

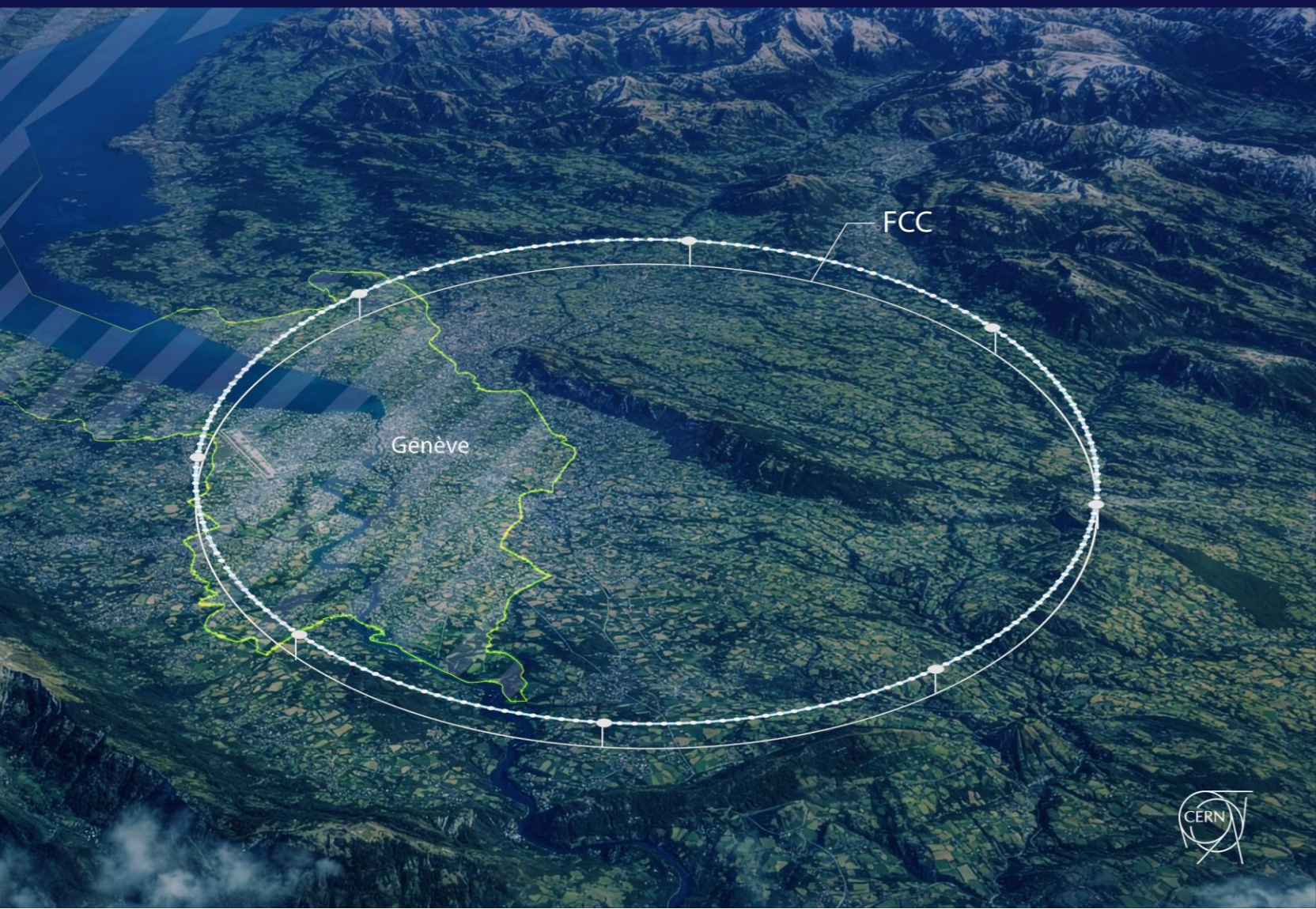
RETOUR D'EXPÉRIENCE SUR LES
ACCÉLÉRATEURS LEP ET LHC
ET ENSEIGNEMENTS POUR LE

FUTUR
COLLISIONNEUR
CIRCULAIRE

Projet du Futur Collisionneur Circulaire

DÉBAT PUBLIC EN FRANCE, SOUS L'ÉGIDE DE LA COMMISSION NATIONALE
DU DÉBAT PUBLIC, DU 2 JUIN AU 1^{ER} OCTOBRE 2026

CONCERTATION PUBLIQUE EN SUISSE, SOUS L'ÉGIDE DE TIERS GARANTS
EXPERTS, DU 18 MAI AU 2 OCTOBRE 2026



AVANT-PROPOS

Ce document a pour ambition de présenter, de manière factuelle et illustrée, un retour d'expérience complet sur deux grandes infrastructures du CERN et leur réalisation :

- > Le **grand collisionneur électron*-positon*, dit LEP** (pour « Large Electron-Positron Collider » en anglais), en fonction de 1989 à 2000. Le programme scientifique du LEP se déploya en deux étapes complémentaires : LEP1 transforma la physique électrofaible* grâce à des mesures d'une précision inédite au niveau du boson Z*, tandis que LEP2 repoussa la frontière énergétique des collisionneurs électron-positron et ouvrit la voie aux recherches directes du boson de Higgs*.
- > Le **grand collisionneur de hadrons* dit LHC** (pour « Large Hadron Collider » en anglais), en fonction depuis 2008 et construit dans le tunnel du LEP. Les expériences au LHC ont découvert le boson de Higgs*, la clé de voûte qui complète le Modèle standard* qui décrit toute la matière visible dans l'Univers.

Ce document est destiné à alimenter le débat public français et la concertation suisse sur le projet de futur collisionneur circulaire (FCC), avec les objectifs suivants :

- > Comprendre l'utilité de ces infrastructures et les grandes étapes de leurs réalisations, notamment sur la gouvernance et la relation entre le prévisionnel et le réalisé ;
- > Apporter des éclairages factuels sur l'opportunité, les alternatives envisagées, les impacts socio-économiques, environnementaux et d'aménagement du territoire du LEP et du LHC ;
- > Identifier comment ce retour d'expérience peut être utile au débat sur le projet de FCC.

La version numérique du présent document est consultable et téléchargeable sur le site Internet du débat public, à l'adresse suivante : <https://www.debatpublic.fr/projet-accelereur-particules>

Date de publication : 2 juin 2026

Les * signalent les termes définis dans le glossaire situé à la fin du présent dossier.

SOMMAIRE

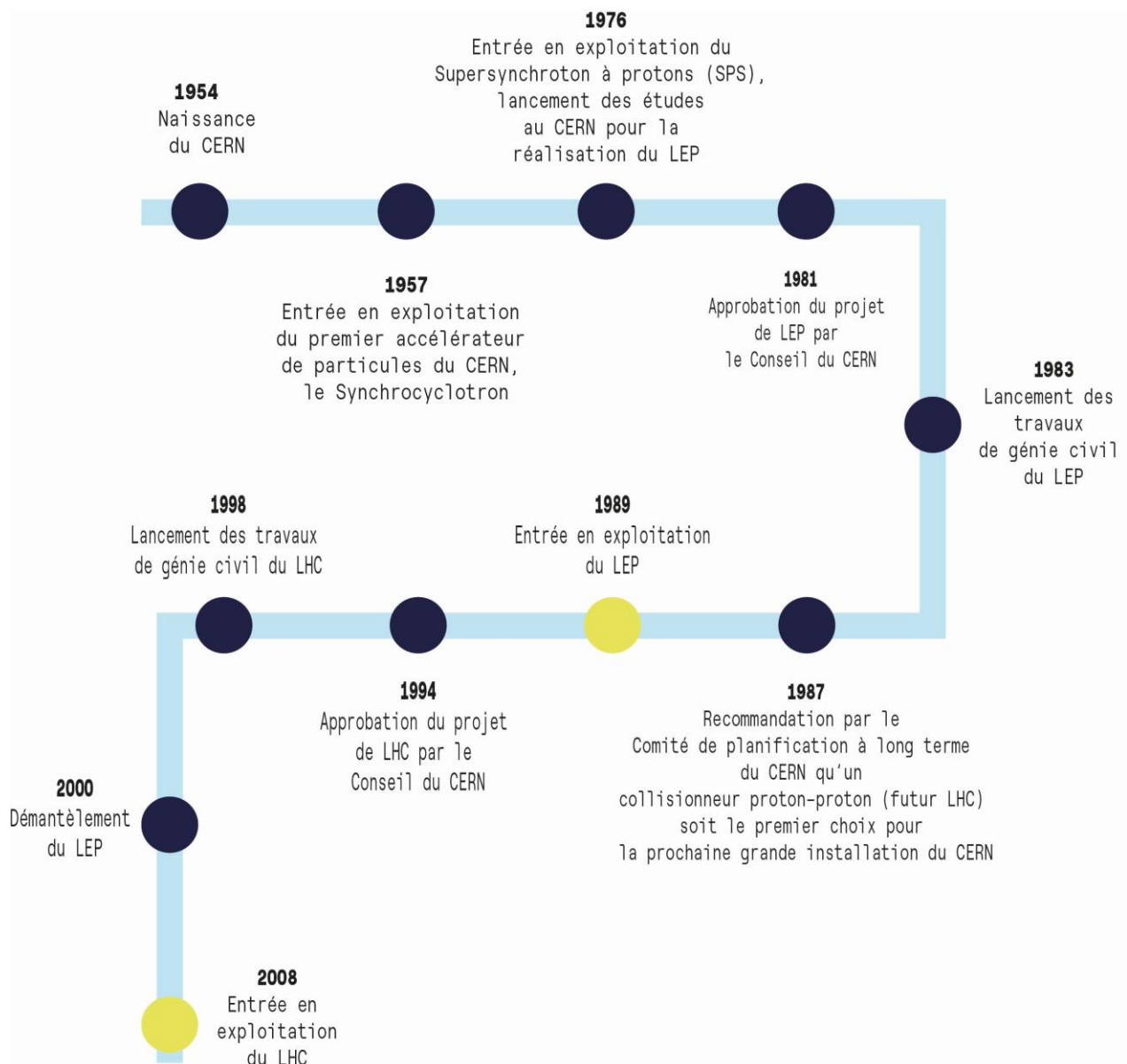
Genèse et conception du LEP et du LHC	4
1.1 Frise chronologique générale et carte des infrastructures	5
1.2 Genèse et conception du LEP.....	7
1.3 Genèse et conception du LHC.....	26
1.4 Le CERN, gouvernance et processus de décision	31
1.5 Relations avec le territoire et concertation.....	32
2. Les infrastructures du LEP et du LHC : données clés et bilan des chantiers.....	33
2.1 Les infrastructures créées.....	34
2.2 Données des chantiers du LEP et du LHC	37
2.3 Déchets : volumes et destination	42
2.4 Consommation électrique	47
2.5 Coût total et financement	53
2.6 Suivi et évaluation	55
2.7 Apports scientifiques.....	57
3. Aménagement du territoire et impacts socio-économiques.....	68
3.1 Intégration territoriale	69
3.2 Emplois et économie locale	72
3.3 Mobilité.....	76
4. Impacts environnementaux.....	78
4.1 Études et expertises conduites	79
4.2 Risques identifiés et risques avérés	82
4.3 Ressource en eau	85
4.4 Compensation agricole et biodiversité.....	90
Conclusions : enseignements pour le débat sur le projet FCC	94
Glossaire.....	97



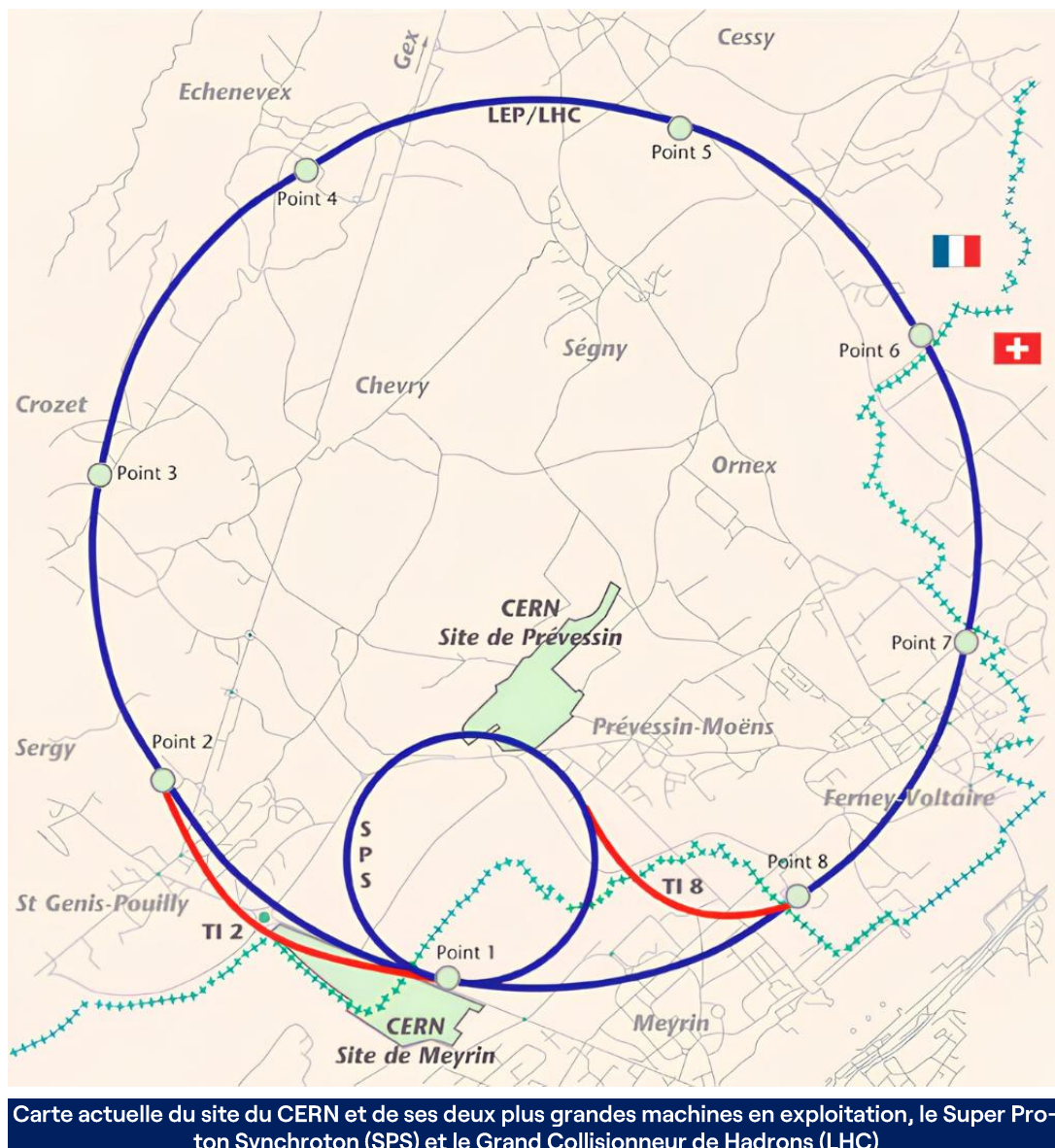
GENÈSE ET CONCEPTION DU LEP ET DU LHC

1.1 FRISE CHRONOLOGIQUE GÉNÉRALE ET CARTE DES INFRASTRUCTURES

1.1.1 La frise chronologique



1.1.2 Carte des infrastructures



1.2 GENÈSE ET CONCEPTION DU LEP

1.2.1 Une longue histoire de coopération autour des grands instruments

Après la Seconde Guerre mondiale, la physique des particules est entrée dans une phase de développement sans précédent. Les physiciens ont alors cherché à comprendre la structure fondamentale de la matière, l'origine des interactions fondamentales et les lois qui régissent l'Univers à l'échelle subatomique (c'est-à-dire inférieure à l'échelle de l'atome). Les nombreuses découvertes de nouvelles particules au cours des années 1950 et 1960 ont révélé un monde microscopique d'une complexité insoupçonnée et renforcé l'idée qu'une théorie plus générale et unifiée doit exister. Pour vérifier ces hypothèses, il est devenu nécessaire d'atteindre des énergies toujours plus élevées afin de produire de nouvelles particules et d'étudier leurs propriétés avec une précision croissante.

Cette exigence scientifique a transformé progressivement les instruments eux-mêmes. Les grands synchrotrons à protons des années 1950 et 1960, comme le **Proton Synchrotron (PS)** du CERN, dont les faisceaux* alimentèrent notamment l'expérience Gargamelle où furent découverts les courants neutres faibles, ou l'Alternating Gradient Synchrotron de Brookhaven, permirent d'explorer de nouveaux domaines d'énergie. **Ils fonctionnaient cependant principalement avec des faisceaux* dirigés sur des cibles fixes.** Or cette méthode présentait une limite fondamentale : seule une fraction de l'énergie du faisceau* était effectivement disponible dans le centre de masse de la collision. **L'idée de faire entrer en collision deux faisceaux* circulant en sens opposé s'imposa progressivement,** car elle permettait d'utiliser beaucoup plus efficacement l'énergie accélérée pour produire de nouvelles particules. Cette logique conduisit au développement des anneaux de stockage et des premiers collisionneurs.

Au CERN, cette évolution prit une forme particulièrement importante avec les Intersecting Storage Rings (ISR), approuvés en 1965 et mis en service en 1971. Les ISR furent le premier collisionneur hadronique* au monde et ouvrirent une nouvelle manière de faire de la physique aux hautes énergies. Ils permirent non seulement de tester la faisabilité de collisions proton-proton sur de longues durées, mais aussi de développer de nouvelles technologies de faisceaux, de vide, de détection et d'analyse. Les observations de particules à grand moment transverse aux ISR contribuèrent à faire émerger l'image des collisions entre constituants internes des hadrons*, les partons, et participèrent au développement de la physique des jets hadroniques*, devenue centrale dans les collisionneurs ultérieurs.

Cette dynamique se prolongea avec le **Super Proton Synchrotron (SPS), approuvé en 1971 et mis en service en 1976.** Le SPS illustre bien la logique cumulative des infrastructures du CERN : il fut construit à proximité du site existant afin d'utiliser le Proton Synchrotron (PS) comme injecteur et de bénéficier des infrastructures déjà disponibles. Son **implantation souterraine**, associée à des halls expérimentaux en surface, constitua une innovation déterminante pour les projets ultérieurs, notamment le LEP et le LHC. Le SPS fut d'abord conçu comme machine de physique sur cible fixe, puis transformé en collisionneur proton*-antiproton*, conduisant en 1983 à la découverte des bosons W et Z*, médiateurs de l'interaction faible. Il fut ensuite adapté comme injecteur pour le LEP, puis pour le LHC, aussi bien pour les faisceaux* de protons* que pour ceux d'ions* lourds.

Cette succession de machines montre que l'augmentation de la taille et de la complexité des accélérateurs ne résultait pas d'une simple logique technique, mais d'un enchaînement de questions scientifiques. La découverte des courants neutres faibles, l'étude de la structure des hadrons* et le développement de la chromodynamique quantique* exigeaient des énergies toujours plus élevées. D'autres objectifs, comme la recherche des bosons W et Z*, l'étude des saveurs* lourdes, la violation de CP ou, plus tard, la recherche du boson de Higgs*, nécessitaient également des collisions plus propres et des détecteurs de plus en plus précis. Le SPS joua aussi un rôle pionnier dans la physique des ions* lourds ultra-relativistes (c'est-à-dire dont la vitesse est très proche de celle de la lumière), ouvrant la voie à l'étude du plasma de quarks et de gluons*, approfondie ensuite au LHC avec l'expérience ALICE.

Dans ce contexte, la coopération internationale s'imposa progressivement comme une condition essentielle du progrès scientifique. La création du CERN en 1954 répondait déjà à cette ambition :

permettre aux pays européens de reconstruire une capacité scientifique commune après la guerre, favoriser le retour en Europe d'une partie des chercheurs partis à l'étranger, et mutualiser les ressources nécessaires au développement de grandes infrastructures consacrées à la recherche fondamentale pacifique.

Cette logique dépassa rapidement le seul cadre européen. Dès la fin des années 1950, dans le contexte de la guerre froide et des efforts de réouverture du dialogue scientifique international, plusieurs physiciens commencèrent à envisager des infrastructures de recherche conçues à une échelle véritablement mondiale. Apparut alors progressivement l'idée d'un « **accélérateur mondial pour la paix** », capable de réunir scientifiques, ressources et compétences autour d'un projet de recherche fondamentale dépassant les rivalités nationales.

Cette ambition d'un accélérateur de très grande échelle fut relancée au milieu des années 1970, alors que les physiciens réfléchissaient déjà aux machines susceptibles de succéder aux grands accélérateurs en construction ou récemment mis en service. En mars 1975, lors d'un séminaire international organisé à La Nouvelle-Orléans, Leon Lederman proposa le nom de **Very Big Accelerator (VBA)** – « **Très Grand Accélérateur** » en français – pour désigner une future machine encore ouverte dans sa définition technique, mais porteuse d'une ambition scientifique et institutionnelle mondiale. Le séminaire ne déboucha pas sur un projet immédiatement réalisable, mais recommanda la création d'un groupe d'étude international placé sous la direction de Victor Weisskopf. Les discussions associaient des représentants des principales régions actives en physique des hautes énergies. Elles portaient à la fois sur les objectifs scientifiques, les configurations techniques envisageables et les formes de coopération internationale nécessaires à la réalisation d'infrastructures de cette échelle.

Les réunions qui suivirent montrèrent que le VBA ne correspondait pas à une machine unique déjà définie. Lors du séminaire de Serpoukhov, en mai 1976, il fut envisagé soit comme un accélérateur de protons* de 10 à 20 TeV* fonctionnant en cible fixe, soit comme un ensemble d'anneaux de stockage électron*-positon* de 100 GeV*. L'option électron*-positon* occupait une place importante dans ces réflexions, car elle offrait un environnement expérimental beaucoup plus propre que les collisions de protons* et permettait d'étudier avec précision la théorie électrofaible*, les bosons W et Z*, ainsi que d'éventuels effets indirects de nouvelles particules. La **création de l'ICFA** (« **International Committee for Future Accelerators** » – en français, « **Comité international pour les futurs accélérateurs** »), peu après, visait précisément à organiser ces discussions sur le VBA, mais aussi sur les futurs projets régionaux et les collaborations internationales.

Au cours des années suivantes, les membres de l'ICFA poursuivirent l'examen des différents scénarios techniques envisageables pour le VBA. Pourtant, malgré le soutien affiché par une partie de la communauté internationale, **l'idée d'une machine mondiale unique ne parvint jamais à se transformer en projet concret.** Les objectifs scientifiques et la configuration technique de l'infrastructure restaient difficiles à stabiliser, tandis que les mécanismes de financement, les priorités nationales, les calendriers politiques et les structures de gouvernance nécessaires à un instrument d'une telle ampleur demeuraient incertains. Si les différentes communautés continuaient d'afficher leur soutien à l'idée d'un accélérateur mondial, les décisions effectives restaient largement liées aux cadres nationaux ou régionaux.

En Europe, le CERN consolidait alors le programme du SPS (Super Proton Synchrotron), dont la transformation en collisionneur proton-antiproton permit aux expériences UA1 et UA2 de découvrir les bosons W et Z* en 1983. Cette réussite confirma la théorie électrofaible* et donna au CERN une visibilité scientifique internationale considérable. Aux États-Unis, elle fut perçue comme le signe possible d'un déplacement de la frontière de la physique des hautes énergies vers l'Europe, renforçant les arguments en faveur d'un grand collisionneur américain capable de reprendre l'initiative à des énergies encore plus élevées.

Dans ce contexte, le projet ISABELLE, étudié au Brookhaven National Laboratory (dans l'État de New York), rencontra des difficultés techniques et perdit progressivement son soutien politique et

scientifique. Dans le même temps, une partie de la communauté américaine défendit l'idée d'un collisionneur beaucoup plus ambitieux, capable d'atteindre directement la frontière des dizaines de TeV*. Ce mouvement fut renforcé au début des années 1980 par le concept du « Desertron » et par la volonté de préserver le leadership américain en physique des hautes énergies. En 1983, le Département de l'Énergie américain décida ainsi d'avancer vers le projet de Superconducting Super Collider (SSC), tout en mettant fin aux travaux sur ISABELLE.

Parallèlement à ces évolutions internationales, le projet LEP prit forme au CERN. Il ne s'agissait ni d'un simple repli européen face à une « machine mondiale » devenue irréalisable, ni d'une opposition entre un projet mondial fondé sur les protons* et un choix européen en faveur des leptons*. **Les premières études du LEP commencèrent au CERN dès 1976**, en parallèle avec d'autres options, notamment un futur collisionneur proton-proton* et un collisionneur électron*-proton*.

Le choix d'un grand collisionneur électron*-positron* s'inscrivait à la fois dans la continuité des collisionneurs e^+e^- développés en Europe et aux États-Unis, d'ADA et ADONE à Frascati, ACO à Orsay, DORIS et PETRA à DESY, SPEAR et PEP au SLAC, et dans le contexte scientifique ouvert par les découvertes des années 1970. La découverte du J/ψ en 1974, nouvelle particule associée au quark charmé*, avait montré la capacité des collisionneurs électron*-positron* à révéler des états jusque-là inconnus de la matière. Le LEP devait prolonger cette logique à une énergie beaucoup plus élevée, avec une ambition différente : **produire de grandes quantités de bosons Z*, puis étudier les paires de bosons W***.

Ces particules occupaient une place centrale dans la théorie électrofaible*, qui décrit dans un même cadre l'interaction électromagnétique* et l'interaction faible*. Leur étude devait permettre de tester avec une précision inédite le Modèle standard, c'est-à-dire la théorie décrivant les particules élémentaires connues et leurs interactions fondamentales. Ce modèle explique la structure de la matière visible de l'Univers, à l'exception de la gravité.

Ce choix répondait également à des raisons expérimentales fortes. Dans les collisions électron*-positron*, l'état initial de la collision est particulièrement bien défini : les électrons* et les positrons* sont des leptons* sans structure interne apparente, et l'énergie disponible dans le centre de masse est connue avec une grande précision. Les réactions produites sont donc plus simples à interpréter que dans les collisions entre protons* ou protons*-antiprotons*, où les particules incidentes sont elles-mêmes composées de quarks* et de gluons*. Cette « propreté » expérimentale faisait du LEP un instrument particulièrement adapté aux mesures de précision des bosons Z et W*, ainsi qu'aux recherches indirectes de nouvelles particules.

Références

- ↘ Doble, N., Gatignon, L., Hübner, K. and Wilson, E. (2017), "The Super Proton Synchrotron (SPS): A Tale of Two Lives", in *Technology Meets Research: 60 Years of CERN Technology – Selected Highlights*, World Scientific, pp. 135–177. DOI: 10.1142/9789814749145_0005.
- ↘ Evans, Lyn, and Peter Jenni, « Discovery machines », CERN Courier, 27 January 2021.
- ↘ Hoddeson, L., Kolb, A. W., & Westfall, C. (2008). "The Super Collider Affair, 1982–1989." In *Fermilab: Physics, the Frontier, and Megascience*. University of Chicago Press.
- ↘ Kolb, A., & Hoddeson, L. (1993). "The mirage of the 'world accelerator for world peace' and the origins of the SSC, 1953–1983." *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, 24(1), 101–124.
- ↘ Wilson, R. R. (1978). "A world organization for the future of high-energy physics." *Physics Today*, 31(2), 48–51.
- ↘ Lederman, L. M. (1977). "VBA." *IEEE Transactions on Nuclear Science*, NS-24(3), 1903–1908.
- ↘ Bjorken, J. D. (1976). "Physics Issues and the VBA." Manuscrit, Fermilab History Collection.
- ↘ Goldwasser, E. L. (1975). "Normalization of Inter-regional Cooperations and Communications."
- ↘ Schopper, H. (1991). "LEP: A historical introduction." *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 336(1642), 179–189.
- ↘ Schopper, Herwig. *LEP – The Lord of the Collider Rings at CERN 1980–2000: The Making, Operation and Legacy of the World's Largest Scientific Instrument*. Berlin / Heidelberg: Springer, 2009. DOI: 10.1007/978-3-540-89301-1.
- ↘ Crowley-Milling, M. C. (1983). "The world's largest accelerator: the electron-positron collider, LEP." *Proceedings of the Royal Society of London A*, 388(1794), 1–20.

1.2.2 La maturation scientifique et technique du projet LEP

La maturation du projet LEP s'est faite dans une interaction étroite entre la communauté européenne de la physique des hautes énergies, représentée par l'ECFA (« **European Committee for Future Accelerators** » – en français, « **Comité européen pour les futurs accélérateurs** »), et le CERN. L'ECFA jouait alors un rôle consultatif essentiel : exprimer les priorités scientifiques de la communauté européenne des physiciens des particules et formuler des recommandations sur les futurs projets à promouvoir en Europe. Dès le milieu des années 1970, l'idée d'un très grand collisionneur électron*-positon* au CERN commença à prendre forme, notamment après une proposition formulée par Burton Richter lors d'une visite au CERN en 1975-1976. **À partir de 1976, à la suite d'une recommandation de l'ECFA, des études furent engagées au CERN pour un grand anneau de collision électron*-positon***, en parallèle avec d'autres options, dont un futur collisionneur proton*-proton* et un collisionneur électron*-proton*.

Le LEP s'imposa progressivement comme le projet le plus largement soutenu par la communauté européenne. Cette maturation scientifique et technique fut jalonnée de plusieurs étapes décisives. Le 25 mai 1977, l'ECFA recommanda unanimement d'étudier en priorité, pour les années 1980, une machine de ce type. En septembre 1978, le séminaire organisé aux Houches par le CERN et l'ECFA permit d'examiner le programme de physique, les paramètres de la machine et les premières configurations expérimentales. Il donna lieu à un « Blue Book » (« livre bleu »), ensuite approfondi par deux groupes de travail de l'ECFA réunis à Rome et à Hambourg. En septembre 1979, ce premier rapport fut remplacé par le « Pink Book » (« livre rose »), qui servit de base aux discussions sur le prochain grand projet d'accélérateur européen.

À cette époque, le modèle électrofaible, qui unifie l'interaction électromagnétique* et l'interaction faible*, s'imposait comme l'un des cadres théoriques majeurs de la physique des particules. La vocation première du LEP était d'en permettre l'étude détaillée. Pour le CERN, dont l'histoire récente avait été marquée par la construction et l'exploitation de grandes machines à protons, le choix d'un collisionneur électron*-positon* constituait aussi une évolution importante. Herwig Schopper, physicien allemand et directeur du CERN de 1981 à 1988, rappelle que le CERN hésita d'abord à quitter un domaine dans lequel il avait excellé, celui des machines à protons*, avant de répondre progressivement à la pression de la communauté scientifique en faveur d'une machine à électrons*.

Les objectifs scientifiques associés au LEP étaient multiples :

- ↘ Dans une première étape, il s'agissait de **produire en abondance des bosons Z***, autour de 91 GeV* dans le centre de masse, afin d'étudier avec une précision inédite les interactions électrofaibles*.
- ↘ Dans une seconde étape, l'augmentation de l'énergie devait permettre **l'étude de la production de paires de bosons W***.
- ↘ Plus largement, le LEP devait **tester les prédictions du Modèle standard***, préciser le nombre de familles de particules légères, contraindre indirectement la masse du quark top* et du boson de Higgs* par des mesures de précision, rechercher d'éventuels nouveaux quarks* ou leptons*, explorer la possibilité de phénomènes nouveaux et étudier les interactions fortes* au niveau des quarks* dans un environnement expérimental particulièrement propre.
- ↘ Dans sa phase finale, le LEP mena également **des recherches directes du boson de Higgs***, sans l'observer, mais en fixant une limite inférieure sur sa masse qui orienta les recherches ultérieures au LHC.

Les décennies précédentes avaient conduit à une compréhension nouvelle du lien entre l'électromagnétisme* et l'interaction faible*. Cette théorie prédisait l'existence des **bosons W et Z***, particules médiatrices de l'interaction faible, beaucoup plus massives que le proton. Ceux-ci furent découverts au CERN en 1983 grâce aux expériences UA1 et UA2 auprès du SPS transformé en collisionneur proton*-antiproton*. **Cette découverte confirmait la pertinence du programme du LEP, mais appelait aussi une exploration beaucoup plus précise des propriétés de ces particules.** Le SPS avait permis leur découverte ; le LEP devait en faire des objets de mesure de précision.

Le LEP était un grand collisionneur circulaire électron*-positon* : il faisait circuler des faisceaux* d'électrons* et de positrons* en sens opposés dans un anneau souterrain avant de les faire entrer en collision en plusieurs points expérimentaux. Son intérêt tenait au fait que les collisions entre leptons* sont plus simples à interpréter que les collisions entre protons* : les électrons* et les positons* ne présentent pas de structure interne apparente. **Cette clarté expérimentale fit du LEP un instrument particulièrement puissant pour tester le Modèle standard* avec une précision inégalée.** Les résultats dépassèrent largement les attentes initiales : la masse du boson Z* fut mesurée avec une précision de quelques parties par million, le nombre de neutrinos* légers fut établi à trois et les mesures électro-faibles* permirent de tester le Modèle standard* au niveau des corrections quantiques.

Le LEP fut également pensé comme une infrastructure évolutive. Dans un contexte économique contraint, le projet fut conçu de manière progressive, sous la forme d'une première phase parfois décrite comme une « machine déshabillée », destinée à être complétée ultérieurement. Cette approche permettait de lancer le programme tout en maintenant le budget du CERN dans une enveloppe constante et en réutilisant les accélérateurs existants, notamment le PS et le SPS, comme injecteurs.

Le choix d'un grand tunnel circulaire répondait d'abord aux besoins du programme électron*-positon*, notamment à la nécessité de limiter les pertes d'énergie dues au rayonnement synchrotron et de permettre une montée progressive en énergie. Mais il s'inscrivait aussi dans une perspective de plus long terme. **Dès la fin des années 1970, l'idée qu'un futur collisionneur de protons puisse être installé dans le tunnel du LEP était déjà présente,** notamment dans les discussions des Houches en 1979, puis fut étudiée plus systématiquement lors de l'atelier de Lausanne en 1984. Cette anticipation reposait sur une logique scientifique claire : le LEP devait permettre des mesures de précision des bosons Z et W*, ainsi que la recherche du boson de Higgs*, tandis qu'un futur collisionneur hadronique* pourrait explorer directement des énergies plus élevées si l'origine de la masse ou d'éventuelles nouvelles particules restaient hors d'atteinte.

Comme le rappelle Herwig Schopper, directeur général du CERN au moment de l'approbation et de la construction du LEP, **la taille du tunnel fut choisie en tenant compte de cette perspective de long terme.** Le maintien d'un anneau d'environ 27 km représentait un compromis entre objectifs scientifiques, contraintes géologiques, maîtrise des coûts et possibilité de préserver une évolution future. Cette décision permit plus tard l'installation du LHC dans la même infrastructure souterraine.

Le Conseil du CERN approuva le projet LEP en 1981, avec une validation définitive par les États membres en décembre de la même année. Cette décision fut l'aboutissement d'un processus engagé plusieurs années plus tôt : études de faisabilité et de conception, rapports techniques et scientifiques, analyses géologiques et environnementales, évaluation des coûts, définition d'un cadre budgétaire et intégration du projet dans le programme de base de l'Organisation.

Le LEP apparaît ainsi comme un exemple particulièrement éclairant de la manière dont un grand instrument scientifique se construit à la croisée de plusieurs dynamiques : maturation des idées théoriques, résultats expérimentaux antérieurs, définition progressive d'objectifs scientifiques, expertise technique, arbitrages budgétaires et décision intergouvernementale.

Références

- ↘ CERN & ECFA. Proceedings of the ECFA-CERN Workshop on Large Hadron Collider in the LEP Tunnel, Lausanne and Geneva, 21–27 March 1984. CERN Yellow Report CERN-84-10, Vol. 1; ECFA-84-085, Vol. 1. Geneva: CERN, 1984. DOI: 10.5170/CERN-1984-010-V-1.
- ↘ Dufour, Jean-Marie. « Le “LEP”, avenir de la physique européenne des particules (CERN) », *Annuaire français de droit international*, vol. 27, 1981, pp. 653–664.
- ↘ Schopper, Herwig. “LEP: A historical introduction.” *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 336(1642), 1991, pp. 179–189.
- ↘ Taylor, Thomas, and Daniel Treille. “The Large Electron Positron Collider (LEP): Probing the Standard Model.” In *Technology Meets Research*, World Scientific, 2017.
- ↘ Crowley-Milling, M. C. “The world’s largest accelerator: the electron-positron collider, LEP.” *Proceedings of the Royal Society of London A*, 388(1794), 1983, pp. 1–20.
- ↘ Schopper, Herwig. “Lessons from LEP.” *CERN Courier*, 11 July 2019.

1.2.3 L’élaboration du tracé du LEP

1.2.3.1 Choix d’implantation géographique sur le site du CERN

La constitution progressive du complexe d’accélérateurs du CERN a très tôt permis de mutualiser les infrastructures, les compétences et une partie des coûts. Depuis la mise en service du PS (Proton Synchrotron) en 1959, les grandes machines du laboratoire n’ont pas été conçues comme des installations isolées, mais comme les éléments successifs d’un ensemble en évolution. Le PS servit ainsi de base ou d’injecteur à plusieurs programmes majeurs, notamment les Intersecting Storage Rings (ISR), le SPS, le collisionneur proton-antiproton, le LEP puis le LHC, tout en continuant à alimenter d’autres lignes expérimentales. Cette logique influença fortement l’implantation géographique des nouvelles infrastructures : les construire à proximité du site existant permettait de réutiliser les accélérateurs, les réseaux techniques, les halls expérimentaux et les compétences déjà disponibles, plutôt que de créer un nouveau complexe entièrement indépendant.

Dans le cas du LEP, cette continuité constitua un argument déterminant en faveur du site du CERN. Les accélérateurs existants, en particulier le PS et le SPS, purent être intégrés au système d’injection du nouveau collisionneur. Cette configuration réduisait les investissements nécessaires et évitait la construction d’un complexe entièrement nouveau sur un autre site.

La proximité du SPS jouait également un rôle dans certaines réflexions à plus long terme autour du LEP, notamment la possibilité — évoquée dans plusieurs scénarios — de collisions électron*-proton* entre les électrons du LEP et les protons du SPS. Cette option demeura toutefois exploratoire. Le scénario qui prit une importance beaucoup plus structurante fut celui d’un futur collisionneur de protons* installé dans le tunnel du LEP.

Dans les premières études du LHC, il ne s’agissait pas seulement de réutiliser ultérieurement le tunnel après l’arrêt du LEP, mais d’envisager, au moins conceptuellement, une coexistence entre le LEP et un nouveau double anneau de protons*. Une telle configuration aurait permis non seulement des collisions proton-proton* de très haute énergie, mais aussi des collisions électron*-proton* entre les faisceaux* du LEP et ceux du futur LHC, ainsi que des collisions d’ions* lourds.

Un rapport du groupe de travail LHC présenté par Giorgio Brianti évoquait ainsi un complexe capable d’offrir, en plus des collisions électron*-positron*, des collisions proton-proton* à environ 16 TeV*, des collisions électron*-proton* jusqu’à environ 1,7 TeV* et, à terme, des collisions plomb-plomb. Cette

perspective montre que le choix du tunnel du LEP s'inscrivait déjà dans une logique d'infrastructure évolutive et de long terme, même si l'option d'une coexistence LEP-LHC fut finalement abandonnée lors du démontage du LEP pour l'installation du LHC. Cette logique de réutilisation et d'adaptation des infrastructures existantes renforçait ainsi la cohérence technique, économique et scientifique du projet.

Note au lecteur

Les documents cartographiques reproduits ici sont des **sources historiques**. Leur conception répond aux **usages et conventions de leur époque** et peut, de ce fait, différer des standards cartographiques contemporains en matière de lisibilité, d'orientation, d'échelle ou de codification graphique.

Les notices et légendes associées visent, dans la mesure des informations disponibles, à accompagner leur lecture et à préciser leur fonction et leur contexte de production (communication publique, usage interne, document de travail, etc.).

