2023, les SIG ont confirmé la faisabilité technique de l'approvisionnement dans le cadre contractuel existant, soit par la construction d'un nouveau raccordement court d'environ 200 m avec un diamètre nominal de 500 mm entre la conduite Tuileries-La Berne et le point 8 du LHC à Ferney-Voltaire (France), soit en utilisant deux lignes internes existantes du CERN qui nécessiteraient une mise à niveau.

Tableau 2.11 : Résumé des besoins en eau non traitée du FCC.

Systeme	Besoin en eau non traitée	Description
SPS	944 m ³	BA2, BA4, BA5, BE2
LHC	795 070 m ³	Complexe LHC, LHC2, LHC3.2, LHC 3.3, LHC4, LHC5, LHC6, LHC7, LHC8
Meyrin, Prévessin	2 437 988 m ³	Approvisionnement principal des sites de Meyrin et Prévessin, SPS BA1 et BA6, approvisionnement LHC1 sécurisé, clubs, Globe

Pour que la distribution d'eau tout au long de l'accélérateur soit techniquement plus facile et économiquement plus avantageuse, deux points de fourniture supplémentaires en eau peuvent être envisagés en France, à partir de L'Arve et/ou du Rhône. Pour ce faire, une étude territoriale spécifique serait nécessaire, qui devrait intégrer les plans de gestion quantitative disponibles pour les ressources en eau (PGRE). Ces prises d'eau nécessiteraient la création d'usines de filtration et de traitement de l'eau.

Afin de réduire davantage les besoins en capacité d'eau, des études initiales ont été réalisées pour identifier des leviers prometteurs (voir Tableau 2.12). Tout d'abord, l'introduction de la récupération et de la fourniture de chaleur fatale dès le départ permet de réduire considérablement les besoins en eau, puisque la quantité d'eau devant être évaporée est moindre si la chaleur est fournie à des consommateurs. Le scénario conservateur indique le potentiel d'économie d'eau sans adaptation du programme d'exploitation classique. Certains consommateurs commerciaux ont besoin de chaleur tout au long de l'année. Il convient de souligner que la réutilisation réaliste de chaleur fatale indiquée nécessite l'adaptation du fonctionnement du collisionneur de particules à la saison au cours de laquelle la chaleur est nécessaire. Des économies potentielles encore plus importantes que celles indiquées sont possibles, en fonction de l'adaptation aux besoins de chaleur saisonniers du territoire. Deuxièmement, le fonctionnement adaptatif du système de refroidissement et des tours d'évaporation à l'aide d'un système de régulation avancé et éventuellement d'une intelligence artificielle permettrait de réduire la consommation au strict minimum requis, compatible avec les besoins réels en matière de refroidissement. Troisièmement, la création d'une prise d'eau supplémentaire à côté du site PD (Nangy, France) permettrait d'alléger les exigences du système global. Étant donné qu'une installation spécialisée de filtrage et de traitement de l'eau serait nécessaire, une première étude vise à vérifier l'utilisation des eaux usées de la station d'épuration de Bellecombe/Scientrier (Syndicat des Eaux de Rocailles et Bellecombe), située à proximité. Cette installation rejette les eaux traitées à un débit moyen d'environ 550 m³/h dans la rivière L'Arve. Bien qu'en principe techniquement réalisable et économiquement viable (le coût d'exploitation annuel par m³ d'eau d'une station d'épuration nécessaire au collisionneur correspond au coût d'un m³ d'eau non traitée achetée à un fournisseur d'eau), des études sont actuellement en cours pour estimer l'effort nécessaire pour réduire le carbonate de calcium (CaCO₃) dissous résiduel et les germes dans l'eau afin de rendre l'eau compatible avec une utilisation dans le système de refroidissement industriel.

Tableau 2.12 : Potentiel d'économie d'eau avec l'introduction de scénarios d'approvisionnement en chaleur fatale et l'utilisation d'eaux usées traitées.

Mode	Réutilisation prudente de chaleur fatale	Réutilisation réaliste de chaleur fatale	Utilisation d'eaux usées traitées
Z	356 800 m ³ /an	476 800 m ³ /an	685 000-1 000 000 m ³ /an
WW	382 400 m ³ /an	523 200 m ³ /an	685 000-1 000 000 m ³ /an
HZ	409 600 m ³ /an	571 200 m ³ /an	685 000-1 000 000 m ³ /an
L.S.	96 000 m ³ /an	96 000 m ³ /an	685 000-1 000 000 m ³ /an
- tt	473 600 m ³ /an	678 400 m ³ /an	685 000-1 000 000 m ³ /

À ce stade, sur un plan quantitatif et commercial, le scénario de référence pour la consommation d'eau est techniquement, financièrement et territorialement faisable car le prélèvement et la consommation d'eau représentent des quantités inférieures à la consommation réelle passée du CERN. La possibilité d'un approvisionnement représentant le double de la demande totale maximale a été confirmée en 2023.

2.7.9. Gestion des eaux usées

Tous les sites doivent être raccordés à l'infrastructure locale d'assainissement pour la gestion des eaux de drainage dans les structures souterraines, de l'eau de pluie collectée et de l'eau traitée qui est purgée des systèmes de refroidissement à base d'eau brute. L'eau de pluie collectée peut également être réutilisée sur les sites pour différents usages liés au projet et pour l'entretien des espaces verts. Dans la mesure du possible, toutes les eaux collectées seront filtrées et traitées sur place avant d'être rejetées dans l'environnement. D'un point de vue territorial, cette approche est préférable à une gestion centralisée des eaux usées, car elle permet de préserver les ruisseaux existants, les zones humides et la biodiversité dans le cadre de projets de renaturation mis en œuvre en association avec les sites de surface. Ce n'est que lorsque l'eau ne remplit pas les conditions requises pour être rejetée librement qu'elle serait dirigée vers le système d'égouts (par exemple, en raison d'un pourcentage plus élevé de résidus non solubles ou pendant les périodes de fortes pluies).

On peut également envisager un concept de gestion centralisée des eaux usées qui consisterait à renvoyer toutes les eaux usées vers un site du CERN (par exemple, LHC P8 et PA à Ferney-Voltaire). Pour la gestion de l'eau de refroidissement, une approche « zéro rejet liquide » (ZRL) peut également être envisagée. La méthode ZRL exige la collecte des solides sur chaque site de surface à intervalles réguliers. Le choix définitif de la technologie reste à faire et nécessite une analyse des coûts et des bénéfices complète et plus large sur l'ensemble de la période du projet, couvrant les investissements et les facteurs d'exploitation. La technologie du traitement de l'eau progresse rapidement en raison des contraintes liées à l'environnement et au développement durable. Il est donc judicieux de consulter des entreprises expérimentées et d'examiner les différentes options dans le cadre de l'évaluation de l'impact sur l'environnement avant de finaliser le choix de la technologie.