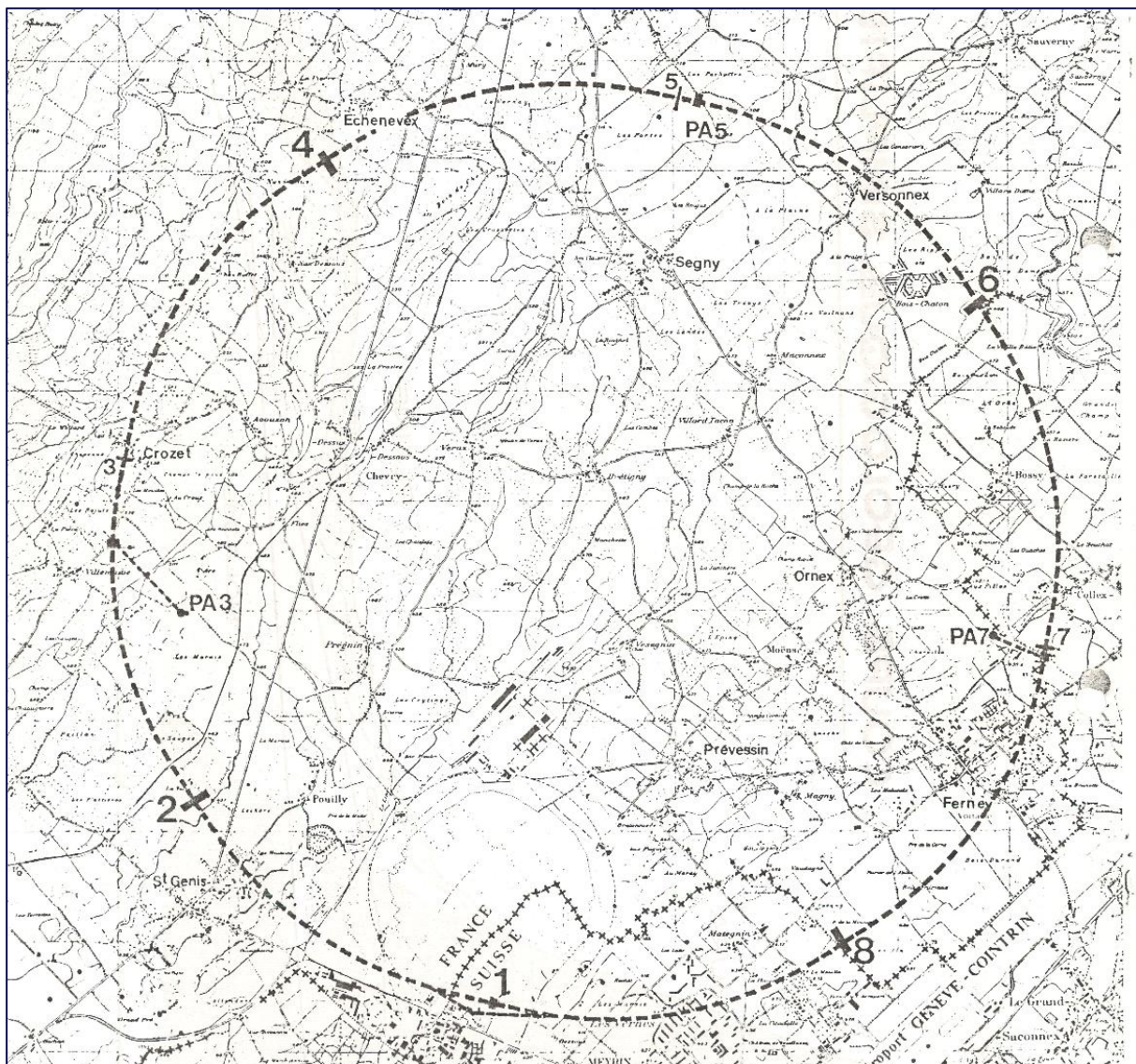


Schéma du projet LEP du CERN au 17 décembre 1981

Il convient en outre de noter que les infrastructures existantes abritent le personnel scientifique et technique indispensable à la réalisation puis au fonctionnement du nouveau projet, ainsi que tout un système de support pour les programmes de recherche.

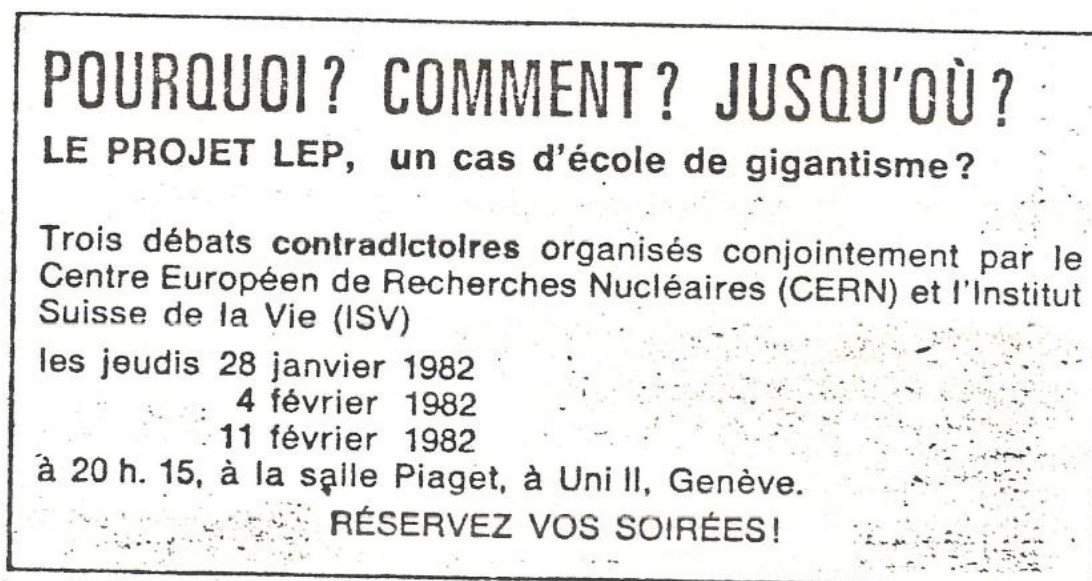
Si le LEP ne s'était pas réalisé au CERN, les laboratoires et installations actuels auraient pu être conduits vers un déclin découlant de leur progressive insuffisance comme instruments de recherche. Le ralentissement des activités du CERN n'aurait pas été sans conséquences sur l'avenir de la région qui l'accueille, sur les plans scientifique, économique et humain.

Ce sont toutes ces raisons qui ont conduit les physiciens européens à arrêter leur choix au site actuel du CERN. Ce choix étant effectué et les dimensions de l'ouvrage fixées dans certaines limites, différentes versions du LEP ont pu alors faire l'objet d'un examen approfondi, particulièrement au regard des conditions liées au sous-sol, mais aussi à partir de critères de physique et de considérations économiques¹.

1.2.3.2 Informer et dialoguer avec le public autour du LEP

Dans les semaines qui suivirent la décision du Conseil du CERN de décembre 1981, et avant la délivrance des autorisations de construire, **plusieurs conférences-débats furent organisées à destination du grand public.** Elles s'inscrivaient dans un effort plus large d'information et de dialogue avec les populations concernées par le projet LEP. Herwig Schopper, directeur du CERN de 1981 à 1988, rappelle ainsi que le CERN organisa au total **173 réunions d'information en territoire français**, auxquelles s'ajoutèrent plusieurs conférences publiques à l'Université de Genève et de nombreux échanges avec les autorités locales, les maires et les représentants de comités régionaux.

Cette démarche répondait à un contexte parfois sensible. Le projet suscitait de nombreuses questions sur son implantation souterraine, les effets possibles du chantier, les risques géologiques, les nuisances pour les communes concernées, mais aussi sur des sujets plus délicats comme les rayonnements, la production éventuelle de gaz nocifs ou les conséquences environnementales. Le CERN chercha alors à ouvrir un dialogue avec les populations voisines afin de clarifier les caractéristiques du projet, d'expliquer les mesures prévues pour limiter les impacts et de répondre aux inquiétudes exprimées localement.



Article de VIVRE DEMAIN – Décembre 1981

¹ Etude d'impact du projet LEP sur l'environnement, 1982, p. 147

L'une de ces conférences-débats eut lieu le 4 février 1982 à l'Université de Genève. Elle permit à des représentants du CERN de présenter le projet LEP et de répondre aux questions du public. L'article reproduit ci-dessous rend compte des principaux échanges qui s'y déroulèrent et permet de mieux saisir les préoccupations exprimées à l'époque, ainsi que les réponses apportées par l'Organisation.

La réalisation du LEP nécessita également un important travail administratif et institutionnel. Comme le tunnel devait traverser des territoires français et suisses, les procédures furent conduites en étroite relation avec les autorités des deux États hôtes. En France, elles comprirent notamment une étude d'impact, une enquête publique, puis une déclaration d'utilité publique. Le dossier de déclaration d'utilité publique fut déposé en 1982 ; après l'enquête publique, les conclusions de la commission d'enquête et l'avis du Conseil d'État, le décret de déclaration d'utilité publique fut publié au Journal officiel le 20 mai 1983. En Suisse, le projet fut examiné dans le cadre des procédures cantonales applicables aux ouvrages situés sur le territoire genevois.

Ces procédures portaient sur les conditions de construction, l'occupation temporaire ou permanente de certains terrains, les accès de chantier, les effets possibles sur l'environnement, les mesures de réduction des nuisances, ainsi que les questions de radioprotection et de sécurité. Le tracé souterrain en France concernait près de 24 km, à des profondeurs variant d'environ 50 à 170 m, et traversait plusieurs centaines de parcelles. La maîtrise foncière et les indemnisations donnèrent lieu à des accords amiables dans de nombreux cas, mais aussi à des procédures plus formelles lorsque cela était nécessaire.

Ainsi, avant même le début des travaux, le LEP fit l'objet d'un processus d'examen associant expertise technique, procédures administratives et dialogue avec les territoires concernés. Les échanges furent nourris, et le CERN publia à l'époque plusieurs notes d'information afin de répondre aux critiques et aux inquiétudes exprimées lors de ces différents temps de débat. Ces documents rappelaient notamment les résultats des études géologiques, hydrogéologiques et radiologiques, ainsi que le cadre réglementaire dans lequel le projet devait être autorisé en France et en Suisse.

Références

- ↘ **Lévy-Mandel, R.**, « Les procédures administratives d'approbation du projet », Travaux, juin 1988, p. 13-16 environ.
- ↘ **Schopper, Herwig**, LEP – The Lord of the Collider Rings at CERN 1980-2000: The Making, Operation and Legacy of the World's Largest Scientific Instrument, Berlin/Heidelberg, Springer, 2009.
- ↘ **CERN**, « Non, le LEP n'est pas effroyable ! », note d'information, 21 janvier 1982.

Pays Gessien

VENDREDI
12 FEVRIER 1982

LE NUMÉRO : 2 FRANCS

Grand débat sur le L.E.P. à Genève

- ❖ Conclusions rassurantes pour l'environnement
- ❖ Perspectives économiques encore floues

Le grand débat organisé à Genève par le C.E.R.N. et l'Institut de la Vie, autour de la construction du LEP, a rassemblé une foule considérable, à l'Auditorium Piaget. Les Gessiens étaient venus en force. Il est vrai que l'avenir de leur région est largement engagé et que le projet a déclenché les plus vives polémiques.

Le débat a dépassé de très loin le niveau des campagnes plus ou moins dérangeantes que nous avons vécues et il a permis de se faire une opinion plus sérieuse des problèmes qui se posent.

Nous ne retiendrons ici que l'essentiel, les dangers qui ont particulièrement sensibilisé nos lecteurs et les perspectives économiques et sociales qu'ouvre le projet.

LES GEOLOGUES SONT D'ACCORD : RISQUES PRATIQUEMENT EXCLUS

Pour préparer la réalisation de son projet, le C.E.R.N. a fait procéder à une étude géologique et hydrologique de la région extrêmement complexe. Toutes les techniques modernes ont été utilisées. Les résultats de ces travaux ont été présentés d'une manière parfaitement claire par le Professeur Albéric Montjoie.

Sur sa plus grande longueur, 24 km, l'anneau traversera la molasse quasi imperméable que l'on connaît bien depuis les travaux de percement du SPS. Il sera incliné pour ne pas entamer la moraine à l'est de son parcours. Dans la molasse, le forage sera sans histoires.

L'anneau pénétrera dans les calcaires du Jura sur une longueur de 3 km. Le déplacement du tunnel, qui a été décidé récemment, réduit considérablement les risques d'incidents dont le premier tracé était porteur. Le Professeur Mathey, géologue de Neuchâtel, cité par les adversaires du LEP, a dit au passage : « Ce premier tracé était celui des physiciens et de leurs fantasmes. Heureusement que les géologues sont intervenus ». Sous le Jura, le tunnelier peut rencontrer des failles mais on sait d'une part prévenir les incidents, d'autre part y remédier rapidement.

On retiendra la conclusion du Professeur Mathey, dont on a apprécié la parfaite honnêteté intellectuelle étant donné qu'il est, pour des raisons de choix scientifique, opposé à la construction du LEP : « Ce n'est pas la géologie qui fera obstacle à la construction du LEP. Les difficultés qu'on va rencontrer ont toujours été surmontées ». Cependant, tout le monde est tombé d'accord pour qu'un état des lieux des maisons situées sur le tracé soit dressé avant les travaux.

LES SOURCES : RISQUES TRES, TRES FAIBLES

Une étude complète des ressources hydrologiques de notre région a été menée à bien et se poursuivra durant l'exécution des travaux. On retiendra que le bassin du Jura, alimenté surtout à la fonte des neiges, n'influence plus le bassin de plaine en été. Or, les communes gessiennes puisent la quasi-totalité de leur eau dans ce bassin de plaine. L'Allondon et le Journaux ont un débit très faible (15 litres/s.). Seule l'Allemagne consomme 142 litres/s.).

Aucune menace ne pèse sur ces nappes qui se trouvent dans la moraine. L'anneau passera nettement au-dessous, dans la molasse imperméable. Au moment du forage vertical, on pourra utiliser la technique de puits moulés, déjà mise en œuvre à Crozet, et qui interdit toute infiltration dans l'ouvrage.

En cours de creusement sous le Jura, on pourra rencontrer des failles pleines d'eau, mais le Professeur Mathey a dit lui-même : « Le risque de déplacement des sources (N.D.L.R. : du bassin jurassien) est d'une faible probabilité ; celui d'une atteinte à la nappe phréatique de probabilité très, très faible ».

Le Professeur Montjoie a souligné pour sa part : « L'impact sera nul grâce aux techniques qui seront mises en œuvre ». Notons que les réserves en eau ont été évaluées à

5 millions de m³ et que la neige et les précipitations hivernales fournissent 25 millions de m³ par an.

LES RADIATIONS : DANGER NEGLIGEABLE

Il n'y a pas eu de débat contradictoire au sujet des radiations. Nul physicien n'est venu contester les chiffres donnés par le C.E.R.N. Ceux-ci correspondent aux conclusions du Professeur Gomez que nous avons récemment publiées. Les radiations dues au LEP seront inférieures, en un point donné, à celles qu'émet un poste de télévision. Quant à la production d'oxyde d'azote, elle équivaudra à celle de deux voitures tournant à 60 km/h.

M. Bertrand Girod de l'Ain, qui a joué avec un certain humour le rôle de Candide, a essayé de mettre le C.E.R.N. en contradiction avec lui-même : « Vous dites que les radiations dues aux électrons sont beaucoup plus faibles que celles qui sont dues aux protons et que, pour cette raison, le LEP n'est pas dangereux. Mais des physiciens parlent déjà de transformer le LEP, dans 20 ou 30 ans, en anneau de collisions protons-antiprotons. Ou'en sera-t-il alors ? ». Le Professeur Brianti a répondu qu'il ne s'agissait là que du rêve lointain de quelques physiciens. De plus, a-t-il ajouté, si cela devait être envisagé, on ne pourrait provoquer la collision que d'un nombre minime de protons et d'antiprotons. Il faut en effet produire un million de protons pour que naisse un seul antiproton ». Cette transformation future, qui n'est pas officiellement envisagée et qui nécessiterait une nouvelle procédure, ne présenterait donc pas de danger réel.

QUEL IMPACT ECONOMIQUE OU SOCIAL ?

Braqué sur les dangers de toutes sortes dont on nous menaçait, on a peut-être regardé comme secondaires les aspects sociaux et économiques du problème. Du débat lancé par M. Rufer, et animé avec fougue par Mme Lucile Hanouze, on ne retiendra que les aspects essentiels pour oublier une personnalisation des questions qui étaient hors du propos.

Jusqu'à ce jour, la présence du C.E.R.N. a été beaucoup plus bénéfique pour Genève que pour le Pays de Gex. En sera-t-il de même lors de la construction et du fonctionnement du LEP ? Les élus gessiens ne l'entendent pas ainsi et le projet de zone d'activités de St-Genis est lié directement au LEP. La zone accueillera les entreprises qui viendront travailler pour le C.E.R.N. Mais il faudra bien un rôle de catalyseur et induire, dans le Pays de Gex, d'autres activités industrielles.

Les effectifs du C.E.R.N. resteront stables si le LEP est construit. Ils régresseront dans le cas contraire. La construction amènera dans notre région plus de 1.000 personnes qui s'ajouteront aux 680 qui travaillent actuellement dans les entreprises.

Ce maximum de 1.800 atteint en 1985 et 1986 décroîtra progressivement sur deux ans. Interpellé par Mme Hanouze, le représentant du C.E.R.N. a reconnu que des erreurs avaient été commises à la fermeture du chantier SPS et qu'elles ne devraient pas se reproduire.

Mme Hanouze pense qu'un budget constant, au moment de la construction du LEP, amènera des licenciements, la masse salariale étant amputée au profit des investissements. Il n'y aura pas de transferts de ce genre à moins M. Brianti. Quant aux droits dus travailleurs, souvent balayés selon la C.F.D.T., ils seront garantis, dit le C.E.R.N., par les lois en vigueur dans les pays hôtes.

xxx

Le Professeur Tschopp, qui avait la lourde charge de mener les débats, a proposé qu'un comité de coordination soit créé pour étudier tous les problèmes qui se posent. C'est une idée à priori intéressante. Reste à savoir qui pourrait y siéger et quels seraient les pouvoirs d'un organisme plus ou moins informel. Mais il est vrai que tout le monde est concerné : élus, agriculteurs, syndicats ouvriers, écologistes, propriétaires. Vaste problème...

Roger ANSELME.



PRESSE

European Organization for Nuclear Research
Organisation européenne pour la recherche nucléaire

NOTE D'INFORMATION

PR 05.82
21.01.82
(DG-OF/RLM)

NON, LE LEP N'EST PAS EFFROYABLE!

Un nouvelle déclaration à sensation parue récemment dans la presse a pu jeter le trouble dans les esprits quant aux dangers que présente le projet LEP. La déclaration parle, entres autres, d'un "millefeuille gorgé d'eau sous pression", des "fosses profondes et longues" nécessaires "pour franchir ces failles ou ces nappes d'eau souterraines", des "poubelles chimico-radioactives", de l'"écran de 50 kilomètres d'épaisseur de terrains" pour stopper un faisceau de radiations, autant d'affirmations ahurissantes qui ne reposent sur aucune réalité, aucune étude scientifique ni aucune expertise et qui sont en parfaite contradiction avec les résultats des études entreprises depuis trois ans.

Failles et pressions d'eau

On avance que le sol gessien est un millefeuille gorgé d'eau sous des pressions de 200 kg/cm^2 , comportant des failles de 3500 m de profondeur, contenant des poches de gaz et des cavités énormes.

D'où sortent ces chiffres? A-t-on jamais vu de l'eau sortir du sol à ces pressions? Ce serait un jet d'eau montant jusqu'à la hauteur de la crête du Jura! Quel géologue confirmerait ces allégations? Peut-on savoir quelles sont les justifications qui permettent d'avancer de telles affirmations?

Les échanges publics autour du LEP furent parfois marqués par des inquiétudes fortes concernant la géologie, les nappes souterraines, les risques de rayonnement et les effets environnementaux du projet. Le CERN répondit alors par plusieurs notes d'information, en rappelant notamment que la majeure partie du tracé se situait dans la molasse, que les études géophysiques avaient été menées avec des experts internationaux, et que les résultats devaient être intégrés à l'étude d'impact du LEP.

Ces documents visaient à opposer aux critiques les données techniques disponibles, tout en soulignant que le projet restait soumis aux autorités compétentes françaises et suisses. Face aux accusations de pollution radioactive ou chimique, le CERN fit valoir que les rayonnements attendus du LEP seraient négligeables au regard du rayonnement ambiant et que l'Organisation était tenue de respecter les normes nationales applicables en France et en Suisse. Ces échanges montrent que, dès le projet LEP, les grands instruments scientifiques ne relevaient pas seulement d'un débat entre physiciens : ils supposaient aussi un travail d'explication publique, de documentation technique et de réponse aux inquiétudes locales.

1.2.3.3 Variantes géographiques étudiées sur le site du CERN

L'implantation du LEP à proximité du CERN fut soumise à un ensemble de contraintes scientifiques, techniques, géologiques, économiques et territoriales. Il ne s'agissait pas seulement de choisir un tracé possible pour un tunnel, mais de définir une configuration capable de répondre simultanément aux exigences de stabilité de la machine, aux caractéristiques du sous-sol, à la maîtrise des coûts, à l'intégration avec les accélérateurs existants et à la limitation des effets sur l'environnement de surface.

La stabilité géologique constituait une contrainte essentielle. Un collisionneur de cette dimension exigeait une géométrie très précise et devait être installé dans des terrains suffisamment homogènes et stables pour garantir le bon fonctionnement des faisceaux*. Le substratum molassique de la région répondait particulièrement bien à cette exigence, comme l'avaient déjà montré les réalisations antérieures du CERN, notamment le PS et le SPS. À l'inverse, un passage trop profond sous le Jura aurait accru les difficultés techniques et les risques liés au creusement. Les études de tracé cherchèrent donc à maintenir autant que possible l'ouvrage dans la molasse, tout en limitant la longueur des sections situées dans les calcaires jurassiens.

Les contraintes économiques et de génie civil imposaient également de réduire la profondeur des puits d'accès. En raison de la pente ouest-est du toit de la molasse, la solution retenue consista à placer l'anneau du LEP dans un plan légèrement incliné, avec une pente d'environ 1,4 %. Cette configuration permettait de limiter la profondeur des ouvrages souterrains, tout en maintenant une large indépendance entre le tunnel et l'environnement de surface, aussi bien pendant les travaux qu'en exploitation. **Le tunnel définitif du LEP, d'une circonférence d'environ 26,7 km, fut finalement situé à une profondeur variable selon les zones,** avec des cavernes expérimentales parfois à plus de 100 mètres sous terre et un passage plus délicat dans les contreforts du Jura.

Le choix du tracé devait aussi tenir compte des nuisances potentielles en surface. Il était souhaitable d'éloigner autant que possible les points d'accès, les puits et les zones de chantier des agglomérations les plus denses, afin de limiter les effets visuels, sonores et logistiques des travaux. Le passage du tunnel sous plusieurs communes imposait en outre des études environnementales et des échanges avec les autorités locales et les populations concernées.

La proximité du SPS jouait un rôle dans les réflexions à plus long terme autour du LEP. Certaines études envisageaient en effet une utilisation conjointe des deux installations pour de futures collisions électron*-proton*. Cette perspective fut prise en compte dans plusieurs scénarios de conception, notamment dans les réflexions portant sur la géométrie relative des deux machines et sur les possibilités d'exploitation future du complexe SPS-LEP. Il convient toutefois de souligner que cette option demeura essentiellement exploratoire et ne constitua jamais le programme scientifique central du LEP.

Un autre critère décisif tenait à l'intégration du LEP dans le complexe d'accélérateurs existant du CERN. La possibilité d'utiliser le PS et le SPS comme éléments de la chaîne d'injection fut un argument majeur en faveur du site du CERN. Les électrons* et positons* produits pour le LEP étaient d'abord préparés dans une chaîne dédiée, comprenant notamment le linac d'injection et l'accumulateur électron*-positon*, avant d'être accélérés dans le PS puis dans le SPS, dernier maillon avant leur injection dans l'anneau principal. Cette solution permettait de réutiliser des infrastructures et des compétences déjà disponibles, plutôt que de construire ailleurs un complexe entièrement nouveau. L'intégration du LEP dans le complexe existant du CERN constitua un argument décisif. **La proposition, formulée en 1980, d'utiliser les synchrotrons déjà en service comme injecteurs réduisit fortement l'intérêt d'une implantation ailleurs en Europe,** puisqu'elle permettait de s'appuyer sur des infrastructures, des compétences et des réseaux techniques déjà disponibles. **Un autre enjeu majeur était de rendre la construction du LEP compatible avec la poursuite des autres programmes scientifiques du CERN.** Cette condition était essentielle pour préserver l'équilibre du programme de l'Organisation et obtenir l'adhésion durable des États membres.

Dans ce contexte, la définition du LEP évolua par étapes successives entre 1976 et 1981. Les premières études envisageaient une machine beaucoup plus ambitieuse : le projet dit « LEP 100 », étudié en 1976, visait une énergie de faisceau* de 100 GeV* dans un anneau d'environ 50 km de circonférence. Son coût fut cependant jugé trop élevé au regard des capacités financières du CERN et de ses États membres.

- > Une proposition plus concrète fut ensuite formulée dans le *Blue Book*² (« Livre bleu ») de 1978, avec **une machine d'environ 22 km et une énergie de faisceau* de l'ordre de 70 GeV***. Cette solution suscita toutefois des réserves au sein du Comité de politique scientifique du CERN, notamment en raison de ses limitations énergétiques et de sa dépendance à de futurs développements supraconducteurs pour atteindre des énergies plus élevées.
- > Le *Pink Book*³ (« Livre rose ») de 1979 proposa alors **un anneau plus ambitieux, d'environ 30,6 km, avec une énergie initiale d'environ 86 GeV* par faisceau* et une possibilité d'évolution vers 130 GeV*** grâce à l'utilisation de cavités radiofréquence* supraconductrices. Cette configuration répondait davantage aux ambitions scientifiques du projet, mais son coût restait très élevé, autour de 1300 millions de francs suisses. Une version révisée du *Pink Book*, présentée en juin 1980, conserva les mêmes grandes caractéristiques tout en ramenant le coût estimé à environ 950 millions de francs suisses, notamment grâce à l'utilisation des accélérateurs existants du CERN comme injecteurs.
- > Ces révisions successives reflétaient à la fois des contraintes budgétaires, l'évolution des solutions technologiques envisagées pour les systèmes radiofréquence* et la volonté de préserver des possibilités d'extension futures.
- > **La solution finalement proposée dans le *Green Book*⁴ (« Livre vert ») de 1981 prévoyait un anneau d'environ 26,7 km, avec une énergie initiale de 50 GeV* par faisceau* et une possibilité d'évolution vers environ 100 GeV*.** Son coût, estimé à environ 910 millions de francs suisses, demeurait considérable, mais rendait le projet plus compatible avec le programme de base du CERN et avec l'objectif d'une décision acceptable pour l'ensemble des États membres.

² CERN-ISR-LEP-78-17, <https://cds.cern.ch/record/101331>

³ CERN-ISR-LEP-79-33 ; ISR-LEP-79-33, <https://cds.cern.ch/record/101333>

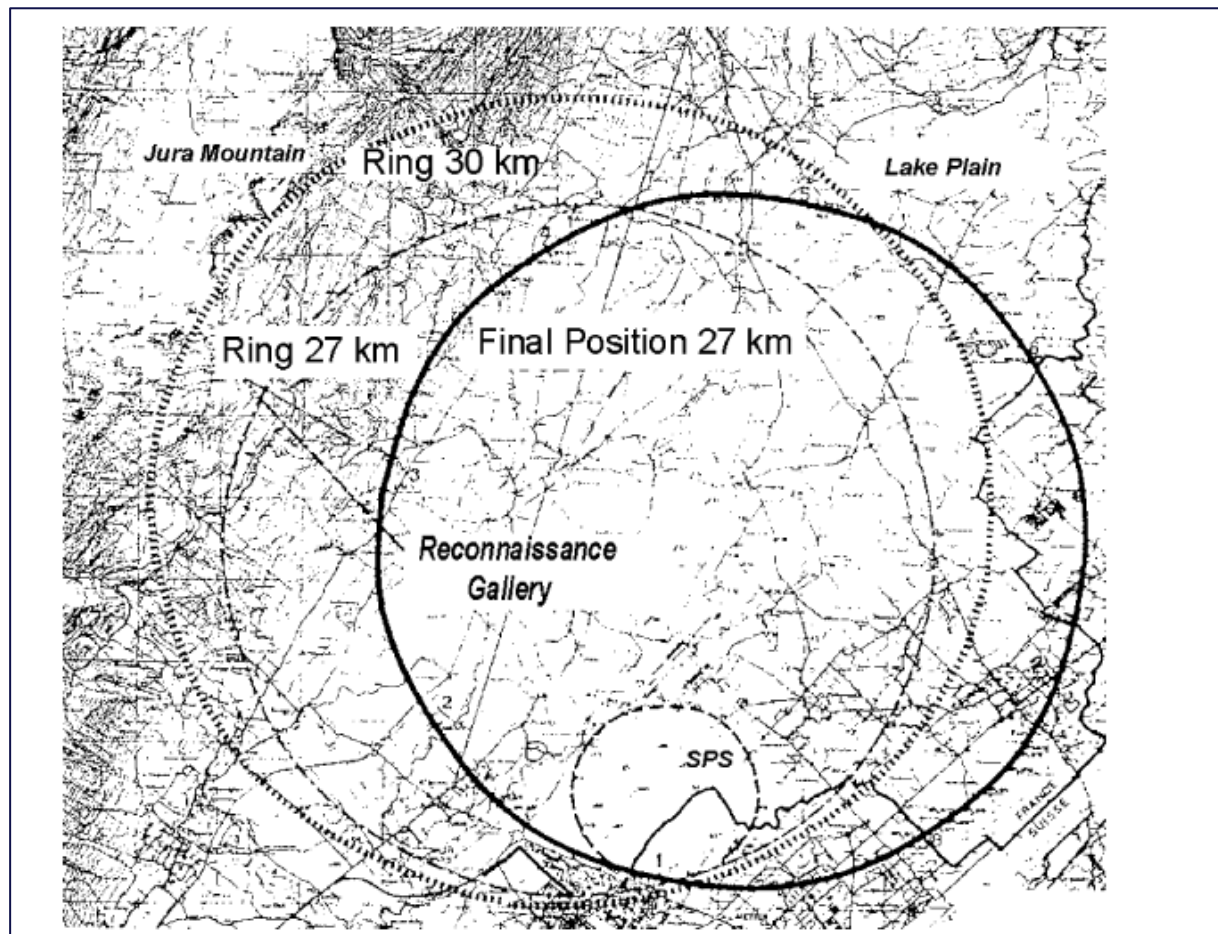
⁴ LEP design report : v.1 The LEP injector chain, Geneva : CERN, 1983, <http://dx.doi.org/10.17181/CERN.0V21.V10K> ; LEP design report , v.2 : The LEP main ring, Geneva : CERN, 1984, <http://dx.doi.org/10.17181/CERN.AXZH.185L> ; LEP design report, v.3 : LEP2 , Geneva : CERN, 1996, <http://dx.doi.org/10.17181/CERN.HAIW.7L49>

Cette version reposait également sur une conception progressive du LEP : une première phase centrée sur l'étude du boson Z^* , suivie d'une montée en énergie permettant d'atteindre ultérieurement le seuil de production des bosons W^* grâce à l'introduction de cavités radiofréquence* supraconductrices. Cette approche par étapes constituait à la fois un moyen de réduire les risques technologiques et une stratégie destinée à rendre le projet politiquement et financièrement acceptable.

Le choix de la circonférence et du tracé ne fut pas seulement dicté par le coût immédiat. Herwig Schopper, directeur général du CERN au moment de la construction du LEP, rappelle que **la principale difficulté concernait le passage sous le Jura** : plusieurs avis recommandaient de réduire davantage la taille de l'anneau, autour de 23 km, afin d'éviter la montagne et de limiter les risques de creusement. Le choix d'un anneau d'environ 27 km fut néanmoins maintenu, en partie parce qu'il préservait la possibilité d'un futur collisionneur proton*-proton* dans le même tunnel. Cette décision impliquait encore un passage sous le Jura dans un plan incliné et comportait un risque réel de retards et de dépassements liés aux conditions géologiques.

Le tracé final du LEP apparaît ainsi comme le résultat d'un compromis entre plusieurs exigences :

- ↘ disposer d'un anneau suffisamment grand pour atteindre les objectifs de physique et permettre une évolution future ;
- ↘ réduire le coût du projet ;
- ↘ utiliser les accélérateurs existants comme injecteurs ;
- ↘ éviter autant que possible un passage profond sous le Jura ;
- ↘ rendre le projet acceptable dans le cadre budgétaire et institutionnel du CERN.



Carte des trois emplacements envisagés pour le tunnel LEP : l'emplacement initialement proposé (30 km de circonférence), l'emplacement intermédiaire approuvé par le Conseil (27 km) et l'emplacement final. Source: H. Schopper, LEP - The Lord of the Collider Rings at CERN - 1980 - 2000

Le choix se porta finalement sur la variante située le plus à l'est. Même si elle ne s'écartait pas complètement du piémont du Jura, cette solution fut considérée comme le meilleur compromis entre stabilité géologique, faisabilité du creusement, maîtrise des coûts et intégration environnementale. Elle ne supprimait pas tous les risques techniques – comme le montrèrent ensuite les difficultés rencontrées dans la section jurassienne – mais elle les rendait plus limités et plus maîtrisables que dans les variantes précédentes⁵.

Références

- ↘ **CERN & ECFA.** Proceedings of the ECFA-CERN Workshop on Large Hadron Collider in the LEP Tunnel, Lausanne and Geneva, 21–27 March 1984. CERN Yellow Report CERN-84-10, Vol. 1; ECFA-84-085, Vol. 1. Geneva: CERN, 1984. DOI: 10.5170/CERN-1984-010-V-1.
- ↘ **Taylor, Thomas, et Daniel Treille.** "The Large Electron Positron Collider (LEP): Probing the Standard Model." In *Technology Meets Research*, World Scientific, 2017.
- ↘ **Assmann, Ralph, Mike Lamont, et Steve Myers.** "A Brief History of the LEP Collider." CERN-SL-2002-009 (OP), CERN, 2002.
- ↘ **P. Darriulat, W. Schnell et J.B. Adams, Présentation générale du projet LEP, CERN, Genève, février 1980.**
- ↘ **Schopper, Herwig.** *LEP – The Lord of the Collider Rings at CERN 1980–2000: The Making, Operation and Legacy of the World's Largest Scientific Instrument.* Berlin / Heidelberg: Springer, 2009. DOI: 10.1007/978-3-540-89301-1.
- ↘ **Myers, Stephen.** "FCC: Building on the Shoulders of Giants." *European Physical Journal Plus*, vol. 136, article 1076, 2021.
- ↘ **CERN-ISR-LEP-79-33 ; ISR-LEP-79-33**, <https://cds.cern.ch/record/101333>
- ↘ **Design study of the Large Hadron Collider (LHC) : a multiparticle collider in the LEP tunnel, The LHC Study Group, CERN-91-03, Geneva : CERN, 1991**, <http://dx.doi.org/10.5170/CERN-1991-003>.
- ↘ **CERN-ISR-LEP-78-17**, <https://cds.cern.ch/record/101331>
- ↘ **LEP design report: v.1 The LEP injector chain**, Geneva: CERN, 1983, <http://dx.doi.org/10.17181/CERN.OV21.V10K>
- ↘ **LEP design report, v.2: The LEP main ring**, Geneva: CERN, 1984, <http://dx.doi.org/10.17181/CERN.AXZH.185L>
- ↘ **LEP design report, v.3: LEP2**, Geneva: CERN, 1996, <http://dx.doi.org/10.17181/CERN.HAIW.7L49>
- ↘ **LHC Working Group, reported by G. Brianti, "The Large Hadron Collider (LHC) in the LEP Tunnel", CERN, 1990, pp. 40–53.**

⁵ Voir notamment *Courrier CERN*, « Le LEP sous la loupe », décembre 1986 ; R. Assmann, M. Lamont et S. Myers, "A Brief History of the LEP Collider," CERN-SL-2002-009, 2002 ; H. Schopper, "It is the spirit that counts," CERN Indico presentation ; S. Myers, "The greatest lepton collider," *CERN Courier*, 2019.

Les avantages du tracé finalement retenu étaient les suivants :

Le tracé finalement retenu permettait de limiter à environ 3 km la longueur du tunnel à creuser dans les calcaires du piémont jurassien, contre près de 8 km dans les premières configurations envisagées, réduisant ainsi la probabilité de rencontrer des accidents géologiques.

Les principales fractures tectoniques identifiées par les études géologiques — notamment les failles de la Tremblaine du Reculet, de la Calame et du Crêt de la Neige — étaient évitées.

La couverture maximale dans le piémont du Jura ne dépassait pas 150 m sur environ 1 km du tracé, alors que les scénarios initiaux prévoyaient des profondeurs pouvant atteindre 600 m sur plusieurs kilomètres. Cette réduction présentait plusieurs avantages :

- ↘ **limitation des pressions hydrostatiques** et donc diminution des contraintes exercées sur les revêtements de l'ouvrage ;
- ↘ **suppression de la nécessité d'une galerie pilote**, qui aurait été indispensable sur les 8 km de franchissement du Jura afin d'assurer le drainage, la sécurité et les possibilités d'intervention en cas d'accidents géologiques ;
- ↘ **possibilité d'intervention directe depuis la surface en cas d'incident** majeur sur le tracé retenu ;
- ↘ **possibilité d'aménager des zones expérimentales** bénéficiant de **facilités d'accès adaptées** au niveau des différents points d'interaction.

Les données recueillies lors des études et prospections géologiques ont joué un rôle déterminant dans ces optimisations du projet. Le premier changement, la réduction de la circonférence de l'anneau, fut décidé après que les études géologiques menées par le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) avaient mis en évidence le risque de rencontrer des terrains triasiques (anhydrite et gypse) au cœur du massif.

Le second changement, le déplacement du tracé de l'anneau, intervint après que des sondages profonds eurent révélé que l'anneau risquait de traverser des accidents tectoniques sous d'importantes couvertures rocheuses, compliquant la conception d'un ouvrage non drainé et risquant d'entraîner des aléas d'exécution aux conséquences difficilement prévisibles sur la planification du projet.

Le maintien d'un anneau de grande circonférence répondait également à une logique de long terme : préserver la possibilité d'installer ultérieurement un collisionneur proton*-proton* de plus haute énergie dans le même tunnel.

Des considérations environnementales jouèrent également un rôle, en particulier au point 4 (voir la carte figurant au 1.1), où il fut nécessaire d'éviter la zone de protection des sources situées sur la commune d'Échenevex et alimentant le réseau de la commune de Chevry⁶.

En contrepartie, les quelques inconvénients du tracé choisi étaient :

- ↘ Une plus grande longueur de déviation, représentant 1/3 du périmètre du SPS au lieu de 1/6 précédemment ;
- ↘ Une augmentation de l'inclinaison du plan de la machine, rendant plus difficile l'obtention de la précision requise pour l'alignement de ses éléments, introduisant une pression hydrostatique supplémentaire dans les circuits de refroidissement due à une différence de niveaux d'environ 150 m, et posant quelques problèmes de sécurité en cas de fuite d'eau ;
- ↘ La position de certains puits impliquant des contraintes telles que des distances plus importantes

⁶ Etude d'impact du projet LEP sur l'environnement, 1982, p. 154

pour les transports routiers et les réseaux de distribution.

Il apparaissait, à l'examen, que les avantages du tracé retenu l'emportaient nettement sur les inconvénients mentionnés ci-dessus. Même si les deux solutions paraissaient toutes deux réalisables, le tracé dans le Jura profond comportait de grands risques, tant pour le budget du projet que pour sa durée d'exécution. Cependant, la solution adoptée demeurait compatible avec une planification réaliste sur les plans technique et financier.

La position exacte du tracé, dans la limite des tolérances indiquées plus haut, fut fixée avec le souci de placer le LEP sous la couverture la plus faible possible dans le piémont du Jura. Le déplacement progressif du tracé vers l'est s'arrêta toutefois devant l'abaissement très rapide du toit de la molasse sous le sillon de Montfleury. L'inclinaison de 1,4 % du plan du LEP était déjà considérée comme une valeur limite pour garantir la précision d'alignement requise pour les éléments de la machine. Elle posait également des contraintes pour l'emploi de moyens standards de transport des déblais lors du creusement du tunnel.

Dans les premières études, une machine de plus grande circonférence avait été envisagée. Avec un système radiofréquence classique, la circonférence optimale aurait été de l'ordre de 50 km. Cette solution, parfois qualifiée de « géante », fut cependant abandonnée en raison des difficultés techniques, géométriques et financières qu'elle impliquait : longueur beaucoup plus importante du tunnel, contraintes accrues de précision d'alignement, multiplication des ouvrages d'accès, risques géologiques plus élevés, complexité accrue du chantier et coût incompatible avec le cadre budgétaire envisagé. Le choix final d'un anneau d'environ 27 km résulta donc d'un compromis entre les objectifs de physique, la faisabilité du creusement, les contraintes d'implantation, la maîtrise des coûts et la possibilité de préserver une évolution future vers un collisionneur de protons dans le même tunnel.

1.2.4 Les alternatives écartées

1.2.4.1 Le LSR : anneau de collision protons-protons

À la fin des années 1970, le LSR (« Large Storage Ring ») faisait partie des options étudiées au CERN pour la prochaine grande infrastructure européenne de physique des particules. **Conçu comme un grand collisionneur proton*-proton*, il prolongeait l'expérience acquise avec les Intersecting Storage Rings (ISR), premier collisionneur hadronique* au monde.** L'idée était d'examiner la faisabilité d'une machine de très haute énergie installée dans un tunnel de grande circonférence, de l'ordre de 20 à 30 kilomètres, préfigurant par certains aspects l'échelle du futur LEP. Cette option reposait alors principalement sur l'utilisation d'aimants conventionnels : les aimants supraconducteurs, qui deviendront plus tard déterminants pour le LHC, n'étaient pas encore suffisamment maîtrisés à cette échelle. Pour atteindre les énergies visées, il fallait donc envisager un anneau de très grande dimension, avec des implications importantes en matière de génie civil, de coût et d'implantation.

Le déclin progressif du LSR au profit du LEP s'est joué sur une combinaison de facteurs scientifiques et technologiques :

- ▾ D'un côté, la communauté des physiciens manifestait un **besoin urgent de « physique propre »** (qui désigne une physique expérimentale où les collisions produisent des événements simples, précis et faciles à interpréter) pour étudier les bosons* médiateurs de l'interaction faible*, une tâche pour laquelle les collisions d'électrons* sont bien mieux adaptées que le "bruit" généré par les collisions de protons*.
- ▾ De l'autre, **le choix de transformer le SPS en collisionneur proton-antiproton* a permis d'atteindre des énergies significatives beaucoup plus vite et à moindre coût.** Cette étape intermédiaire réduisit la priorité du projet LSR et permit au CERN de mettre temporairement de côté l'option d'un grand collisionneur de protons* afin de se concentrer sur la réalisation du tunnel du LEP, tout en conservant la perspective qu'il puisse un jour accueillir un collisionneur hadronique utilisant des aimants

supraconducteurs plus puissants.

Ainsi, **bien que le LSR ait été officiellement abandonné en 1981, il préfigurait plusieurs des principes qui seront repris ultérieurement pour le LHC**, lequel en constituera l'aboutissement technologique à grande échelle⁷.

1.2.4.2 Accélérateurs linéaires

Plusieurs concepts de collisionneurs linéaires électron-positron furent étudiés aux États-Unis, notamment autour du SLAC (« Stanford Linear Accelerator Center »), ainsi qu'au CERN et en URSS. Toutefois, compte tenu des technologies disponibles à la fin des années 1970, **les experts considéraient qu'un collisionneur circulaire constituait, pour les énergies visées par le LEP, la solution la plus réaliste, la moins risquée technologiquement et la plus économique.**

Cette préférence s'expliquait notamment par le fait que les collisionneurs circulaires reposaient sur des technologies déjà largement maîtrisées et permettaient de stocker les faisceaux* pendant de longues périodes, multipliant ainsi le nombre de collisions disponibles pour les expériences. À ces énergies, les collisionneurs linéaires nécessitaient encore d'importants développements technologiques pour atteindre des performances comparables.

Le choix du LEP reflétait ainsi un compromis caractéristique de la fin des années 1970 : privilégier une machine technologiquement réalisable à court terme, capable d'ouvrir rapidement une nouvelle phase de la physique électrofaible, tout en préservant la possibilité d'évolutions futures vers des collisionneurs hadroniques de plus haute énergie.

Références

- ↘ Keil E. (1974) *Perspectives of colliding beams*, CERN ISR-TH/74-22.
- ↘ Richter B. (1976) *Very high-energy electron-positron colliding beams for the study of the weak interactions*, CERN/IST-LTD/76-9.
- ↘ CHEEP Study Group (1978) *CHEEP: an e-p facility in the SPS*, CERN 78-02.
- ↘ Ellis J, Gaillard MK (1976) *Physics with very high energy e+e- colliding beams*, CERN Yellow Report 76-18.
- ↘ Dalitz R, Telegdi V (1979) *Draft paper on the justification for LEP*, CERN/SPC/435.

⁷ CERN Document server, 20th Plenary Meeting, 1976

1.3 GENESE ET CONCEPTION DU LHC

1.3.1 Le contexte international : le projet avorté de Supercollisionneur supraconducteur (SSC) aux Etats-Unis

Le LHC permet d'accélérer et mettre en collision des protons (qui appartiennent à la famille des hadrons*), en lieu et place des électrons* ou des positons* pour le LEP. L'option consistant à compléter ou à remplacer ultérieurement le LEP par un grand collisionneur de hadrons* était présente à l'esprit des physiciens des particules européens depuis le milieu des années 1970.

Au niveau international, le projet de LHC avait pour principal concurrent le projet américain de **Supercollisionneur supraconducteur (SSC, pour « Superconducting Super Collider »), abandonné par le Congrès américain en octobre 1993** dans un contexte marqué par la fin de la guerre froide et l'évolution des priorités budgétaires des États-Unis.

Parmi les facteurs ayant conduit à cet abandon figuraient l'augmentation substantielle des coûts, une hésitation sur le statut national ou international du projet, ainsi que le choix d'un site entièrement nouveau nécessitant la création d'infrastructures scientifiques et techniques considérables. **Cette annulation du SSC a rendu d'autant plus crédible la réalisation du LHC par le CERN**⁸. En janvier 1994, le Comité international pour les accélérateurs futurs (ICFA pour « International Committee for Future Accelerators » en anglais) a ainsi déclaré que « *le LHC offre désormais la seule opportunité réaliste d'étudier des collisions hadroniques* à plusieurs TeV*. [...] Le LHC restera une installation unique dans un avenir prévisible et l'ICFA estime qu'il constitue à présent l'étape suivante appropriée pour la physique des particules à la frontière des hautes énergies* », ce qui a aidé à obtenir un soutien en faveur du LHC de la communauté scientifique internationale en physique des particules⁹.

Néanmoins, selon Carlo Rubbia, directeur général du CERN de 1989 à 1993, « *la presse avait exagéré à l'excès l'aspect compétitif entre le LHC et le SSC. C'était une vision très superficielle, tandis qu'un examen plus attentif de la portée des deux machines révélait une forte complémentarité. Il y avait de la place pour une machine dotée de l'énergie la plus élevée et pour une autre visant la luminosité* la plus élevée et qui, de plus, offrirait d'autres voies à explorer (collisions ep [électrons*-positons*], collisions d'ions* lourds) une fois que le SSC aurait commencé à fonctionner. En outre, l'existence des deux machines permettrait une vérification croisée très utile des expériences* »¹⁰.

En 1997, les États-Unis ont finalement rallié le projet LHC¹¹.

Références

- ↘ Schopper H (2001) LEP, LHC and European perspectives on the SSC. Invited talk at the session 'Perspectives on major high energy physics projects', APS Meeting, 29 April 2001, Washington
- ↘ Ellis J, Gaillard MK (1976) Physics with very high energy e+ e- colliding beams. CERN yellow report 76-18. CERN, Geneva
- ↘ Hermann A, Krige J, Mersits U, Pestre D (1987) History of CERN. North Holland, Amsterdam

⁸ Llewellyn Smith C. 2015 Genesis of the Large Hadron Collider.Phil. Trans. R. Soc. A 373: 20140037. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2014.0037>

⁹ Llewellyn Smith C. 2015 Genesis of the Large Hadron Collider.Phil. Trans. R. Soc. A 373: 20140037. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2014.0037>

¹⁰ Llewellyn Smith C. 2015 Genesis of the Large Hadron Collider.Phil. Trans. R. Soc. A 373: 20140037. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2014.0037>

¹¹ CERN70 : La grande aventure du LHC | CERN

1.3.2 La conception du LHC au CERN

L'idée d'utiliser ultérieurement le tunnel du LEP pour accueillir un grand collisionneur de protons* ne naquit pas après la mise en service du LEP, mais **accompagna très tôt les réflexions sur la conception même de l'anneau**. Dès 1977, John Adams, alors directeur élu du CERN, proposa que le tunnel du futur LEP soit dimensionné de manière à pouvoir recevoir, à terme, un anneau d'aimants supraconducteurs destiné à accélérer des protons à des énergies de plusieurs TeV*¹². Cette perspective était déjà largement connue au moment de l'étude d'été du LEP organisée aux Houches et au CERN en septembre 1978¹³. Elle fut ensuite examinée plus systématiquement lors du premier atelier consacré au LHC, organisé à Lausanne en mars 1984¹⁴, suivi d'une présentation ouverte au CERN. Le maintien d'une grande circonférence et de dimensions suffisantes pour le tunnel ne répondait donc pas uniquement aux besoins immédiats du programme électron*-positon* : il s'inscrivait aussi dans **une stratégie de long terme visant à préserver la possibilité d'un futur collisionneur hadronique* dans la même infrastructure**.

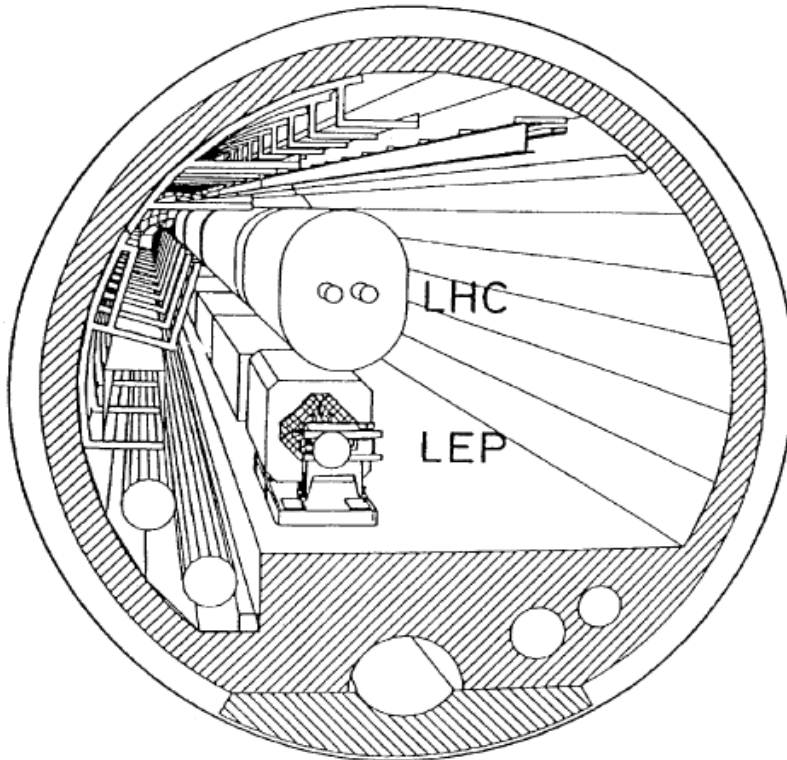
Cette réflexion s'inscrivait dans **une tradition propre au CERN : préparer les projets futurs alors même que les précédents n'étaient pas encore achevés**, afin de permettre une discussion approfondie avec la communauté scientifique et d'anticiper les contraintes techniques, calendaires et budgétaires. La question devint plus concrète au milieu des années 1980. En 1985, le Conseil du CERN créa **un Comité de planification à long terme**, présidé par Carlo Rubbia, chargé d'étudier l'avenir du laboratoire après le LEP. Son rapport, présenté en juin 1987, recommanda qu'un collisionneur proton*-proton* installé dans le tunnel du LEP constitue le premier choix pour la prochaine grande installation du CERN. Cette recommandation reposait notamment sur l'hypothèse qu'un programme de développement permettrait de disposer, dans un délai d'environ une décennie, d'aimants supraconducteurs à haut champ adaptés à une telle machine.

En juin 1990, le Comité des directives scientifiques du CERN entérina la proposition et recommanda au Conseil du CERN de donner un premier signe de soutien au projet LHC. En décembre de la même année, le Comité européen pour les futurs accélérateurs (ECFA) alla plus loin en recommandant que le projet soit approuvé dès que possible.

¹² C. Llewellyn Smith, "Genesis of the Large Hadron Collider", Philosophical Transactions of the Royal Society A 373, 2015

¹³ CERN, Proceedings of the LEP Summer Study, Les Houches and CERN, 10-22 September 1978, CERN Yellow Report CERN-79-01, Geneva, 1979.

¹⁴ CERN/ECFA, Large Hadron Collider in the LEP Tunnel: Proceedings of the ECFA-CERN Workshop, Lausanne and Geneva, 21-27 March 1984, CERN Yellow Report CERN-84-10, Geneva, 1984.



LARGE HADRON COLLIDER IN THE LEP TUNNEL

Le LHC dans le tunnel du LEP, tel que proposé en 1984 lors de la réunion ECFA de Lausanne

Un rapport technique détaillé sur la machine proposée fut publié au printemps 1991. Il reçut un accueil favorable du Comité d'évaluation du LHC, composé de 15 experts d'Europe, des Etats-Unis et du Japon, qui présenta son rapport en juin 1991. Six mois plus tard, le Conseil du CERN, à sa session de décembre 1991, prenait acte que « *le LHC est la machine qui convient pour assurer la poursuite de la mission du CERN et l'avenir de celui-ci* »¹⁵.

La proposition de construction du LHC fut présentée en décembre 1993 au Conseil du CERN, qui l'approuva à l'unanimité le 16 décembre 1994¹⁶. Cette approbation reposait notamment sur une réalisation progressive du projet, sur le maintien d'un budget global maîtrisé et sur l'espoir d'obtenir des contributions significatives de pays non-membres du CERN.

La synthèse exécutive de l'ensemble de documents consacrés au LHC et aux plans à long terme du CERN, présentée au Conseil en décembre 1993, déclare qu' « *il existe des arguments convaincants selon lesquels [...] une physique fondamentale nouvelle apparaîtra dans le domaine d'énergie qui [...] sera ouvert par le LHC. Un collisionneur proton-proton à haute luminosité* est actuellement le seul choix réaliste pour explorer ce domaine d'énergie, et le LHC est désormais la seule possibilité pour un tel collisionneur après l'abandon du SSC. Un collisionneur électron*-positon* à haute énergie serait approprié pour des études détaillées au-delà de tout seuil d'énergie identifié auparavant pour une*

¹⁵ Etude d'impact sur l'environnement du projet LHC, 1997, p. 6-8 ; Llewellyn Smith C. 2015 Genesis of the Large Hadron Collider.Phil. Trans. R. Soc. A 373: 20140037. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2014.0037>

¹⁶ Etude d'impact sur l'environnement du projet LHC, 1997 ; Llewellyn Smith C. 2015 Genesis of the Large Hadron Collider.Phil. Trans. R. Soc. A 373: 20140037. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2014.0037>

nouvelle physique, une fois que la technologie permettant de construire une telle machine sera disponible »¹⁷.

Cette synthèse exécutive précise ensuite que le LHC « *offrira une "portée" inégalée dans la recherche de particules fondamentales et des interactions entre elles, et devrait conduire à des éclairages nouveaux et uniques sur la structure de la matière et la nature de l'Univers. L'étude des collisions proton-proton au LHC donnera l'occasion de découvrir le soi-disant boson de Higgs*, ou des bosons*, et devrait ainsi répondre à la question de savoir pourquoi certaines particules ont une masse tandis que d'autres n'en ont pas. Ces expériences devraient trouver des particules "supersymétriques", si elles existent, révélant ainsi un lien profond entre les particules constituantes et les particules qui médient les forces entre elles* »¹⁸.

Le LHC devait notamment permettre d'explorer le domaine d'énergie du TeV*, considéré comme essentiel pour comprendre les mécanismes responsables de la brisure de symétrie électrofaible et de l'origine de la masse des particules. En effet, l'un des enjeux du LHC était de démontrer expérimentalement l'existence, ou non, du boson de Higgs*, théorisé dans les années 1960.

Références

- ↘ ECFA-CERN Workshop, Lausanne and Geneva, 'Large Hadron Collider in the LEP tunnel', 21 to 27 March 1984, ECFA 84/85, CERN 84-102
- ↘ CERN, Report of the Long Range Planning Committee, 27 August 1987. CERN/1658. CERN, Geneva.
- ↘ Llewellyn Smith C., 2015, Genesis of the Large Hadron Collider. Phil. Trans. R. Soc. A 373: 20140037. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2014.0037>

¹⁷ Llewellyn Smith C. 2015 Genesis of the Large Hadron Collider. Phil. Trans. R. Soc. A 373: 20140037. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2014.0037>

¹⁸ Llewellyn Smith C. 2015 Genesis of the Large Hadron Collider. Phil. Trans. R. Soc. A 373: 20140037. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2014.0037>

1.3.3 Alternatives et stratégies concurrentes

Le Comité de planification à long terme du CERN a examiné plusieurs alternatives au LHC :

- > La possibilité de la **construction d'un collisionneur linéaire pour l'étude des interactions électron*-positon* dans le domaine du TeV***. Ces machines apparaissaient scientifiquement très prometteuses, notamment pour les études de précision, mais leurs exigences technologiques nécessitaient encore de nombreuses années de recherche et de développement avant d'envisager une mise en œuvre à grande échelle. Dans ce contexte, l'existence au CERN d'un tunnel de grandes dimensions avec le LEP, ainsi que d'une chaîne d'accélérateurs déjà opérationnelle et fiable, renforça l'intérêt d'un collisionneur proton-proton* de type LHC comme solution plus rapide et plus réaliste pour explorer le domaine des TeV*. Les deux approches étaient généralement considérées comme complémentaires : les collisionneurs hadroniques* offraient un fort potentiel de découverte à haute énergie, tandis que les collisionneurs électron*-positron* demeuraient particulièrement adaptés aux mesures de précision. En outre, la possibilité d'exploiter ultérieurement le LHC pour des collisions d'ions* lourds et, dans certaines configurations envisagées à l'époque, pour des collisions électron*-proton*, renforçait encore l'attrait du projet¹⁹.
- > L'option d'un **collisionneur proton*-antiproton*** fut exclue²⁰ en raison des difficultés liées à la production et au stockage d'antiprotons* en quantité suffisante pour atteindre les luminosités* requises dans le domaine des TeV*. Les progrès des technologies d'aimants supraconducteurs et l'existence du tunnel du LEP rendirent alors plus pertinente l'option d'un collisionneur proton*-proton* de type LHC²¹.

¹⁹ Etude d'impact sur l'environnement du projet LHC, 1997, p. 6

²⁰ Etude d'impact sur l'environnement du projet LHC, 1997, p. 7

²¹ Luciano Maiani, The large hadron collider project, [https://doi.org/10.1016/S0920-3796\(99\)00035-6](https://doi.org/10.1016/S0920-3796(99)00035-6)

1.4 LE CERN, GOUVERNANCE ET PROCESSUS DE DECISION

Les principales instances du CERN comprennent le Conseil, qui constitue l'organe directeur suprême de l'Organisation, ainsi que les organes subsidiaires placés sous son autorité :

- Le **Conseil du CERN** est l'organe directeur suprême de l'Organisation. Il contrôle les activités du CERN dans les domaines scientifique, technique et administratif et approuve les programmes d'activité ainsi que les budgets de l'Organisation.
- Le **Comité des directives scientifiques** : composé de membres nommés (personnalités éminentes au sein de la communauté scientifique) et de membres *ès qualités*, il assiste le Conseil de manière consultative et surveille de façon générale les activités scientifiques de l'Organisation ;
- Le **Comité des finances** : composé de représentants des États membres du CERN, il assiste le Conseil pour toutes les questions relatives à la gestion financière de l'Organisation, y compris pour ce qui concerne sa Caisse de pensions ;
- Le **Comité d'audit** : composé de deux délégués au Conseil, dont l'un est nommé président du Comité, et de quatre membres experts extérieurs ayant une expérience solide des questions d'audit, il est chargé de donner des orientations et des conseils indépendants et objectifs sur le bien-fondé et l'efficacité des procédures de l'Organisation dans les domaines suivants : a) structure de gouvernance ; b) gestion des risques ; c) valeurs et éthique ; d) cadre du contrôle interne ; e) surveillance de l'audit interne et de l'audit externe.

Au moment de sa création en 1954, le CERN comptait 12 États membres : Belgique, Danemark, France, Grèce, Italie, Norvège, Pays-Bas, République fédérale d'Allemagne, Royaume-Uni, Suède, Suisse et Yougoslavie.

La Yougoslavie a quitté le CERN en 1961.

Au moment de l'approbation du projet de LEP par le Conseil du CERN en 1981, le CERN comptait 1 État membre supplémentaire : l'Autriche (adhésion en 1959).

Au moment de l'approbation du projet de LHC par le Conseil du CERN en 1994, le CERN comptait 7 États membres supplémentaires : l'Espagne (État membre de 1961 à 1969, puis nouvelle adhésion en 1983), le Portugal (1985), la Finlande (1991), la Pologne (1991), la République tchèque et la Slovaquie (adhésion commune en tant que République tchécoslovaque en 1992), la Hongrie (1992).

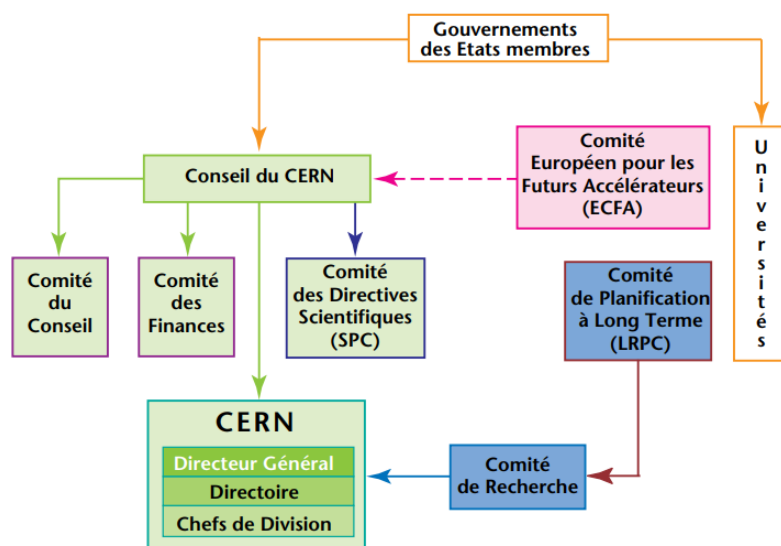


Schéma de décision des projets du CERN au moment du LHC

1.5 RELATIONS AVEC LE TERRITOIRE ET CONCERTATION

Une « Structure de concertation » fut mise en place dès le début du projet LEP et maintenue active jusqu'à la réalisation du LHC. Elle était présidée par le sous-préfet de Gex et réunissait les maires et les conseillers généraux — aujourd'hui conseillers départementaux — directement concernés, les représentants des services départementaux de l'État, le chef du projet ainsi qu'un autre membre du Directoire du CERN. La fréquence semestrielle des réunions pouvait être augmentée en fonction des besoins, devenant trimestrielle pendant les phases actives des chantiers. Cette structure *ad hoc* permit une communication ouverte et un dialogue constructif entre les différents partenaires. Elle se réunit également à plusieurs reprises pour prendre connaissance du projet LHC²² et en discuter les principales implications.

Dans le cas du LEP, l'importance de cet effort de concertation tenait à la fois à l'ampleur du projet, à son tracé transfrontalier et aux procédures administratives propres aux deux États hôtes. En raison du tracé du LEP et des dispositions réglementaires applicables en France et en Suisse, le poids principal des procédures administratives se situa du côté français. Celles-ci purent néanmoins être menées à leur terme sans affecter le déroulement des travaux, grâce à un important effort parallèle d'explication et de dialogue conduit entre la mi-1980 et la mi-1984.

Cet effort prit plusieurs formes. **Du côté suisse, 117 réunions** furent organisées avec les deux communes concernées²³. **Du côté français**, le CERN mena une campagne de **173 réunions d'information**, réparties entre **13 communes différentes**, auxquelles s'ajouta une exposition itinérante présentée dans **quatre lieux**. Plusieurs conférences publiques, comprenant des exposés explicatifs et des débats, furent également organisées à l'Université de Genève. Des discussions individuelles eurent lieu avec les autorités locales, notamment des maires, des représentants de comités locaux ou régionaux et d'autres personnalités influentes.

Au lancement et lors de la médiatisation du projet LEP, une partie importante de la population associait encore, à tort, le CERN à l'industrie nucléaire. Le Directeur général du CERN de l'époque, Herwig Schopper, accorda donc une attention particulière à l'information du public et à l'explication du projet, afin de clarifier sa nature scientifique, ses objectifs et ses implications concrètes pour les territoires concernés.

Ces dispositifs montrent que les préoccupations locales ne relevaient pas nécessairement d'une opposition homogène ou structurée à l'échelle départementale. Elles étaient plutôt liées aux communes directement concernées par le tracé du LEP, les ouvrages souterrains, les puits d'accès, les zones de chantier et les éventuelles incidences locales. La structure de concertation côté français et le comité consultatif côté suisse permirent ainsi de suivre l'avancement du projet, d'en examiner les incidences et de maintenir un dialogue régulier entre le CERN, les autorités et les élus locaux.

²² Etude d'impact sur l'environnement du projet LHC, 1997, p. 236-237

²³ Schopper, Herwig, LEP – The Lord of the Collider Rings at CERN 1980–2000: The Making, Operation and Legacy of the World's Largest Scientific Instrument, Berlin/Heidelberg, Springer, 2009.



2. LES INFRASTRUC- TURES DU LEP ET DU LHC : DONNEES CLES ET BILAN DES CHANTIERS

2.1 LES INFRASTRUCTURES CRÉES

Récapitulatif des infrastructures créées pour le LEP et le LHC		
Projet	Pour le LEP*	Pour le LHC
Tunnel circulaire souterrain	Circonférence : 27 km Diamètre de l'anneau : près de 9 km Diamètre intérieur du tunnel : 3,8 m dans les arcs ; 4,4 ou 5,5 mètres dans les sections droites Profondeur moyenne de 100 mètres (entre 50 et 175 mètres)	
Volume utile des ouvrages souterrains construits (tunnel, puits et halles souterraines)	600 000 m ³	243 000 m ³
Surface des bâtiments construits	50 500 m ²	28 900 m ²

Références :

- ↘ Etude d'impact du projet LHC sur l'environnement, 1997, p. 77
- ↘ [Histoire du LEP | CERN](#)
- ↘ CERN, "LHC, The guide, FAQ" : <https://cds.cern.ch/record/2255762/files/CERN-Brochure-2017-002-Eng.pdf>

2.1.1 Les infrastructures et équipements créés pour le LEP

Avec pour objectif de faire entrer en collision des paquets d'électrons* ayant la forme d'un ruban plat de 10 cm de long sur 6 mm de large et tournant en sens opposés, le LEP a été constitué, à sa création, des infrastructures suivantes :

- ↘ 1 tunnel circulaire souterrain de 27 km de circonférence et de près de 9 km de diamètre ;
- ↘ 8 points d'accès associés à des bâtiments de surface ;
- ↘ 2 tunnels de communication avec le Super Proton Synchrotron (SPS), exploité comme injecteur* d'électrons* ;
- ↘ des galeries et zones expérimentales.

Le complexe d'accélérateurs du CERN fournissait les particules et le LEP a été équipé au total de **6 détecteurs** pour observer les collisions entre électrons et positons* de haute énergie (les 4 premiers ayant été installés au lancement de l'infrastructure). Le LEP fut équipé de **quatre grands détecteurs généralistes** (ALEPH, DELPHI, OPAL et L3) ainsi que de **deux expériences plus spécialisées**, LEP5 et LEP6 :

- ↘ **ALEPH** – situé près d'Echenevex (France). Détecteur polyvalent destiné à l'étude de la physique électrofaible, des bosons *W* et *Z**, des quarks* lourds et à la recherche de nouvelles particules.
- ↘ **DELPHI** – situé près de Ferney-Voltaire (France). Détecteur généraliste optimisé pour l'identification

précise des particules (leptons*, photons* et hadrons*).

- ↘ **OPAL** – situé près de Versinnex (France). Détecteur polyvalent conçu pour des mesures de précision du Modèle standard* et la recherche de nouvelles physiques.
- ↘ **L3** – situé près de Sergy (France). Détecteur spécialisé notamment dans la mesure très précise des leptons* et des bosons* électrofaibles*.
- ↘ **LEP5 (BREMS)** – expérience dédiée à la mesure de la luminosité du LEP à l'aide d'un moniteur de bremsstrahlung.
- ↘ **LEP6 (MODAL)** – expérience consacrée à la recherche de particules fortement ionisantes, notamment les monopôles magnétiques hypothétiques.

Dans le LEP, c'est en chacun des huit points d'intersection que se croisaient les paquets d'électrons* tournant dans le sens inverse des aiguilles d'une montre et les paquets de positons* qui tournent dans le sens des aiguilles d'une montre²⁴. Dans le LHC, les collisions se font principalement entre hadrons* – en particulier des protons* – mais une partie du programme est également consacrée aux collisions d'ions* lourds afin d'étudier la matière dans des conditions extrêmes proches de celles de l'Univers primordial.

Pour couvrir le domaine d'énergie à explorer au-delà du LEP, l'installation de la nouvelle machine dans le tunnel existant du LEP et l'utilisation du reste de l'infrastructure du CERN, à travers la chaîne de tous les accélérateurs existants, sont apparues comme la solution la plus économique²⁵.

2.1.2 Les infrastructures et équipements créés pour le LHC

Le LHC s'appuie sur quatre grands détecteurs, dont certains réutilisent des infrastructures du LEP tandis que d'autres ont nécessité la construction de nouvelles cavernes expérimentales :

- ↘ Les deux plus grands, **ATLAS (installé à Meyrin)** et **CMS (installé à Cessy)**, ont été conçus essentiellement pour observer des collisions entre protons* et notamment identifier les bosons de Higgs*. Ces expériences ont nécessité la construction de deux nouvelles zones d'expérimentation, situées respectivement aux Points 1 et 5, à Meyrin et Cessy (voir carte figurant dans la partie 1.1).
- ↘ Les deux autres expériences, **ALICE (installé à Sergy)** et **LHCb (installé à Ferney-Voltaire)**, sont du même ordre de grandeur que les quatre expériences qui ont fonctionné au LEP à partir de 1989. Elles ont réutilisé les zones d'expérimentation du LEP des Points 2 et 8 (voir carte figurant dans la partie 1.1), à Sergy et Ferney-Voltaire. Leur échelle et leurs objectifs scientifiques diffèrent de ceux d'ATLAS et CMS. ALICE observe les collisions entre ions* lourds et LHCb afin d'étudier notamment les phénomènes de violation de symétrie CP et les différences entre matière et antimatière*²⁶.

Ce nouveau programme impliquait l'installation de nouveaux équipements :

- ↘ **des aimants plus puissants**, capables de guider la trajectoire de protons* qui sont des particules lourdes. Ces aimants sont dits supraconducteurs : la supraconductivité est la propriété des conducteurs d'offrir une résistance électrique nulle, donc de faire circuler des courants électriques élevés dans des conducteurs de petite dimension à un faible coût énergétique. Cet effet se produit à très basse température, dans le domaine de la cryogénie : dans le cas du LHC, on est proche du zéro absolu avec -271°C , température où le fluide réfrigérant, l'hélium liquide, possède des propriétés spécialement favorables de capacité calorifique et de fluidité. **Les aimants de courbure (les dipôles) et les aimants de focalisation (les quadripôles) forment une enceinte cryogénique continue qui**

²⁴ Etude d'impact du projet LEP sur l'environnement, 1982, p. 12

²⁵ Posters de présentation du LHC, p. 5

²⁶ Posters de présentation du LHC, p. 14

occupe la majeure partie du tunnel et qui a représenté les trois quarts du budget de la machine²⁷ ;

- ▾ des **absorbeurs de faisceaux*** (blocs de graphite et d'acier de 11,30 m de long), recevant les faisceaux* ayant déjà servi et extraits de la machine.

Le programme d'aménagement du LHC incluait les principaux aménagements suivants :

- ▾ La création de **nouveaux bâtiments au Point 5 à Cessy**, essentiellement destinés à l'expérience **CMS** (pré-assemblage en surface, montage et maintenance de l'ensemble de détecteurs, installations de ventilation des salles souterraines et celles nécessaires à la production de froid)²⁸ ;
- ▾ La création de **nouveaux bâtiments au Point 1 à Meyrin**, destinés à l'expérience **ATLAS** (montage et maintenance de l'ensemble des détecteurs, ventilation des salles souterraines et installations cryogéniques). : ils ont été bâtis à proximité immédiate des installations du LEP existantes, pour une surface totale des nouvelles constructions sera de 6073 m² ;
- ▾ La création de **nouveaux bâtiments à Ferney-Voltaire et Ornex**, destinés à l'expérience **LHCb** et servant à abriter les installations cryogéniques complémentaires nécessaires au bon fonctionnement de l'expérience ;
- ▾ La création de **nouveaux bâtiments au Point 1.8 à Prévessin-Moëns**, servant pour l'assemblage d'éléments de l'accélérateur ;
- ▾ La création de **nouveaux ouvrages de surface à Saint-Genis-Pouilly** :
 - ▾ le puits PMI 2, situé au bout du site de Meyrin du CERN (utilisé non seulement pour creuser le tunnel de transfert TI2 mais aussi pour le transfert des aimants de courbure de l'accélérateur jusqu'à leur lieu d'installation dans le tunnel principal) ;
 - ▾ un hall de montage et de stockage des aimants (SMI 2) de 2100 m² à proximité immédiate du puits ;
 - ▾ un bâtiment (SDI 2) de 440 m² pour "coiffer" le puits PMI 2 ;
- ▾ La création de **nouveaux ouvrages de surface à Versonnex**, avec le prolongement de deux bâtiments existants pour abriter les installations cryogéniques complémentaires (900 m²), et la création d'une aire de stockage d'hélium complète l'ensemble ;
- ▾ La création d'**ouvrages souterrains, pour les principaux** :
 - ▾ une **halle souterraine d'expérimentation (UX 55) abritant le détecteur CMS**, située à environ 100 m de profondeur, creusée autour de l'axe du tunnel principal et desservie depuis la surface par un puits de 20,40 m de diamètre (PX 56) ;
 - ▾ une **autre halle (US 55) renfermant les équipements techniques liés au détecteur CMS (US 55)**, d'une longueur de 85 m et d'un diamètre de 18 m, située à proximité immédiate de la halle d'expérimentation, et desservie depuis la surface par un puits de 12 m de diamètre (PM 54) ;
 - ▾ une **grande halle souterraine abritant le détecteur ATLAS**, de 53 m de long, 30 m de large de 30 m et 35 m de haut, construite au Point 1 à Meyrin le long de l'axe du tunnel LEP existant, desservie par deux puits de diamètre 18 et 12,6 m ;
 - ▾ une autre halle, longue de 62 m, large 20 m et haute de 12,6 m, pour loger les équipements techniques liés au détecteur ATLAS, desservie par un puits existant ;
 - ▾ des **tunnels de transfert (TI2 et TI8)** nécessaires pour amener vers le LHC les protons* pré-accélérés dans le Supersynchrotron à protons* (SPS) ;
 - ▾ **deux salles** situées à 100 m de profondeur, à 750 m de part et d'autre du Point 6 (**Versonnex et Collex-Bossy**), pour accueillir les **absorbeurs de faisceaux***.

²⁷ Posters de présentation du LHC, p. 7

²⁸ Posters de présentation du LHC, p. 22-23

2.2 DONNÉES DES CHANTIERS DU LEP ET DU LHC

2.2.1 Calendrier de réalisation du LEP et du LHC

Les travaux de génie civil du LEP ont commencé le 13 septembre 1983, lorsque les présidents des deux pays hôtes du CERN, François Mitterrand pour la France et Pierre Aubert pour la Suisse, ont donné symboliquement le premier coup de pioche et posé une plaque commémorative de l'inauguration. Le tunnel a été achevé le 8 février 1988. Un faisceau* a ensuite été injecté* cette même année dans les premiers 2,5 kilomètres de l'anneau, et le premier faisceau* circula le 14 juillet 1989. L'accélérateur a produit les premières collisions un mois après, le 13 août 1989. **Le LEP a été officiellement inauguré le 13 novembre 1989**²⁹.

Le chantier du LHC a commencé en 1998, deux ans avant l'arrêt du LEP (le 20 novembre 2000). Le tout premier aimant a été installé en 2003 dans l'un des deux tunnels de transfert construits pour amener le faisceau* du SPS vers le LHC. Le LHC a été officiellement inauguré le 21 octobre 2008, après avoir démarré le 10 septembre 2008. Neuf jours après ce démarrage, une interconnexion défaillante stoppa la machine, causant des dommages majeurs sur 600 mètres. Après 14 mois de réparations et d'améliorations, le LHC redémarrera avec succès et le programme de recherche expérimentale démarra le 30 mars 2010³⁰.

Le planning de réalisation du LHC a beaucoup évolué après l'approbation du projet en décembre 1994. En raison des contraintes budgétaires, il était au départ prévu de réaliser le projet en deux étapes, avec un fonctionnement de la machine aux deux tiers de sa capacité dès 2004 et une finition progressive pour arriver à l'énergie maximale en 2008. Cette approche mettait rapidement à la disposition des physiciens un outil de recherche déjà valable, tout en étalant son financement dans le temps. Avec l'assurance de contributions substantielles d'Etats non-membres de l'Organisation, il a ensuite été décidé de réaliser le projet d'une seule traite, en visant un début d'exploitation à pleine énergie dans la deuxième moitié de 2005, et pour un coût total moindre³¹. La mise en service a finalement été repoussée à 2008 en raison de plusieurs aléas, en particulier la hausse du coût (30 % de plus que prévu à l'origine) et l'échec de trois aimants utilisés pour focaliser et manipuler les faisceaux* de protons* de l'accélérateur lors de tests préliminaires³².

2.2.2 Trafic généré par les chantiers du LEP et du LHC

Pour le **chantier du LEP**, les voies de circulation mobilisées par le CERN évitaient systématiquement les principales agglomérations, grâce à un choix approprié des points d'extraction et de décharge. Les itinéraires utilisés suivaient dans toute la mesure du possible le tracé de routes existantes ou déjà projetées, afin d'éviter la création de voies nouvelles. Enfin, les trafics supplémentaires engendrés sur les réseaux étaient faibles par rapport à ceux existants³³.

Pour le **chantier du LHC**, le trafic de pointe n'a pas dépassé 90 camions par jour sur la route la plus chargée, la RD984 (trafic de l'époque : 14 000 véhicules/jour). A Cessy, le trafic maximum sur la VC 8 fut de 70 camions par jour pendant 4 mois (voir graphique)³⁴.