Les eaux usées provenant des activités humaines (toilettes, éviers, bureaux, centres d'accueil des visiteurs, cafés et restaurants) seront directement évacuées par des raccordements au réseau public d'eaux usées. La conception des raccordements au réseau d'eaux usées doit être élaborée en coopération avec les services de l'administration publique locale au cours d'une phase préparatoire ultérieure, en faisant appel à des entreprises spécialisées dans ce domaine. À ce stade, la configuration suivante est envisagée pour les raccordements locaux aux réseaux d'eaux usées :

- Site PA : Raccordement au réseau d'eaux usées via le LHC Pt8 en France.
- Site PB : Raccordement au réseau local d'eaux usées à Presinge, Suisse.
- Site PD : Raccordement à la station d'épuration des eaux usées (STEP) SRB à Scientrier, France.
- Site PF : Raccordement au réseau local d'eaux usées à Éteaux, France.
- Site PG : Raccordement au réseau local d'eaux usées via la station-service d'autoroute de Groisy. En variante, raccordement au réseau à Charvonnex sur la D1203 en France.
- Site PH : Création d'un nouveau réseau local d'eaux usées jusqu'au point de raccordement le plus proche, à une distance de 250 à 300 m en France. La station d'épuration des eaux usées (STEP) située à proximité du site n'est pas en mesure d'accepter toutes les eaux usées du site dans les cas les plus exigeants. Par conséquent, soit la STEP doit être renforcée pour le projet de collisionneur, soit l'excès d'eau doit être réacheminé via un réseau d'eaux usées dans le tunnel jusqu'aux sites PG et PJ. L'élaboration de la stratégie fait partie d'une phase de conception ultérieure.
- Site PJ : Raccordement au réseau local d'eaux usées à 500 m entre Vulbens et Valleiry, en France.
- Site PL : Raccordement au réseau local d'eaux usées à Challex, France.

2.7.10. Services d'urgence

L'analyse des différents scénarios de mise en œuvre a révélé que la poursuite de l'approche actuelle consistant à desservir les sites de surface des accélérateurs de particules du CERN ne peut pas être étendue au périmètre du futur collisionneur circulaire de particules sans poser de problèmes importants. Bien que les sites de surface se trouvent à proximité immédiate d'infrastructures routières importantes, les distances et la situation du trafic nécessiteraient des temps d'intervention trop longs si tous les sites devaient être desservis à partir du site du CERN de Meyrin, en Suisse. La mise en place d'un personnel spécialisé dans les services d'urgence sur chacun des sites de surface représente un coût

prohibitif, en ce qui concerne les ressources humaines et les équipements et entraînerait des difficultés dans la gestion opérationnelle de l'installation. L'analyse ultérieure d'un seul pôle d'assistance dédié n'apporte que des améliorations limitées en ce qui concerne la sécurité et les services d'urgence. C'est pourquoi une analyse géographique détaillée a été réalisée afin d'identifier des approches alternatives (voir Fig. 2.57).



Fig. 2.57 : Services de lutte contre les incendies et services d'urgence dans le périmètre du scénario de référence.

Hormis le site PH, les sites de surface du scénario d'implantation de référence sont proches de postes de lutte contre l'incendie et de services d'urgence (voir Tableau 2.13). Certains d'entre eux ont été construits récemment. Par conséquent, le scénario de projet peut envisager de recourir à un soutien du personnel d'urgence et de lutte contre l'incendie assuré par ces stations, accompagné d'une formation commune régulière et d'un centre d'orientation en cas d'urgence au CERN. Le renforcement de la collaboration du CERN avec ces services, l'apport d'équipements, de matériels et de formations se traduisent également par des avantages socio-économiques. Ceux-ci ont été analysés et font partie de l'évaluation plus large de l'impact socio-économique.

La constitution de ces ressources et la transition vers un nouveau système d'exploitation nécessitent plusieurs années de préparation. Les dix années de la phase de construction offrent une fenêtre adéquate pour lancer ce processus, qui nécessite des accords avec les services d'urgence et de lutte contre les incendies.

Tableau 2.13 : Sélection de services d'urgence à proximité des sites de surface.

Site	Distance	Emplacement	Capacité	Service
PA	1 km	Prévessin, France	66 personnes	Caserne départementale de pompiers CIS Est-Gessien
PB	5,8 km	Chêne-Bougeries, Suisse	30 personnes	Caserne de pompiers du service cantonal du feu
PD	0,3 km	Contamine-sur-Arve, France	n/a	Hôpital, Centre Hospitalier Alpes-Léman
PD	9 km	Arenthon, France	11 personnes	Poste de lutte contre les incendies et de premiers secours
PD	12,1 km	Éteaux, France	68 personnes	Centre d'intervention et de secours
PF	3,2 km	Éteaux, France	68 personnes	Centre d'intervention et de secours
PG	2,3 km	Groisy, France	50 personnes	Centre d'intervention et de secours, service d'urgence
PH	10 km	Frangy, France	37 personnes	Centre d'intervention et de secours local
PH	14 km	Épagny, France	135 personnes	Centre d'intervention et de secours, service d'urgence
PH	1,3 km	Valleiry, France	26 personnes	Centre d'intervention et de secours, service d'urgence
PL	7,4 km	Thoiry, France	70 personnes	Centre d'intervention et de secours, service d'urgence

2.7.11. Aspects territoriaux de la gestion des matériaux excavés

La gestion des matériaux excavés est traitée comme un problème socio-économique et de gestion de projet plutôt que comme un aspect propre au génie civil. La disponibilité de dépôts appropriés pour les déchets inertes diminue continuellement et les prix de mise en dépôt des matériaux continuent d'augmenter en conséquence. Pour donner un ordre de grandeur, le coût du dépôt final des matériaux excavés peut varier entre 385 millions d'euros et 825 millions d'euros en fonction des possibilités de réutilisation ou non des matériaux [1]. Alors que la fraction calcaire des matériaux excavés peut être réutilisée dans le projet, la majorité des 6 millions de m³ de volume *in situ*, à savoir 95 % de molasse et 3 % de moraines, est au centre des développements de la filière de réutilisation. L'objectif est quadruple :

1. Réduire la contrainte d'une situation déjà tendue en ce qui concerne la recherche de dépôts appropriés ;
2. Réduire les besoins en transport routier de longue distance ;
3. Réduire les coûts globaux du projet ;
4. Contribuer à la création d'avantages socio-économiques supplémentaires en faisant du projet un projet pilote pour les innovations dans le domaine de la gestion des matériaux excavés.

En ce qui concerne l'objectif de générer des avantages socio-économiques au-delà du projet, il faut garder à l'esprit que le bassin molassique s'étend au nord des Alpes, de la région de Genève à la Hongrie, en passant par la Suisse, l'Allemagne et l'Autriche. L'utilisation de nouvelles méthodes pour réutiliser ces matériaux est donc importante, tout comme les avantages socio-économiques potentiels.

Dans le cadre de l'étude de faisabilité du FCC, en s'appuyant sur les contributions de la Commission européenne pour le projet FCC Innovation Study (FCCIS) cofinancé par le programme Horizon 2020, un concours international appelé « Mining the future » a été lancé pour explorer des voies crédibles, techniquement réalisables et économiquement viables pour le développement de la réutilisation de la molasse à l'horizon 2030 [55].

Selon les conditions du cadre réglementaire en France et en Suisse, entre 15 % et 30 % des matériaux molassiques pourraient être considérés comme naturellement pollués (par exemple, hydrocarbures naturellement présents, nickel, zinc et chrome). Il y aura donc toujours une quantité résiduelle de matériaux qui devra être transportée vers des dépôts qui acceptent ces matériaux. On suppose qu'une grande partie des autres matériaux sert au remblayage des carrières et au processus de renaturation des carrières remblayées.