²⁹ Histoire du LEP | CERN

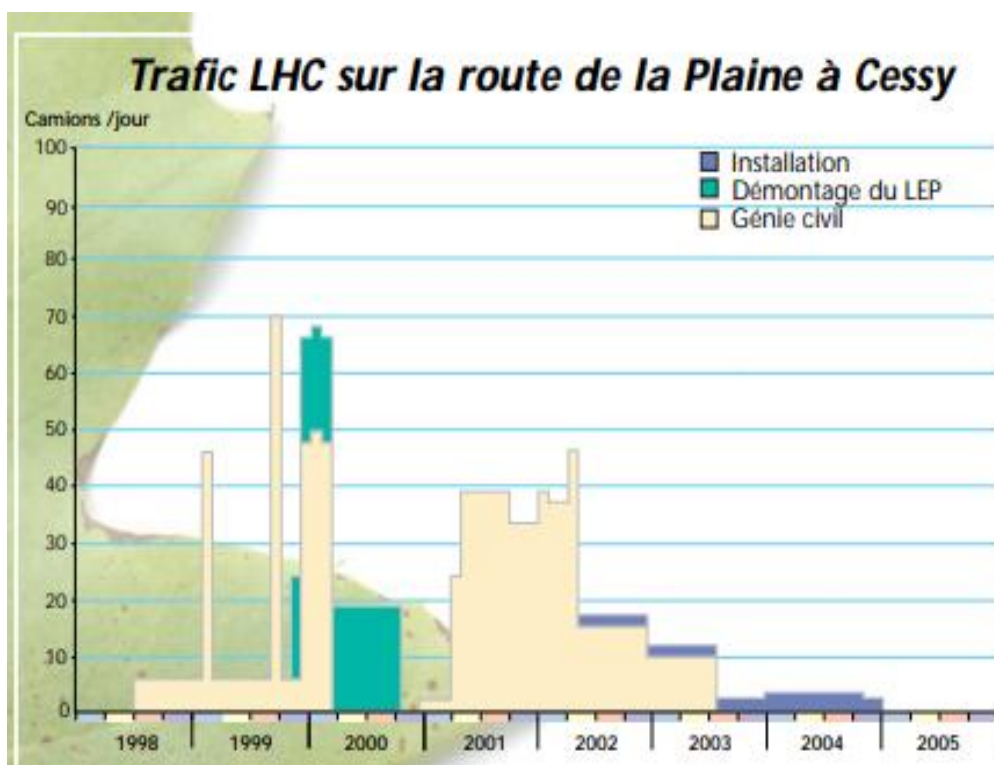
³⁰ CERN70 : La grande aventure du LHC | CERN

³¹ Etude d'impact du projet LHC sur l'environnement, 1997, p. 49

³² Large Hadron Collider faces delay – Physics World

³³ Etude d'impact du projet LEP sur l'environnement, 1982, p. 37

³⁴ Posters de présentation du LHC, p. 9



Trafic lié aux travaux du LHC sur la route de la Plaine à Cessy

2.2.3 Méthodes et travaux, géologie et hydrogéologie

2.2.3.1 Organisation des travaux

Pour la réalisation des travaux souterrains du LEP, le chantier fut organisé en plusieurs lots correspondant aux différentes conditions géologiques et aux différents secteurs de l'anneau. Les lots dits de « plaine », confiés par le CERN au groupement EUROLEP conduit par Fougerolle, concernaient une partie importante des ouvrages souterrains : 16 des 18 puits d'accès aux ouvrages du LEP, ainsi que plusieurs chambres et galeries souterraines. Un puits auxiliaire supplémentaire fut également nécessaire au Point 2 afin de permettre la réalisation simultanée du dernier octant du tunnel principal, tandis que s'achevaient les ouvrages du Point 2. Dans la plaine, lorsque les puits traversaient des terrains morainiques ou aquifères, leur excavation fut réalisée à l'abri de parois moulées.

Lot A (plaine)	Lot B (plaine)	Lot C (piémont du Jura)
<ul style="list-style-type: none"> > Un 1er chantier de 9,4 km entre le point 8 (point bas) et le point 3a au pied du piémont du Jura tournant dans le sens des aiguilles d'une montre > Un 2ème chantier de 6,6 km entre le point 8 (point bas) et le point 6 tournant dans le sens inverse des aiguilles d'une montre > Tous les déblais du lot A ont été extraits en surface par le point 8. 	<p>Deux chantiers principaux :</p> <ul style="list-style-type: none"> > puits et ouvrage souterrains du Point 6 > 6,6 km de tunnel entre le point 6 et le point 4 	<ul style="list-style-type: none"> > Un 1er chantier de 3,0 km de tunnel principal depuis le point d'intersection de la galerie de reconnaissance et de l'anneau du LEP jusqu'au point 4 > Un 2ème chantier : à partir de l'installation de chantier du PA3, travaux de transformation de la galerie de reconnaissance en galerie d'accès, réalisation de l'alvéole technique située au point de jonction entre la galerie de reconnaissance et l'anneau du LEP et l'achèvement du puits PA3

Le démantèlement du LEP, réalisé en 2000, concernait le collisionneur et les quatre expériences de physique associées. La construction du LHC exigeait en effet que le tunnel soit complètement débarrassé de tous les équipements qui n'étaient pas réutilisables pour la nouvelle machine. Le processus du démantèlement s'est décomposé chronologiquement de la façon suivante :

1. Mise à l'arrêt définitif du faisceau*
2. Contrôle radiologique de vérification de zonage
3. Sécurisation des zones
4. Enlèvement des éléments radioactifs
5. Déconnexion des composants vides
6. Découpe de la chambre à vide et des barres d'excitation
7. Dépose et enlèvement des composants de la ligne faisceau* (aimants, chambre à vide, etc....)
8. Dépose et enlèvement des câbles
9. Dépose et enlèvement de la tuyauterie de refroidissement
10. Nettoyage des petits composants restants
11. Contrôle radiologique de vérification et reclassification des zones³⁵.

Les chantiers de surface du LHC ont largement réutilisé les zones LEP existantes, mais certains travaux ont nécessité des extensions au-delà des emprises clôturées héritées du LEP. Ces extensions concernaient notamment les zones où de nouveaux ouvrages souterrains, bâtiments techniques ou infrastructures expérimentales devaient être réalisés. Trois lots ont été délimités, couvrant chacun l'ensemble des ouvrages construits, tant en souterrain qu'en surface :

- > **la zone du Point 1 (Lot 1)** : cavernes expérimentales et de service, puits, galeries diverses, bâtiments et ouvrages de surface ;
- > **la zone du Point 5 (Lot 2)** : cavernes expérimentales et de service, puits, galeries diverses, bâtiments et ouvrages de surface ;
- > **l'ensemble des autres zones autour de l'anneau (Lot 3)** : les tunnels de transfert vers les Points 2 et 8 et leurs puits d'accès, les ouvrages souterrains d'arrêt des faisceaux* autour du Point 6, les adaptations des infrastructures existantes du LEP au Point 2, les ouvrages réalisés au Point 7, ainsi que les galeries diverses, bâtiments et ouvrages de surface pour l'ensemble des points, à l'exception des Points 1 et 5.³⁶.

Autour de l'anneau LEP/LHC, l'importance des chantiers variait selon les sites. Aux Points 1, 8, 2, 6 et 8, les travaux purent rester essentiellement confinés dans les emprises existantes. En revanche, aux Points 1, 3, 4 et 5, des extensions de surface furent nécessaires pour accueillir les nouvelles infrastructures expérimentales et techniques du LHC^{37,38}.

Par ailleurs, **les travaux du LHC avaient pour objectif de minimiser le temps mort que représentait pour la recherche la période entre l'arrêt du LEP (démantelé en 2000) et le début de l'exploitation du LHC (en 2008)** : ce temps mort a été réduit en assemblant de grandes parties des détecteurs en surface, et en réunissant ensuite les morceaux préfabriqués dans la halle souterraine associée à chaque

³⁵ CERN, Bilan de démantèlement du collisionneur LEP, novembre 2002 : <https://cds.cern.ch/record/702725/files/sl-note-2002-043.pdf>

³⁶ Etude d'impact du projet LHC sur l'environnement, 1997, p. 135-136

³⁷ Etude d'impact du projet LHC sur l'environnement, 1997, p. 157

³⁸ Poole J., Silari M. (2001), LEP Dismantling Project, CERN SL Division Note SL-Note-2001-015-MR, CERN, Genève.

expérience dès qu'elle était prête. L'assemblage en surface se faisait alors en parallèle avec la construction de la halle souterraine. Le montage de la machine et des expériences a commencé environ quatre ans après le début du chantier de génie civil. En effet, ces travaux ne pouvaient être réalisés qu'une fois le LEP démonté et les travaux de génie civil achevés aux endroits concernés³⁹.

Les grandes cavités souterraines du LEP firent l'objet d'une attention particulière en raison de leurs dimensions et de la variabilité géologique de la molasse. Leur excavation fut réalisée par phases successives, avec mise en place rapide de soutènements provisoires, béton projeté, boulons d'ancrage, cintres ou renforcements localisés, puis d'un revêtement définitif en béton. Des dispositifs de drainage, d'étanchéité et de suivi géotechnique, notamment par extensomètres, permirent de contrôler les déformations du massif et d'adapter les méthodes d'exécution aux conditions rencontrées. Cette démarche montre que la construction du LEP reposait déjà sur une combinaison étroite entre conception, observation du terrain et ajustement progressif des procédés de chantier.

Références :

- ↳ P. Calnaud, « Les procédés généraux de construction des lots "plaine" », Travaux, juin 1988 ;
- ↳ M. Panet et Y. Leblais, « Les grandes cavités souterraines du LEP », Travaux, juin 1988.

2.2.3.2 Méthodes des travaux

Le chantier du LEP a retenu les principes directeurs suivants :

- > Le **creusement mécanique des terrains** a été retenu sur tous les terrains où il était efficace, soit avec des tunneliers à pleine section, soit avec des machines haveuses à tête mobile. Ce fut notamment le cas pour les galeries souterraines dans la plaine et dans le piémont du Jura, tant que le rocher (molasse et matériaux de la zone de transition) n'était pas d'une compacité telle que le travail à la haveuse ne soit plus possible.
- > L'**emploi d'explosifs** fut au contraire limité aux zones où le creusement mécanisé n'était pas techniquement envisageable (notamment pour certains puits traversant la molasse ainsi que pour les sections du tunnel principal creusées dans les roches dures du piémont jurassien)⁴⁰.

Les techniques ayant fait leurs preuves pour le LEP ont été utilisées à nouveau pour les ouvrages souterrains du LHC :

- > **congélation du sol pour la traversée des moraines aquifères** (gel d'un terrain meuble contenant de l'eau, d'une part pour lui conférer une résistance élevée et par conséquent un comportement comparable à celui d'une roche, d'autre part pour obtenir une étanchéité totale qui exclut toute venue d'eau pendant l'excavation) : cette technique, recourant à la saumure comme liquide réfrigérant, assure une protection efficace des nappes phréatiques rencontrées ; elle en évite la pollution sans interférer sur le régime d'écoulement souterrain de l'eau ; la congélation est stoppée dès que l'avancement des travaux est affranchi des problèmes posés par la présence d'eau ;
- > **paroi moulée** : il s'agit de la construction d'une enceinte étanche à l'eau par implantation de panneaux jointifs étanches ancrés dans la roche située sous le terrain morainique. Exécutée au préalable dans le terrain en place, elle isole là aussi le puits du terrain environnant avant tout

³⁹ Etude d'impact du projet LHC sur l'environnement, 1997, p. 51 et 160

⁴⁰ Etude d'impact du projet LEP sur l'environnement, 1982, p. 37-38

début de creusement ;

- > **emploi des explosifs** : contrairement à certains travaux du LEP, les explosifs ne furent pas utilisés pour la construction des ouvrages souterrains du LHC. Cette méthode fut envisagée et testée comme solution possible, notamment pour le Point 5, mais elle ne fut finalement pas retenue pour les travaux de construction. Le creusement du LHC s'est donc appuyé sur d'autres méthodes d'excavation, mieux adaptées aux contraintes techniques, environnementales et réglementaires des sites concernés⁴¹.

Vulnérabilité du site aux séismes

Les ouvrages souterrains réalisés pour le LEP dans des formations molassiques présentaient une vulnérabilité sismique généralement faible, en raison du confinement lithologique et de l'atténuation des mouvements sismiques en profondeur.

Enjeux hydrogéologiques

A la différence du Supersynchrotron à protons* (SPS) construit entièrement dans la molasse, entre les communes de Meyrin, de Saint-Genis-Pouilly et de Prévessin, le LEP parcourt la zone des calcaires du piémont du Jura sur une faible longueur (3 km environ) et la molasse sur le solde du tracé. Il a donc fallu examiner les impacts spécifiques, à savoir la rencontre d'eaux souterraines, et les conséquences qu'elles pouvaient en résulter tant sur les travaux eux-mêmes que sur l'environnement.

Contrairement au SPS, l'anneau du LEP avait été positionné dans un plan incliné de 1,4 % entre le P4 (point haut) et le P8 (point bas). Le choix de la profondeur de l'anneau et de la pente du plan qui le contient avait répondu aux deux préoccupations principales :

- > maintenir dans la plaine le tunnel dans la molasse étanche,
- > et minimiser la profondeur des puits d'accès et la couverture dans le piémont du Jura.

La position altimétrique du tunnel avait permis d'éviter que ce dernier et ses ouvrages souterrains annexes ne traversent en partie les alluvions morainiques, donc les sillons aquifères. Les seuls contacts possibles avec les moraines s'étaient faits au niveau des puits d'accès.

Dans les zones de piémont du Jura, la nature géologique des terrains rencontrés, calcaires urgoniens, n'avaient pas permis d'exclure la rencontre de zones de fractures et de karsts, soit colmatés, soit avec de possibles circulations d'eau, bien que les sondages n'aient pas révélé de karsts au niveau du tunnel.

Un incident géologique important est survenu en septembre 1986 lors du creusement du tunnel entre les Points 3 et 4, lorsqu'une venue d'eau sous forte pression provenant d'une faille géologique a provoqué l'inondation partielle d'une section du tunnel et l'interruption temporaire des travaux pendant plusieurs mois⁴². Cet épisode a conduit au renforcement des mesures de stabilisation et d'étanchéification, notamment par injections systématiques de résine, soutènements métalliques et revêtements immédiats en béton projeté, afin de limiter les infiltrations et de sécuriser la poursuite du chantier.

⁴¹ Etude d'impact du projet LHC sur l'environnement, 1997, p. 140-143

⁴² Concerning "Travaux 633 (1988)", "Construction du LEP"

2.3 DÉCHETS : VOLUMES ET DESTINATION

Type de déchets	Volume généré par le LEP	Volume généré par le LHC	Destination	Mode de transport
Déblais inertes (m³)	1 110 000 ⁴³ (foisonné)	574 000 (foisonné) Déblais générés par le creusement des halles et des tunnels souterrains ⁴⁴	<p>LEP :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Anciennes gravières du Pays de Gex (pour transformation en 20 ha environ de pâturages) - Mise à disposition des collectivités locales des déblais rocheux de bonne qualité pour l'utilisation comme matériaux routiers⁴⁵ <p>LHC :</p> <p>La construction des nouvelles cavernes expérimentales du LHC, notamment pour les expériences ATLAS et CMS, a nécessité la gestion de volumes considérables de déblais issus des excavations souterraines. Des dispositifs logistiques spécifiques furent mis en place afin de limiter les nuisances pour les populations riveraines et les impacts sur l'environnement, notamment par l'aménagement d'itinéraires dédiés au transport des matériaux excavés, l'organisation des flux de chantier et des mesures visant à réduire la propagation des poussières et du bruit autour des sites.</p> <p>La gestion des déblais dut également prendre en compte certaines contraintes géologiques et environnementales particulières. Certains matériaux excavés, notamment des roches imprégnées d'hydrocarbures naturels rencontrés dans la molasse, furent traités séparément et évacués vers des filières spécialisées sous le contrôle des autorités compétentes, tandis que les autres déblais étaient transportés vers des zones de dépôt dédiées⁴⁶.</p>	Poids-lourds Pour la réalisation du LEP, le surcroît de trafic de poids lourds lié au transport des déblais a évité les agglomérations principales du Pays de Gex : Saint-Genis-Pouilly, Gex, Ferney-Voltaire. En outre, ce trafic avait lieu uniquement de jour et en semaine ⁴⁷ .
Déchets radioactifs très faible activité (tonnes)	Pour l'ensemble : 187 tonnes éliminées vers la France		Stockage dans le Centre Industriel de Regroupement Et de Stockage (CIRES) de l'Agence nationale de gestion des déchets radioactifs (ANDRA) dans l'Aube (France)	Transport par la route en camion
Déchets radioactifs faible et moyenne activité (tonnes)	Aucun	Aucun	Élimination pour stockage en Suisse ⁴⁸ , dès lors que les critères d'acceptation FMA-VC (half-life, activity level) sont dépassés.	Transport par la route en camion

⁴³ Etude d'impact du projet LEP sur l'environnement, 1982, p. 36

⁴⁴ Posters de présentation du LHC, p. 9

⁴⁵ Etude d'impact du projet LEP sur l'environnement, 1982, p. 37 ; 59 ; 96

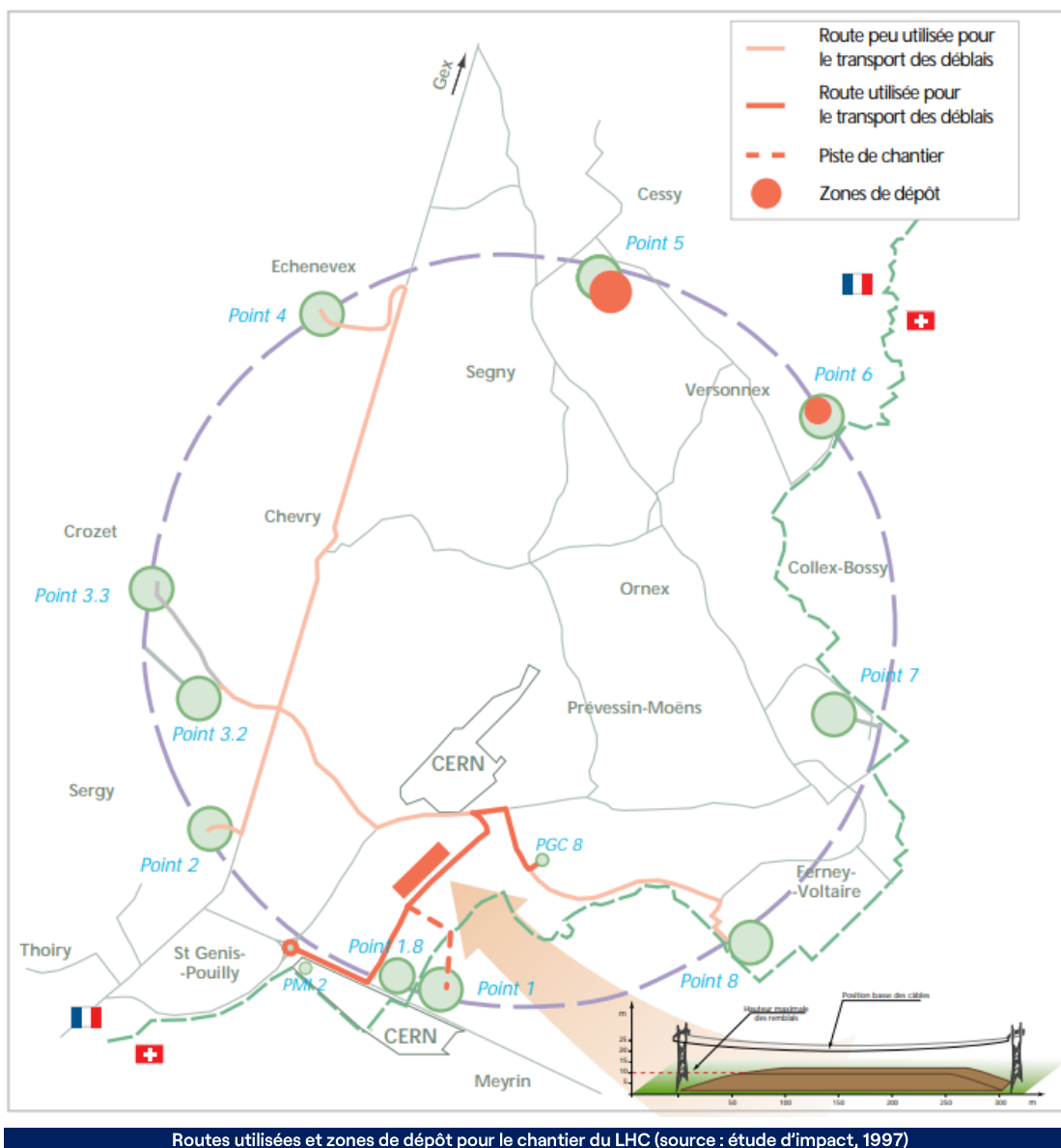
⁴⁶ ATLAS infrastructures CERN teams, "Back-up document for ATLAS general paper", 2007. <https://cds.cern.ch/record/1095699/files/tech-pub-2008-002.pdf>

⁴⁷ Etude d'impact du projet LEP sur l'environnement, 1982, p. 163-164

⁴⁸ En Suisse, l'Institut Paul Scherrer est en charge de la collecte, de l'entreposage et du conditionnement des déchets radioactifs produits dans le secteur de la recherche, de l'industries et du médical, en attendant le stockage définitif dans un future centre de stockage en profondeur (Accord tripartite du 15 novembre 2010 du la Gestion des Déchets Radioactifs du CERN)

La destination des déchets du chantier LHC peut être précisée dans le tableau, mais il est important de distinguer les déchets conventionnels de chantier des matériaux issus du démantèlement du LEP. Pour ce dernier, les sources disponibles indiquent qu'environ 29 000 tonnes d'équipements de l'accélérateur et 10 000 tonnes provenant des expériences furent retirées en moins de 15 mois. Moins de 3 % des matériaux retirés furent classés comme radioactifs. Les matériaux furent orientés vers trois grandes filières : recyclage, stockage pour réutilisation, ou entreposage comme déchets radioactifs. Près de 9 479 tonnes furent vendues pour recyclage, tandis que certains équipements furent conservés pour réutilisation au CERN ou transférés à des instituts. Le système radiofréquence supraconducteur du LEP, représentant environ 444 tonnes, fit ultérieurement l'objet d'une procédure spécifique de libération radiologique, qui permit de libérer 421 tonnes, dont 405 tonnes furent vendues comme ferraille après contrôles radiologiques détaillés.

Les principaux **points de dépôt des déblais du chantier du LHC** étaient situés l'un à Cessy (190 000 m³), l'autre à Versonnex (34 000 m³) et le dernier à Prévessin-Moëns (350 000 m³), sous la ligne électrique à haute tension. Les déblais extraits au Point 1 ont été transportés sur ce site par une piste de chantier à travers champs⁴⁹.



⁴⁹ Posters de présentation du LHC, p. 9

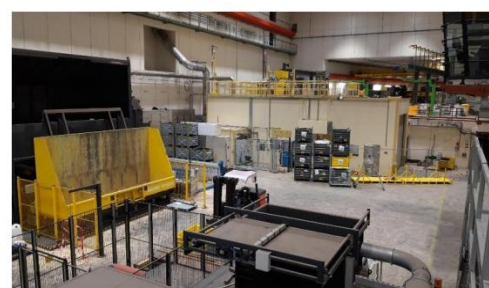
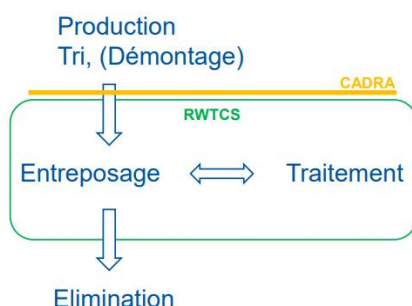
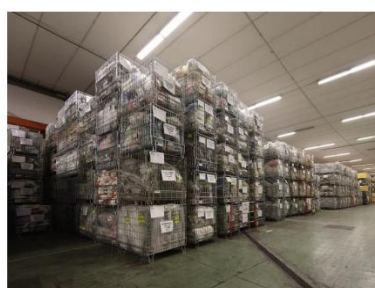
L'article 7 de l'Accord tripartite du 15 novembre 2010 sur la Gestion des Déchets Radioactifs du CERN, stipule que les déchets radioactifs provenant des installations du CERN sont éliminés par les États hôtes selon les filières mises en place en conformité avec leur législation nationale. Pour la gestion des déchets radioactifs, l'Organisation rédige et communique aux autres Parties une « étude déchets » du site couvrant toutes les installations.

Cette étude précise, pour chaque catégorie de déchets produits, les filières d'élimination prévues. Elle est mise à jour chaque fois que nécessaire. Elle prend également en compte le principe d'une répartition équitable entre les États hôtes, en fonction des quantités, du niveau d'activité et de la toxicité des déchets concernés. Son objectif est d'assurer une élimination conforme aux exigences réglementaires, selon les filières les plus adaptées sur les plans technique, environnemental et économique. Cette répartition peut, par exemple, tenir compte du volume total des déchets, de leur niveau d'activité radiologique, de leur toxicité chimique éventuelle, de leur origine géographique, ainsi que de la disponibilité des filières d'élimination appropriées en France ou en Suisse.

Le choix des filières d'élimination est approuvé par les Parties après examen en Réunion tripartite. L'Organisation tient à jour un inventaire des déchets radioactifs éliminés vers les États hôtes et présents sur son site.

À noter que le CERN ne produit pas de déchets radioactifs de haute activité (HA). Les déchets radioactifs produits relèvent principalement de la catégorie des déchets de très faible activité (TFA) et, dans une moindre proportion, des déchets de faible et moyenne activité (FMA). Ils proviennent essentiellement de matériaux ou d'équipements activés lors de leur exposition aux faisceaux* de particules ou aux rayonnements secondaires dans les zones techniques des accélérateurs : pièces métalliques, éléments de blindage, composants de machine, filtres, câbles ou matériels remplacés lors des opérations de maintenance ou de démantèlement. Il ne s'agit donc pas de rejets radioactifs dans l'environnement, mais de déchets solides identifiés, contrôlés, conditionnés et orientés vers les filières appropriées. En fonctionnement normal, les sources de rayonnement diffusé à l'extérieur de la machine sont quasi inexistantes ; l'enjeu radiologique concerne principalement la gestion contrôlée des composants activés à l'intérieur des zones techniques.

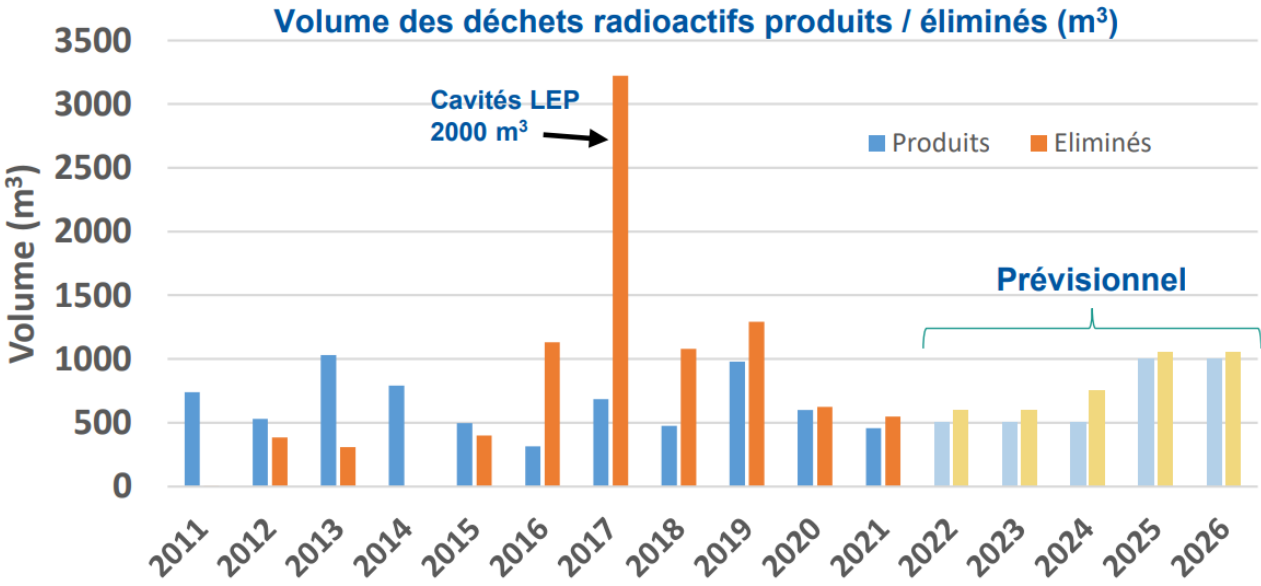
Pendant les phases de construction et de démantèlement du LEP, aucun déchet de "Faible et Moyenne Activité" n'a été produit. Pendant les phases de construction et d'exploitation du LHC, aucun déchet "Faible et Moyenne Activité" n'a été produit.



Processus de gestion des déchets (source : Accord tripartite du 15/11/2010)

Volume des déchets radioactifs entreposés pour la totalité des installations du CERN, jusqu'en 2021

Déchets entreposés (au 31/12/2021)	Volume (m ³)
Candidats à la Libération inconditionnelle - CL (déchets conventionnels)	1604
TFA - Très Faible Activité	3881
FMA-VC - Faible et Moyenne Activité à Vie Courte	325
FA-MA - Faible Activité et de Moyenne Activité.	15
TOTAL	5825
Pourcentage d'entreposage utilisé	60%



Volume des déchets radioactifs produits/éliminés de 2011 à 2026

Références

- ↘ **J. Poole**, The Dismantling Project for the Large Electron Positron (LEP) Collider, CERN-SL-2002-058 MR, 06/12/2002.
- ↘ **R. Billen and P. Le Roux**, LEP Dismantling Traceability: Experience Gained during the Execution Phase, SL-Note-2001-032 MR, CERN, 31 July 2001.
- ↘ **C. Duchemin, M. Magistris, F. Pozzi, M. Silari, C. Theis and H. Vincke**, "Radiological clearance of equipment from high-energy electron accelerators: The example of LEP superconducting acceleration system", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 919, 42–55, 2019.
- ↘ **M. Silari**, A brief recall of the LEP radiation history, LEP3 mini-workshop, CERN, 23 October 2012.
- ↘ **CERN Environment Report 2021–2022**, section "Waste".
- ↘ **CERN Environment Report 2017–2018**, section "Waste".
- ↘ **Swiss Radiological Protection Ordinance**, 26 April 2017, ORaP/RPO.

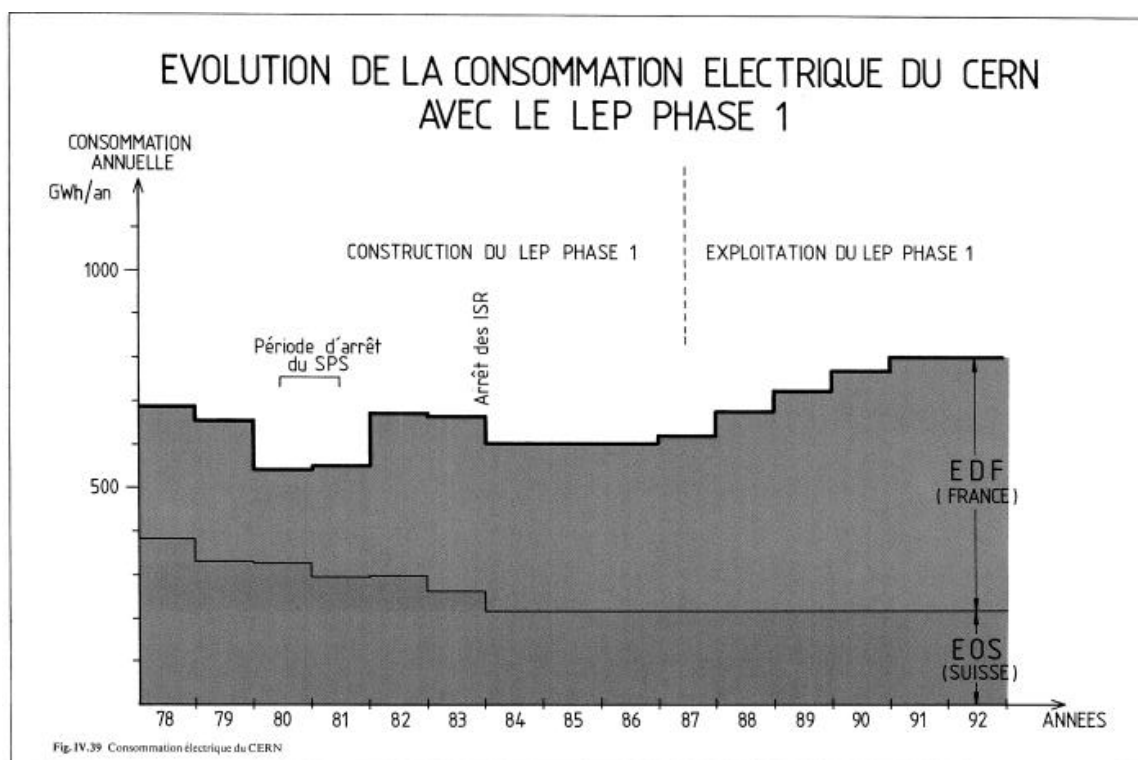
2.4 CONSOMMATION ÉLECTRIQUE

2.4.1 Concernant le LEP

La puissance électrique maximale nécessaire était de 70 MW* pour la phase initiale et était susceptible d'augmenter progressivement par la suite jusqu'à 150 MW* pour l'énergie de 100 GeV* environ. Cette puissance a été fournie par la ligne EDF existante de 400 kV, reliant le poste du SPS à Génissiat et fournissant toute l'électricité nécessaire au Laboratoire de Prévessin. Les dimensions du LEP imposaient des liaisons en moyenne et haute tension pour relier le poste de transformation du SPS aux 8 sous-stations qui ont été construites aux points d'accès du LEP. Ces sous-stations étaient similaires à celles déjà en service au CERN. Seules les liaisons haute tension entre le poste du SPS et les points 2, 4, 6 et 8 du LEP n'empruntaient pas le tunnel ; elles ont été enterrées et aucune trace visible ne subsistait à la fin des chantiers d'installation⁵⁰.

Au-delà du volume d'énergie consommé, l'expérience du LEP montra que la stabilité de la distribution électrique constituait un facteur essentiel de disponibilité de la machine, les coupures ou perturbations pouvant affecter en cascade d'autres services comme le refroidissement, la ventilation ou la cryogénie⁵¹.

La consommation électrique du LEP augmenta progressivement au cours de son exploitation, notamment avec la montée en énergie de LEP2 et le déploiement des cavités radiofréquence* supraconductrices, pour atteindre un ordre de grandeur d'environ de 200 GWh*/an⁵².



Evolution de la consommation électrique du CERN avec le LEP en phase 1, de 1978 à 1992 (source : étude d'impact du projet LEP sur l'environnement, 1982, p. 133)

⁵⁰ Barbalat O. (1981), LEP Power Consumption, CERN internal note, 27 May 1981 ; Etude d'impact du projet LEP sur l'environnement, 1982, p. 27

⁵¹ Collier, Paul, « General Services in the Stone Age: SPS & LEP », actes de Chamonix XI, CERN, 2001, p. 178-181.

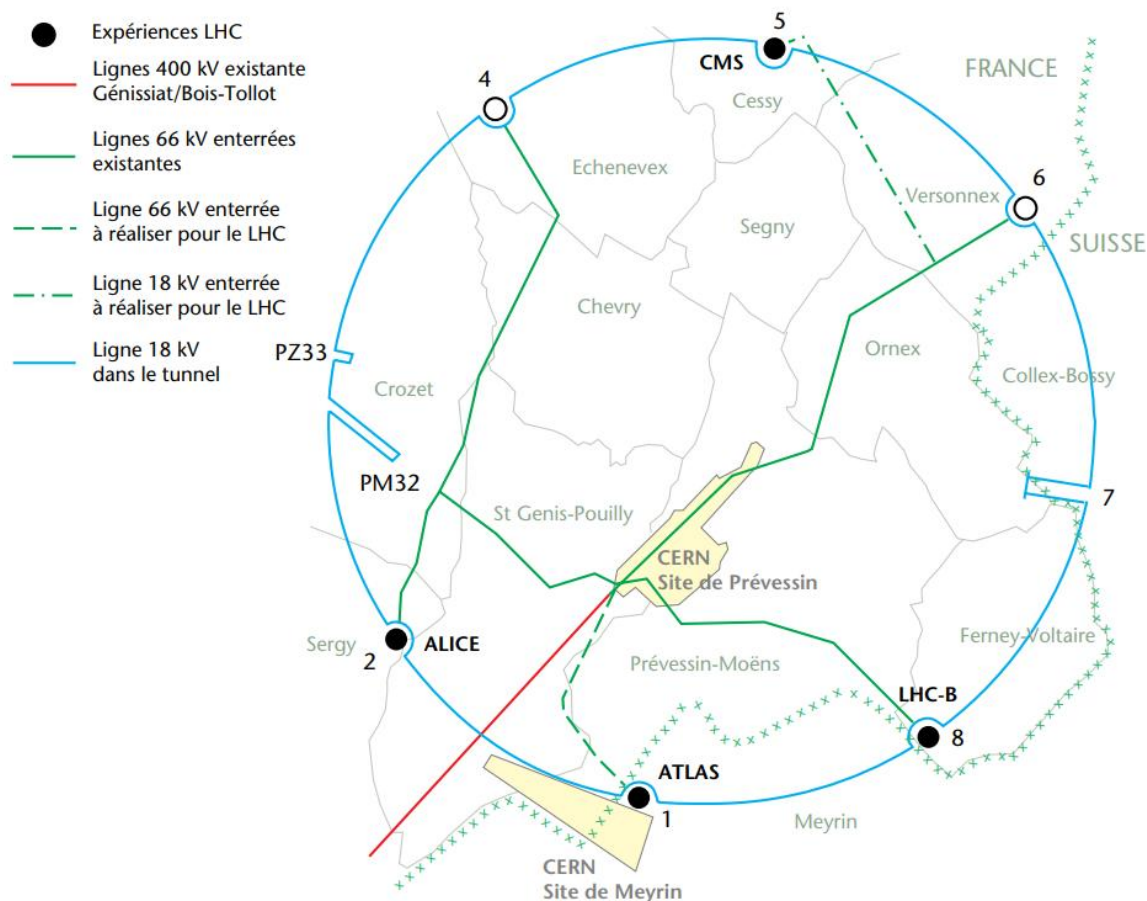
⁵² Etude d'impact du projet LEP sur l'environnement, 1982, p. 132

2.4.2 Concernant le LHC

Le LHC s'inscrit dans la continuité des infrastructures électriques créées pour le LEP, dont il réutilise en grande partie le réseau de distribution. Cette continuité a constitué un avantage important, mais l'installation du LHC et de ses nouvelles expériences a également nécessité des adaptations substantielles, en particulier aux Points 1 et 5 :

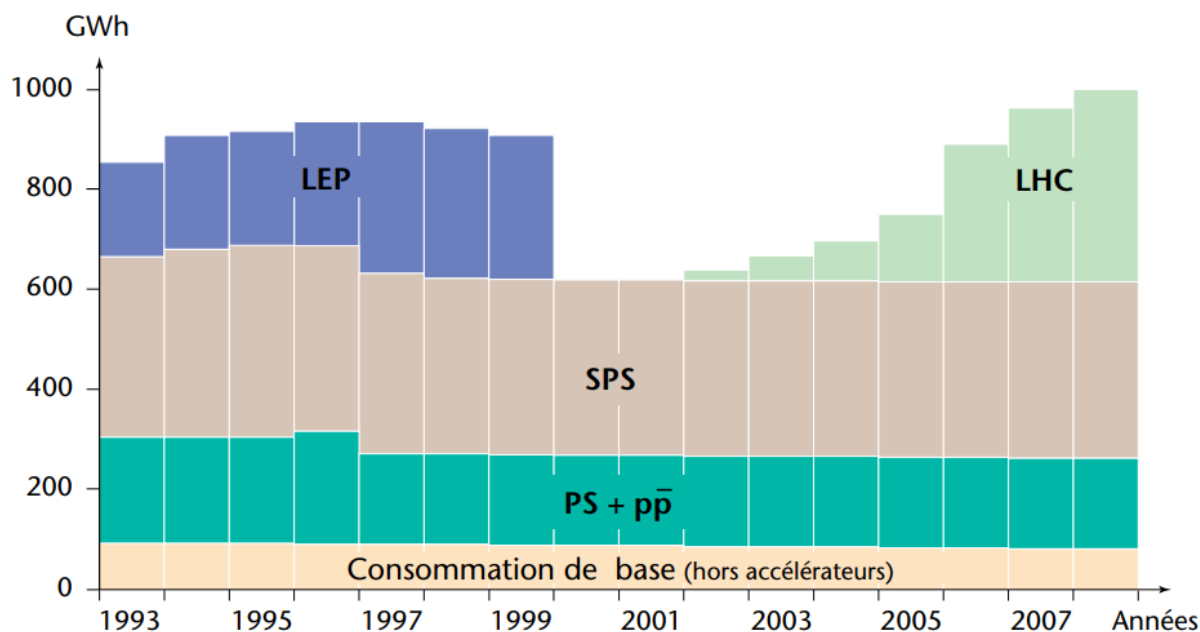
- **Pour renforcer l'interconnexion des différents sites du Laboratoire et améliorer la fiabilité globale du réseau, plusieurs ouvrages complémentaires furent réalisés.** Une liaison électrique 66 kV fut construite entre la sous-station 400 kV/66 kV du site de Prévessin et le Point 1, à Meyrin. Enterrée dans une tranchée d'environ 1,30 m de profondeur, elle a fait du Point 1 un nœud important du réseau électrique du CERN, alimentant à la fois l'accélérateur, les infrastructures associées et l'expérience ATLAS.
- **Une autre liaison, en 18 kV, fut installée entre le Point 5, à Cessy, et le Point 6, à Versonnex.** Les deux tunnels de transfert reliant le SPS au LHC ont également nécessité des installations électriques puissantes, destinées notamment à alimenter les systèmes magnétiques de guidage des faisceaux* fonctionnant à température ambiante ; ces équipements ont été intégrés autant que possible dans des bâtiments déjà existants issus des phases SPS et LEP.