D'autres voies sont actuellement explorées dans le cadre d'un laboratoire de terrain appelé « Open-Skylab » (voir Fig. 2.58) dans les locaux du CERN, sur la base de protocoles scientifiques permettant le développement de processus et de produits gérés par la qualité, condition préalable légale pour la réutilisation des matériaux. Étant donné que ce projet d'innovation n'a démarré qu'en 2025 et qu'il est nécessaire de disposer d'informations beaucoup plus complètes et détaillées sur les caractéristiques des

matériaux excavés prévisibles au moyen d'un échantillonnage géotechnique (extraction de diagraphies dans un ensemble représentatif d'emplacements le long du tracé du tunnel du collisionneur), un plan spécifique pour la gestion des matériaux excavés ne pourra être élaboré qu'à un stade ultérieur. Il faut environ 5 ans pour mettre au point les procédés et les produits permettant de transformer la molasse en terre pouvant être mélangée à des sols déjà fertiles et pouvant être utilisée efficacement pour des applications dans l'agriculture, la sylviculture, les projets de renaturation, l'entretien des chemins et des bords de route et d'autres applications innovantes telles que l'isolation thermique et les matériaux de construction.



Fig. 2.58 : Situé sur un terrain d'un hectare marqué d'une ligne rouge, à côté du point 5 du CMS du CERN à Cessy, en France, le laboratoire de terrain OpenSkyLab développe des processus de gestion de la qualité pour la transformation des matériaux excavés en vue d'une utilisation dans le cadre d'applications de renaturation et d'autres applications sociétales. Le terrain a été préparé au cours de l'hiver 2025. Le développement scientifique durera au moins quatre ans.

Les autorisations de mise en œuvre de ces filières dans le cadre d'un nouveau projet de construction ne peuvent être demandées aux autorités nationales en France et en Suisse qu'à partir du moment où des processus gérés par la qualité et des descriptions spécifiques et localisées des filières de réutilisation existent et ont été validés.

Les matériaux excavés ont le statut de déchets dans les législations nationales en raison de critères formels, indépendamment de leur origine, de leur traitement et de leur degré de pollution. L'application de ces critères formels rend plus difficile la mise en œuvre des principes écologiques et économiques si utiles de l'économie circulaire. Le 13 avril 2021, Porr Bau GmbH a saisi la Cour de justice de l'Union européenne (CJUE) d'un recours contre une décision préjudicielle rendue en vertu de l'article 267 TFUE par le Landesverwaltungsgericht Steiermark (tribunal administratif régional, Styrie, Autriche), par décision du 2 avril 2021, dans l'affaire Porr Bau GmbH contre Bezirkshauptmannschaft Graz-Umgebung (autorité administrative du district de Graz et environs), concernant la conclusion de la juridiction nationale autrichienne selon laquelle les matériaux excavés déversés sur des zones de culture constituaient des déchets.

Dans l'affaire C-238/21, ECLI:EU:C:2022:885 [1], la Cour (première chambre) a statué : L'article 3, point 1, et l'article 6, paragraphe 1, de la directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil, du 19 novembre 2008, relative aux déchets et abrogeant certaines directives, doivent être interprétés en ce sens qu'ils s'opposent à toute réglementation nationale en vertu de laquelle des matériaux d'excavation non contaminés qui, en vertu du droit national, appartiennent à la classe de qualité la plus élevée,

– doivent être classés comme « déchets » lorsque leur détenteur n'a ni l'intention ni l'obligation de s'en débarrasser,

ces matériaux remplissant les conditions fixées à l'article 5, paragraphe 1, de ladite directive pour être classés comme « sous-produits » ; et

- ne perdent leur statut de déchet que lorsqu'ils sont utilisés directement comme substitut et que leur détenteur a satisfait aux critères formels pertinents aux fins de la protection de l'environnement, si ces critères ont pour effet de compromettre la réalisation des objectifs de cette directive.

Conséquence directe de l'arrêt, les matériaux excavés non contaminés peuvent être utilisés pour des applications écologiques et économiques utiles s'ils satisfont aux critères de qualité applicables. Les critères formels ne doivent pas exclure, ni entraver l'utilisation des matériaux excavés, ni empêcher la mise en œuvre des principes de l'économie circulaire. Le statut de fin de déchet peut être obtenu par un simple test de qualité. Le prétraitement, le traitement et la transformation des matériaux excavés n'ont aucune incidence sur la possibilité d'utiliser les matériaux, puisqu'ils font partie intégrante d'un processus de production décrit à l'article 6 de la directive 2008/98/CE de l'UE relative aux déchets.

Par conséquent, la réutilisation des matériaux excavés est possible dans un pays de l'UE, si l'on connaît suffisamment la qualité des matériaux excavés pour organiser la réutilisation avant l'extraction et si des accords sont passés avec des clients pour les matériaux, pour des applications compatibles avec la qualité des matériaux pouvant être livrés, y compris tout traitement potentiel avant la livraison, et si la filière de réutilisation est écologiquement justifiée et économiquement viable.

Pour soutenir ce processus, le projet doit mettre en œuvre un système de suivi complet pour l'analyse des matériaux excavés, leur traitement sur le site d'excavation, leur prétraitement et leur transformation, la production du produit final, le transport vers les clients (audit et traçabilité) et le suivi des matériaux réutilisés après que les clients les ont acceptés.

Enfin, le transport transnational doit être soigneusement planifié. Comme le principe du partage équitable aboutit à une quantité de matériaux sous le territoire suisse supérieure au volume excavé sur ce territoire, une solution pour le rapatriement des matériaux excavés de la France vers la Suisse ou une forme de compensation doit être élaborée avant que le processus d'excavation ne puisse commencer.

Pour le remblayage des carrières, l'étude de faisabilité a identifié des sites appropriés à l'horizon 2030. Cependant, il faut garder à l'esprit que ces emplacements sont rapidement occupés par d'autres processus de construction et que les capacités doivent donc être réservées à temps par le biais d'accords entre le CERN et les carrières. Alors que l'étude en France a pu être réalisée de manière exhaustive pour la région concernée (Fig. 2.59), les données sur les carrières potentielles et les mines pouvant être remblayées restent aujourd'hui incomplètes pour le territoire suisse.

Si le transport des matériaux à proximité du projet par camion le long des principaux axes de transport reste l'hypothèse principale, le transport entre les sites d'excavation et les axes de transport est de préférence effectué par d'autres moyens tels que des bandes transporteuses. Le transport vers des lieux de réutilisation plus éloignés se fait de préférence par train.

Dans un premier temps, une stratégie de gestion des matériaux excavés a été mise en place grâce aux efforts conjoints d'experts techniques et d'organisations des pays hôtes qui accompagnent régulièrement les projets de construction à grande échelle. Actuellement, des procédés et des produits sont en cours de mise au point pour démontrer le potentiel de réutilisation des matériaux molassiques. Dans le même temps, un plan de référence pour la gestion des matériaux prévisibles doit être élaboré pour confirmer que les carrières et les mines, ainsi que la disponibilité des dépôts, peuvent répondre à un scénario prudent en matière de matériaux excavés dans les deux pays hôtes. Un travail avec les autorités des États hôtes est nécessaire pour présenter les processus de réutilisation gérés par la qualité et pour obtenir les autorisations nécessaires à l'application de ces processus. Des accords avec les clients doivent être conclus afin de pouvoir mettre en œuvre les filières de réutilisation. Un nombre beaucoup plus important d'échantillons doivent être prélevés le long du tracé du tunnel et une analyse détaillée des échantillons géologiques doit être effectuée pour parvenir à une estimation plus précise d'un scénario de réutilisation. Pour étayer la stratégie au plan technique, l'analyse des matériaux en ligne pendant le creusement du tunnel et le traitement et la transformation des matériaux sur place dans une usine modulaire doivent être démontrés et portés au niveau de l'application industrielle (niveau TRL 9) dans un délai maximum de cinq ans. La question ouverte du transport ferroviaire, du trafic transfrontalier

Implementation/Implementation-Figs/quarries.pdf

Fig. 2.59 : Capacités des carrières susceptibles d'être remblayées à proximité du projet sur le territoire français et dans le canton de Genève en Suisse. Les capacités sont indiquées en tonnes.

et du rapatriement des matériaux excavés doit être résolue. Enfin, il convient d'étudier d'autres possibilités de réutilisation sur de plus grandes distances car, une fois que les matériaux se trouvent sur une voie ferrée, ils peuvent être livrés moyennant une faible empreinte carbone supplémentaire. Cela ouvre des possibilités de réutilisation qui ne sont pas envisagées à l'heure actuelle.

2.7.12. Transport et mobilité

En ce qui concerne le transport de matériaux et d'équipements et la mobilité des personnes, les thèmes suivants sont identifiés dans le cadre du développement du projet d'implantation territoriale :

1. Transport des matériaux de construction vers les chantiers de construction ;
2. Évacuation des matériaux excavés à partir des chantiers de construction ;
3. Déplacement des ouvriers de construction vers et depuis les chantiers ;
4. Transport de l'infrastructure technique et des équipements de l'accélérateur de particules vers les sites de surface ;
5. Transport de biens et de consommables vers les sites de surface pour l'exploitation, l'entretien et les réparations ;
6. Transport du personnel vers et depuis les sites de surface pour l'exploitation, l'entretien et les réparations ;
7. Trafic induit par les visiteurs sur les sites d'expérience.

L'évacuation des matériaux excavés est le facteur le plus important du trafic supplémentaire induit. La stratégie pour un futur projet consiste à limiter l'utilisation de camions pour le transport à partir des sites et de s'appuyer sur des approches alternatives telles que les convoyeurs et les téléphériques pour créer des liaisons avec les principaux axes de transport situés à proximité (par exemple, les stations-service des autoroutes, les terminaux ferroviaires, les routes départementales à plusieurs voies). Ces modalités conviennent également

à l'acheminement de certains matériaux de construction depuis les principaux itinéraires de transport jusqu'aux sites. Lorsque cela n'est pas possible, des camions acheminent le matériel depuis les principaux axes de transport via des itinéraires temporaires, par exemple, pour les éléments en béton préfabriqués et les équipements volumineux des accélérateurs de particules et de l'infrastructure technique. Ce n'est que lorsqu'une telle approche ne peut être évitée que les routes locales seront utilisées pour des activités limitées liées à la construction et à l'installation. Les transports exceptionnels sont inévitables, mais ils ne se produisent que très rarement et selon des horaires et dans des conditions planifiés et autorisés. Le trafic lié aux matériaux de construction est très limité, avec généralement moins de 10 livraisons par site équipé d'un tunnelier. Le trafic pendant la phase d'installation est de l'ordre de 9 livraisons pour un site technique et de 18 livraisons pour un site d'expérience. Le facteur limitant est la quantité de matériaux et d'équipements qui peuvent être transférés de la surface vers le sous-sol, ainsi que les capacités limitées de transport et d'installation dans la structure souterraine.

À l'heure actuelle, une première estimation du nombre d'ouvriers de construction par chantier montre que la présence varie entre 50 et 450 environ tout au long de la phase de construction pluriannuelle (Fig. 2.60). Des différences significatives d'ouvriers présents sur les chantiers de construction apparaissent entre les sites avec tunneliers (PA, PD, PG, PJ) et les sites sans tunnelier (PB, PF, PH, PL). Les sites dépourvus de tunnelier ne voient pas la présence de plus de 100 personnes à la fois. Le nombre d'ouvriers ne dépassera 250 personnes que pendant la période d'activité maximale entre 2035 et 2039. Un plan spécifique de mobilité du personnel ne peut être élaboré qu'une fois que les activités de construction seront définies de manière plus détaillée au cours d'une phase préparatoire visant à préparer les études de marché et les appels d'offres pour la construction. Pour éviter que les ouvriers ne fassent individuellement la navette entre les sites de construction et leurs résidences, le plan de construction prévoira des transferts par navette, comme le veulent les meilleures pratiques en matière de construction et d'exploitation industrielle. La même approche sera adoptée pour la phase d'installation au cours de laquelle environ 200 à 300 personnes seront actives sur les sites d'expérience et environ 100 personnes sur les sites techniques. Une petite fraction de ces personnes devra compter sur le transport individuel en voiture. Il est cependant prévu de limiter ce type de transport aux seuls cas où un tel moyen de transport est nécessaire.

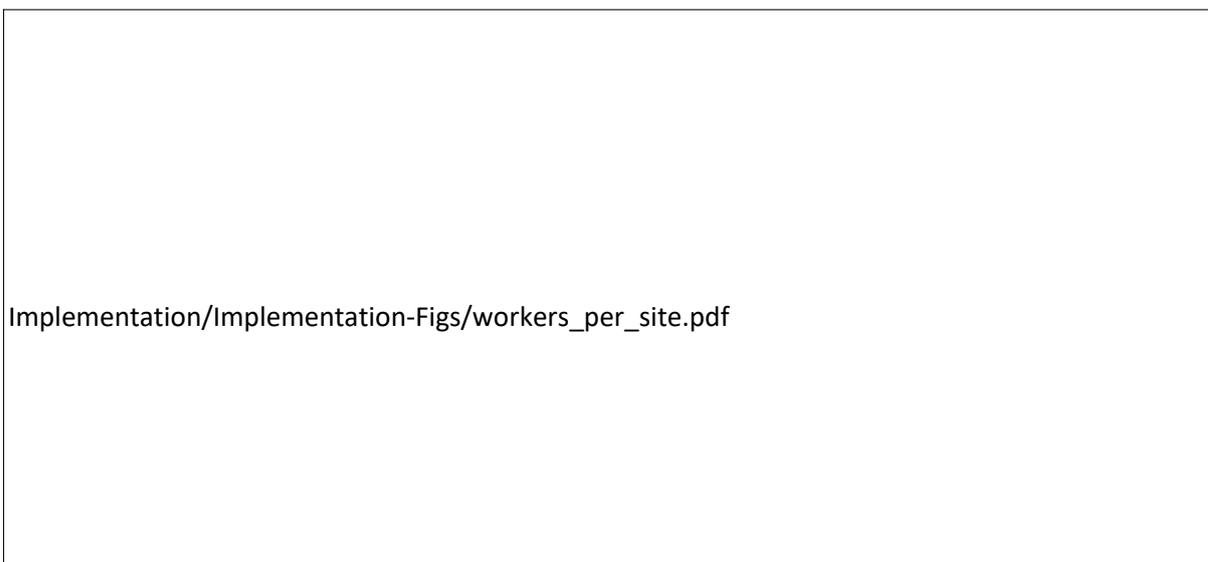


Fig. 2.60 : Exemple de scénario d'ouvriers de construction par chantier et par année. Un plan spécifique pour le personnel et la mobilité doit être élaboré dans le cadre d'un projet de phase préparatoire lorsque les activités de construction seront définies à un niveau plus détaillé.