Les deux tunnels de transfert reliant le LHC au SPS ont également nécessité des installations électriques puissantes pour alimenter leur système de guidage magnétique fonctionnant à température ambiante. Les installations électriques de ces deux tunnels de transfert sont logées dans des bâtiments déjà existants à l'époque du SPS et du LEP⁵³.



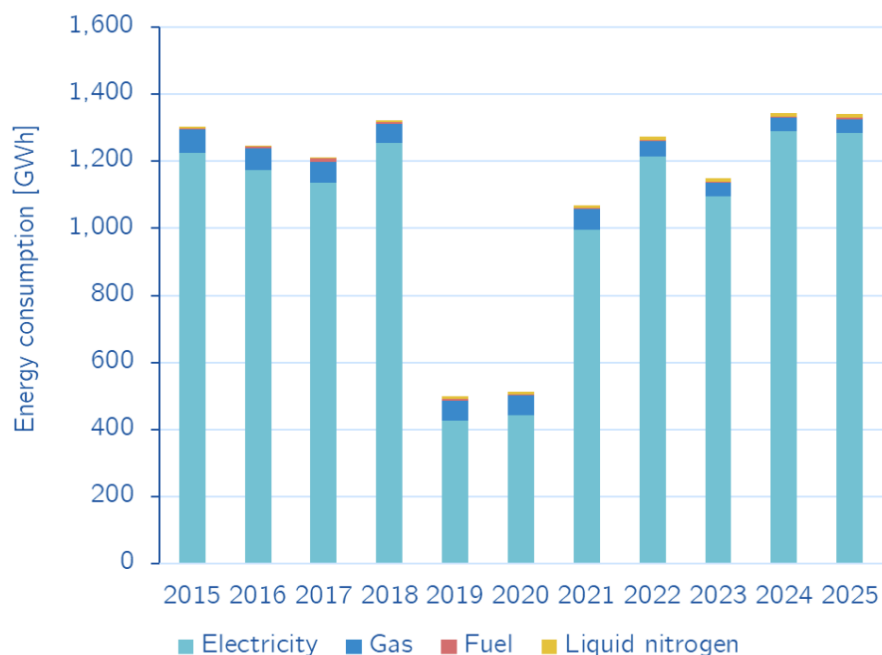
Plan schématique des liaisons électriques enterrées LEP/LHC (source : étude d'impact sur l'environnement du projet LHC, 1997, p. 133)

⁵³ Etude d'impact sur l'environnement du projet LHC, 1997, p. 42-43 et 133

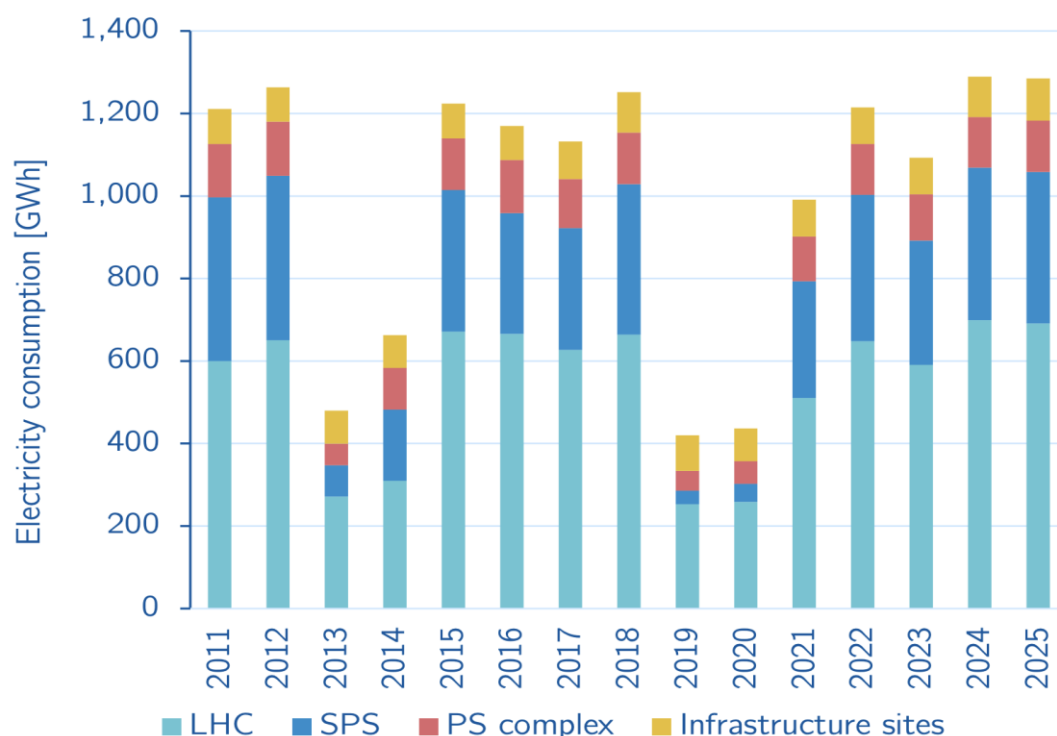


Evolution estimée de la consommation électrique du CERN de 1993 à 2008 (source : étude d'impact LHC, 1997)

La consommation énergétique du LHC ne peut toutefois être analysée isolément de celle de l'ensemble du complexe du CERN. Aujourd'hui, l'électricité représente l'essentiel de l'énergie consommée par le Laboratoire – environ 95 % en moyenne sur les périodes RUN2 et RUN3 – devant le gaz, le carburant et l'azote liquide. En période de fonctionnement nominal, la consommation annuelle totale du CERN se situe autour de 1,2 à 1,3 TWh (soit 1 200 à 1 300 GWh*), avec une baisse marquée pendant les longs arrêts techniques. La ventilation par grands ensembles montre que le LHC représente la part principale de la consommation électrique du CERN, environ 54 % en moyenne sur RUN2–RUN3, devant le SPS, le complexe PS et les infrastructures de site.



Répartition de la consommation d'énergie au CERN de 2015 à 2025, par type d'énergie



Répartition de la consommation d'énergie au CERN de 2011 à 2025, par poste de consommation

Cette consommation reflète la nature même du LHC : une machine supraconductrice nécessitant des systèmes cryogéniques, des alimentations électriques de forte puissance, des équipements radiofréquence*, des réseaux de refroidissement et de ventilation, ainsi que de nombreux services techniques indispensables au fonctionnement des expériences. Elle explique pourquoi la gestion de l'énergie est devenue un enjeu opérationnel à part entière.

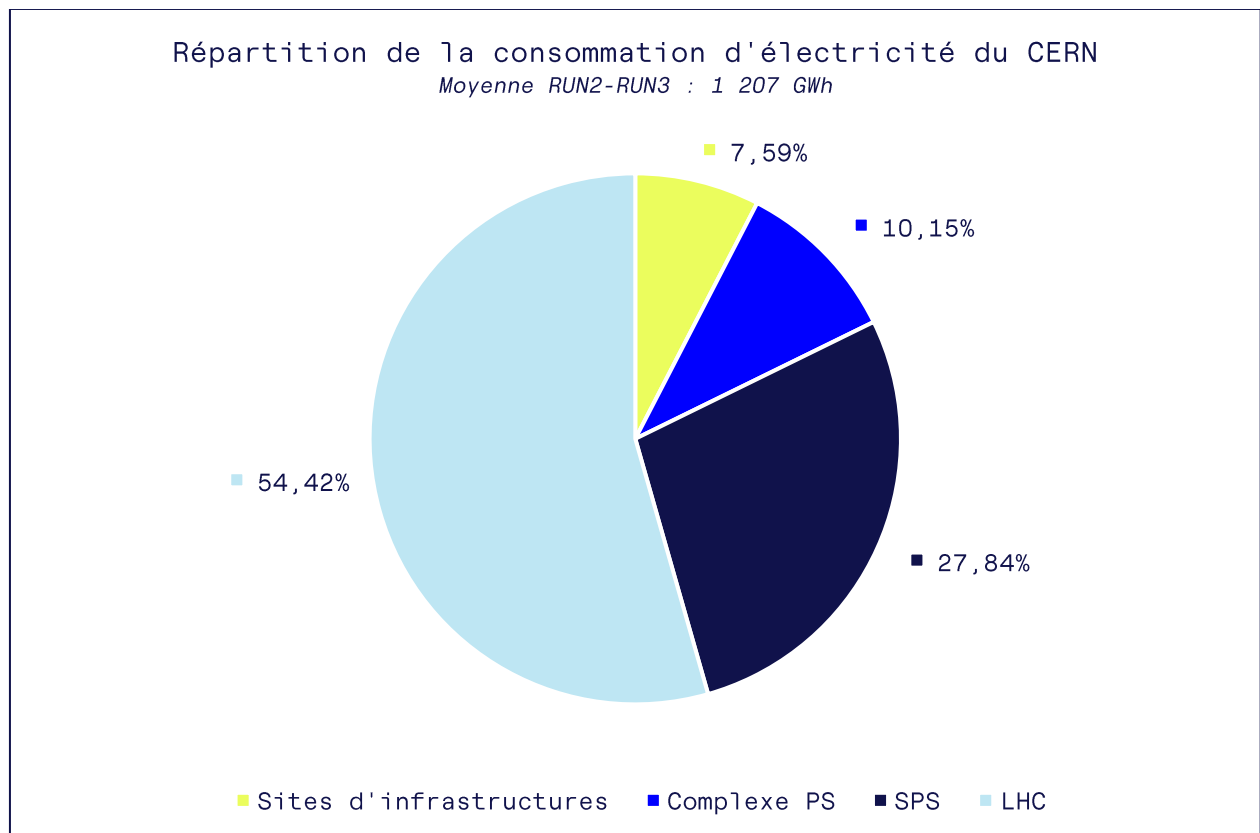
Le CERN dispose aujourd'hui d'un système structuré de management de l'énergie, renforcé depuis 2022 et certifié ISO 50001 depuis 2023. Ce dispositif repose sur une équipe dédiée, un suivi régulier de la consommation, des prévisions liées au calendrier des accélérateurs et des recommandations visant à optimiser l'usage de l'énergie avec un impact minimal sur le programme scientifique.

Au-delà du suivi de la consommation, **le CERN a engagé plusieurs actions visant à améliorer l'efficacité énergétique et à valoriser une partie de l'énergie fatale produite par ses infrastructures**. Depuis janvier 2026, la chaleur récupérée sur les tours de refroidissement du Point 8 du LHC alimente le réseau Ferney-Genève Innovation, en fournissant environ 20 GWh/an d'énergie décarbonée, soit l'équivalent de la consommation de 5 800 logements, et en évitant environ 5 000 tonnes de CO₂ par an. D'autres projets de récupération de chaleur sont en cours, notamment à partir du nouveau centre de données de Prévessin et des tours de refroidissement du Point 1 du LHC, afin d'alimenter les sites CERN de Meyrin et Prévessin à hauteur de 25 à 30 GWh/an à partir de 2027 et de réduire fortement la consommation annuelle de gaz du Laboratoire.

Le CERN a également engagé des contrats d'achat d'électricité photovoltaïque à long terme avec des producteurs situés en France. Ces accords doivent représenter une puissance de pointe d'environ 89 MW* et une production annuelle estimée à 128 GWh*, avec des livraisons prévues entre mai 2026 et juillet 2027 sur une durée de quinze ans. Ils couvriraient environ 10 % de la consommation électrique du CERN en période d'exploitation des accélérateurs, et une part plus importante pendant les longs arrêts techniques.

Les objectifs récents du CERN visent à contenir la consommation malgré la montée en performance du complexe. Pour 2030, l'objectif annoncé est de limiter la consommation électrique à 1,5 TWh/an (soit 1 500 GWh*/an) jusqu'à la fin du RUN4, c'est-à-dire pendant l'exploitation du HL-LHC, de réduire la consommation de gaz de 60 % par rapport à 2018, et de couvrir 10 % des besoins électriques par des sources renouvelables. Plusieurs leviers sont mobilisés : optimisation des modes d'exploitation, amélioration des indicateurs de performance énergétique du LHC, du SPS et du complexe PS, exigences d'efficacité énergétique dans les achats, nouveaux centres de données à faible indicateur d'efficacité énergétique (PUE), récupération de chaleur et production renouvelable dédiée.

Depuis 2010, les mesures d'efficacité énergétique auraient déjà permis plus de 100 GWh*/an d'économies, notamment grâce à la rénovation d'installations, à l'optimisation des modes de fonctionnement des cryoplants et à la consolidation de bâtiments. Des économies supplémentaires de l'ordre de 80 à 100 GWh*/an sont visées à l'horizon 2030, en particulier grâce à l'optimisation du refroidissement et de la ventilation, à la récupération de chaleur et à la modernisation des bâtiments.



La consommation électrique prévue en 2008 est à peine supérieure à celle de 1996, alors que le LHC permet des investigations avec une énergie dans le centre de masse supérieure d'un facteur 100 par rapport à l'énergie du LEP. Des choix technologiques et des procédures d'exploitation expliquent cette augmentation modeste de l'énergie consommée, par exemple l'utilisation d'aimants supraconducteurs refroidis à très basse température, permettant de produire des champs magnétiques très élevés avec des pertes électriques réduites. S'y ajoute le fait que le LHC fait circuler des protons*, dont les pertes par rayonnement synchrotron sont bien plus faibles que celles des électrons* et positons* du LEP.

Consommation électrique moyenne	LEP	LHC
Phase chantier (moyenne annuelle)	655 GWh*	680 GWh*
Phase fonctionnement (moyenne annuelle)	877 GWh*	990 GWh*

2.5 COÛT TOTAL ET FINANCEMENT

2.5.1 Le coût total et le financement du LEP

Le coût de construction du LEP fut estimé, dans le cadre du projet final approuvé en 1981 (« Green Book »), à environ 910 millions de francs suisses de 1981 pour la machine et ses infrastructures principales, sans inclure les expériences de physique. **Au terme du projet, le coût total du LEP atteignit environ 1,3 milliard de francs suisses courants.** Les quatre grandes expériences représentèrent un coût supplémentaire d'environ 504 millions de francs suisses, dont 147 millions financés par le CERN et 357 millions par les collaborations scientifiques associant des instituts issus des États membres et de plusieurs pays non-membres⁵⁴.

Le financement du LEP constitua une rupture importante dans l'histoire du CERN. Pour la première fois, un grand projet devait être réalisé sans budget supplémentaire spécifique, à l'intérieur d'un budget global considéré comme pratiquement constant, de l'ordre de 610 millions de francs suisses par an. Cette contrainte influença profondément la conception technique, le calendrier et l'organisation du projet. Afin de rendre le LEP compatible avec ces limites budgétaires, le CERN adopta une stratégie dite de « *stripped-down LEP* », consistant à construire dans un premier temps uniquement les éléments indispensables à une première phase d'exploitation centrée sur la production du boson Z*, les améliorations ultérieures devant être décidées progressivement⁵⁵. En ce sens, plusieurs leviers ont été activés pour le financer :

- ↘ Etalement des paiements sur une longue période et recours à des mécanismes d'endettement ;
- ↘ Réduction ou arrêt de plusieurs programmes scientifiques existants, notamment l'ISR (Intersecting Storage Rings) et le BEBC (Big European Bubble Chamber), afin de dégager des ressources financières ;
- ↘ Diminution des contributions directes du CERN aux expériences, impliquant une participation accrue des collaborations internationales ;
- ↘ Réorganisation interne importante du Laboratoire et redéploiement d'une partie du personnel vers le projet LEP*⁵⁶.

Références

- ↘ **CERN Council** Procedure for approving and starting the LEP project, (1980) CERN/1395, December 1980. CERN, Geneva.
- ↘ **CERN Council Resolutions** – approval of the LEP project, phase 1 – revision of the banner procedure with a view to the LEP project, (1981) CERN/1411, 22 May 1981. CERN, Geneva
- ↘ **CERN** (1981) The green book. CERN 2444. Geneva

⁵⁴ Rapport final, Situation financière du projet LEP, 30 mai 1990 : CM-P00090310-f.pdf

⁵⁵ Conséquences du projet de construction du LEP sur les activités de recherche du CERN, J.B. Adams, février 1980 : <https://cds.cern.ch/record/2258299/files/Fran%C3%A7ais.pdf>

⁵⁶ CERN Courier, Lessons from LEP, 2019 (source en anglais) : <https://cerncourier.com/a/lessons-from-lep/>

2.5.2 Le coût total et le financement du LHC

Le coût de construction du LHC connu plusieurs réévaluations au cours du projet. L'estimation initiale présentée au moment de l'approbation du projet en 1994 s'élevait à environ 2,6 milliards de francs suisses pour l'accélérateur. Le coût final de la machine atteint finalement environ 4,3 milliards de francs suisses, hors coût complet des expériences.

Dans le cas du LHC, les deux États-hôtes, la France et la Suisse, qui bénéficient des retombées économiques de proximité par rapport aux autres États membres, ont accepté de verser des contributions volontaires supplémentaires ; toutes deux ont accepté d'indexer leurs contributions à 2 % par an.

Plusieurs États non-membres du CERN contribuèrent également au financement du LHC (États-Unis, Canada, Russie, Japon, Inde, etc.), sous forme de contributions financières directes ou de contributions en nature représentant une part significative du coût du projet⁵⁷ :

- ▾ Le Japon a versé une contribution de 8,85 milliards de yens ;
- ▾ Un accord, signé en mars 1996 avec l'Inde, prévoyait une contribution à l'accélérateur LHC d'une valeur nette de 12,5 millions de dollars pour le CERN ;
- ▾ Un accord, signé avec la Russie en juin 1996, prévoyait des contributions d'une valeur nette pour le CERN de 67 millions de francs suisses respectivement pour l'accélérateur LHC et pour ses détecteurs ;
- ▾ Un accord signé avec le Canada prévoyait une contribution en nature au LHC pendant la première moitié de la période de construction d'une valeur de 30 millions de dollars canadiens.

	LEP	LHC	Source / remarques
Infrastructure et accélérateur	1,3 milliard pour la machine et les infrastructures ⁵⁸	4,332 milliards pour les infrastructures et l'accélérateur ⁵⁹	Les valeurs sont exprimées en francs suisses courants, c'est-à-dire en francs suisses des années au cours desquelles les dépenses ont été effectuées.
Détecteurs et expériences	504 millions pour le fonctionnement des expériences	Financements principalement assurés par les collaborations internationales	Comparaison délicate selon les périmètres comptables
Mise à niveau (milliards)	LEP2 (cavités supraconductrices intégrées progressivement)	HL-LHC (mise à niveau du LHC vers la haute luminosité*) : 1,2 milliard	La mise à niveau du LHC vers la haute luminosité* est en cours.

Les sommes indiquées dans le tableau ci-dessus sont en francs suisses.

⁵⁷ Site internet CERN : Contribution de 531 MUSD des États-Unis d'Amérique au projet de grand collisionneur de hadrons du CERN | CERN

⁵⁸ Rapport, situation financière du projet de LEP, 30 mai 1990, p.12 : CM-P00090310-f.pdf .

⁵⁹ Site internet, Chiffres clés du LHC | CERN : <https://home.cern/fr/resources/faqs/facts-and-figures-about-lhc>

2.6 SUIVI ET EVALUATION

De manière plus générale, les grands programmes du CERN, dont le LEP puis le LHC, ont fait l'objet d'un suivi régulier par différentes instances internes et externes : comités scientifiques, organes de contrôle financier, groupes d'experts techniques et instances intergouvernementales. Ces mécanismes visaient à examiner la cohérence scientifique des projets, leur faisabilité technique, leur calendrier, leurs coûts et leur compatibilité avec le programme global de l'Organisation.

A titre d'illustration, lors du Conseil du CERN du 14 décembre 2001, le Directeur général de l'époque, Luciano Maiani⁶⁰, avait annoncé la mise en place de cinq groupes de réflexion chargés d'examiner le coût des différents programmes scientifiques, les domaines où des économies sont possibles dans l'ensemble du Laboratoire, la restructuration et l'amélioration des outils de gestion des ressources du CERN⁶¹.

A cette occasion, un double contrôle des activités a été mis en place, à la fois interne et externe :

- ↘ Avant l'approbation du LHC, un comité d'examen externe présidé par Robert Aymar, alors Directeur des Sciences de la Matière au CEA, fut chargé d'évaluer la faisabilité technique du projet. Ses conclusions furent très positives, confirmant notamment le réalisme de la conception de la machine, la pertinence des aimants « deux-en-un » et du refroidissement à l'hélium superfluide, ainsi que la faisabilité du système cryogénique. Le comité recommanda une approbation rapide du projet.
- ↘ Le Conseil a approuvé la nomination de M. K.H. Kissler en tant que Contrôleur du programme du CERN.
- ↘ Le Conseil a aussi approuvé la création d'un **Comité d'examen externe (ERC)** chargé d'étudier deux grands domaines⁶² :
 - ↘ l'accélérateur LHC, ses zones d'expérimentation et la contribution du CERN à la construction des détecteurs ;
 - ↘ le programme scientifique du CERN qui n'est pas directement lié au LHC.

Aujourd'hui, face aux résultats du LHC, notamment la découverte du boson de Higgs*, il a été décidé de le mettre à jour via la phase à haute luminosité*, dite HL-LHC. Dans ce cadre, un comité d'examen a été constitué du Comité consultatif pour les machines du CERN (CMAC), de cinq membres supplémentaires issus de laboratoires et d'universités du monde entier, et de spécialistes dans des domaines directement liés aux principales technologies du projet HL-LHC.

Les programmes LEP puis LHC ont également consolidé un modèle original de collaboration scientifique internationale. Avec le LEP, quatre grandes expériences, ALEPH, DELPHI, L3 et OPAL, ont réuni des équipes issues de nombreux pays autour de détecteurs conçus, construits et exploités collectivement. Ce modèle s'est poursuivi et considérablement amplifié avec le LHC, dont les expériences ont mobilisé des collaborations mondiales associant universités, laboratoires nationaux, instituts de recherche, ingénieurs, techniciens et partenaires industriels.

- ↘ Dès les **années 1990**, les **collaborations ATLAS et CMS** se sont construites à l'échelle internationale : après l'arrêt du projet SSC aux États-Unis, 27 nouvelles institutions américaines rejoignirent ATLAS et 32 CMS avant la soumission des propositions techniques en décembre 1994.
- ↘ À la **fin des années 2010**, **ATLAS** réunissait 183 institutions de 38 pays, représentant plus de 200

⁶⁰ Luciano Maiani and Luisa Bonolis, "The LHC timeline: a personal recollection (1980–2012)", *European Physical Journal H* 42, 475–505, 2017.

⁶¹ Site du CERN, Le CERN réagit à l'augmentation du coût du LHC, 14 décembre 2001 : <https://home.cern/fr/news/press-release/general-cern/cern-reacts-increased-cost-completion-lhc>

⁶² Recommandation du Conseil, CERN/ CC/ 2407/ Rev : <https://cds.cern.ch/record/1189416/files/CM-P00083531-f.pdf>

instituts et près de 3000 auteurs scientifiques, sans compter les nombreux ingénieurs, techniciens et personnels administratifs indispensables au fonctionnement du détecteur. **CMS** rassemblait, de son côté, plus de 3500 scientifiques et ingénieurs issus de 201 instituts dans 45 pays.

- ↘ **Aujourd'hui**, les collaborations restent parmi les plus vastes entreprises scientifiques internationales :
 - ↘ **ATLAS** compte plus de 5500 membres et plus de 3000 auteurs scientifiques, avec des équipes réparties dans des universités et laboratoires du monde entier. La liste institutionnelle d'ATLAS indique 176 institutions dans 40 pays, correspondant à 246 instituts au total.
 - ↘ **CMS** réunit quant à elle plus de 4000 physiciens, ingénieurs, informaticiens, techniciens et étudiants, issus d'environ 240 instituts et universités dans plus de 50 pays.

Les détecteurs du LHC ont ainsi été construits selon une organisation distribuée : de nombreux composants furent développés, assemblés et testés dans les instituts participants à travers le monde avant d'être acheminés au CERN pour les tests finaux, l'intégration, l'installation et la mise en service dans les cavernes expérimentales.

Cette continuité entre LEP et LHC illustre l'un des traits distinctifs de la physique des particules contemporaine : la capacité à fédérer, sur plusieurs décennies, des compétences, des ressources et des responsabilités venues du monde entier autour d'un objectif scientifique commun.

Références

- ↘ **CERN**, page on LEP, for the four LEP experiments ALEPH, DELPHI, L3 and OPAL.
- ↘ **CORDIS/DELPHI**, for the example of 52 laboratories from 20 countries.
- ↘ **Della Negra, Jenni & Virdee**, *The Construction of ATLAS and CMS*, for the figures on ATLAS/CMS institutions and countries.
- ↘ **Jenni**, *The long journey to the Higgs boson and beyond at the LHC*, for the distributed construction/testing model and the Worldwide LHC Computing Grid.

2.7 APPORTS SCIENTIFIQUES

2.7.1 La recherche fondamentale

Le LEP a permis les avancées suivantes⁶³ :

- ↘ établir l'existence de trois familles de neutrino* ;
- ↘ contraindre indirectement la masse du quark top et du boson de Higgs grâce aux mesures de précision électrofaibles ;
- ↘ établir que la constante de couplage forte, α_s , dépend de l'énergie ;
- ↘ étudier l'évolution des constantes de couplage des interactions fondamentales avec l'énergie, et d'extrapoler cette évolution jusqu'à de très hautes énergies afin de tester les modèles d'unification des forces.

Le LEP est souvent considéré comme l'une des confirmations expérimentales les plus précises du Modèle standard*. Les expériences du LEP ont mesuré les propriétés des bosons Z et W* avec une précision sans précédent et ont confirmé avec une très grande exactitude la structure de la théorie électrofaible*. Bien que le LEP n'ait pas permis de découvrir le boson de Higgs*, il a fixé une limite inférieure sur sa masse (d'environ 114 GeV) et fortement orienté les recherches ultérieures menées au Grand collisionneur de hadrons (LHC), où le boson de Higgs* a finalement été découvert en 2012.

Le LEP a également joué un rôle majeur dans l'évolution des technologies et de l'organisation de la physique des particules. Il a contribué au développement des cavités radiofréquence* supraconductrices, des techniques de calibration de haute précision des faisceaux* et des grands détecteurs polyvalents exploités par des collaborations internationales de grande taille. Plus largement, l'ère du LEP coïncida avec la **naissance du World Wide Web au CERN**, conçu à partir de 1989 pour faciliter le partage d'informations entre scientifiques travaillant dans des institutions dispersées à travers le monde. Plusieurs infrastructures, technologies et modes d'organisation développés pour le LEP furent ensuite réutilisés ou prolongés dans le cadre du LHC.

Les premières années de collecte et d'analyse des données du LHC ont livré plusieurs résultats majeurs :

- ↘ la découverte du boson de Higgs* annoncée en 2012, qui a confirmé l'existence du mécanisme de Brout-Englert-Higgs et complété l'édifice du Modèle standard* ;
- ↘ l'absence, à ce jour, d'indice concluant de nouvelles particules ou interactions au-delà de celles décrites par le Modèle standard*, malgré de nombreuses recherches ciblant notamment la supersymétrie, la matière noire ou d'autres extensions théoriques ;
- ↘ la mise à l'épreuve du Modèle standard* dans un domaine d'énergie inédit, grâce à l'étude de collisions proton-proton* atteignant jusqu'à 13,6 TeV dans le centre de masse*⁶⁴.
- ↘ l'étude du plasma de quarks et de gluons* grâce aux collisions d'ions lourds*, permettant d'explorer un état de la matière proche de celui qui existait dans les premiers instants de l'Univers ;
- ↘ la réalisation d'un vaste programme de mesures de précision portant sur le boson de Higgs*, le quark top, la chromodynamique quantique* et de nombreux processus rares ;
- ↘ une remarquable concordance entre les données expérimentales et les prédictions théoriques, confirmant la robustesse des modèles utilisés pour décrire les collisions proton-proton* de haute énergie.

⁶³ CERN Courier, Lessons from LEP, 2019 (source en anglais) : <https://cerncourier.com/a/lessons-from-lep/>

⁶⁴ M. Mangano, The Physics Landscape of the High Luminosity LHC, The High Luminosity Large Hadron Collider, mars 2024, p. 55-66

Dans son ensemble, le LHC a donc consolidé le Modèle standard* tout en ouvrant un nouveau champ d'exploration : comprendre pourquoi ce cadre théorique, bien qu'extrêmement précis, demeure incomplet face à des questions telles que la nature de la matière noire, l'asymétrie entre matière et antimatière ou l'origine de la masse des neutrinos.

L'analyse d'une fraction seulement des données déjà fournies par le LHC – à peine 6 % de ce qui est attendu d'ici la fin de la phase HL-LHC, à la fin des années 2030 – outre la découverte du boson de Higgs*, a déjà conduit à un ensemble très vaste de mesures et de recherches, documentées dans près de 2000 articles de physique publiés par les expériences du LHC.

Cette réussite s'inscrit dans une continuité scientifique et technologique avec les programmes antérieurs du CERN. La découverte des courants neutres par Gargamelle en 1973, puis celle des bosons W et Z* par les expériences UA1 et UA2 auprès du SPS transformé en collisionneur proton*-antiproton* en 1983, avaient confirmé la solidité de la théorie électrofaible* et renforcé la nécessité de rechercher le boson de Higgs*. Le LEP prolongea cette trajectoire en mesurant avec une précision inédite les propriétés des bosons Z et W*, en confirmant les corrections radiatives électrofaibles* et en contraignant indirectement la masse du quark top* et celle du boson de Higgs*. En fixant ensuite une limite inférieure sur la masse du boson de Higgs*, **le LEP contribua à définir le terrain scientifique sur lequel le LHC allait opérer**⁶⁵.

Le LEP a également permis de développer des compétences, des technologies et des modes d'organisation, de grands détecteurs polyvalents, des collaborations internationales, un traitement massif des données, des cavités radiofréquence* supraconductrices, qui furent prolongés ou réutilisés dans le cadre du LHC. La recherche du boson de Higgs* influença fortement la conception des détecteurs ATLAS et CMS dans les années 1990, tandis que le choix d'un tunnel LEP suffisamment grand pour accueillir ultérieurement un collisionneur hadronique permit au CERN de passer d'une machine de précision électron*-positron* à une machine de découverte proton-proton*.

Aucun prix Nobel n'a été attribué directement aux expériences du LEP. Toutefois, ses résultats ont constitué l'une des validations expérimentales les plus rigoureuses de la théorie électrofaible* et ont préparé le terrain scientifique de la découverte du boson de Higgs* au LHC. Ils illustrent ainsi le rôle essentiel des machines de précision dans la construction progressive des découvertes ultérieures.

Les activités de recherche liées au LEP et au LHC ont donné lieu à plusieurs distinctions scientifiques majeures⁶⁶. Elles témoignent à la fois de l'importance des avancées théoriques, des découvertes expérimentales et du rôle des grandes collaborations internationales.

Le prix Nobel de physique 2013 a été décerné conjointement à François Englert et Peter W. Higgs « pour la découverte théorique d'un mécanisme qui contribue à notre compréhension de l'origine de la masse des particules subatomiques, mécanisme qui a récemment été confirmé par la découverte de la particule fondamentale prédite, réalisée par les expériences ATLAS et CMS du Grand collisionneur de hadrons* (LHC) du CERN ». Cette distinction consacrait le lien entre une idée théorique formulée dans les années 1960, le mécanisme de Brout-Englert-Higgs, et sa confirmation expérimentale près d'un demi-siècle plus tard grâce aux données du LHC. Elle s'inscrivait aussi dans la continuité des mesures de précision réalisées au LEP, qui avaient contribué à orienter la recherche du boson de Higgs*.

⁶⁵ Chalmers, Matthew, « The thrill of the chase », CERN Courier, 1 July 2022.

⁶⁶ Diaconu, Cristinel, and Ulrich Schwickerath, « Hidden treasures », CERN Courier, 9 September 2025.

D'autres distinctions ont reconnu plus directement le rôle des grandes collaborations expérimentales et des instruments qui ont rendu ces découvertes possibles :

- ↘ En 2013, le prix de physique des hautes énergies et des particules de la Société européenne de physique fut attribué aux collaborations ATLAS et CMS pour la découverte d'un boson de Higgs, ainsi qu'à Michel Della Negra, Fabiola Gianotti, Peter Jenni et Tejinder Virdee pour leur rôle pionnier dans la conception et la réalisation des expériences CMS et ATLAS.
- ↘ En 2017, ces trois physiciens reçurent également le prix W.K.H. Panofsky de l'American Physical Society pour leur leadership dans la conception, la construction et la réalisation des détecteurs ATLAS et CMS, déterminants pour la découverte du boson de Higgs*.

Plusieurs distinctions avaient déjà reconnu le rôle décisif des théoriciens dans l'élaboration du mécanisme de Brout-Englert-Higgs :

- ↘ Le prix de physique des hautes énergies et des particules de la Société européenne de physique fut attribué en 1997 à Robert Brout, François Englert et Peter Higgs pour leurs travaux sur la génération de masse des bosons vecteurs.
- ↘ Le prix Wolf de physique leur fut également décerné en 2004.
- ↘ En 2010, le prix J. J. Sakurai de l'American Physical Society élargit cette reconnaissance à Gerald Guralnik, Carl Richard Hagen, Tom Kibble, Robert Brout, François Englert et Peter Higgs pour leurs contributions au mécanisme de brisure spontanée de symétrie et à la génération de masse des bosons vecteurs. Ces distinctions préparent la reconnaissance plus large apportée par le prix Nobel de physique 2013, décerné à François Englert et Peter Higgs après la découverte expérimentale du boson de Higgs par ATLAS et CMS au LHC.

Le Breakthrough Prize 2025 en physique fondamentale a été attribué aux collaborations scientifiques des expériences ALICE, ATLAS, CMS et LHCb du LHC. Ce prix reconnaît l'ensemble du programme scientifique mené par les quatre grandes expériences : mesures détaillées des propriétés du boson de Higgs*, étude de processus rares et des asymétries matière-antimatière*, découverte de nouvelles particules interagissant par l'interaction forte, exploration du plasma de quarks et de gluons* dans les collisions d'ions lourds, et étude de la matière dans les conditions les plus extrêmes accessibles en laboratoire. Il souligne ainsi que le LHC n'est pas seulement l'instrument de la découverte du boson de Higgs, mais une infrastructure de recherche dont les résultats couvrent un champ très large de la physique fondamentale.

Enfin, **l'impact scientifique de ces infrastructures se prolonge au-delà de leur période d'exploitation.** L'expérience du LEP montre que des données bien préservées peuvent être ré-analysées longtemps après la fin d'un programme, à la lumière de nouvelles méthodes théoriques, de nouveaux outils logiciels et de nouvelles questions scientifiques. Près de 25 ans après l'arrêt du LEP, des analyses fondées sur des données archivées d'ALEPH continuent d'être publiées, tandis que les environnements logiciels de DELPHI et d'OPAL ont pu être partiellement restaurés. Certaines données du LEP sont aujourd'hui migrées vers des formats standardisés développés pour les futurs collisionneurs, contribuant à la préservation des données, à la formation, au développement logiciel et à la préparation de possibles programmes électron*-positron* comme le projet FCC-ee.

Au-delà des découvertes et des publications déjà produites, **les données issues des grandes expériences constituent elles-mêmes un patrimoine scientifique durable.** La préservation des données en physique des hautes énergies ne consiste pas seulement à conserver des fichiers : elle suppose aussi de maintenir l'accès aux logiciels, aux environnements de calcul, aux simulations, aux calibrations, à la documentation et aux compétences nécessaires pour refaire ou prolonger des analyses. Le rapport DPHEP souligne que les données des expériences de physique des particules sont le résultat d'un investissement financier et humain considérable, qu'elles sont souvent uniques et qu'elles peuvent encore contenir des informations non exploitées au moment de la fin de l'exploitation d'une machine. Il recommande donc de préserver non seulement les données, mais la capacité complète de les analyser

à long terme. Cette dynamique est visible dans les profils de publication de plusieurs expériences de physique des particules. Les données associées au LEP, à HERA, à BaBar, à Belle, au Tevatron ou encore à RHIC montrent que la production scientifique ne s'interrompt pas avec la fin de la prise de données : une part significative des articles est publiée plusieurs années après l'arrêt des faisceaux*, parfois grâce à des programmes structurés de préservation des données.

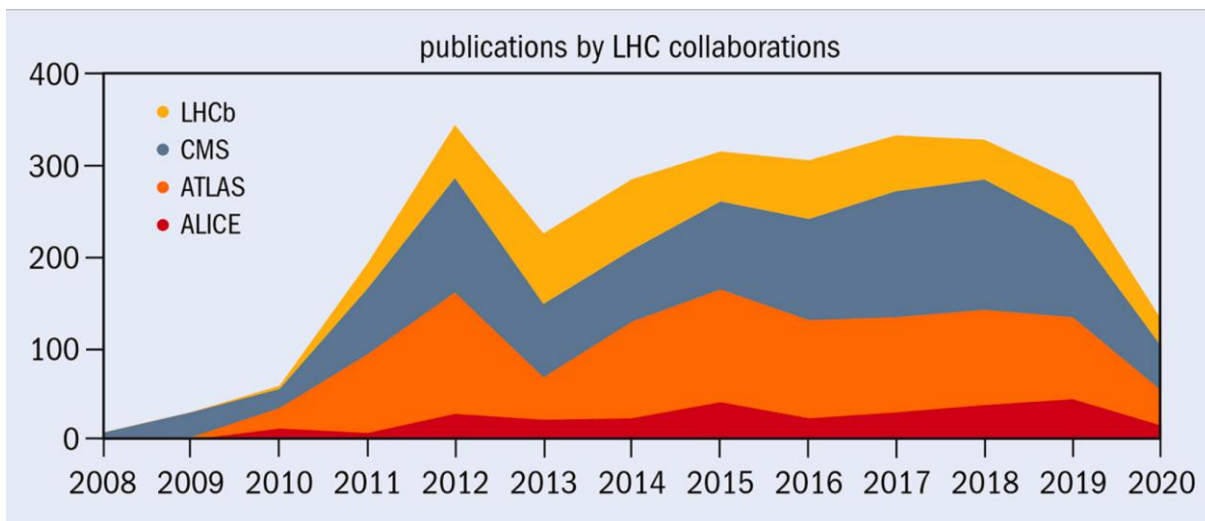
La préservation des données apparaît donc comme un moyen d'augmenter le rendement scientifique d'une infrastructure au-delà de sa période d'exploitation.

Cette logique est particulièrement importante pour le LHC et le HL-LHC. Une analyse bibliométrique a identifié 54 384 auteurs individuels associés au LHC, ayant collectivement signé 434 065 produits scientifiques uniques, dont 34 558 directement liés au LHC. Ces résultats proviennent principalement des grandes expériences ALICE, ATLAS, CMS et LHCb, mais aussi d'expériences et de collaborations plus modestes. Leur valeur scientifique ne se limite toutefois pas aux publications déjà produites : les données et les analyses du LHC pourront continuer à être réinterprétées à la lumière de nouveaux modèles théoriques, de nouvelles méthodes d'intelligence artificielle, de nouveaux outils statistiques et de cadres de réanalyse plus standardisés. Dans cette perspective, la préservation structurée des données, des logiciels et des connaissances associées constitue un élément essentiel du retour scientifique à long terme des grandes infrastructures de recherche. Cette valeur scientifique de long terme s'ajoute à une production déjà considérable, que les analyses bibliométriques permettent de mesurer.