Les déplacements du personnel pendant l'exploitation sont négligeables. Pour les périodes d'entretien et de réparations, le transfert par navette peut à nouveau être prévu. Cela favorise également la participation des membres de la collaboration internationale qui ne disposent pas nécessairement de moyens de transport individuels. La présence de 10 à 30 personnes au maximum est prévue sur un site de surface, selon qu'il s'agit d'un site technique ou d'un site d'expérience.

La circulation des visiteurs vers et depuis les sites d'expérience est généralement organisée de manière centralisée par des navettes. Si un site comporte une installation pour les visiteurs ou des infrastructures culturelles, éducatives et de loisirs supplémentaires, il faudra prévoir des capacités pour le trafic individuel. En supposant une présence attendue de 25 000 visiteurs par an et par site et 50 % de visiteurs individuels avec 2 personnes par véhicule, le trafic individuel est de l'ordre de 5 à 10 allers-retours de véhicules par site et par jour. Il convient de noter que les visites n'ont lieu qu'environ 250 jours par an et pendant environ 8 heures par jour.

2.7.13. Intégration paysagère et stratégie architecturale

Contexte

Des conceptions techniques génériques des bâtiments des sites de surface ont été élaborées dans le cadre de l'étude de faisabilité afin de mieux comprendre les besoins en espace, la compatibilité des infrastructures techniques requises avec les nombreuses contraintes liées à l'emplacement des sites de surface (par exemple, la topographie, le relief, la visibilité, la nature, les risques technologiques, l'accès, et bien d'autres encore) et les coûts. Ces développements conceptuels ne doivent pas être confondus avec les conceptions spécifiques des sites de surface qui sont finalement transformées en plans à inclure dans le processus d'autorisation environnementale. Cette activité a également nécessité l'engagement des parties prenantes locales dans des ateliers participatifs, le respect de nombreuses exigences et contraintes applicables telles que les exigences de performances fonctionnelles et structurelles, les limitations de zonage (utilisation autorisée des terrains), la protection du sol et du sous-sol, les documents et réglementations d'urbanisme, les normes nationales et internationales, les codes et normes de construction, les réglementations en matière d'efficacité énergétique, la sécurité, les interventions d'urgence, la protection contre le bruit, la limitation de la pollution lumineuse artificielle, l'accessibilité, la protection de l'habitat et de la biodiversité (par exemple, les corridors et les continuités écologiques), les considérations culturelles et patrimoniales, l'intégration paysagère et, en définitive, une autorisation sociétale d'exploitation au plan.

Pour toutes ces raisons et pour préparer une éventuelle phase préparatoire ultérieure du projet qui doit inclure les développements des sites de surface spécifiques et les constructions sur ces sites, l'étude de faisabilité a lancé une première analyse exploratoire pour identifier les composants appropriés d'une boîte à outils architecturale permettant d'orienter ce travail ultérieur. Les concepts architecturaux ont été développés par une société spécialisée dans le domaine de l'architecture innovante, de la conception de bâtiments, du développement urbain et de la planification. Une équipe multisectorielle d'architectes, de planificateurs, de concepteurs et d'urbanistes s'est réunie afin d'établir les bases qui doivent être développées dans une boîte à outils architecturale complète pour la phase de conception.

Les éléments de la boîte à outils d'architecture sont tous basés sur des projets réellement mis en œuvre. Trois exemples notables (Fig. 2.61 développés par la société contractante sont mentionnés ci-après :

1. La « Forest Tower »³ au Camp Adventure Park à Gissfeld Klosters Skove, au Danemark. Ce projet comprend une promenade de 900 mètres reliée à une tour d'observation de 45 mètres de haut, permettant aux visiteurs de découvrir la forêt d'un point de vue unique. La rampe d'accès continue garantit l'accessibilité à tous les visiteurs, quelle que soit leur condition physique ;
2. Le projet « Living Places Copenhagen », qui démontre une nouvelle façon de construire des maisons dont l'empreinte carbone est de 3,8 kg/CO₂/m²/an, soit trois fois moins que la moyenne actuelle. Ce projet illustre la durabilité du travail et les conceptions innovantes ;
3. Le projet « Urban Village » élabore un modèle de développement de logements abordables et agréables à vivre. Il comprend la conception de bâtiments modulaires, abordables et à faible empreinte carbone, qui peuvent être facilement assemblés dans des environnements urbains contraignants.

Un autre exemple est le projet « CO-EVOLUTION », une collaboration danoise et chinoise sur le développement urbain durable en Chine, qui a reçu le Lion d'or en 2006 à la Biennale d'architecture de Venise.

³<https://www.campadventure.dk/en/skovtaarnet/>

Implementation/Implementation-Figs/EFFEKT_projects.pdf

Fig. 2.61 : Trois exemples de projets innovants conçus par l'entreprise qui a participé à l'étude de faisabilité pour l'élaboration d'une boîte à outils d'orientation en matière d'architecture. De gauche à droite : tour forestière, lieux de vie, village urbain.

Boîte à outils d'architecture

La motivation pour le développement d'une boîte à outils d'architecture est de soutenir l'intégration des sites de surface le plus tôt possible dans leurs contextes territoriaux qui diffèrent d'un site à l'autre. La boîte à outils vise également à répondre à la question de savoir comment les nouveaux sites de surface peuvent être bénéfiques pour le territoire et les communautés locales aux alentours.

La boîte à outils repose sur trois piliers :

1. Concepts et éléments d'architecture ;
2. Paysage ; et
3. Communauté.

Les trois éléments constitutifs que sont l'architecture, le paysage et la communauté (Fig. 2.62) sont au centre des stratégies d'intégration pour les sites de surface. Les stratégies visent à trouver un équilibre entre exigences techniques, durabilité environnementale et engagement communautaire. L'intégration de l'innovation architecturale, de la restauration du paysage et des équipements publics vise à réduire au maximum l'empreinte écologique et visuelle tout en favorisant la biodiversité et l'engagement local.

Architecture

Les concepts architecturaux mettent l'accent sur l'intégration durable et esthétique au sein de l'environnement. Pour atteindre ces objectifs, les concepteurs adopteront des approches modernes telles que les toitures végétalisées, les techniques de construction innovantes et les expressions de façade. Ces méthodes atténuent la domination visuelle des structures industrielles. Elles facilitent une transition harmonieuse entre les bâtiments et le paysage environnant. Les concepteurs sont encouragés à explorer de nouveaux matériaux et de nouvelles techniques de construction à même de répondre aux objectifs environnementaux et économiques. L'intégration de toitures végétalisées permet non seulement d'atténuer les incidences sur l'environnement, mais aussi de renforcer la cohésion visuelle entre l'environnement bâti et l'environnement naturel. Un exemple de mise en œuvre récente de ce concept est celui de Carlo Ratti pour l'entreprise de transformation alimentaire Mutti en Italie [56] (voir Fig. 2.63).

Implementation/Implementation-Figs/architectural-toolkit.pdf

Fig. 2.62 : Trois exemples de projets innovants conçus par la société EFFEKT De gauche à droite : tour de forêt, lieux de vie, village urbain.

Aménagement paysager

Le projet prévoit de recourir à des stratégies qui donnent la priorité à la restauration écologique et à l'harmonie visuelle. Les principaux éléments sont les suivants :

- Renaturation : Les efforts de restauration améliorent les écosystèmes locaux en favorisant la biodiversité et en augmentant la résistance aux changements environnementaux. Utilisation du terrain naturel : En intégrant les structures dans le paysage existant, les concepteurs réduisent au maximum les perturbations visuelles et maintiennent la continuité du terrain naturel.
- Utilisation du terrain : Le fait de travailler avec le terrain naturel réduit au maximum la présence visuelle des installations dans l'environnement.

Implementation/Implementation-Figs/mutti_italy.pdf

Fig. 2.63 : La toiture végétalisée créée à partir des matériaux excavés du site de construction permet au bâtiment de se fondre dans son environnement naturel (Agnese Bedini et Melania Della Grave/DSL Studio).

- Tampons verts : La mise en place de barrières végétales réduit l'impact visuel et environnemental des installations, en favorisant la flore et la faune locales. L'aménagement paysager garantit une intégration subtile des installations dans l'environnement, permettant à la nature de prospérer tout en masquant les éléments d'infrastructure.
- Paysage ininterrompu : En insérant les constructions dans le relief et le paysage, la nature peut s'étendre sans interruption au-dessus, tandis que les installations peuvent être partiellement cachées à la vue.

Engagement communautaire

Le projet s'engage à impliquer activement les communautés locales autour des sites en créant des espaces partagés, des opportunités éducatives, des espaces culturels et des installations de visite. En fonction du soutien de la communauté, des services professionnels et/ou de loisirs peuvent être prévus dans les projets. Les actions spécifiques comprennent, par exemple, la création de zones récréatives telles que des jardins communautaires, qui utilisent des espaces inutilisés tout en bénéficiant aux populations locales. La mise à disposition de plateformes éducatives et d'installations de visite permet au public de s'informer sur les objectifs scientifiques et les réalisations techniques du projet. Ces plateformes offrent des possibilités de communication directe avec les scientifiques et la communauté internationale des ingénieurs. L'exploitation de l'énergie excédentaire à des fins communautaires, telles que le chauffage des piscines publiques, des installations de santé et de relaxation et le soutien d'autres activités de loisirs, sont d'autres possibilités qui peuvent être prises en considération. Grâce à ces initiatives, le projet favorise un sentiment d'inclusion et apporte une valeur ajoutée aux communautés environnantes au-delà de sa mission scientifique de base.

Les stratégies d'intégration pour les sites de surface du FCC reflètent une approche globale des dimensions environnementales, techniques et sociales. En combinant l'innovation architecturale, la

renaturation et la conception centrée sur la communauté, le projet assure une coexistence durable et harmonieuse avec son environnement. Ces stratégies visent non seulement à atténuer les éventuelles incidences négatives, mais aussi à fournir des actions tangibles et concrètes pour améliorer les écosystèmes locaux et impliquer le public de manière efficace.

Site PA

Le site d'expérience PA de Ferney-Voltaire (Fig. 2.64) est situé dans un environnement déjà urbain qui continue à voir apparaître de nouvelles constructions telles qu'un quartier commercial et d'innovation de haute technologie, des prestataires de soins de santé, des immeubles résidentiels et des installations commerciales. Situé dans un contexte transfrontalier avec l'aéroport de Genève et un poste frontière à proximité immédiate, l'espace ouvert restant serait partiellement occupé par le site de surface. Il faut donc veiller à une bonne intégration et à la préservation de la vue sur la chaîne du Mont-Blanc. Les environs du site peuvent être restaurés afin de créer une valeur ajoutée pour un habitat existant et un corridor naturel. L'image ci-dessous donne une idée de la manière dont le site pourrait s'intégrer dans le terrain ouvert, en exploitant le voisinage immédiat du point 8 du LHC (absent de illustration) pour toutes les constructions et infrastructures qui ne doivent pas nécessairement se trouver à proximité immédiate des deux puits.



Fig. 2.64 : Besoins en espace pour un site et intégration paysagère du site d'expérience PA à Ferney-Voltaire, France.

Site PB

Le site technique PB de Presinge, en Suisse, est situé dans un paysage agricole ouvert, à l'écart des villages. La zone est cependant utilisée fréquemment par les résidents pour des activités de loisirs, telles que la marche et la course à pied. Avec des espaces naturels protégés à proximité immédiate, le

contexte exige une bonne intégration paysagère. Des bâtiments industriels conventionnels ne sont pas envisageables pour ce site. La boîte à outils d'architecture vise à fournir des principes directeurs qui doivent être appliqués en collaboration avec les parties prenantes locales afin de créer un site acceptable qui offre les fonctionnalités techniques requises pour le projet scientifique. La Figure 2.65 présente l'espace total requis pour les phases FCC-ee et FCC-hh. L'enveloppe indiquée peut être aussi petite que possible, mais aussi grande que nécessaire pour développer une intégration paysagère appropriée basée sur un paysage ininterrompu et une renaturation. L'objectif est de créer une valeur ajoutée en étendant le site de préservation de la nature et en apportant un habitat supplémentaire afin de créer de meilleures conditions pour la croissance de la biodiversité et les activités de loisirs humaines.



Fig. 2.65 : Besoins en espace pour un site et intégration paysagère du site d'expérience PB à Presinge, Suisse.

Site PD

Le site d'expérience PD à Nangy, en France, est situé entre l'autoroute A40 et la nouvelle route départementale à plusieurs voies RD903, qui passe à l'extrémité sud du site. Les environs sont dominés par le grand hôpital régional « CHAL », une zone industrielle au nord avec une grande usine de transformation du lait et un quartier mixte commercial et résidentiel de l'autre côté de la route départementale à plusieurs voies. Bien que la zone soit vaste et ouverte, le site n'est pas très visible car il serait aménagé sur une pente. Les conditions topographiques suggèrent une approche en terrasses du nord au sud. Bien qu'il ne soit pas nécessaire de construire les bâtiments et les équipements de la phase du collisionneur de hadrons dès la première phase, celle du collisionneur de leptons, l'aménagement du site et l'intégration paysagère exigent un aménagement planifié

des terrasses dès le départ. Les espaces verts domineront donc le site pendant la première phase d'exploitation. L'accès au site par le nord est exclusif, n'entraînant, ainsi, aucun trafic de transit supplémentaire.



Fig. 2.66 : Besoins en espace pour un site et intégration paysagère du site d'expérience PD à Nangy, France.