Une analyse bibliométrique permet également de mesurer l'ampleur de l'écosystème scientifique associé au LHC. Le processus d'extraction des données a identifié 54 384 auteurs individuels associés au LHC, ayant collectivement signé 434 065 produits scientifiques uniques. Parmi ces productions, 34 558, soit environ 8 %, étaient directement liées au LHC, tandis que les autres concernaient des travaux menés dans d'autres collaborations ou expériences du CERN, ou dans des domaines de recherche sans lien direct avec le LHC. Les productions liées au LHC provenaient principalement des grandes expériences ALICE, ATLAS, CMS et LHCb, mais incluaient également des contributions issues d'expériences et de collaborations de plus petite taille. Ces chiffres illustrent à la fois la production scientifique propre du LHC et l'effet plus large de structuration d'une communauté internationale de recherche autour de cette infrastructure⁶⁷. L'analyse menée par le CERN Scientific Information Service, présentée dans le CERN Courier⁶⁸, confirme l'ampleur de cette production scientifique. Dix ans après le démarrage du LHC, les expériences avaient publié 2 852 articles, dont près de 1 000 pour CMS et 964 pour ATLAS. Ces publications se distinguent aussi par leur impact : les articles des quatre grandes expériences du LHC recevaient en moyenne 112 citations, contre 41 pour l'ensemble des articles expérimentaux indexés dans INSPIRE. Les articles d'ATLAS et de CMS annonçant la découverte du boson de Higgs* figuraient parmi les publications les plus citées de la décennie en physique des hautes énergies.

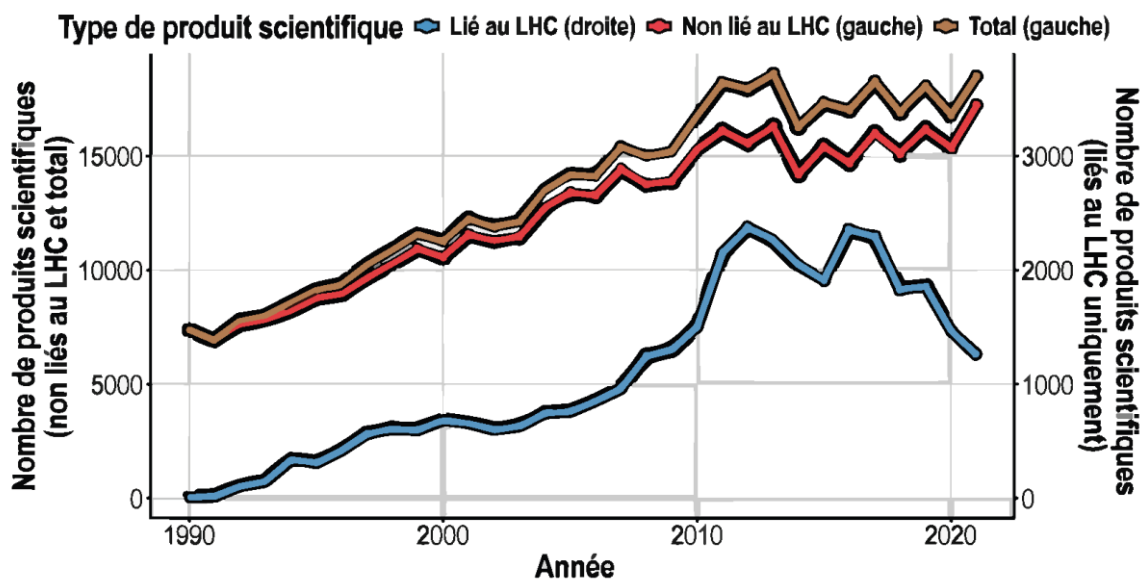
⁶⁷ Etude FCC, Socio-Economic impacts of the lepton collider-based research infrastructure, 2025 (source en anglais) : <https://zenodo.org/records/15421975>

⁶⁸ A decade in LHC publications (CERN Courier, January 2021) <https://cerncourier.com/a/a-decade-in-lhc-publications/>



Publications scientifiques liées au LHC, entre 2008 et 2020, en fonction des installations

Figure 20 : Production scientifique totale, liée et non liée au LHC (1990-2021)



Source : Giffoni, F., Sirtori, E., & Colnot, L. (2024)

Production scientifique totale issue du CERN entre 1990 et 2020, en lien ou non avec le LHC

2.7.2 La recherche appliquée

Le parti pris du CERN est de considérer que la recherche fondamentale peut déboucher sur des innovations de rupture.

En effet, les outils de base du CERN – accélérateurs et détecteurs de particules – trouvent des applications dans la vie quotidienne. Inventés pour servir à la recherche fondamentale, les accélérateurs de particules se comptent désormais par milliers dans le monde, et seul un petit pourcentage sert à la recherche fondamentale. La grande majorité de ces machines ont d'autres applications, qui vont du diagnostic médical et de la thérapie à la fabrication de puces électroniques. Dans le domaine informatique, le CERN a également permis de déboucher sur des innovations. Ainsi, les technologies du CERN ont apporté des contributions à la société, non seulement en physique, mais aussi en médecine, en santé, dans les applications environnementales et les infrastructures numériques.

D'autres découvertes sont davantage connexes et liées à la vie de la communauté scientifique au CERN. La plus connue des technologies nées au CERN est le World Wide Web, inventé par Tim Berners-Lee, initialement pour permettre le partage de données scientifiques⁶⁹. Aujourd'hui, internet connecte des milliards d'utilisateurs.

2.7.2.1 Les thérapies par faisceau de particules pour traiter les cancers

Il n'existe pas de thérapie unique efficace pour tous les cancers. Les recherches actuelles visent à élargir les possibles traitements.

Dès les années 1990, le CERN contribue au développement de l'hadronthérapie, une technique de radiothérapie de pointe utilisant des faisceaux* de protons* ou d'ions* pour traiter certains cancers. Son principe repose sur une propriété physique particulière : contrairement aux rayons X, les protons et les ions déposent l'essentiel de leur énergie à une profondeur bien définie dans les tissus, le « pic de Bragg », ce qui permet de concentrer la dose sur la tumeur tout en limitant l'exposition des tissus sains environnants. L'idée d'utiliser des faisceaux* de protons* pour traiter des cancers avait été proposée dès 1946 par le physicien Robert Wilson, mais son développement clinique a nécessité les progrès réalisés dans les accélérateurs, l'imagerie médicale, le calcul et la planification des traitements.

C'est dans ce contexte que le CERN a accueilli, à partir de 1996, l'étude PIMMS (Proton Ion Medical Machine Study)⁷⁰, menée avec la fondation TERA, MedAustron et Onkologie 2000. Cette étude visait à concevoir un synchrotron médical optimisé pour le traitement par protons et ions carbone. Le concept PIMMS, ensuite amélioré par la fondation TERA et mis en œuvre avec l'apport de l'INFN, a constitué l'une des bases du Centre national d'hadronthérapie oncologique (CNAO) à Pavie ; il a également inspiré MedAustron, à Wiener Neustadt, centre médical et de recherche consacré à la thérapie par protons* et ions* carbone. Ces centres illustrent la manière dont les compétences du CERN en accélérateurs, aimants, contrôle des faisceaux* et formation de personnel ont pu être transférées vers des infrastructures médicales spécialisées. Ces deux centres figurent parmi les rares en Europe à proposer protons* et ions* carbone et ont déjà traité des milliers de patients⁷¹.

Le rôle du CERN ne se limite pas à la conception de machines. Avec la création d'ENLIGHT en 2002, dont le bureau de coordination est hébergé au CERN, l'Organisation a contribué à structurer un réseau européen associant médecins, radiobiologistes, ingénieurs, informaticiens et industriels autour du **développement de l'hadronthérapie**. Ce réseau a favorisé la formation, l'accès transnational aux centres de traitement, l'élaboration de protocoles communs et plusieurs projets européens consacrés à l'amélioration des traitements, de l'imagerie en ligne, de la dosimétrie et des méthodes de planification.

⁶⁹ Plus de détails sur le site du CERN : <https://home.cern/fr/science/computing/birth-web>

⁷⁰ Badano, L. et al., Proton-Ion Medical Machine Study (PIMMS) Report, CERN, 2000.

⁷¹ Impact of CERN technologies, CERN

Les applications médicales issues de la physique des particules ne concernent pas seulement les traitements par faisceaux*, mais aussi **l'imagerie, la dosimétrie, la simulation et l'analyse de données**. Elles reposent sur trois grands domaines d'expertise développés au CERN pour ses accélérateurs et ses expériences : la production et le contrôle de faisceaux* de particules, les détecteurs de rayonnements et les outils de calcul scientifique. La tomographie par émission de positons*, ou PET scan, en est un exemple important : elle utilise l'annihilation d'un positon avec un électron*, produisant deux photons* détectés en coïncidence par un anneau de détecteurs, afin de reconstruire en trois dimensions l'activité métabolique des tissus. Dès les années 1970, des travaux menés au CERN, notamment par David Townsend en collaboration avec l'Université de Genève et l'Hôpital cantonal de Genève, contribuèrent à la reconstruction d'images PET et au développement de la PET en trois dimensions.

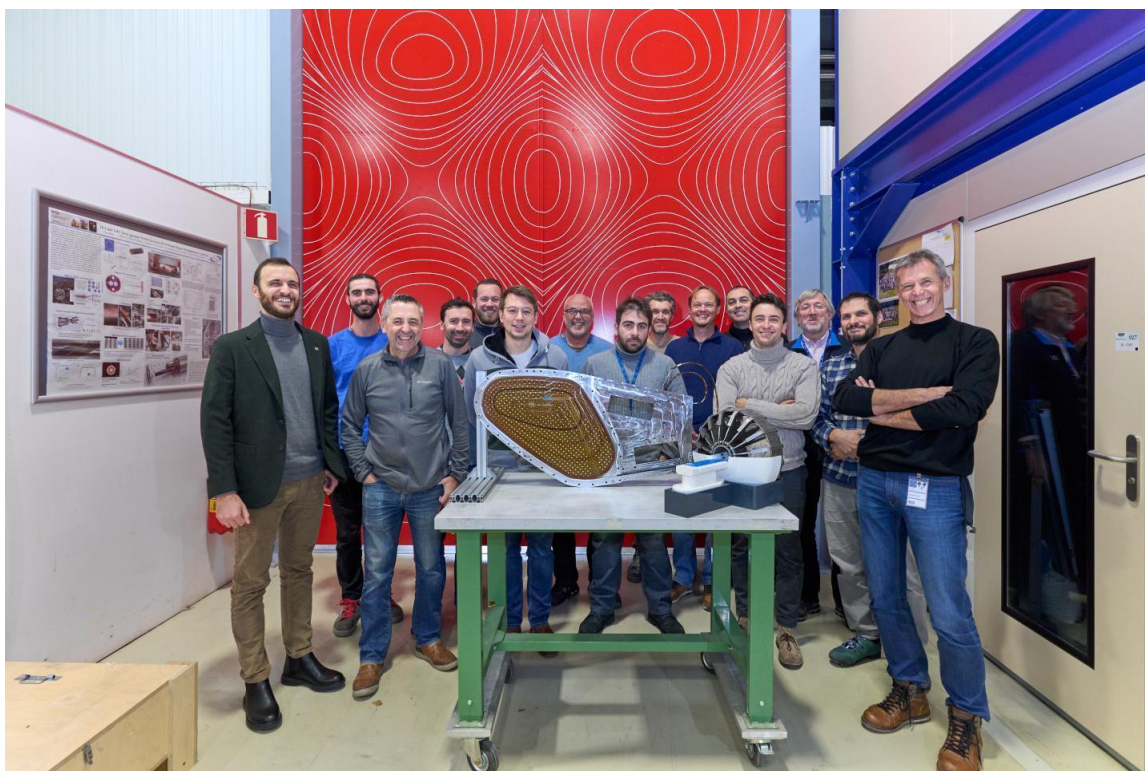
Plus largement, les technologies de détection issues de la physique des particules – comme les chambres proportionnelles multifils de Georges Charpak, les détecteurs hybrides à pixels de la collaboration Medipix ou les cristaux scintillants développés dans le cadre de Crystal Clear – ont trouvé **des applications en radiologie, médecine nucléaire et imagerie médicale**. Cette continuité montre que les retombées médicales liées au CERN ne procèdent pas d'un transfert direct depuis une seule machine comme le LEP ou le LHC, mais d'un écosystème technologique plus large, fondé sur les accélérateurs, les détecteurs, l'électronique rapide, la reconstruction d'images et le traitement de grandes quantités de données⁷².

Aujourd'hui, le CERN continue d'apporter son expertise et collabore à la nouvelle génération de machines : plus compactes, moins coûteuses et plus polyvalentes. Pour obtenir les meilleurs résultats, l'hadronthérapie nécessite un dispositif complexe, appelé portique, que l'on fait pivoter autour du patient et qui est équipé d'aimants guidant avec précision les faisceaux* d'hadrons* sur les tumeurs. Malheureusement, la taille et le coût de ces machines constituent un obstacle au développement de ce type de traitement. S'appuyant sur son savoir-faire en matière d'aimants supraconducteurs, une équipe du CERN a mis au point un nouveau portique supraconducteur plus léger, appelé GaToroid, qui devrait être beaucoup plus compact que les dispositifs actuels tout en conservant la même précision. Contrairement aux portiques rotatifs traditionnels, le GaToroid peut envoyer des faisceaux* de particules dans différentes directions sans qu'il soit nécessaire de déplacer le patient ou les aimants. Il utilise des bobines supraconductrices compactes placées à différents angles autour du patient afin de créer un champ magnétique toroïdal stable capable de diriger des faisceaux* de particules sur une tumeur, dans n'importe quelle direction, protégeant le patient des champs magnétiques parasites.

Le CERN a aussi transféré son savoir-faire vers des accélérateurs linéaires compacts, intégrés dans un système innovant de protonthérapie. Le CERN, le Centre Hospitalier Universitaire Vaudois et THERYQ travaillent à construire un dispositif médical d'électrons* de très haute énergie compatible avec la radiothérapie FLASH dans les prochaines années⁷³. Contrairement à la radiothérapie traditionnelle, qui veut que les différentes doses du traitement soient administrées séquentiellement depuis différentes directions, avec de longues pauses lors desquelles le portique rotatif doit être ajusté, la radiothérapie FLASH administre simultanément la totalité de la dose, en 100 millisecondes, depuis toutes les directions.

⁷² Dosanjh, Manjit, Manuela Cirilli, Steve Myers and Sparsh Navin, "Medical Applications at CERN and the ENLIGHT Network", *Frontiers in Oncology*, vol. 6, article 9, 2016. DOI: 10.3389/fonc.2016.00009.

⁷³ Ibidem



L'équipe qui a conçu, construit et testé l'aimant de démonstration pour le projet GaToroid, à côté d'une version à l'échelle 1:3 de celle-ci. De gauche à droite : Enrico Felcini, Cedric Urscheler, Juan Carlos Perez, Francois-Olivier Pincot, Pierre-Antoine Contat, Melvin Liebsch, Ahmed Benfkhi, Mariano Pentella, Gregory Maury, Sébastien Clement, Carlo Petrone, Gianluca Vernassa, Gijs de Rijk, Ariel Haziot, Luca Bottura. (Image : M. Cavazza/CERN)

2.7.2.2 L'imagerie médicale

Les technologies du CERN contribuent également à l'**amélioration de l'imagerie médicale**, en particulier grâce aux développements réalisés dans le domaine des détecteurs de particules. Les expériences de physique des hautes énergies ont nécessité des instruments capables de localiser avec une très grande précision le passage de particules, de mesurer leur énergie, d'enregistrer des signaux très rapides et de reconstruire des événements complexes à partir de millions de mesures. Ces mêmes principes se retrouvent dans plusieurs techniques d'imagerie médicale : détecter des photons ou des particules, mesurer leur énergie ou leur trajectoire, puis reconstruire une image exploitable pour le diagnostic.

La **tomographie par émission de positons***, ou PET scan, illustre ce lien de manière particulièrement claire : elle repose sur la détection en coïncidence de deux photons produits lorsqu'un positon s'annihile avec un électron, grâce à des détecteurs disposés autour du patient. Dès les années 1970, des travaux menés au CERN, notamment par David Townsend en collaboration avec l'Université de Genève et l'Hôpital cantonal de Genève, contribuèrent à la reconstruction d'images PET et au développement de l'imagerie PET en trois dimensions.

D'autres développements issus des détecteurs de physique des particules ont ensuite nourri l'imagerie médicale. Les cristaux scintillants étudiés pour les calorimètres des expériences du LHC ont été explorés par la collaboration Crystal Clear pour de nouveaux systèmes d'imagerie, notamment en PET. Les détecteurs hybrides à pixels, développés pour répondre aux exigences des expériences du LHC, ont donné naissance à la famille Medipix/Timepix, capable de compter individuellement les photons et de mesurer leur énergie. Cette approche a ouvert la voie à l'imagerie X spectrale, ou *photon-counting*, permettant de produire des images à haute résolution et de mieux distinguer différents tissus ou matériaux. La puce Medipix3⁷⁴ a notamment été intégrée dans des scanners CT développés par MARS

⁷⁴ P. Charitos, « In discussion with Michael Campbell: Unpacking the Medipix/Timepix Revolution », EP News, CERN, 10 décembre 2024.

Bioimaging pour produire des images en couleur à haute définition.

Ces exemples montrent que l'apport du CERN à l'imagerie médicale ne se limite pas à une innovation électronique particulière. Il repose plus largement sur l'ensemble d'un savoir-faire développé pour les grands détecteurs : capteurs, matériaux scintillants, électronique de lecture rapide, géométrie des détecteurs, reconstruction d'images, simulation et traitement de grands volumes de données. C'est cette continuité entre instrumentation de physique des particules et instrumentation médicale qui explique une partie importante des retombées du CERN dans le domaine de la santé⁷⁵.

2.7.2.3 Les collaborations avec l'industrie

Le CERN maintient des liens étroits avec la Commission européenne et de nombreux acteurs industriels, comme en témoignent plus de 81 collaborations de transfert de connaissances en cours, incluant des projets de R&D, des licences, du conseil et des accords de copropriété⁷⁶. Ces coopérations s'inscrivent dans un vaste écosystème de transfert de connaissances couvrant notamment les technologies des accélérateurs, les aimants supraconducteurs, la cryogénie, les détecteurs de particules, les matériaux avancés, le traitement des données et les applications médicales.

Le CERN collabore avec de nombreux partenaires industriels dans le cadre de **projets de recherche et développement, de licences technologiques, de prestations de conseil et d'accords de copropriété intellectuelle**. En 2025, plus de 700 accords de transfert de connaissances avaient été signés depuis 2011. Les études menées auprès des fournisseurs du CERN montrent que ces collaborations favorisent l'innovation industrielle : les entreprises ayant obtenu leur première commande du CERN entre 2016 et 2024 ont connu, en moyenne, une augmentation de 15 % de leur portefeuille de brevets, de 14 % de leur chiffre d'affaires et de 13 % de leur emploi par rapport à des entreprises comparables n'ayant pas travaillé avec le CERN.

Plusieurs technologies développées initialement pour les besoins de la physique des particules ont trouvé des applications dans d'autres secteurs. Les puces de lecture Medipix, développées au CERN pour les détecteurs de particules, sont aujourd'hui utilisées dans l'imagerie médicale, la surveillance des radiations spatiales, certaines applications industrielles et la conservation du patrimoine culturel. Dans le domaine médical, l'expertise du CERN en technologies des accélérateurs a également contribué au développement de centres d'hadronthérapie tels que MedAustron en Autriche et le CNAO en Italie, spécialisés dans le traitement de certains cancers par faisceaux* de protons* et d'ions*.

CERN et Airbus UpNext évaluent l'usage de technologies supraconductrices et cryogéniques pour des avions hybrides/électriques plus légers et efficaces, notamment avec stockage d'hydrogène liquide. Des systèmes de tests de matériaux à très basse température, issus du CERN, sont utilisés par Applus+ pour des composites potentiellement adaptés aux réservoirs.

Le CERN collabore aussi avec ITER sur aimants supraconducteurs, cryogénie et vide. Avec SuperNode, il développe une nouvelle isolation pour câbles supraconducteurs intégrables aux réseaux terrestres et sous-marins.

Certaines installations du CERN sont utilisées par des partenaires extérieurs pour des recherches dépassant le cadre de la physique des particules. L'installation CHARM permet par exemple de tester des équipements électroniques dans des environnements radiatifs comparables à ceux rencontrés dans l'espace ; elle a notamment été utilisée pour des projets liés aux missions spatiales européennes. L'installation CLEAR est utilisée à la fois pour des recherches en physique des faisceaux*, pour l'étude des effets des radiations spatiales, notamment dans le cadre de missions de l'Agence spatiale européenne (ESA), et pour des recherches sur de nouvelles techniques de radiothérapie.

⁷⁵ Ibidem

⁷⁶ Donnée transmise par la Direction "Entrepreneurship & Innovation Networks" au CERN

Le CERN a également joué un rôle important dans le développement d'outils numériques ouverts largement utilisés dans la recherche scientifique internationale. La plateforme Zenodo, développée avec le programme européen OpenAIRE, permet l'archivage et le partage libre de publications scientifiques et de données de recherche. Le logiciel ROOT, conçu pour l'analyse de grands volumes de données scientifiques, a trouvé des applications dans des domaines aussi variés que la finance, la surveillance des marchés ou l'analyse de données complexes. La plateforme Indico, développée au CERN pour l'organisation de conférences scientifiques, est aujourd'hui utilisée dans de nombreux pays et institutions de recherche.

Cette capacité à transformer des avancées scientifiques et technologiques en bénéfices plus larges pour la société est également illustrée par les activités de transfert de connaissances du CERN. Le rapport Highlights from CERN's 2025⁷⁷ knowledge transfer initiatives présente une sélection de ces activités et indique qu'en 2025, 89 contrats de transfert de connaissances ont été signés, dont 32 accords de R&D collaborative et 28 licences, avec une majorité de partenaires industriels.

Les enquêtes menées auprès des partenaires d'innovation du CERN mettent en évidence les bénéfices suivants⁷⁸ :

- ▾ 8 partenaires sur 10 ont accru leurs connaissances technologiques et leurs capacités de résolution de problèmes.
- ▾ Plus de 70 % ont développé de nouvelles méthodologies et de nouveaux instruments pour le développement de produits.
- ▾ Plus de 75 % ont signalé une amélioration des compétences du personnel après la collaboration⁷⁹.

2.7.2.4 Science ouverte et écosystème d'innovation

Le CERN promeut l'innovation ouverte : la quasi-totalité de ses logiciels est open source. Le principe fondamental de la philosophie open source est que les bénéficiaires d'une technologie doivent avoir accès à tous ses éléments constitutifs, comme le code logiciel, les schémas électroniques et les conceptions mécaniques, afin de pouvoir l'étudier, la modifier et la redistribuer à d'autres. Depuis la mise à disposition du logiciel du World Wide Web selon un modèle open source en 1994, le CERN est continuellement un pionnier dans ce domaine, soutenant le matériel open source (avec la licence CERN Open Hardware), l'accès ouvert (avec le consortium SCOAP pour l'édition en libre accès en physique des particules) et les données ouvertes (avec le portail Open Data pour les expériences du LHC)⁸⁰.

Le portail CERN Open Data témoigne de la politique du CERN en matière d'accès ouvert et de données ouvertes. Il permet aux expériences du LHC de partager leurs données avec un double objectif : servir la communauté scientifique, y compris les chercheurs extérieurs aux équipes expérimentales du CERN ainsi que les citoyens scientifiques, et répondre aux besoins de formation et d'enseignement grâce à des ressources spécialement sélectionnées. Les premiers articles fondés sur des données issues du portail CERN Open Data ont été publiés.

Le CERN a également investi, avec un cofinancement de la Commission européenne, dans Zenodo, un dépôt gratuit pour l'archivage des données, des logiciels et d'autres artefacts de recherche. Conçu pour un usage au-delà de la communauté de la physique des hautes énergies, Zenodo s'appuie sur la longue tradition et l'expertise du CERN en matière de partage et de préservation des connaissances scientifiques au bénéfice de tous. Hébergé au CERN, Zenodo offre à l'ensemble de la communauté scientifique la possibilité de stocker ses données dans un environnement non commercial et de les mettre librement à disposition de la société⁸¹.

⁷⁷ CERN, Highlights from CERN's 2025 knowledge transfer initiatives, CERN Knowledge Transfer, 2025 : <https://kt-report-2025.web.cern.ch/>

⁷⁸ Ibidem

⁷⁹ CERN Knowledge Transfer Group, CERN Knowledge Transfer Highlights 2025, CERN, Geneva, 2025. CERN Knowledge Transfer Highlights 2025

⁸⁰ Site internet du CERN, Open source for open science (source en anglais) : <https://home.cern/science/computing/open-source-open-science>

⁸¹ Ibidem

[Open Research Europe \(ORE\)](#), plateforme à but non lucratif de publication en libre accès, sera accueillie au CERN à l'automne 2026⁸². Lancée par la Commission européenne en 2021 et soutenue par un groupement d'organismes de financements nationaux représentant onze États membres du CERN, ORE a pour objectif de faciliter une diffusion rapide et transparente de la recherche financée par fonds publics. Destinée à l'origine exclusivement à la recherche financée par les programmes Horizon 2020 et Horizon Europe, la plateforme ORE servira également désormais de voie de publication gratuite pour tous les auteurs de pays dont les organismes de financement nationaux participent au groupement de financement. L'accueil de la plateforme au sein du Laboratoire ayant été approuvé par le Conseil du CERN en décembre 2025, le CERN fournira l'infrastructure technique et opérationnelle pendant une phase pilote de cinq ans, étant entendu que la gouvernance du système sera assurée par le groupement ORE.

⁸² Site du CERN, Le CERN va accueillir la principale plateforme de publication en libre accès en Europe, 25 mars 2026 : <https://www.home.cern/fr/news/news/knowledge-sharing/cern-host-flagship-european-open-access-publishing-platform>



3. AMENAGEMENT DU TERRITOIRE ET IMPACTS SOCIO-ECONOMIQUES

3.1 INTÉGRATION TERRITORIALE

La réalisation d'un ouvrage nécessite la plupart du temps l'acquisition des terrains nécessaires à son implantation. Le CERN n'est pas propriétaire des terrains qu'il occupe. Ces terrains sont mis à sa disposition par les États (France et Suisse) sur le territoire desquels il est implanté⁸³. Il n'y a pas eu d'acquisition à l'échelle de l'ouvrage. A titre de comparaison, la réalisation du Supersynchrotron à protons* (SPS) a conduit à l'achat par les États hôtes de 68 ha en Suisse et 412 ha en France.

Le LEP quant à lui, avec une circonférence de l'ordre de 27 km, compte tenu de sa réalisation souterraine profonde, n'a pas nécessité d'acquisitions de surface sur son tracé, hormis les secteurs situés à l'aplomb des puits d'accès au tunnel. Il y a huit points d'accès dont un en Suisse et sept sur territoire français. Les superficies à mobiliser se sont réparties comme suit :

PA1 en Suisse sur terrain appartenant à la Confédération	
PA2 – commune de Sergy	3,8 ha
PA3 – commune de Crozet	2,4 ha
PA4 – commune d'Echenevex	3,0 ha
PA5 – commune de Cessy	2,0 ha
PA6 – commune de Versonnex	5,0 ha
PA7 – commune d'Ornex	1,3 ha
PA8 – commune de Ferney-Voltaire	3,5 ha

Dans l'ensemble, les emprises de chantier étaient incluses dans les limites des terrains acquis par l'État hôte pour les besoins des aménagements de surface (points 2, 3, 4, 5 et 7). Pour y parvenir, le CERN avait imposé aux entreprises de situer leurs installations centrales sur les terrains de la future zone d'activité intercommunale de Saint-Genis-Pouilly où le CERN prenait sa charge les premiers aménagements de viabilité.

Quatre exceptions d'occupations temporaires de terrains sont toutefois à noter :

- > Au voisinage du point 1, sur le territoire de la commune de Préveessin, pour l'installation du chantier du PGC 1. Cette installation provisoire avait été faite pour la durée des travaux sur un terrain agricole de 1,5 ha. La remise en état était réalisée après travaux.
- > Au voisinage du point 4, sur le territoire de la commune d'Echenevex, pendant la réalisation d'un puits d'accès pour le personnel, une superficie de 0,5 ha avait été occupée temporairement et serait remise en état une fois les travaux achevés.
- > Au voisinage du PA6, mais en Suisse, 0,5 ha de terrain agricole faisant aussi l'objet d'une

⁸³ Etude d'impact 1982, p. 97-99

occupation temporaire.

- > Enfin, à proximité du PA8, les installations de chantier débordant des terrains du CERN. 0,8 ha étant occupés provisoirement sur des terrains destinés à la réalisation d'une future zone artisanale à Ferney-Voltaire.

La réutilisation du tunnel du LEP pour le LHC a permis de limiter l'impact foncier⁸⁴.

En France, l'acquisition de 18,4 ha complémentaires a été nécessaire pour sa réalisation. Comme par le passé, ces terrains ont été acquis par l'Etat français. Les procédures liées à la déclaration d'utilité publique (DUP) ont été utilisées le cas échéant. À la suite de la DUP, le Plan d'occupation des sols (POS) de chaque commune concernée a été mis en conformité avec la nouvelle affectation des terrains et leur classement est modifié en conséquence.

En Suisse, les terrains nécessaires à la réalisation du projet LHC ont été mis à la disposition du CERN par la Confédération suisse à partir de mai 1996.

Terrains à acquérir en surface par commune	
Commune	Surface en m ²
Crozet	1 633
Echenevex	7 245
Cessy	156 498
Versonnex	19 510
Total	184 886

Le LHC n'a entraîné que peu d'acquisitions en tréfonds (sous-sol) puisqu'il réutilisait entièrement le tunnel construit pour le LEP. Seuls 5,3 hectares ont été acquis en tréfonds pour couvrir les ouvrages souterrains complémentaires.

⁸⁴ CERN (1997) Projet LHC : étude d'impact sur l'environnement, Chapitre "Impact foncier", <<https://cds.cern.ch/record/348945?ln=en>>, p. 290

Terrains à acquérir en tréfonds par commune	
Commune	Surface en m ²
Saint-Genis-Pouilly	32 400
Versonnex	20 900
Total	53 300

Une seule servitude a été nécessaire pour l'ensemble du projet. Elle couvre le tracé de la canalisation d'évacuation des eaux claires du Point 5 à Cessy, du site du CERN jusqu'à son débouché dans l'Oudar, qui coule au nord-est du site.

Servitudes pour canalisations par communes		
Commune	Servitude	Longueur en mètres linéaires
Cessy	Canalisation	250
Versonnex	<ul style="list-style-type: none"> > Fossé à ciel ouvert > Canalisation 	<ul style="list-style-type: none"> > 800 > 200
Total	1205	

Ces maîtrises foncières ont débouché sur des usages permanents. La réalisation du LEP et du LHC a permis la **création de deux plans d'eau permanents** :

- > A l'occasion de la réalisation du LEP, au niveau du Point 6 à **Versonnex** ;
- > A l'occasion de la réalisation du LHC : un plan d'eau permanent au lieu-dit Les Mouilllets, en aval du site du Point 5 de **Cessy**, sur la zone de dépôt de déblais située à cheval sur le territoire des communes de Cessy et de Versonnex (un niveau minimum d'eau dans le plan d'eau est garanti grâce à l'apport régulier d'eau de bonne qualité en provenance du drainage du tunnel)⁸⁵.

⁸⁵ Posters de présentation du LHC, p. 16

3.2 EMPLOIS ET ÉCONOMIE LOCALE

3.2.1 Concernant le LEP

Le nombre de salariés du CERN est resté stable, voire a légèrement diminué entre 1982 et 1988. En revanche, les effectifs des entreprises impliquées dans la construction ont augmenté progressivement de fin 1982 à fin 1984, pour atteindre un pic d'environ 1 500 personnes en 1985-1986. Cette hausse concernait à la fois le génie civil et les autres métiers techniques (mécanique, tuyauterie, électricité, électromécanique, électronique). Après le pic, une décroissance sur environ deux ans a ramené les effectifs à une stabilité de 300 à 400 personnes, niveau dépendant des développements futurs⁸⁶.

Membres du personnel, chercheurs associés et collaborateurs rémunérés par catégorie professionnelle (fin 1982-1983)						
Tableau en anglais						
	1982			1983		
Professionnel Catégorie	Staff mem- bers	Fellows and paid asso- ciates	Total CERN	Staff mem- bers	Fellows and paid asso- ciates	Total CERN
	No. %	No.	No. %	No. %	No.	No. %
Research phy- sicists	101 2,86	205	306 8,01	97 2,81	212	309 8,22
Scientific and engin. work	701 19,85	73	774 20,27	717 20,72	80	797 21,21
Technical work	1177 33,33	2	1179 30,87	1159 33,57	4	1163 30,96
Manual work, crafts and trades	982 27,81	-	982 25,71	918 26,59	-	918 24,43
Office and adm. work	570 16,74	8	578 15,13	561 16,25	9	570 15,17
TOTAL	3 531 100%	288	3 819 100%	3 452 100%	305	3 757 100%

⁸⁶ Etude d'impact du projet LEP sur l'environnement, 1982, p. 144

Pour la phase d'exploitation, à partir de 1989, la répartition est la suivante :

Nombre total de personnel par division et statut au 31 décembre 1989									
Tableau en anglais									
Division	Staff members	Fellows	Paid Associations		Students	Appren-tices	Total CERN	Unpaid associates	
			Member states	Non Member states				Member states	Non Member states
DG	23						23	2	
AG	108						108	2	
TH	47	29	12	11	1		100	20	6
EP	380	69	55	96	17		617	4 394	1 166
EF	375	23	10	3	19		430	63	26
DD	256	15	1	4	13		289	6	7
PS	427	15	1	1	12		456	19	6
LEP	482	8	3	3	45		541	6	4
SPS	397	14		7	33		454	14	2
ST	453	2		1	8		464		
TIS	167	2		1	6		176		
FI	92						93		
PE	66					27	93	3	
Totals	3 273	177	86	127	154	27	3 844	4 529	1 217

Note: Departures on 31st December are not deducted from end year strength

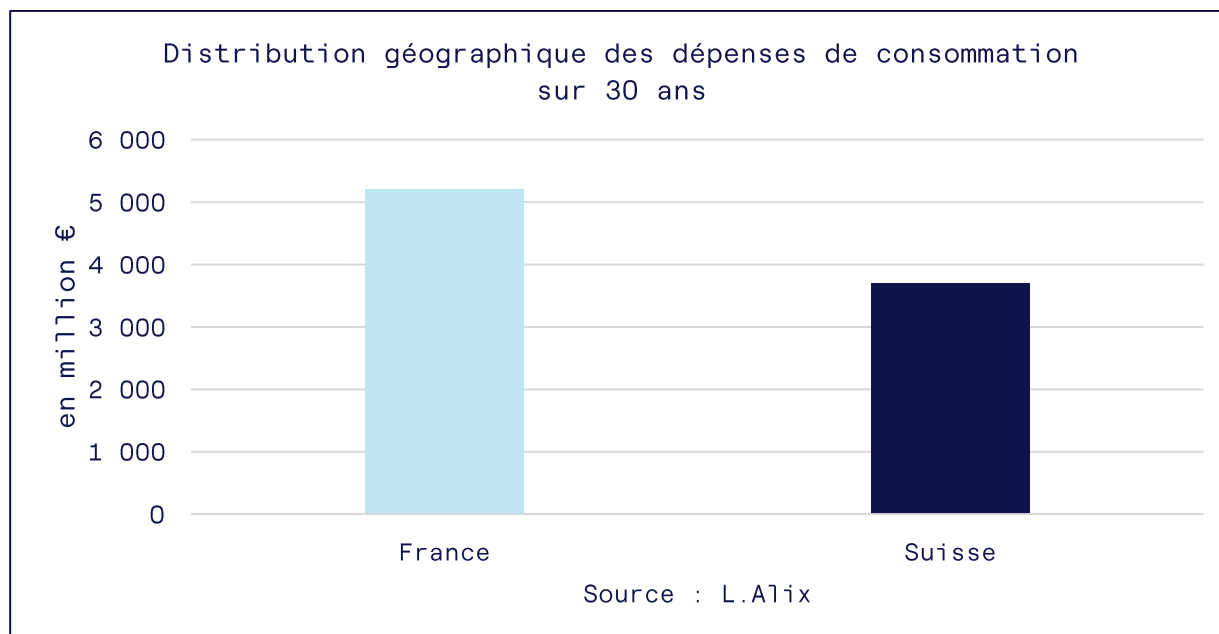
Profitant des retombées économiques du LEP, un certain nombre de communes ont créé un **syndicat à vocation unique (SIVU) pour lancer une zone d'activité intercommunale**, située sur le territoire de la commune française de **Saint-Genis-Pouilly**. Le CERN s'est engagé à demander aux entreprises intervenant sur le projet LEP d'établir leurs installations centrales sur la zone intercommunale. Cet engagement a été pris sous réserve que les conditions économiques faites au CERN pour l'utilisation de la zone auront été jugées acceptables. Sous cette même réserve, le CERN s'est engagé à équiper une première tranche de cette zone pour l'accueil des entreprises travaillant pour le projet LEP.

Bien qu'à long terme le projet LEP ne soit pas créateur d'emplois industriels, il a cependant constitué l'occasion favorable pour le Pays de Gex de se doter de l'infrastructure capable d'accueillir des industries s'établissant de façon plus durable et dont le CERN ne serait pas le client exclusif. En cela, le CERN apporte sa contribution à la solution d'un problème important pour les populations environnantes : le développement de l'emploi industriel dans les années à venir⁸⁷.

⁸⁷ Etude d'impact du projet LEP sur l'environnement, 1982, p. 146

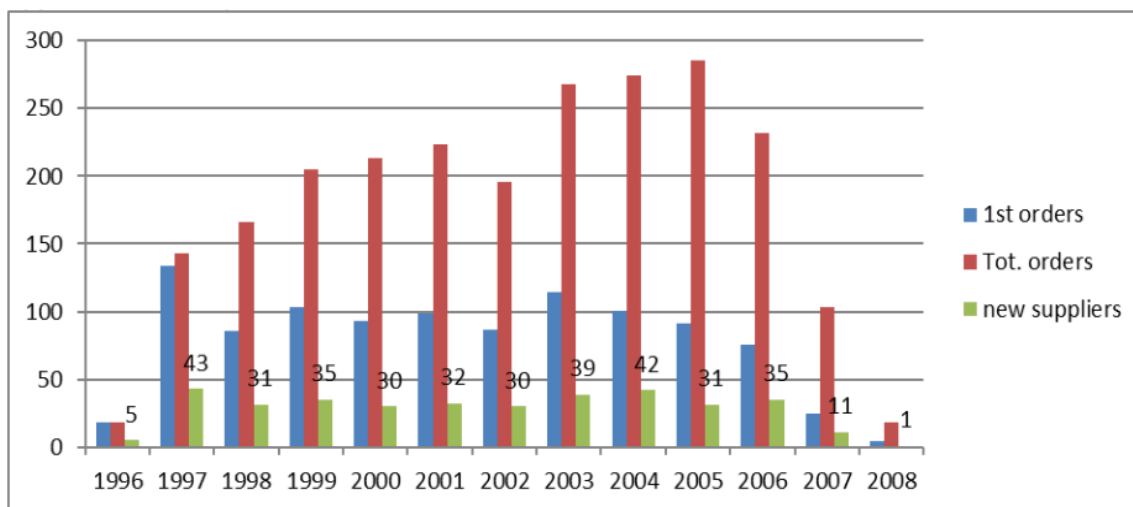
3.2.2 Concernant le LHC/HL-LHC

Les retombées socio-économiques associées au programme LHC/HL-LHC dépassent largement le seul cadre scientifique. Les études et rapports institutionnels du CERN mettent en évidence des effets liés à la formation de capital humain, aux transferts technologiques vers l'industrie, aux collaborations avec des entreprises de haute technologie, ainsi qu'aux retombées culturelles, touristiques et territoriales générées par les activités du laboratoire. Selon les données du CERN, plusieurs milliers de scientifiques, ingénieurs, étudiants et personnels techniques vivent dans la région franco-genevoise et y génèrent des dépenses directes durant toute la période d'exploitation du programme LHC/HL-LHC. Les analyses socio-économiques du CERN soulignent également l'importance des bénéfices indirects liés aux compétences acquises par les jeunes chercheurs, aux innovations industrielles issues des collaborations technologiques et à l'attractivité internationale du territoire.