Site PF

Le site technique PF à Éteaux, en France, est situé directement sur une route nationale à forte circulation. Une entreprise de travaux publics est établie de l'autre côté de la route. La zone se caractérise par une vue ouverte sur la chaîne des Préalpes et la pente tombant sur une forêt et un petit ruisseau au sud de l'autoroute A410 rend le site partiellement visible depuis la route nationale. La boîte à outils d'architecture permet de prévoir une renaturation à cet endroit, créant ainsi une valeur ajoutée malgré la consommation d'espace agricole. Les zones humides situées à proximité immédiate du site et qui ne sont pas suffisamment préservées aujourd'hui peuvent être améliorées pour créer des habitats et catalyser la croissance durable de la biodiversité dans cette région. La Figure 2.67 montre les besoins en espace du site technique et les possibilités de restauration des zones humides à l'ouest. L'espace restauré est à peu près aussi grand que l'espace construit.

Site PG

Le site d'expérience PG, qui s'étend sur les communes de Groisy et de Charvonnex en France, est situé dans un environnement naturel mixte, une forêt et un pâturage utilisé pour le bétail. Il n'est pas possible d'éviter la forêt, car le puits principal menant à la caverne d'expérience ne peut pas être déplacé et il n'existe qu'une faible marge de manœuvre pour ajuster l'emplacement du puits menant à la caverne de service. Les contraintes d'habitat et de biodiversité



Implementation/Implementation-Figs/PF-2D-concept.pdf

Fig. 2.67 : Besoins en espace pour un site et intégration paysagère du site technique PF à Éteaux, France.

que la forêt implique nécessitent de réduire au maximum la consommation de terrain boisé. Par conséquent, il est envisagé de diviser le site de manière à placer les infrastructures ayant un impact visuel et sonore à proximité de l'autoroute au nord, les installations pouvant être déplacées sur le plateau ouvert à l'extérieur de la forêt, et à ne conserver à proximité des puits que les équipements strictement nécessaires, tels que les ascenseurs et la ventilation. Le résultat est un site qui couvre une plus grande surface, mais dont l'impact sur la nature est bien moindre que celui d'un site regroupé. La configuration permet de créer de la valeur ajoutée grâce à une installation pour accueillir les visiteurs. La première phase consacrée au collisionneur de leptons permettrait de conserver des espaces largement libres de construction et verts. Seule la deuxième phase, consacrée au collisionneur de hadrons, nécessitera des constructions temporaires pour l'enroulement de la bobine des détecteurs et des systèmes de réfrigération cryogéniques permanents. Une surface et des arbres équivalents à la surface et aux arbres défrichés peuvent être recréés sur la zone du site qui est actuellement un pâturage ouvert et sur les clairières de la forêt qui ont été créées historiquement. Cela signifie que le développement du site visera finalement un équilibre général neutre en ce qui concerne la préservation de l'habitat et de la biodiversité et qu'il pourra créer une valeur ajoutée grâce à des installations pour les visiteurs. La Figure 2.68 montre les besoins en espace pour les constructions sur le site principal (à droite) et l'annexe proche de l'autoroute (à gauche). Les espaces verts destinés à la renaturation et un exemple d'installation pour l'accueil des visiteurs sont visibles dans la partie inférieure du site principal.

Site PH

À son emplacement nominal, le site technique PH à Cercier et Marlioz en France serait entièrement situé dans un bois sur une pente assez raide. En termes d'intégration, la principale difficulté technique est la pente qui nécessite une approche en terrasses. Le site serait entièrement caché dans la forêt. Les exigences techniques d'accueil de tous les équipements nécessaires au

Implementation/Implementation-Figs/PG-2D-concept.pdf

Fig. 2.68 : Besoins en espace pour un site et intégration paysagère du site d'expérience PG à Charvonnex et Groisy, France. L'image de droite concerne le site principal autour des puits et l'image de gauche décrit l'annexe proche de l'autoroute qui contribue à réduire les impacts sur la nature, l'habitat, la biodiversité, la visibilité et le bruit.

fonctionnement du système de radiofréquences nécessitent cependant un espace important (Fig. 2.69). Les principaux éléments de construction sont la sous-station électrique de 400 kV, les convertisseurs de puissance et le système de réfrigération cryogénique.

Bien que l'emplacement soit techniquement réalisable, l'analyse de l'impact sur l'environnement et l'engagement auprès des parties prenantes locales selon le schéma « Éviter-réduire-compenser » peuvent encore nécessiter une réduction supplémentaire de la consommation d'espace. Dans ce contexte, la division du site en une partie électrique qui peut être déplacée plus loin et des éléments qui doivent être proches des puits (cryogénie, refroidissement, ventilation) peut être reconsidérée.

D'un point de vue architectural, les bâtiments du site sont moins exigeants que les autres, car le site est invisible de l'extérieur.

Site PJ

Le site d'expérience PJ à Dingy-en-Vuache et Vulbens, en France, est situé dans une zone agricole juste au sud de l'autoroute A40, avec un accès routier existant à Vulbens. L'existence d'un corridor pour la faune devra être prise en compte lors de l'intégration du site. Le site n'est pas visible de l'autoroute ni des communes. Il est éloigné de tout hameau ou maison individuelle. Les contraintes topographiques et de relief imposent à nouveau une approche en terrasses qui nécessite de préparer dès le départ l'ensemble du site pour les deux phases du collisionneur (ee et hh). Le terrain offre de bons moyens pour intégrer le site visuellement et pour prévoir une installation d'accueil de visiteurs. L'existence de liaisons de mobilité douce entre les communes voisines peut également être intégrée dans la planification du site. La majeure partie de la surface serait conservée en tant que prairie jusqu'à l'installation du second collisionneur de particules. Plusieurs espaces qui seraient nécessaires à cette phase seraient également créés dès la première phase, puisque l'approche en terrasses



Implementation/Implementation-Figs/PH-2D-concept.pdf

Fig. 2.69 : Besoins en espace pour l'intégration d'un site technique PH à Cercier et Marlioz, France.

permet de créer des volumes couverts et semi-enterrés qui peuvent être utilisés à des fins différentes à des moments différents. Comme sur d'autres sites d'expérience, les installations d'enroulement de la bobine et d'assemblage des détecteurs ne seraient que temporaires. Ces zones seraient ensuite restaurées en espaces verts (Fig. 2.70).

Site PL

Le site technique PL à Challex, en France (département de l'Ain), serait situé sur un espace agricole ouvert et plat, à l'emplacement de deux maisons individuelles. Les vignobles situés à proximité, sur le territoire suisse, se trouvent sur des pentes raides qui s'abaissent vers le Rhône et la zone du vallon de l'Allondon. La proximité de l'emplacement du site, situé à l'extérieur du village, sert aux résidents locaux et aux touristes pour des activités de loisirs telles que la marche, la randonnée, la course à pied et la visite des vignobles. L'application complète de la boîte à outils d'orientation architecturale pour une très bonne intégration dans le paysage est donc un objectif primordial. Étant donné que le terrain très plat ne peut pas être utilisé efficacement pour intégrer le site dans le paysage, le fait d'abaisser légèrement le site pour éviter de perturber le paysage peut atténuer certains problèmes de visibilité. L'expression de façade, les matériaux de construction naturels, les façades et toits verts et les écrans de visibilité seront des éléments essentiels de l'architecture et de la conception du site. La surface prévue pour ce site comprend un tampon vert supplémentaire sur l'espace, inutilisable pour l'exploitation agricole afin de veiller à ce que la visibilité du site reste faible et que l'intégration puisse être très bien planifiée et mise en œuvre. Cette intégration contribue également à améliorer la valeur de l'habitat, à favoriser l'épanouissement de la biodiversité et à rendre la zone plus attrayante pour les activités de loisirs. Seule une petite différence entre la phase de construction du collisionneur de leptons et celle du collisionneur de hadrons est prévue, ce qui garantit que, dans toute la mesure du possible, le site soit définitivement développé dès le départ.