Environ 80 % de l'effectif total du CERN participe à ses programmes principaux (les collisionneurs de particules LHC et HL-LHC). En effet, tous les membres du personnel ne travaillent pas à 100 % sur les collisionneurs de particules et leurs expériences, mais ils assurent le bon fonctionnement d'une plateforme au service de plusieurs programmes. Ainsi, le personnel travaillant sur les accélérateurs de particules veille généralement à l'exploitation et à la maintenance de l'ensemble des accélérateurs et des infrastructures techniques, y compris le collisionneur de particules et toute la chaîne d'injecteurs* nécessaire à son fonctionnement.

À titre d'exemple, selon les données internes du CERN, 20 % du personnel travaille pour des expériences qui ne sont pas liées au programme de recherche principal, 24 % œuvrent dans des secteurs qui garantissent le bon fonctionnement de l'ensemble des infrastructures de recherche, y compris le collisionneur de particules, et 56 % sont rattachés aux expériences du collisionneur de particules. Cela nous conduit à 80 % des personnes considérées comme actives au sein des infrastructures et des expériences liées au collisionneur de particules.



Répartition annuelle des commandes d'approvisionnement du LHC, des premières commandes passées à un fournisseur et des nouveaux fournisseurs

Références

- ↘ **Leslie Alix, Johannes Gutleber**, *Tracing Different Types of Local Economic Benefits of RIs: The Case Study of LHC*, in Johannes Gutleber & Panos Charitos (dir.), *The Economics of Big Science 2.0*, Springer, Cham, 2025.
 DOI: 10.1007/978-3-031-60931-2_4
- ↘ **Andrea Bastianin, Massimo Florio et al.**, *Social Cost-Benefit Analysis of the HL-LHC*, CERN-ACC-2018-0014, CERN, Genève, 2018.
- ↘ **Massimo Florio, Stefano Forte, Emanuela Sirtori**, "Forecasting the Socio-Economic Impact of the Large Hadron Collider: a Cost-Benefit Analysis to 2025 and Beyond", *Physical Review Special Topics – Accelerators and Beams*, 2016.
- ↘ **Johannes Gutleber, Panos Charitos (dir.)**, *The Economics of Big Science 2.0*, *The Economics of Big Science 2.0*, Springer, Cham, 2025.
- ↘ **CERN**, *The Value of CERN – Economic and Societal Impact of CERN Activities*, CERN, Genève, 2019.
- ↘ **CERN Knowledge Transfer Group**, *CERN Knowledge Transfer Highlights 2025*, CERN, Genève, 2025.
- ↘ **V. Nilsen**, "Knowledge transfer at CERN", *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 112, 2016, pp. 113–118.
- ↘ **Erica Delugas, Francesco Giffoni, Emanuela Sirtori, Johannes Gutleber**, *The Human Capital Accumulation at Research Infrastructures*, 2025

3.3 MOBILITÉ

Les besoins routiers liés au chantier du LEP étaient de trois ordres qui se complètent :

- > Les liaisons chantiers de génie civil – décharges,
- > Les liaisons liées à l'aménagement et au montage de la machine,
- > Enfin, les liaisons nécessaires à l'exploitation.

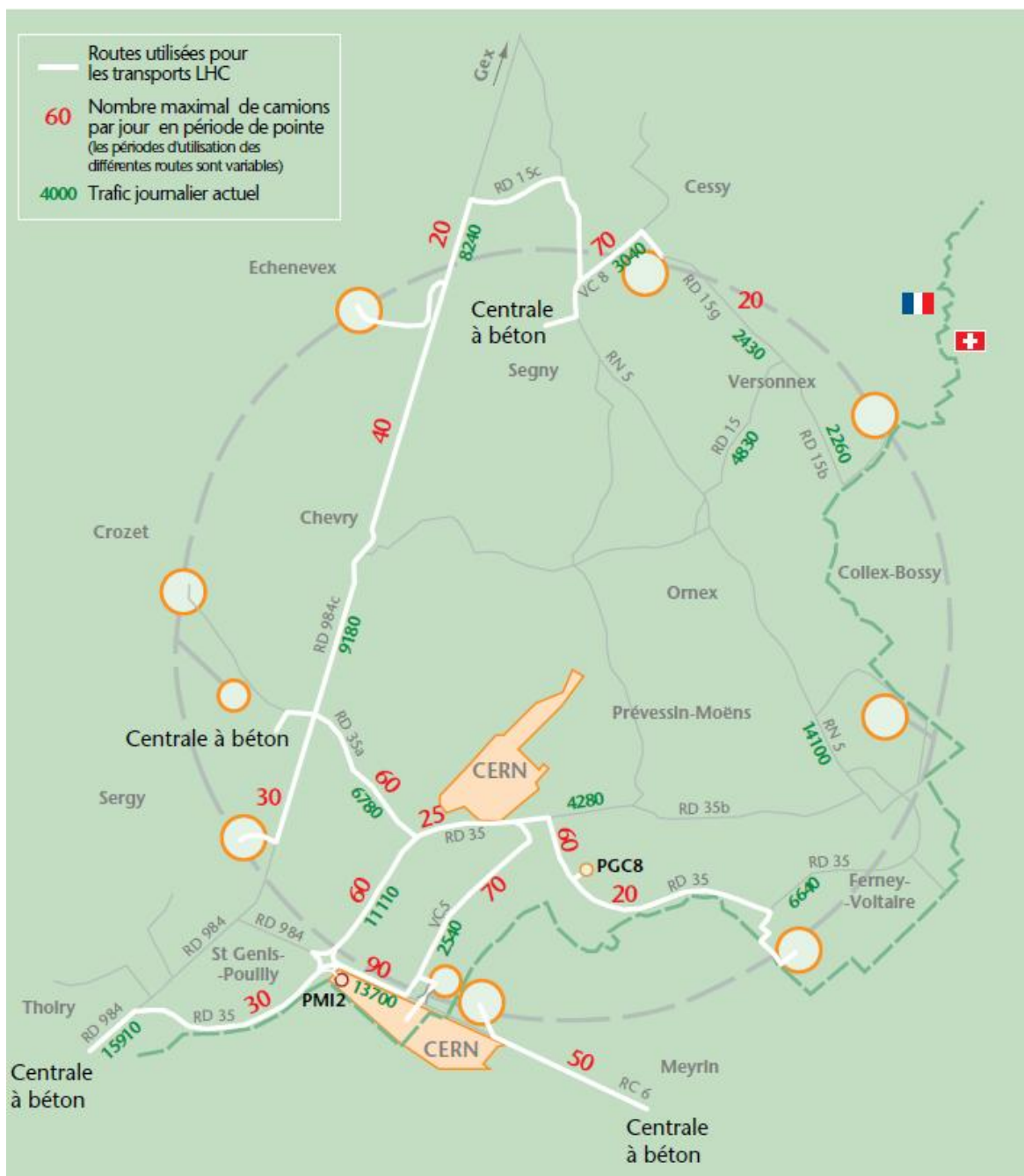
Le CERN a volontairement renoncé à proposer la création de nouvelles routes. Les aménagements proposés conduisaient à des liaisons plus longues pour la circulation lourde (labos CERN, points 5 et 6 par exemple). A quelques exceptions près, les aménagements de voirie créés pour le chantier concernaient essentiellement des routes déjà existantes (renforcements) ainsi que des projets déjà envisagés par les collectivités avant l'implantation du LEP (contournements d'agglomérations, routes prévues aux plans d'occupation des sols des communes)⁸⁸.

Sur les liaisons constituant l'armature routière du Pays de Gex, ils consistaient essentiellement en des renforcements de chaussées (CD984 et 984c), l'achèvement de la liaison CERN-Ferney-Voltaire-Genève, la déviation de Gex. Le renforcement de la RN5, déjà programmé par ailleurs, ne faisait pas partie de ce programme de travaux. Sur le réseau dessert, départemental ou communal, ils comprenaient des travaux de renforcement de chaussées, le calibrage (élargissement) à 6 m des voies existantes trop étroites, la construction de voies communales nouvelles pour permettre l'accès aux puits, enfin l'aménagement des carrefours avec les routes à grande circulation⁸⁹.

Pour la phase d'exploitation du LEP, le trafic routier était essentiellement lié à la présence de personnel sur les sites des quatre expériences. Comme pour les expériences LEP, le nombre de physiciens et de techniciens présents au même moment est inférieur à une trentaine par site, ce qui entraîne un trafic maximum d'une centaine de véhicules légers par jour. En période de fonctionnement, soit environ huit mois par an, les transports par camion sont rares. Pendant les quatre mois d'arrêt annuel, des transports de matériel par camion ont lieu occasionnellement. Lors du refroidissement de l'accélérateur à la reprise du fonctionnement après l'arrêt annuel, un trafic de 12 camions citernes par jour a lieu pendant deux semaines pour alimenter les Points 1,8, 2, 4, 6 et 8 en azote liquide utilisé pour le pré-refroidissement. Sur les axes principaux, l'accroissement total du trafic lié au LHC reste inférieur à 1% du trafic actuel en raison du grand étalement du chantier dans le temps.

⁸⁸ Etude d'impact du projet LEP sur l'environnement, 1982, p. 115

⁸⁹ Etude d'impact du projet LEP sur l'environnement, 1982, p. 164



Trafic maximum total induit par la construction du LHC (source: étude d'impact du projet LHC, 1997)



4. IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

4.1 ÉTUDES ET EXPERTISES CONDUITES

Dans le cadre des études géologiques, hydrogéologiques et géotechniques du LEP, plus d'une centaine de sondages, d'une profondeur comprise entre 100 et 1000 m, furent réalisés sur les différents tracés envisagés. Ces reconnaissances furent complétées par des levés géologiques de surface, des sondages géoélectriques, des études photogéologiques et une étude thermographique. L'objectif était de caractériser le substratum molassique, les formations calcaires du Jura, les zones fracturées, les circulations d'eau souterraine et les risques associés au creusement du tunnel.

Ces études furent menées avec l'appui de plusieurs experts internationaux sollicités par le CERN dès les premières phases du projet :

- **pour la géologie** : Pierre Duffaut, géologue et ingénieur civil des Mines, ancien chef d'Aménagement à Électricité de France et ancien chef du département Génie géologique du BRGM ;
- **pour l'hydrogéologie** : le professeur Albéric Monjoie, des Laboratoires de géologie et d'hydrogéologie de l'Université de Liège ;
- **pour la géotechnique** : Giovanni Lombardi, ingénieur EPF.

Le CERN confia également au Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) le levé géologique de la partie de la chaîne du Jura concernée par le LEP. Cette étude permit d'établir une prévision géologique, stratigraphique et tectonique fondée sur les affleurements, la photogéologie et l'analyse structurale. Les forages profonds réalisés dans le piémont du Jura précisèrent ensuite ces prévisions et permirent d'adapter le tracé retenu.

Les investigations confirmèrent que la section jurassienne représentait la partie la plus délicate du projet. Les études initiales avaient notamment mis en évidence l'incertitude liée aux formes géologiques susceptibles d'être rencontrées sous le Jura : présence possible du Lias, remontée éventuelle du Trias avec gypses et cargneules, ou surface de chevauchement associée à des circulations aquifères importantes. Les risques principaux concernaient donc moins la traversée de la molasse, globalement favorable, que les formations calcaires fracturées ou karstifiées du Jura, susceptibles de provoquer des venues d'eau sous pression.

Le tracé finalement retenu réduisit fortement la longueur du tunnel située sous le Jura, autour de 3,4 km, et limita la couverture maximale à environ 170 m. Les conditions rencontrées lors du creusement se révélèrent globalement conformes aux prévisions quant à la nature et à la structure des formations, même si certaines difficultés apparurent dans les zones de fissures et de joints de bancs. L'incident le plus notable fut celui du « renard », lié à une venue d'eau chargée de sables et d'argiles dans la galerie, qui entraîna un arrêt temporaire du chantier et nécessita des traitements spécifiques par injection, drainage et soutènement.

L'expérience montra ainsi que les études préalables avaient permis de réduire les risques majeurs, sans toutefois supprimer toute incertitude inhérente au creusement dans un milieu géologique complexe. Elle confirma l'importance d'une stratégie combinant reconnaissance approfondie, adaptation du tracé, suivi hydrogéologique pendant les travaux et capacité d'intervention rapide en cas d'aléa⁹⁰.

⁹⁰ Etude d'impact du projet LEP sur l'environnement, 1982, p. 158

Références

- ▾ **Fourneaux, J.-C.**, « Les conditions géologiques et hydrogéologiques du percement du tunnel du LEP sous le Jura », Travaux, juin 1988, p. 42–45 environ.
- ▾ **Monjoie, A.**, « Le projet LEP et l'hydrogéologie du pays de Gex et de la première chaîne du Jura », Travaux, juin 1988, p. 38–40 environ.
- ▾ **Hotellier, J.-F.**, et Rebuffe, P., « Les parois moulées dans la construction du LEP », Travaux, juin 1988, p. 31–37 environ.

4.1.1 Etudes hydrologiques effectuées dans le cadre du LEP :

Au début des années 1980, les études hydrogéologiques conduites dans le cadre du projet LEP ont permis de compléter et de préciser la connaissance des nappes phréatiques du Pays de Gex et de la première chaîne du Jura⁹¹. Elles visaient à établir un état initial avant les travaux, à caractériser les circulations d'eau souterraine et à évaluer les interactions possibles entre le tunnel, les aquifères et les bassins versants concernés.

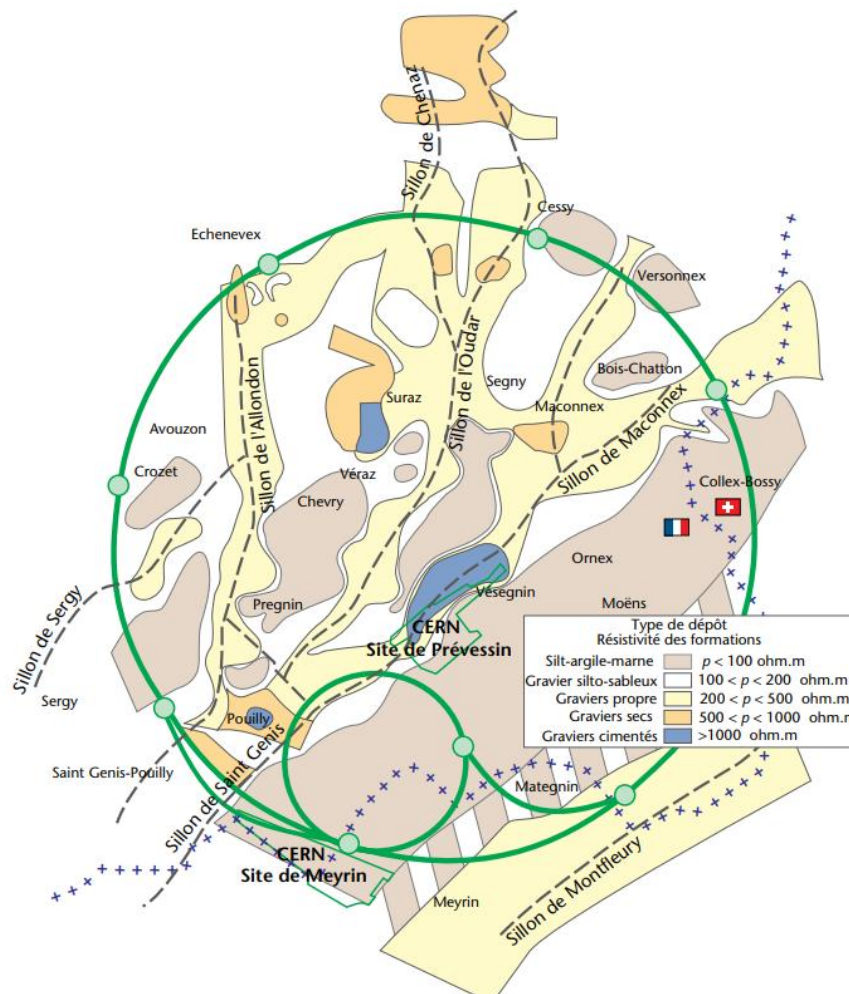
Ces études, reprises notamment dans l'étude d'impact du LEP, portaient sur :

- ▾ la détermination des limites du bassin hydrogéologique concerné ;
- ▾ l'étude hydrométéorologique du bassin : précipitations, températures, hygrométrie, ensoleillement, évapotranspiration et variations du stock d'humidité du sol ;
- ▾ l'étude des débits des cours d'eau irriguant le bassin, avec mesure continue des niveaux, établissement de courbes de débit et tracé des hydrogrammes correspondants ;
- ▾ le recensement des points d'eau, ainsi que la mesure périodique des niveaux et des débits pour les plus significatifs ;
- ▾ l'analyse chimique de sources, de cours d'eau et de certaines résurgences caractéristiques ;
- ▾ le calcul des bilans des réserves d'eaux souterraines.

Une partie de ces mesures s'est poursuivie après la phase d'étude, parfois de manière journalière, notamment pour les débits, les niveaux de sondage et la pluviométrie. Ce suivi a contribué à constituer une base de données hydrogéologique plus complète sur le Pays de Gex et les circulations d'eau liées au piémont jurassien. Il a ainsi fourni des informations utiles aux hydrogéologues, aux collectivités et aux administrations pour la compréhension des ressources souterraines et leur gestion à long terme.

L'intérêt de ces études ne résidait donc pas uniquement dans la prévention des risques liés au creusement du tunnel. Elles ont également permis d'améliorer la connaissance scientifique et technique du fonctionnement hydrologique régional, en particulier des relations entre les dépôts fluvio-glaciaires de la plaine, les sillons graveleux, les nappes profondes et les circulations karstiques du Jura.

⁹¹ Monjoie, A., « Le projet LEP et l'hydrogéologie du pays de Gex et de la première chaîne du Jura », Travaux, juin 1988, p. 38–40.



Carte hydrogéologique de la zone des ouvrages du CERN (source : étude d'impact LHC, 1997)

4.1.2 Rejets atmosphériques

Le LEP comme le LHC n'ont pas généré d'effluents polluants : le système de ventilation (celui du LEP ayant été entièrement conservé pour le LHC) aspire l'air ambiant à tous les points pairs du tunnel, et rejette cet air aux points impairs. Les rejets des tours de refroidissement, situés aux quatre points pairs du LEP, contiennent uniquement de la **vapeur d'eau**. L'évaporation de l'eau sous un flux d'air pulsé crée le refroidissement voulu. La quantité maximum de vapeur d'eau envoyée dans l'atmosphère par les aéroréfrigérants est d'environ $50 \text{ m}^3/\text{h}$. Les effets des rejets atmosphériques sur la pluviométrie ou l'humidité ambiante sont insignifiants. Durant les périodes froides de l'année, des panaches de condensation sont visibles. Compte tenu de l'arrêt annuel des installations qui a toujours lieu durant la période hivernale, du mois de novembre aux mois de mars ou avril, le nombre de jours par an où les panaches sont visibles ne dépasse pas la vingtaine⁹².

⁹² Etude d'impact du projet LHC sur l'environnement, 1997, p. 44 et 198

4.2 RISQUES IDENTIFIÉS ET RISQUES AVÉRÉS

4.2.1 Radiations du LEP

Dès la phase de préparation du LEP, le CERN a conduit des études spécifiques afin d'évaluer les effets éventuels du projet sur la radioprotection et la qualité de l'air⁹³. Ces travaux portaient notamment sur les rayonnements diffusés, la radioactivité potentiellement produite dans l'air du tunnel ainsi que la formation possible d'ozone et d'oxydes d'azote. Les résultats concluaient à des effets très faibles pour le public et l'environnement.

Pour toutes les phases envisagées du LEP⁹⁴, les risques liés aux rayonnements diffusés furent considérés comme insignifiants par rapport à l'exposition naturelle externe existant dans la région. Les doses supplémentaires calculées à proximité des accès restaient très faibles, de l'ordre de 0,01 à 0,02 mSv/an dans les hypothèses les plus pénalisantes, comparé à environ 1 mSv/an par l'exposition naturelle dans le Pays de Gex⁹⁵.

Pendant toute la durée d'exploitation du LEP, aucun radionucléide n'a été repéré dans l'air ou dans l'eau, et aucun rayonnement diffusé n'a été détecté dans des zones accessibles au public. Les concentrations d'ozone et d'oxydes d'azote mesurées aux sorties de ventilation étaient même souvent inférieures à celles observées plus loin, en raison de la décomposition de ces molécules dans le tunnel souterrain du LEP.

Le cas du LEP illustre directement cette valeur scientifique prolongée. Après l'arrêt de la machine en 2000, les quatre expériences ALEPH, DELPHI, L3 et OPAL ont continué à publier des analyses pendant plusieurs années. Selon le rapport DPHEP, 349 articles évalués par les pairs furent publiés entre 2004 et 2009, soit 13,5 % de l'ensemble des publications du LEP. Ces publications ne relevaient pas seulement d'analyses marginales : elles couvraient les principaux domaines du programme scientifique du LEP, notamment les mesures électrofaibles, la QCD, les recherches du Higgs, la supersymétrie, les recherches exotiques et la physique des saveurs*. Environ une centaine de ces publications concernaient le cœur du programme scientifique et font partie de l'héritage du LEP.

Cette expérience montre que les données conservées peuvent acquérir une valeur nouvelle à mesure que les méthodes théoriques, les outils de simulation, les techniques statistiques ou les questions scientifiques évoluent.

4.2.2 Radiations du LHC

Les études radiologiques menées pour le LHC concluent également à un impact très faible pour le public et l'environnement. La contribution globale attribuable au LHC est estimée au moins 100 fois inférieure à la radioactivité naturelle mesurée dans les localités environnantes. À titre d'ordre de grandeur, pour une exposition naturelle externe d'environ 1 mSv/an, la contribution du LHC reste nettement inférieure à 0,01 mSv/an. Cette valeur demeure très faible au regard de l'exposition naturelle annuelle et de ses variations habituelles selon les lieux ou les modes de vie.

L'activation des matériaux dans le LHC concerne principalement certains composants métalliques directement exposés aux faisceaux* ou aux pertes de faisceau*. Ces éléments peuvent devenir faiblement radioactifs, mais ils restent confinés dans des zones techniques à accès strictement contrôlé et ne constituent pas des rejets dans l'environnement. Ainsi, la radioprotection du LHC repose sur une distinction essentielle : l'impact externe pour le public demeure extrêmement faible, tandis que les

⁹³ Goebel, K., « Impact radiologique du futur programme CERN (LEP) », CERN-Publications annuelles pendant et après la prise de données. Les zones grisées indiquent les périodes d'exploitation des expériences ; les pourcentages indiquent la part d'articles publiés après la fin de la prise de données, montrant que la production scientifique se prolonge souvent au-delà de l'arrêt des faisceaux.

⁹⁴ Etude d'impact du projet LEP sur l'environnement, 1982, p. 136

⁹⁵ Etude d'impact du projet LEP sur l'environnement, 1982, p. 138

zones internes de la machine font l'objet d'une surveillance spécifique, notamment lors des opérations de maintenance, des arrêts techniques ou du remplacement de composants activés.

La surveillance repose notamment sur un système de mesure⁹⁶ qui assure une surveillance continue des niveaux de radiation et de radioactivité grâce à un réseau de détecteurs répartis sur les différents sites. Les mesures sont collectées en temps réel, transmises à une base de données, et archivées à long terme. Certains détecteurs installés dans des zones accessibles pendant l'exploitation sont reliés à des alarmes locales déclenchées automatiquement lorsque les niveaux de radiation dépassent des seuils prédéfinis ; ces alertes sont également transmises aux salles de contrôle. La fiabilité de ce dispositif joue un rôle opérationnel important, puisqu'un dysfonctionnement du contrôle radiologique peut conduire à l'arrêt de l'exploitation des accélérateurs.

Pour le LEP comme pour le LHC, des mesures radiologiques de contrôle sont régulièrement effectuées en France et en Suisse par les autorités compétentes en collaboration avec le CERN. Historiquement, ces contrôles relevaient notamment de l'O.P.R.I.⁹⁷, de l'IRSN et de l'ASNR en France, ainsi que de l'Office fédéral de la santé publique en Suisse⁹⁸.

Voir la partie 2.3 sur les données concernant les déchets

4.2.3 Bruit produit par le LEP

Le CERN a commandé, durant l'année 1995, deux campagnes de mesures à l'APAVE, laboratoire français agréé. La première campagne a été effectuée du 1 au 15 février 1995 alors que la majorité des installations du LEP étaient à l'arrêt, et la seconde pendant la deuxième quinzaine de novembre 1995 avec toutes les installations du LEP en fonctionnement, et donc avec le maximum possible de nuisances sonores. Ces mesures ont confirmé qu'en fonctionnement maximum, les installations du LEP, et donc celles du LHC, n'augmentent que très peu le niveau sonore dans l'environnement ; en outre, celui-ci reste dans tous les cas en-dessous des limites autorisées par la réglementation⁹⁹.

Les engins de chantier étaient conformes, du point de vue bruit, aux exigences des divers arrêtés en vigueur. En outre, pour réduire leurs effets sur l'environnement, le CERN a installé des écrans acoustiques, avant le début des travaux, dans toutes les zones du LEP où cela était nécessaire¹⁰⁰.

Les tirs de mines, lorsqu'ils sont susceptibles de provoquer des bruits intempestifs en surface, ont eu lieu uniquement de jour. Bien que le bruit émis soit de nature impulsionnelle, il ne provoque pas de dégâts lorsque le tir est effectué dans les règles de l'art. Le CERN a veillé à ce que l'entreprise prenne toutes les précautions pour éviter les nuisances à l'extérieur, sous le contrôle d'un laboratoire spécialisé indépendant¹⁰¹.

Des contrôles des effets des vibrations en surface ont été systématiquement effectués par un laboratoire extérieur spécialisé¹⁰².

⁹⁶ Segura Millan, G., Perrin, D. and Scibile, L., "RAMSES: The LHC Radiation Monitoring System for the Environment and Safety", proceedings of ICALEPCS 2005, CERN.

⁹⁷ L'O.P.R.I. – Office de protection contre les rayonnements ionisants – correspond à une dénomination historique de l'organisme français compétent en matière de radioprotection. Les responsabilités institutionnelles ont ensuite évolué, notamment avec l'IRSN et l'ASN, puis avec la création, au 1er janvier 2025, de l'Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection (ASNR), qui regroupe les missions de l'ASN et de l'IRSN.

⁹⁸ Posters de présentation du LHC, p. 18

⁹⁹ Etude d'impact du projet LHC sur l'environnement, 1997, p. 211

¹⁰⁰ Etude d'impact du projet LEP sur l'environnement, 1982, p. 163-164

¹⁰¹ Etude d'impact du projet LEP sur l'environnement, 1982, p. 163-164

¹⁰² Etude d'impact du projet LEP sur l'environnement, 1982, p. 40

4.2.4 Bruit produit par le LHC

Les émissions sonores sont essentiellement liées au chantier. Les activités en surface sont limitées aux heures réglementaires de travail. Les jours fériés locaux sont respectés. Pendant la phase d'exploitation des installations, tous les équipements potentiellement sources de bruit sont installés dans des bâtiments antibruit, spécialement conçus. Le niveau sonore dans le voisinage autour des sites existants est resté inchangé. En ce qui concerne le Point 5 à Cessy et le Point 1 à Meyrin, qui font l'objet de nouveaux aménagements importants, les émissions sonores sont comparables à celles des autres sites¹⁰³.

Des contrôles des effets des vibrations en surface ont été systématiquement effectués par un laboratoire extérieur spécialisé¹⁰⁴.

4.2.5 Pollutions et santé humaine (LEP et LHC)

De manière générale, les infrastructures du CERN et celles du LEP en particulier ne sont pas dévolues à des activités chimiques spécifiques, ce qui explique l'absence de stockage de substances dangereuses susceptibles de menacer la santé humaine ou l'équilibre écologique. Le fonctionnement des détecteurs de particules repose sur l'usage de mélanges gazeux combinant des gaz inertes et des gaz inflammables, à l'image du dioxyde de carbone, de l'argon, du xénon, du méthane, du butane ou encore de l'éthane.

Les périls potentiels associés à l'exploitation du LHC se répartissent en deux grandes catégories que sont les risques d'origine interne et les risques d'origine externe. La première catégorie englobe principalement les éventuels risques radiologiques, le danger d'incendie, les contraintes liées à la manipulation de gaz inflammables ou de fluides cryogéniques, ainsi que les nuisances sonores. Quant aux menaces extérieures, elles se limitent essentiellement aux hypothèses d'inondations des structures ou à la survenue d'un séisme. Il convient toutefois de souligner que, même dans de telles circonstances, les répercussions seraient strictement matérielles pour les installations et ne provoqueraient aucun dommage pour les populations locales ou le milieu naturel. Ces éventualités sont rigoureusement anticipées dès la genèse du projet, permettant d'arrêter et d'appliquer des principes de prévention dès la conception des équipements. Par ailleurs, le CERN s'appuie sur des équipes professionnelles spécialisées et des dispositifs d'intervention rapide disponibles en permanence. À l'instar de son prédécesseur le LEP, le LHC demeure assujéti à la réglementation stricte des installations nucléaires de base.

Cette procédure spécifique aux installations nucléaires de base¹⁰⁵ impose, lors de son étape préliminaire, la réalisation d'une étude de danger exhaustive dont le but est de recenser l'ensemble des risques possibles tout en formulant les règles de prévention nécessaires.

¹⁰³ Posters de présentation du LHC, p. 7

¹⁰⁴ Etude d'impact sur l'environnement du projet LHC, p. 144

¹⁰⁵ Pour plus de détails sur le cadre des installations nucléaires de base en France, voir <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/installations-nucleaires-france>

4.3 RESSOURCE EN EAU

Les chiffres relatifs à la ressource en eau doivent être interprétés avec prudence, car les sources disponibles ne renvoient pas toujours au même périmètre ni à la même définition. Il convient notamment de distinguer l'eau prélevée ou fournie au CERN, l'eau utilisée ou mise en circulation dans les circuits de refroidissement, l'eau rejetée après usage, l'eau évaporée par les tours de refroidissement et la consommation nette. Cette distinction est essentielle pour éviter des comparaisons directes entre les chiffres historiques du LEP, les chiffres actuels du LHC et les estimations relatives au FCC.

Dans les années 1980 et 1990, les besoins en eau du CERN étaient élevés, en grande partie en raison des circuits de refroidissement alors utilisés pour les accélérateurs et les installations techniques. L'eau provenait principalement du Léman, via la station de pompage du Vengeron, exploitée par les Services industriels de Genève. Un document technique de 1998 indique qu'en 1996, la consommation totale d'eau du CERN atteignait environ **19,1 millions de m³**.

Ce niveau élevé s'expliquait par les caractéristiques des réseaux de refroidissement alors en place au CERN, hérités de plusieurs phases successives de développement depuis les années 1960 et 1970. Certains circuits restaient ouverts ou semi-ouverts et utilisaient encore de l'eau potable pour des tours de refroidissement, le refroidissement direct de groupes frigorifiques ou certaines zones techniques. À la fin des années 1990, le CERN a donc engagé une réflexion visant à transformer ces circuits en systèmes fermés, afin de réduire les besoins en eau du complexe LEP-LHC de 750 m³/h à environ 300 m³/h.

Depuis lors, les réseaux et circuits de refroidissement du CERN ont été profondément consolidés et optimisés. Les rapports environnementaux récents montrent que la consommation annuelle totale d'eau de l'Organisation a fortement diminué depuis 2000 : elle est passée d'environ 15 000 mégalitres en 2000 à 3 234 mégalitres en 2022¹⁰⁶, soit une baisse d'environ 80 %. Cette réduction s'explique notamment par la consolidation des infrastructures de refroidissement et d'assainissement, ainsi que par la transformation de circuits de refroidissement ouverts en circuits semi-ouverts ou fermés. En 2021 et 2022, la consommation totale du CERN était respectivement de 2 661 et 3 234 mégalitres, contre 3 477 mégalitres lors de l'année de référence 2018. Environ 80 % de l'eau fournie au CERN est consacrée aux usages industriels, principalement le refroidissement du complexe d'accélérateurs, des détecteurs et des installations informatiques, tandis qu'environ 20 % correspond aux usages sanitaires.

Les données 2023-2024¹⁰⁷ confirment cet ordre de grandeur : pendant ces deux années d'exploitation, la consommation d'eau du CERN s'est élevée à 2 830 mégalitres en 2023 et 2 895 mégalitres en 2024. L'eau fournie au CERN provient aujourd'hui à 99 % du Léman, via les Services industriels de Genève ; une faible part provient des eaux souterraines fournies par la Régie des Eaux Gessiennes, principalement pour les usages sanitaires et l'eau potable sur les sites du LHC. Le CERN s'est fixé pour 2030 l'objectif de maintenir sa consommation annuelle d'eau sous 3 600 mégalitres, malgré l'augmentation attendue des besoins de refroidissement liée au HL-LHC et aux améliorations des expériences.

Le cas de l'année 2019 illustre l'importance de distinguer les différents périmètres de mesure. Cette année correspondait à une période d'arrêt des accélérateurs pour maintenance et ne peut donc pas être considérée comme représentative d'une année d'exploitation nominale. La consommation totale d'eau du CERN était alors d'environ 2 millions de m³. Les données disponibles montrent aussi qu'il faut distinguer l'eau effectivement consommée de l'eau simplement mise en circulation dans les circuits de refroidissement : le système de circulation du SPS a ainsi fait circuler 7,5 millions de m³ d'eau en 2019, sans que ce volume corresponde à une consommation nette. Pour le LHC, la consommation spécifique indiquée cette année-là était de 44 694 m³, principalement destinée à compenser l'évaporation des tours de refroidissement aux points du LHC, à couvrir certains usages sanitaires et à assurer la

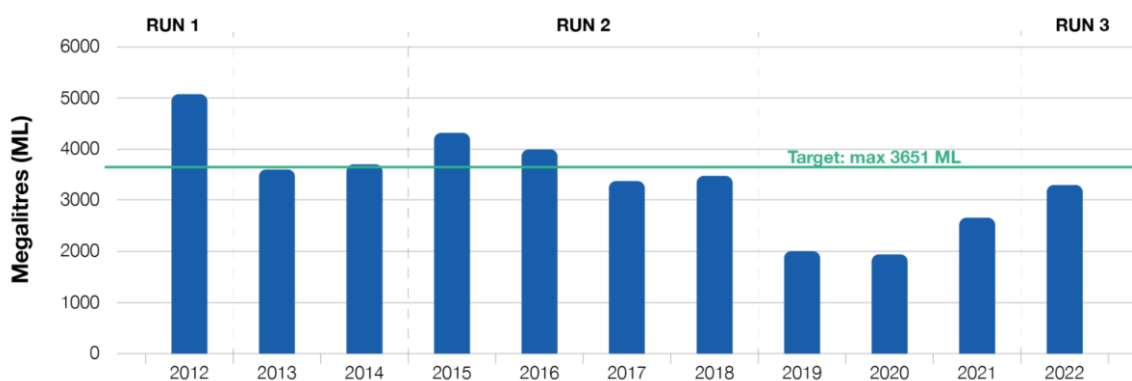
¹⁰⁶ <https://hse.cern/environment-report-2021-2022/water-and-effluents>

¹⁰⁷ <https://environmentreports.web.cern.ch/environment-report-2023-2024/water-and-effluents/>

redondance du réseau incendie. Ce chiffre ne doit donc pas être interprété comme la consommation totale d'eau du LHC en régime d'exploitation normal.

La baisse apparente entre les chiffres historiques associés au LEP et ceux du LHC ne traduit donc pas seulement une différence entre deux machines. Elle reflète à la fois l'évolution des infrastructures de refroidissement du CERN, la fermeture progressive de circuits auparavant ouverts ou semi-ouverts, l'amélioration des réseaux, mais aussi des différences technologiques entre les deux accélérateurs. Le LEP était un collisionneur électron-positron utilisant principalement des équipements conventionnels et des systèmes radiofréquence fortement consommateurs d'eau de refroidissement, tandis que le LHC est une machine supraconductrice dont le fonctionnement repose sur un système cryogénique complexe. Cette cryogénie nécessite elle aussi des infrastructures de refroidissement importantes, mais elle s'inscrit dans une architecture différente, avec des circuits plus optimisés et davantage fermés. À cela s'ajoutent des différences de définition entre volumes prélevés, volumes mis en circulation, rejets, évaporation et consommation effective. Toute comparaison entre LEP, LHC et FCC doit donc s'appuyer sur des unités, des périmètres et des modes de refroidissement clairement harmonisés.

Consommation d'eau (m ³ /an) :		
Période	LEP	LHC
Phase fonctionnement (moyenne annuelle)	20 757 309	6 000 000



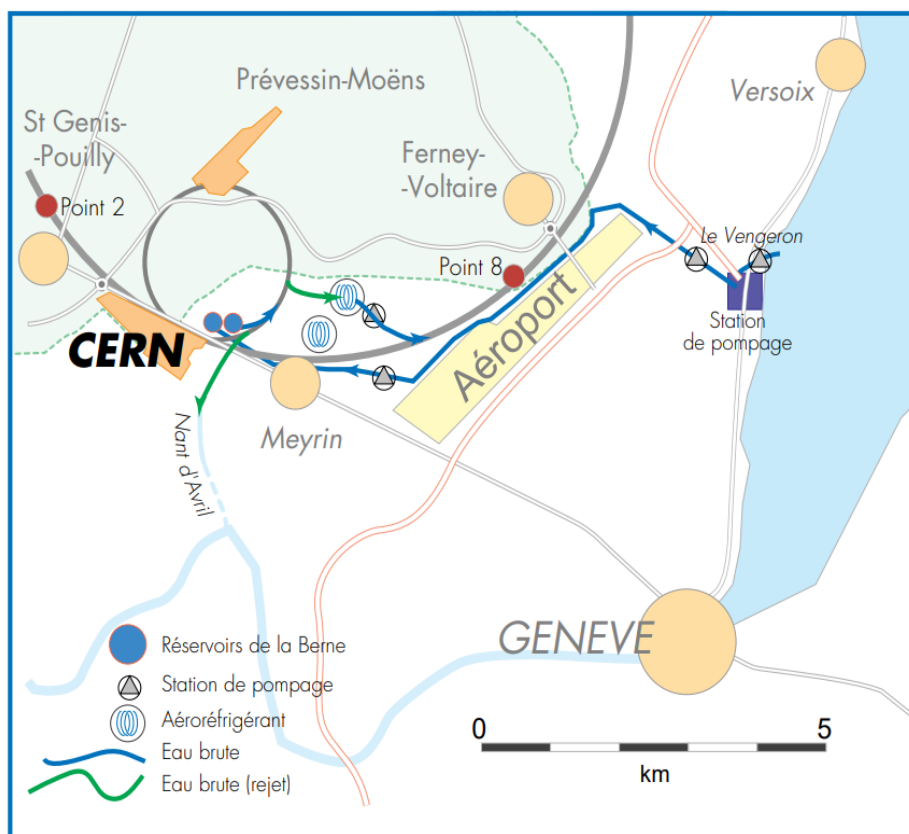
CERN'S WATER CONSUMPTION 2012-2022

Consommation d'eau au CERN de 2012 à 2022

Prélèvements

Les sites du LEP sont alimentés en eau potable depuis les réseaux communaux les plus proches. En 1995, la consommation correspondait aux volumes suivants¹⁰⁸ :

Site	Consommation (m ³)
Point 2	12 492
Point 3	101
Point 4	6 918
Point 5	0
Point 6	13 367
Point 7	940
Point 8	21 713



Alimentation du CERN en eau de refroidissement (source : étude d'impact LHC, 1997, p. 44)

L'eau de refroidissement du LHC provient du circuit de refroidissement du Supersynchrotron à protons* (SPS), qu'elle a déjà servi à refroidir avant d'être utilisée pour le LHC. Cette eau est pompée directement dans le Léman et rejetée dans le Nant d'Avril, en Suisse. Grâce à l'utilisation de la supraconductivité, la consommation d'eau de refroidissement reste stable (autour de 1 m³/s). L'eau de refroidissement n'est soumise à aucun risque de pollution chimique. Le LHC n'a pas conduit à une augmentation de la consommation d'eau potable par rapport au LEP¹⁰⁹.

¹⁰⁸ Etude d'impact du projet LHC sur l'environnement, 1997, p. 188-189

¹⁰⁹ Posters de présentation du LHC, p. 8

Rejets :

Les eaux rejetées sont constituées des eaux de réfrigération, des eaux pluviales, des eaux de drainage et des eaux usées :

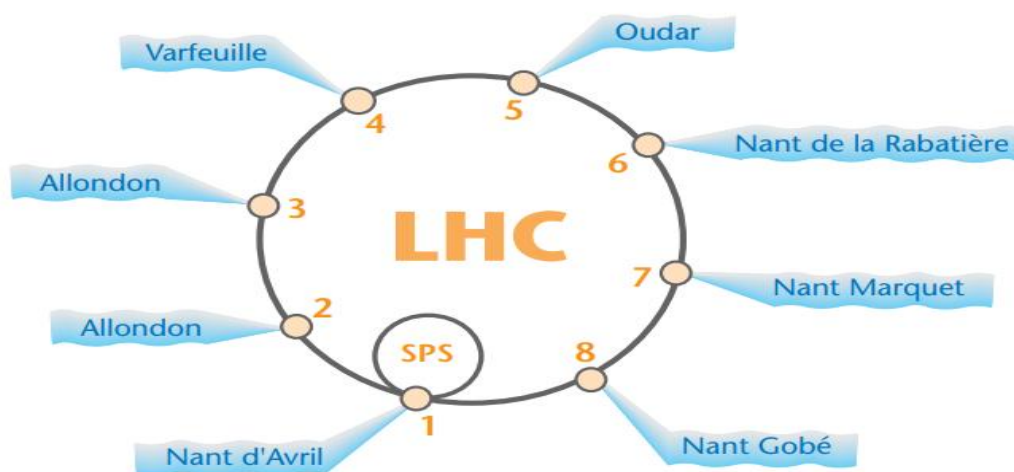
- ↳ Lors de leur emploi au CERN, les eaux de réfrigération ne subissent aucune altération.
- ↳ Les eaux pluviales représentent l'ensemble des eaux de précipitation recueillies aussi bien sur les toitures que sur les parkings.

Ces différentes catégories ne correspondent pas aux mêmes usages ni aux mêmes filières de collecte et de traitement. Les eaux rejetées par les installations du CERN relèvent de catégories différentes – eaux de réfrigération, eaux pluviales, eaux de drainage et eaux usées – qui ne correspondent ni aux mêmes usages, ni aux mêmes modes de collecte, de traitement et de rejet.

Historiquement, pour le LEP, les deux principaux exutoires des eaux de réfrigération et des eaux pluviales étaient le Nant d'Avril, en Suisse, et le Lion, en France. En moyenne, environ 85 % de ces eaux étaient rejetées dans le Nant d'Avril et 15 % dans le Lion. Les rejets vers le Nant d'Avril concernaient principalement les eaux de réfrigération du PS, du SPS et du LEP, ainsi qu'une partie importante des eaux de surface collectées sur le site de Meyrin. Les rejets vers le Lion correspondaient essentiellement aux eaux de surface du site de Prévessin-Moëns et à une autre partie des eaux collectées sur le site de Meyrin.

Les eaux pluviales collectées sur les sites des points d'accès de la machine LEP sont rejetées localement : dans l'Allondon pour les Points d'accès 2 et 3, dans la Varfeuille pour le Point 4, dans l'Oudar pour le Point 5, dans le Nant de la Rabatière pour le Point 6, dans le Nant Marquet pour le Point 7 et dans le Nant Gobé pour le Point 8¹¹⁰.

Il convient toutefois de préciser que les eaux de réfrigération ne sont pas des eaux mises en contact avec les faisceaux* de particules. Leur principale modification éventuelle est liée à leur usage thermique : elles servent à évacuer la chaleur produite par les installations techniques. Dans les circuits comportant des tours de refroidissement, une partie de l'eau s'évapore et une autre partie, appelée eau de purge, peut contenir des résidus issus du traitement nécessaire pour limiter la corrosion, l'entartrage, l'encrassement biologique ou le risque de légionelles. Ces eaux font donc l'objet d'un suivi et, dans les installations récentes, de mesures visant à réduire les volumes rejetés et à améliorer la qualité des effluents. Pour le LHC et le SPS, le CERN a notamment engagé un programme visant à recycler une partie des eaux de purge des tours de refroidissement et à réduire les rejets vers le Nant d'Avril.



Points de rejet des eaux pluviales et de drainage des sites LEP/LHC (source : étude d'impact du LHC, 1997, p. 190)

¹¹⁰ Etude d'impact du projet LHC sur l'environnement, 1997, p. 189

Les eaux pluviales et les eaux de drainage recueillies sur les sites et dans les ouvrages souterrains du LEP/LHC sont orientées vers les cours d'eau les plus proches, selon les exutoires prévus pour chaque point d'accès. Il s'agit principalement d'eaux claires, distinctes des eaux usées et des eaux de réfrigération. Leur qualité a fait l'objet de plusieurs types de contrôles. Les Services industriels de Genève (SIG) comptabilisaient les volumes d'eau utilisés par le CERN et contrôlaient la qualité de l'eau au niveau des stations de pompage du Vengeron et de Peney ; les résultats étaient ensuite transmis au CERN, puis analysés et archivés par le groupe ST-CV. Des analyses complémentaires de la qualité des eaux rejetées ont également été réalisées par un laboratoire indépendant, afin de contrôler les principaux paramètres physico-chimiques. Ces contrôles portaient notamment sur la température, le pH, la conductivité, l'oxygène dissous, les matières en suspension, les hydrocarbures, les nitrites, nitrates, phosphates, chlorures, sulfates, la dureté et certains métaux.

Les résultats disponibles indiquaient que ces eaux ne présentaient pas de pollution particulière et que leur qualité pouvait, dans certains cas, être comparable, voire meilleure que celle des milieux récepteurs. La mise en service du LHC, installé dans les infrastructures du LEP, n'a pas modifié de manière significative cette situation, ni en termes de volumes rejetés ni en termes de qualité.

Les eaux usées suivent, quant à elles, les filières d'assainissement appropriées et sont dirigées vers les stations d'épuration suisses ou françaises proches des installations du CERN. Une partie des eaux usées du site de Meyrin, celles du site de Prévessin-Moëns, ainsi que celles des Points 2, 3, 3.3, 4 et 5 sont dirigées vers la station d'épuration de Saint-Genis-Pouilly. Une autre partie des eaux usées du site de Meyrin est envoyée vers la station d'épuration de Peney. Les eaux usées du Point 6 sont collectées vers la station d'épuration de Sauverny, tandis que celles des Points 7 et 8 sont dirigées vers la station d'épuration de Ferney-Voltaire.

Le suivi de la qualité des eaux s'écoulant depuis les sites du CERN vers les rivières environnantes reposait aussi sur des mesures continues et des campagnes ponctuelles. La température et le pH des eaux rejetées vers le Nant d'Avril et le Lion étaient suivis en continu par plusieurs stations de mesure, avec transmission des valeurs à la salle de contrôle technique du CERN. Des inspections régulières étaient menées aux points critiques des cours d'eau, notamment aux endroits où se déversaient les eaux du CERN. Des campagnes d'échantillonnage permettaient en outre d'effectuer des mesures in situ, oxygène dissous, température, conductivité, ainsi que des analyses physico-chimiques courantes. Des observations de la macrofaune benthique ont également été réalisées afin d'évaluer la qualité biologique des milieux récepteurs en amont et en aval des points de rejet.

Un contrôle radiologique spécifique complétait ce dispositif. Des stations situées sur les collecteurs de sortie des sites de Meyrin et de Prévessin-Moëns, ainsi qu'à la sortie des eaux du LEP au Point 1, permettaient de mesurer en continu l'activité gamma des eaux rejetées vers le Nant d'Avril et le Lion. Des échantillons étaient prélevés régulièrement pour l'analyse de l'activité bêta totale et de la teneur en tritium. Ces résultats étaient suivis par le groupe Radioprotection du CERN et publiés dans ses rapports périodiques ; les valeurs relevées se situaient à la limite du mesurable.

Le suivi réalisé indiquait qu'au cours de l'exploitation du LEP, l'activité des accélérateurs n'avait pas entraîné d'influence perceptible sur la qualité des milieux récepteurs. La seule modification identifiée concernait une augmentation ponctuelle de la température dans le Nant d'Avril et le Lion, de l'ordre de 1 °C à 4 °C selon les périodes. Après mélange, les températures maximales sont toutefois restées inférieures au seuil de 25 °C retenu pour la protection de la faune aquatique. Cet impact thermique est donc resté limité et n'a pas entraîné de dommage constaté pour ces cours d'eau¹¹¹.

¹¹¹ Etude d'impact du projet LHC sur l'environnement, 1997, p. 204

4.4 COMPENSATION AGRICOLE ET BIODIVERSITÉ

4.4.1 Agriculture

La construction du LEP entraîna des acquisitions de terrains agricoles et des procédures d'indemnisation des propriétaires et exploitants concernés, notamment pour les puits et installations de surface. En revanche, le LHC réutilisant largement le tunnel du LEP, ses impacts fonciers et agricoles furent beaucoup plus limités. Les mécanismes modernes de "compensation collective agricole" n'existaient pas encore à l'époque du LEP.

4.4.2 Impacts du LEP sur la biodiversité

Contrairement aux aménagements routiers, qui créent dans la nature des phénomènes de coupure, aux aménagements urbains, qui ôtent à la nature des espaces importants, et aux carrières, qui bouleversent les sols, le projet du LEP s'est traduit en surface par la réalisation de quelques aménagements ponctuels. De ce point de vue, les études menées au CERN et la surveillance mise en place ont permis de considérer qu'aucun dommage sensible n'avait été causé à la flore ou à la faune par les ouvrages réalisés.

Aucun des points situés sur la périphérie du LEP, et destinés à l'aménagement des installations de surface, ne s'est trouvé situé dans une zone protégée au titre de la législation sur les sites et monuments historiques. Le seul secteur boisé protégé (flanc du Jura) sous lequel passait le tracé du LEP est resté exempt de tout aménagement de surface du fait de l'ouvrage.

4.4.3 Impacts du LHC sur la biodiversité

Les ouvrages du LHC n'ont pas modifié les équilibres existants puisqu'ils avaient été réalisés sur les sites du LEP déjà en place. Il a été nécessaire de déboiser sur un seul site, pour l'implantation, sur environ 1 500 m², des échangeurs atmosphériques et d'une installation d'alimentation électrique.

Tous les aménagements paysagers prévus ont comporté des plantations d'essences locales d'arbres et d'arbustes.

Sur les trois sites concernés par les dépôts de déblais, aucune espèce florale notable n'était présente et le dépôt de ces déblais n'avait donc pas nui à l'environnement floristique.

À Cessy, l'impact des travaux sur la faune, en particulier du dépôt des déblais, avait été essentiellement transitoire, ces travaux touchant uniquement des parcelles à vocation agricole. En outre, des plantations avaient été réalisées sur les plates-formes paysagères aux alentours du site, et ce reboisement avait eu un effet bénéfique à long terme.

Le dépôt des déblais à Préveessin-Moëns s'est fait sous la ligne électrique 400 kV, à l'emplacement de la coupe rase réalisée par EDF en août 1988 dans le bois de Serves, et occupait une surface au sol faible au regard de l'ensemble du massif. Une zone de taillis de densité variable s'était développée depuis à cet endroit. Ces taillis attiraient notamment des oiseaux de lisière et servaient au repos, au gagnage et au transit de la grande faune présente. L'impact transitoire lié aux travaux avait donc été conséquent. À long terme cependant, l'impact de ces aménagements a été réduit. Il a fallu à peine cinq ans pour que la coupe rase d'EDF devienne une zone intéressante pour la faune. La plantation d'arbustes adaptés sur les talus des dépôts avait permis de rendre rapidement à cette zone son aspect et sa végétation initiaux.

La surface de la zone de dépôt des déblais de Versonnex (secteur de Bois Chatton/Sous Villars-Dame) a été faible. Il s'agissait avant tout d'une zone de transit des animaux entre les bois de la Versoix et le Pays de Gex. À long terme, l'impact de ces dépôts est faible. En effet, le secteur alors déboisé a été recouvert par les dépôts puis reboisé avec des essences locales. Les différents stades par lesquels était passée la végétation avaient offert une diversification de la futaie.

Pour éviter tout accident, la chasse a été interdite pendant le chantier, en particulier autour des trois zones de dépôt des déblais.

4.4.4 Les mesures en faveur de la biodiversité prises au LHC

Le Plan directeur du CERN, lancé en 2015 (valable jusqu'en 2040) est articulé autour de l'urbanisme, de la mobilité, de la protection de l'environnement et de l'aménagement paysager. Il guide un développement cohérent, y compris hors du périmètre clôturé, en conciliant efficacité opérationnelle, énergie et exigences environnementales.

Pour les constructions et rénovations, le CERN applique des référentiels comme la certification BREEAM¹¹², qui couvre énergie, eau, climat, matériaux, déchets, qualité de l'air et écologie. Le nouveau bâtiment de Prévessin (13 000 m², livraison visée 2027, 475 postes) illustre cette approche, avec des mesures d'intégration paysagère et de préservation de la biodiversité fondées sur un état initial documenté.

L'Open Sky Laboratory (OSL), situé à Cessy à proximité du site de surface accueillant le détecteur CMS, expérimente la transformation de la molasse excavée du HL-LHC en sol fonctionnel grâce à des procédés naturels.

L'Organisation maximise l'usage des infrastructures et rationalise les stockages pour préserver les espaces verts. La prévention et la réduction des impacts priment ; des plans de limitation sont activés lorsque l'impact est inévitable, la compensation n'intervenant qu'en dernier recours.

Avec le canton de Genève, une charte d'intégration paysagère est en préparation pour compléter le Masterplan. La gestion des terrains favorise la biodiversité via un entretien minimal, la tonte tardive et le pâturage ovin (10 ha à Meyrin, 25 ha à Prévessin), limitant arrosage, engrais et produits chimiques.

Le plan d'action biodiversité 2021–2025, appuyé sur les pratiques des États hôtes, s'appuie sur un inventaire faune-flore ayant identifié environ 50 ha prioritaires à protéger. Plus de 2 200 arbres ont été recensés, avec des essences remarquables (chênes, frênes, tilleuls). Une visite virtuelle des sites sensibilise le public à cette diversité.

Le CERN gère 95 ha de forêts, principalement en France, avec l'ONF. Un plan de gestion (publié en mars 2025¹¹³) prévoit libre évolution, sécurisation, récoltes sélectives, enrichissement anticipé, régénération naturelle et coupes d'amélioration pour renforcer les fonctions écologiques.

Les prochaines actions visent à réduire la pollution lumineuse, lutter contre les espèces invasives, promouvoir une agriculture durable et lancer un programme de plantation d'arbres pour atténuer les îlots de chaleur.

4.4.5 Les mesures continues en faveur de la biodiversité

Au fil du temps, le CERN a mis en place plusieurs mesures pour promouvoir la biodiversité sur ses terrains, en s'appuyant sur une approche d'entretien à faible intensité afin de favoriser sa préservation, avec un arrosage réduit au minimum et l'élimination des engrais et produits chimiques chaque fois que possible. Le CERN retarde la tonte des pelouses et recourt au pâturage ovin pour permettre l'achèvement complet du cycle de vie de la flore. En plus de ses sites clôturés, le CERN possède également 136 hectares de forêts, principalement situées le long du tracé en surface de l'accélérateur SPS. Ces forêts, dont la plupart se trouvent en France, sont gérées conjointement par le CERN et l'Office national des

¹¹² BREEAM (pour « Building Research Establishment Environmental Assessment Method ») est une méthode d'évaluation des critères environnementaux utilisée pour mesurer et certifier la performance environnementale des bâtiments.

¹¹³ Pour plus d'informations : <https://sce-dep.web.cern.ch/sce-news/nouveau-plan-de-gestion-des-forets-du-cern>

forêts (ONF). Pour limiter les interventions mécaniques, mieux respecter les sols et réduire les dommages au couvert forestier, le débardage à cheval est utilisé pour l'extraction des arbres tombés, une mesure de gestion forestière employée régulièrement depuis 2012.

Groupe de travail biodiversité et plan d'action

En 2020, l'Organisation a créé un groupe de travail sur la biodiversité avec quatre objectifs clés :

1. Conserver et protéger les espaces naturels du domaine du CERN ;
2. Développer la biodiversité dans les zones clôturées et non clôturées ;
3. Établir des mesures dédiées à la biodiversité pour les nouveaux projets d'aménagement sur les sites du CERN ;
4. Définir des indicateurs pour le suivi de la biodiversité au CERN

Le plan d'action proposé pour 2021–2025 a identifié plusieurs mesures à faire approuver, financer et mettre en œuvre par le comité de pilotage pour la protection de l'environnement du CERN (CERN Environmental Protection Steering board – CEPS), dont deux sont déjà en cours.

Lignes directrices pour les nouvelles constructions

La première mesure consiste à élaborer des lignes directrices pour intégrer la biodiversité dans les nouvelles constructions au CERN. Ces onze lignes directrices visent à aligner le CERN sur les réglementations françaises et suisses en matière de protection de la biodiversité. Elles couvrent divers sujets, tels que les nouvelles plantations, les espèces invasives, les toitures végétalisées et la compensation arborée. À titre d'exemple, 200 arbres ont récemment été plantés sur le site de Meyrin sur trois ans, afin de compenser les arbres abattus en raison du vieillissement et de travaux. Cette mesure s'inscrit dans le Masterplan 2040 du CERN, publié fin 2021¹¹⁴, qui adopte des principes et des standards favorisant la biodiversité lors du développement du site. Des mesures spécifiques ont été élaborées non seulement pour préserver le patrimoine naturel du CERN, mais aussi pour renforcer la biodiversité sur les terrains gérés par l'Organisation.

Inventaires faune-flore

La deuxième mesure lancée porte sur la réalisation d'inventaires de différentes espèces de faune et de flore sur les sites du CERN. Ces inventaires sont essentiels pour suivre les populations, identifier les zones d'intérêt biologique et leur importance, et mettre en place des mesures de protection concrètes. Sur la base de recommandations d'experts, les inventaires se concentreront sur la flore, les amphibiens, les insectes et les oiseaux. Les premiers relevés ont déjà commencé/ lors de l'inventaire des amphibiens, deux espèces de grenouilles ainsi que deux espèces protégées de tritons ont été observées. Un premier inventaire de la flore a conduit à l'identification d'une nouvelle espèce d'orchidée sur le site du CERN, l'orchis brûlé. L'inventaire des oiseaux est toujours en cours.¹¹⁵

Prochaines thématiques et phénomènes à surveiller

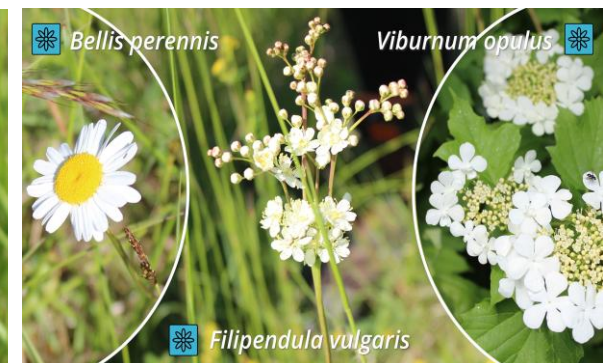
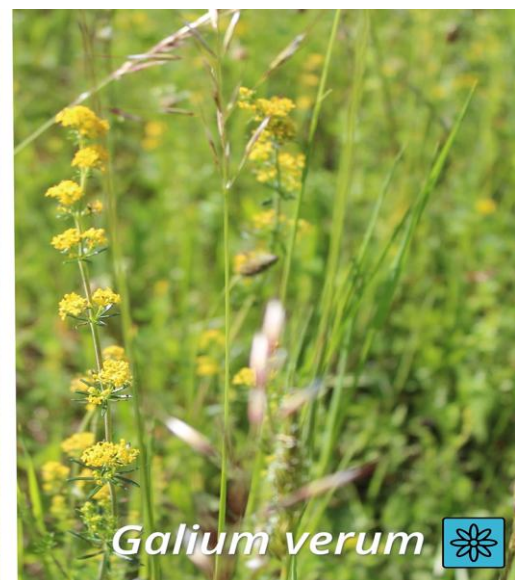
Le groupe de travail sur la biodiversité du CERN poursuit l'étude d'autres enjeux, tels que la pollution lumineuse, qui peut avoir des effets négatifs sur la faune nocturne, ainsi que les îlots de chaleur urbains. La plantation d'arbres et de végétation supplémentaires sur le site du CERN contribuera à atténuer ce phénomène, qui survient dans les zones fortement artificialisées avec peu ou pas de verdure. Alors que le béton et l'asphalte emmagasinent la chaleur, la végétation aide à rafraîchir l'air et à stabiliser les températures.

¹¹⁴ Disponible en ligne : <https://cds.cern.ch/record/2792531?ln=fr>

¹¹⁵ étude disponible : <https://environmentreports.web.cern.ch/environment-report-2023-2024/biodiversity-land-use/>

Engagements au-delà du périmètre du CERN

L'Organisation s'engage également à améliorer la biodiversité en aval de ses activités. En 2020, le CERN a cosigné une charte initiée par le WWF Genève pour la revitalisation du Nant d'Avril, le deuxième plus grand affluent du Rhône dans le bassin genevois. Outre l'amélioration de la qualité de l'eau, le projet renforcera la biodiversité de l'ensemble du bassin versant. Le projet se déroulera jusqu'en 2033 et les actions menées favoriseront la recolonisation par certaines espèces cibles, notamment la truite fario, la salamandre tachetée et la couleuvre à collier.



Quelques espèces florales situées aux abords des installations du LHC (source : CERN's Year of Environmental Awareness, site internet officiel du CERN)



**CONCLUSIONS :
ENSEIGNEMENTS POUR LE
DEBAT SUR LE PROJET FCC**

L'histoire du LEP puis du LHC montre que les grandes infrastructures scientifiques du CERN s'inscrivent dans des temporalités longues, reposent sur des arbitrages scientifiques, technologiques et financiers complexes, et entretiennent des interactions durables avec les territoires qui les accueillent. Le retour d'expérience associé à ces deux projets apporte plusieurs enseignements utiles pour éclairer le débat public et la concertation autour du projet de Futur collisionneur circulaire (FCC).

Un processus de décision progressif fondé sur l'expertise et l'évaluation des alternatives

La réalisation du LEP puis du LHC s'est appuyée sur plusieurs années d'études scientifiques, techniques, environnementales et financières, ainsi que sur des processus de validation impliquant les instances du CERN et de ses États membres. Les différentes alternatives technologiques ont été analysées avant les décisions finales : collisionneur électron*-positon* ou proton-proton*, machine linéaire ou circulaire, variantes de tracés, réutilisation ou non des infrastructures existantes.

Ces expériences montrent que les choix réalisés ne résultaient pas d'une trajectoire unique ou prédéterminée, mais d'arbitrages successifs entre ambitions scientifiques, maturité technologique, maîtrise des coûts, délais de réalisation et contraintes territoriales.

Le débat sur le FCC s'inscrit dans cette continuité : il intervient à un moment où plusieurs options scientifiques et technologiques sont encore discutées au niveau international et où la décision finale n'a pas encore été prise par les États membres du CERN.

L'importance de l'intégration territoriale et du dialogue avec les populations

Le retour d'expérience du LEP et du LHC montre également que la faisabilité territoriale constitue un enjeu majeur pour les grandes infrastructures scientifiques. Dès les années 1980, le projet LEP a donné lieu à des réunions publiques, des conférences-débats.

Le CERN a progressivement structuré ses relations avec les territoires à travers des dispositifs de concertation associant collectivités locales, services de l'État et représentants du CERN. Cette expérience souligne l'importance d'un dialogue continu avec les habitants, les élus, les acteurs économiques, agricoles et associatifs concernés par les projets. Le retour d'expérience montre également que certaines inquiétudes exprimées lors des débats sur le LEP puis le LHC, notamment concernant les risques géologiques, hydrogéologiques, les nuisances ou les impacts environnementaux, se retrouvent aussi dans les échanges avec une partie du public actuel pour le projet FCC. Néanmoins, la différence majeure est que le CERN anticipe de plus en plus ces temps de dialogue, en suivant les évolutions législatives des États hôtes en la matière, permettant ainsi une information et des débats en amont de toute décision du CERN.

Des projets fortement dépendants des infrastructures existantes

Le LEP puis le LHC illustrent la logique cumulative des infrastructures du CERN. Le LEP a bénéficié des accélérateurs déjà présents sur le site du CERN, tandis que le LHC a ensuite réutilisé le tunnel du LEP ainsi qu'une grande partie de la chaîne d'injection existante.

Cette mutualisation des infrastructures a permis de limiter certains coûts, de réduire les emprises nouvelles et de capitaliser sur des compétences techniques déjà présentes sur le territoire. Elle a également renforcé le rôle du bassin franco-genevois comme pôle scientifique international durable.

Le projet FCC s'inscrit lui aussi dans cette logique de continuité d'utilisation des infrastructures existantes du CERN et bénéficierait également de cet héritage.

Une prise en compte croissante des enjeux environnementaux

Le retour d'expérience du LEP et du LHC montre une évolution progressive des exigences environnementales appliquées aux grands projets scientifiques.

Les études géologiques et hydrogéologiques ont joué un rôle important dans le choix des tracés du LEP et dans l'adaptation du projet afin de limiter les risques techniques et environnementaux. Les chantiers ont également conduit à développer des techniques spécifiques visant à protéger les nappes phréatiques, limiter les nuisances ou encadrer les déblais. Le LHC a par ailleurs renforcé les dispositifs de suivi environnemental, notamment en matière de gestion des déchets, de maîtrise des impacts des chantiers et de consommation énergétique.

Des impacts économiques et scientifiques durables

Le LEP puis le LHC ont contribué au maintien et au développement d'un écosystème scientifique, industriel et technologique de dimension internationale dans la région franco-genevoise. Les phases de conception, de construction et d'exploitation ont mobilisé sur plusieurs décennies des milliers de chercheurs, ingénieurs, techniciens et entreprises, générant une activité économique importante à l'échelle locale, régionale et internationale.

Au-delà des dépenses directement liées aux chantiers et à l'exploitation des infrastructures, ces projets ont favorisé le développement durable de compétences scientifiques et techniques de haut niveau, l'installation d'entreprises spécialisées dans des domaines de pointe, ainsi que la constitution de réseaux internationaux de recherche et d'innovation. Les collaborations industrielles mises en place autour du CERN ont notamment contribué au développement de technologies liées à la supraconductivité, à la cryogénie, aux matériaux avancés, aux détecteurs, à l'informatique scientifique et aux applications médicales.

Le LEP puis le LHC ont également produit des avancées scientifiques majeures, allant des mesures de précision du Modèle standard* à la découverte du boson de Higgs* en 2012. Ces infrastructures ont contribué à faire évoluer durablement la physique des particules, tout en participant au développement de technologies et de méthodes ensuite réutilisées dans d'autres domaines scientifiques, industriels et médicaux.

Le retour d'expérience montre ainsi que les grandes infrastructures scientifiques doivent être analysées simultanément comme des projets de recherche fondamentale, des projets industriels, des instruments de coopération internationale et des projets territoriaux, dont les effets scientifiques, économiques, technologiques et humains se déploient sur plusieurs décennies.

Un retour d'expérience utile mais non directement transposable

Enfin, le retour d'expérience du LEP et du LHC apporte des éléments utiles pour éclairer le débat sur le FCC, tout en présentant certaines limites. Les contextes scientifiques, réglementaires, environnementaux, énergétiques et sociétaux ont fortement évolué depuis les années 1980 et 1990. Les attentes contemporaines en matière de participation du public, d'environnement, de sobriété énergétique ou de compensation territoriale sont aujourd'hui beaucoup plus importantes.

Les enseignements tirés du LEP et du LHC ne permettent donc pas de préjuger des conclusions du débat sur le projet FCC, mais ils constituent des éléments de compréhension utiles pour apprécier la manière dont le CERN a historiquement conçu, réalisé et intégré ses grandes infrastructures scientifiques dans leur territoire d'accueil.



GLOSSAIRE

LES INSTALLATIONS DU CERN

> **ACCÉLÉRATEUR**

Dispositif complexe, situé généralement dans un tunnel, qui accélère des faisceaux de particules chargées et les porte à des énergies élevées. On utilise des champs électriques pour accélérer les particules et des aimants pour les guider et les focaliser. Les faisceaux peuvent entrer en collision entre eux ou avec une cible fixe.

- ↘ Un collisionneur circulaire est un accélérateur dans lequel deux faisceaux, accélérés en sens opposé, interagissent en des points de collision déterminés.
- ↘ Un accélérateur linéaire (linac) sert souvent de premier maillon dans la chaîne d'accélération.
- ↘ Un synchrotron est un accélérateur dans lequel le champ magnétique courbant les orbites des particules augmente avec l'énergie de ces dernières, ce qui permet d'obtenir des orbites circulaires avec un rayon de constante.

> **CAVITÉ RADIOFRÉQUENCE**

Pour accélérer les particules, les accélérateurs sont dotés de cavités radiofréquence (RF) : ce sont des enceintes métalliques qui abritent un champ électromagnétique. Les particules chargées qui pénètrent dans ce champ reçoivent une impulsion électrique qui les fait accélérer. Dans le Grand collisionneur de hadrons (LHC), 16 cavités RF sont placées dans quatre réfrigérateurs cylindriques appelés cryomodules, ce qui leur permet de fonctionner à un état supraconducteur.

> **FAISCEAU**

Dans un accélérateur, les particules sont rassemblées en un faisceau. Les faisceaux peuvent contenir des milliards de particules et peuvent être divisés en paquets. Chaque paquet mesure ordinairement plusieurs centimètres de long, mais seulement quelques millimètres, voire micromètres de large.

> **INJECTEUR**

Système qui fournit des particules à un accélérateur. La chaîne d'injection du LHC est constituée de plusieurs accélérateurs successifs.

> **LHC (LARGE HADRON COLLIDER)**

Grand collisionneur de hadrons ; le plus grand accélérateur du CERN et au monde.

> **PS (PROTON SYNCHROTRON)**

Accélérateur qui sert à accélérer des particules (ions et protons), soit pour envoyer les faisceaux* directement dans des expériences, soit pour alimenter des accélérateurs* plus puissants.

> **SPS (SUPER PROTON SYNCHROTRON)**

Supersynchrotron à protons. Accélérateur fournissant les faisceaux (ions et protons) pour des expériences du CERN, et préparant également ceux du LHC.

LES NOTIONS CLÉS DE LA PHYSIQUE DES PARTICULES

> **PARTICULES ÉLÉMENTAIRES**

Les particules élémentaires sont les plus petits « grains de matière », d'une taille bien inférieure à celle des atomes. Elles ne sont pas observables à l'œil nu et nécessitent des accélérateurs* pour comprendre leur comportement.

Ces particules se répartissent en deux groupes : les quarks et les leptons.

- ↘ Les différents **quarks** sont les quarks u et d, les quarks c (charmés) et s (étranges), et les quarks t (top) et b (bottom).
- ↘ La catégorie des **leptons** regroupe l'électron et le neutrino de l'électron, le muon et le neutrino mu, le tau et le neutrino tau.

Les physiciens ont développé une théorie appelée « **Modèle standard** » pour mieux les comprendre. Ils valident et affinent ce Modèle à l'aide d'expériences qui permettent d'observer la présence réelle de certaines particules, parfois bien après qu'elles ont été incluses dans le Modèle, comme le boson de Higgs par exemple.

Quatre forces, ou interactions, fondamentales assurent la cohésion des particules. Elles sont portées par des particules appelées bosons. La force électromagnétique est portée par le photon ; la force faible par les bosons W, chargés, et par le boson Z, neutre ; la force forte par le gluon ; enfin, la gravité est probablement portée par le graviton, qui n'a pas encore été découvert. Les **hadrons** sont des particules sensibles à la force forte. Ils comprennent les mésons, particules formées d'une paire quark-antiquark, et les baryons, particules formées de trois quarks. Le pion et le kaon sont deux types de mésons. Les **neutrons** et les **protons** sont des baryons ; les neutrons contiennent un quark u et deux quarks d ; les protons contiennent deux quarks u et un quark d.

> **ANTIMATIÈRE**

À toute particule de matière correspond une antiparticule. Les antiparticules chargées portent une charge électrique opposée à celle de leur partenaire de matière. Bien que les antiparticules soient excessivement rares dans l'Univers aujourd'hui, on pense que matière et antimatière ont été créées en quantités égales lors du Big Bang.

> **ANTIPROTON**

L'antiproton est l'antiparticule du proton (voir Antimatière).

> **ATOME**

Tout élément de notre Univers, du Soleil à notre corps, qu'il soit solide, liquide ou gazeux, est composé d'atomes. De taille très petite – un dixième de milliardième de millimètre –, ils sont composés de trois types de particules :

- ↘ Les **protons**, chargés positivement ;
- ↘ Les **neutrons**, non chargés (les protons et les neutrons composent le noyau) ;
- ↘ Les **électrons**, chargés négativement, qui gravitent autour du noyau. Un électron est une particule qui porte une charge électrique négative. Les électrons forment la couche extérieure « réactive » des atomes qui interagissent avec d'autres atomes et forment les liens chimiques qui maintiennent les molécules groupées, formant les corps de matière qui nous composent et sont tout autour de nous. Des flux d'électrons entre deux points génèrent un

courant électrique.

> **BOSON DE HIGGS**

Particule dont l'existence a été théorisée dans les années 1960 et vérifiée grâce au Grand collisionneur de hadrons (LHC) en 2012, et que les physiciens associent au mécanisme par lequel les particules acquièrent une masse.

> **CHROMODYNAMIQUE QUANTIQUE**

Théorie physique qui décrit l'interaction forte, l'une des quatre forces fondamentales, qui permet de comprendre les interactions entre les quarks et les gluons et, au passage, la cohésion du noyau atomique.

> **ELECTRON**

Un électron est une particule qui porte une charge électrique négative. Les électrons forment la couche extérieure « réactive » des atomes qui interagissent avec d'autres atomes et forment les liens chimiques qui maintiennent les molécules groupées. Des flux d'électrons entre deux points génèrent un courant électrique.

> **HADRON**

Particule subatomique, c'est-à-dire de taille inférieure à un atome, contenant des quarks, des anti-quarks et des gluons, et qui est donc soumise à la force forte. (Voir particules)

> **ION**

Atome auquel on a enlevé (ion positif) ou ajouté (ion négatif) un ou plusieurs électrons.

> **LUMINOSITÉ**

En physique des particules, la luminosité mesure la capacité d'un accélérateur de particules à produire le nombre d'interactions requis. Plus la luminosité produite par un accélérateur de particules est élevée, plus les expériences reçoivent de données. Une plus grande luminosité signifie donc des résultats plus précis et une probabilité accrue d'observer les phénomènes les plus rares.

> **MATIÈRE**

La matière que nous connaissons est formée de molécules, elles-mêmes constituées d'atomes.

> **MODÈLE STANDARD**

Ensemble de théories rassemblant les connaissances actuelles sur les propriétés des particules fondamentales.

> **NEUTRON**

Particule subatomique de charge électrique nulle. Les neutrons sont présents dans le noyau des atomes, liés avec des protons par l'interaction forte.

> **NEUTRINO**

Particule neutre qui n'interagit que très faiblement en traversant la matière.

> **PLASMA QUARKS-GLUONS (QGP)**

Type de plasma dans lequel les protons et les neutrons se dissocieraient en leurs parties constitutives ; cet état de la matière aurait existé immédiatement après le Big Bang.

> **POSITON (OU POSITRON)**

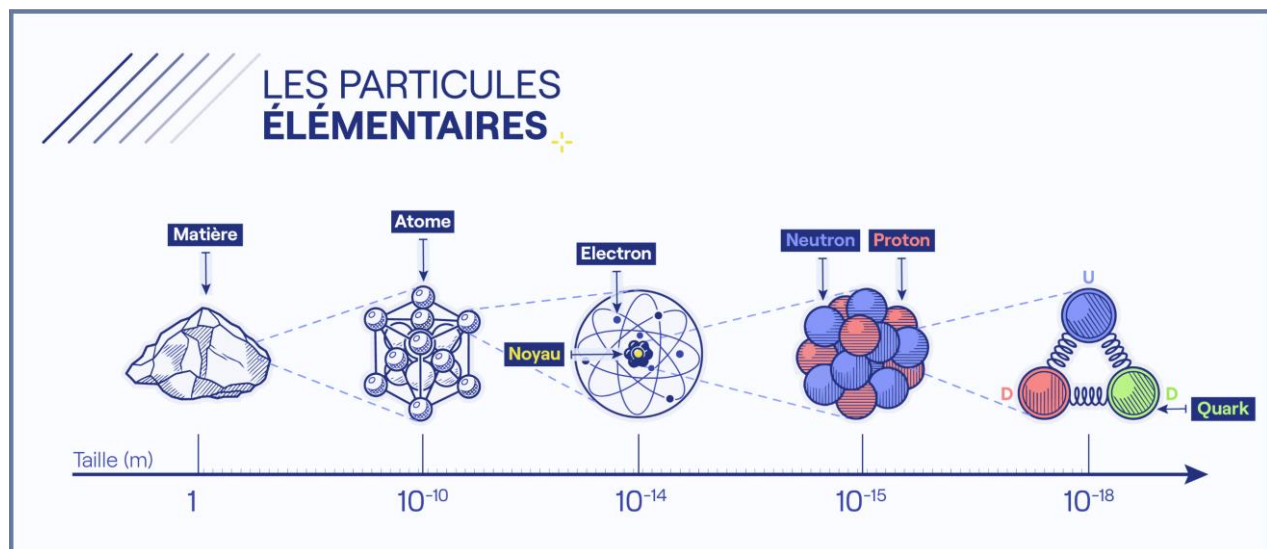
Particule strictement de même masse que l'électron, mais chargée positivement, donc considérée comme étant l'antiparticule de l'électron (anti-électron).

> **PROTON**

Particule subatomique portant une charge électrique élémentaire positive. Les protons sont présents dans les noyaux atomiques, où ils sont liés à des neutrons par l'interaction forte à l'exception du noyau d'hydrogène ordinaire.

> **SAVEUR**

La saveur, en physique des particules, est une caractéristique permettant de distinguer différents types de leptons et de quarks. Les leptons se déclinent en trois saveurs (électron, muon et tauon) et les quarks en six saveurs (Bas, Haut, Étrange, Charme, Beauté, Vérité).



Les unités de mesures et d'énergie

> **ÉLECTRONVOLT (EV)**

Unité de mesure de l'énergie ou de la masse utilisée en physique des particules.

Un eV étant extrêmement petit, ses multiples, le MeV (million d'électronvolts) et le GeV (milliard d'électronvolts), sont d'usage plus courant. La toute dernière génération d'accélérateurs de particules atteint des énergies de plusieurs milliers de milliards d'électronvolts (de l'ordre du TeV).

A titre d'illustration, le Grand Collisionneur de Hadrons (LHC), le plus grand collisionneur actuel, permet

de faire entrer en collision des particules à une énergie d'environ 13,6 TeV.

> **MÉGAWATT (MW)**

Unité de mesure de la puissance électrique. 1 000 mégawatts (MW) = 1 gigawatt (GW) = 1 milliard de watts.

> **GIGAWATTHEURE (GWH)**

Un gigawattheure (GWh) correspond à un milliard de wattheures (1 GWh = 1 000 000 000 Wh ou 1 000 MWh). Cette unité est couramment utilisée pour quantifier la production ou la consommation d'énergie à l'échelle régionale, notamment dans le secteur électrique, ou d'un parc de production à l'année.

> **TEV (TÉRAÉLECTRONVOLT):**

Unité d'énergie utilisée en physique des particules. Un téraélectronvolt correspond à mille milliards d'électronvolts, soit 10^{12} eV. Les énergies des collisionneurs sont souvent exprimées en TeV pour indiquer l'énergie disponible lors des collisions de particules.

DÉBAT PUBLIC EN FRANCE, SOUS L'ÉGIDE DE LA COMMISSION NATIONALE
DU DÉBAT PUBLIC, DU **2 JUIN** AU **1^{ER} OCTOBRE 2026**

↘ <https://www.debatpublic.fr/projet-accelerateur-particules>

CONCERTATION PUBLIQUE EN SUISSE, SOUS L'ÉGIDE DE TIERS GARANTS
EXPERTS, DU **18 MAI** AU **2 OCTOBRE 2026**

↘ <https://www.concertation-fcc-cern.ch/la-plateforme-du-cern->