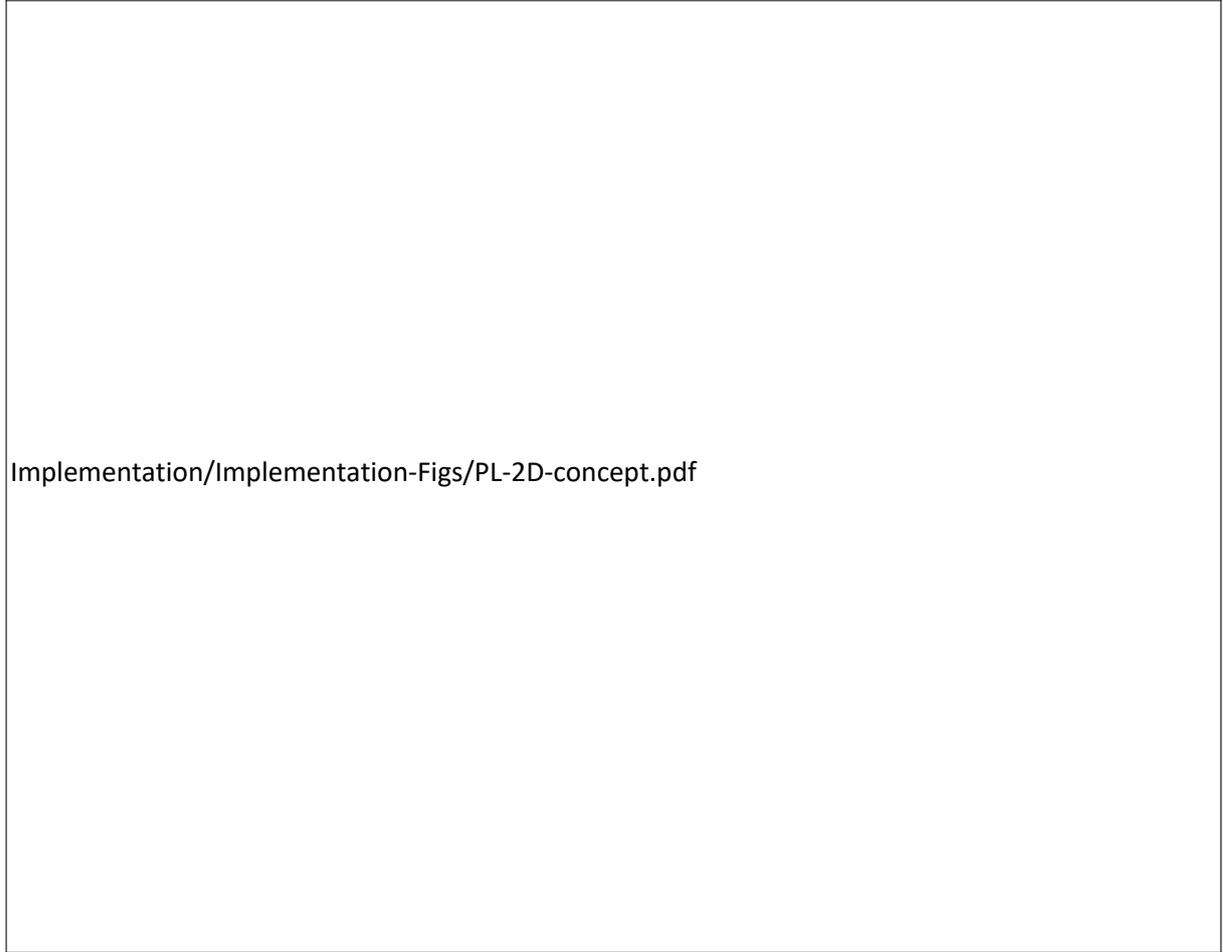
Implementation/Implementation-Figs/PJ-2D-concept.pdf

Fig. 2.70 : Besoins en espace pour l'intégration du site d'expérience PJ à Dingy-en-Vuache et Vulbens, France. La boîte à outils d'architecture suggère de centrer le site entre les lignes d'arbres existantes afin de garantir la création de corridors fonctionnels pour la faune. Par rapport à aujourd'hui, ces lignes peuvent conduire à une amélioration des conditions d'habitat.

Conclusions

La Figure 2.72 illustre les résultats de l'application de la boîte à outils d'architecture sur l'emplacement de certains sites de surface. Ces travaux ne représentent pas de conceptions ou de choix architecturaux spécifiques pour l'implantation. Ils servent d'outil pour engager avec les parties prenantes locales un dialogue sur les besoins et les contraintes de chacun des emplacements. Ils permettent de développer des concepts architecturaux et des projets dans le cadre d'un effort de coopération, fédérant les scientifiques et les ingénieurs qui conçoivent l'infrastructure de recherche, les architectes et les paysagistes qui développent les sites et les parties prenantes locales. L'engagement prend d'abord, dans chaque lieu, la forme d'ateliers collaboratifs avec des représentants de la population et des parties prenantes locales intéressées. Cette phase comprend également des visites communes sur le terrain afin de mieux comprendre ce qui peut être envisagé de manière réaliste et ce qui est nécessaire, tant du point de vue technique que du point de vue des parties prenantes. Les exigences et les contraintes du projet technique seront intégrées dans cette activité. Une fois que les conditions limites ont été convenues et documentées, une autre phase, plus détaillée, peut commencer, au cours de laquelle les architectes-ingénieurs élaborent des scénarios spécifiques pour les sites. L'objectif est de parvenir à des conceptions de sites équilibrées et intégrées de manière adéquate lors d'une phase préparatoire ultérieure du projet. Les résultats, sous la forme de plans de conception, de descriptions et de prescriptions de construction, seront inclus dans le processus d'autorisation environnementale dans chaque État hôte.

Il convient de noter que le concept architectural et les développements de conception d'un projet



Implementation/Implementation-Figs/PL-2D-concept.pdf

Fig. 2.71 : Besoins en espace pour l'intégration d'un site technique PL à Challex, France.

public de cette envergure, avec huit nouveaux sites de surface occupant chacun plusieurs hectares d'emprises, nécessitent une étude de marché et une procédure d'appel d'offres en temps utile pour trouver un partenaire qualifié. La disponibilité d'une telle société d'architecture doit être assurée à la fois en termes de personnel minimum et de temps ininterrompu pour travailler sur le projet. L'ensemble du processus de développement devrait s'étaler sur plusieurs années.

Implementation/Implementation-Figs/architecture-concepts.pdf

Fig. 2.72 : Collection de concepts d'artiste résultant de l'application de la boîte à outils d'architecture à des sites individuels. Les conceptions paysagères intégrées exigent une préparation précoce des parcelles, et les zones tampons vertes devront être préparées dès la phase de construction souterraine afin de pouvoir sélectionner les sites dès le début.