

# MISE A JOUR DE LA DISCIPLINE DE LANGAGE

15 April 2024, V1.0

## 1. Le CERN

---

### 1.1. Le plus grand laboratoire de physique des particules du monde

- Qu'est-ce que le CERN ?

Le plus grand laboratoire de physique des particules du monde, créé en 1954, est basé en France (Pays de Gex, Ain) et en Suisse (Meyrin, Genève). C'est une organisation intergouvernementale qui compte 23 États membres, 11 États membres associés. Plusieurs États et organisations ont le statut d'observateur ; le CERN travaille également en collaboration avec plus de 50 États non-membres.

- Quelles sont les missions du CERN ?

- Mettre en œuvre et mener un programme de recherche scientifique diversifié et actualisé en physique fondamentale.
- Mettre à disposition de la communauté scientifique et faire fonctionner un complexe d'accélérateurs de particules.
- Rassembler des personnes du monde entier dans le but de repousser les limites de la science et de la technologie et de favoriser la collaboration internationale à des fins pacifiques.
- Former une nouvelle génération de scientifiques et d'ingénieurs.
- Pour en savoir plus : Convention pour l'établissement d'une Organisation européenne pour la Recherche nucléaire du 1<sup>er</sup> juillet 1953 : [https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1955/695\\_713\\_721/fr](https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1955/695_713_721/fr)  
<https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000000499865>  
Notre site : <https://home.cern/fr/about/who-we-are/our-mission>

- Quel est le budget annuel du CERN ?

- Environ 1,4 milliard de francs suisses.
- Chaque État membre y contribue en fonction de son revenu national net.

- Quelles sont les contributions de la France et de la Suisse ?

**En 2023 :**

- France : 13,5 % du budget du CERN (env. 160 millions de francs suisses)
- Suisse : 3,8 % du budget du CERN (env. 45 millions de francs suisses)

## 1.2. Comprendre les mystères de l'Univers

- Qu'étudie le CERN ?
  - Les particules fondamentales qui composent la matière visible de l'Univers et les forces qui agissent entre elles.
  - La matière visible de l'Univers est composée d'un nombre restreint de particules, dont le comportement est régi par quatre forces distinctes ; la matière visible ne représente qu'environ 5 % de la matière et de l'énergie totales de l'Univers. Les 95 % invisibles ne sont pas encore connus.
  - La découverte du boson de Higgs il y a une décennie n'a pas mis un terme aux recherches ; les physiciens doivent étudier cette particule en détail afin de pouvoir mesurer ses propriétés. De nombreuses questions restent sans réponse. Par exemple, quelle est la nature de la matière noire qui forme une grande partie de l'Univers ? Ou bien, pourquoi y a-t-il bien plus de matière que d'antimatière dans l'Univers, alors que matière et antimatière ont été produites en quantité égale au début de l'Univers ? Et bien d'autres choses encore...
  
- À quoi servent les recherches menées au CERN ?
  - Le principal objectif du CERN est la recherche fondamentale en physique des particules. Ce type de recherche produit des connaissances essentielles et répond ainsi à la curiosité humaine.
  - Les grandes avancées proviennent de nouvelles connaissances générées par la recherche fondamentale ; sans science fondamentale, il n'y a pas de science appliquée : ainsi, « l'équation fondamentale de la relativité générale [d'Albert Einstein] (...) a donné naissance à plusieurs applications concrètes, utilisées quotidiennement [comme] le GPS » ([https://www.lemonde.fr/les-decodeurs/article/2015/11/27/comment-la-theorie-de-la-relativite-d-einstein-a-change-nos-vies\\_4819236\\_4355770.html](https://www.lemonde.fr/les-decodeurs/article/2015/11/27/comment-la-theorie-de-la-relativite-d-einstein-a-change-nos-vies_4819236_4355770.html)) ; « [des] découvertes, qui forment la première révolution quantique, découlent un certain nombre d'applications encore utilisées aujourd'hui : les lasers, les circuits intégrés ou encore les transistors » (<https://www.cea.fr/comprendre/Pages/physique-chimie/essentiel-sur-mecanique-quantique.aspx>)
  - Les outils et technologies développés pour mener à bien ces recherches peuvent avoir de nombreuses applications directes (p. ex. imagerie médicale ou thérapie hadronique utilisée pour le traitement de certains cancers. Voir aussi : <https://knowledgetransfer.web.cern.ch/applications-cern-technologies-society>)
  - Ces technologies sont généralement transférées à la société par les universités et instituts participant aux collaborations et par le CERN (p. ex. dans des domaines allant de l'aérospatiale au patrimoine culturel, en passant par la santé, la sécurité et la protection de l'environnement).
  
- En quoi consistent les « expériences » ?
  - Les recherches scientifiques au CERN sont organisées en expériences dont l'ampleur varie. Ces expériences étudient les interactions entre des particules dans les accélérateurs ; cela repose sur une forte capacité informatique.
  - L'installation phare du CERN est le LHC (Grand collisionneur de hadrons – *Large Hadron Collider*), le plus grand et plus puissant accélérateur du monde. Les grandes expériences du LHC réunissent des centaines d'universités et d'instituts de recherche et des milliers de scientifiques qui collaborent au service d'une même mission.
  - Les expériences du CERN durent plusieurs années, parfois plusieurs décennies. Ainsi, les expériences du LHC ont recueilli leurs premières données en 2010 et seront opérationnelles

jusqu'en 2040 environ.

- Qu'est-ce qu'un accélérateur de particules ?

- Une machine qui propulse des faisceaux de particules (p. ex. protons ou électrons) à des vitesses proches de celle de la lumière ; un accélérateur peut être linéaire ou circulaire.
- Plusieurs accélérateurs reliés les uns aux autres sont actuellement en service au CERN.
- Il existe quelque 30 000 accélérateurs de particules dans le monde (p. ex. l'installation MedAustron en Autriche pour le traitement de certaines formes de cancer ; l'Accélérateur Grand Louvre d'Analyse Élémentaire AGLAE à Paris pour la vérification des quantités et combinaisons d'éléments dans les œuvres du musée ; l'Installation Européenne de Rayonnement Synchrotron ESRF à Grenoble).

- Qu'est-ce qu'un collisionneur de particules ?

L'accélérateur de particules propulse des particules chargées (électrons, protons, ions, etc.) à des vitesses très élevées, proches de la vitesse de la lumière grâce à des champs électromagnétiques. Ces particules sont ensuite dirigées vers une cible ou entrent en collision avec d'autres particules circulant en sens inverse. En analysant les résultats de ces collisions, les physiciens peuvent étudier la structure de la matière, les forces fondamentales de l'univers et les particules élémentaires.

Un seul collisionneur est actuellement en service au CERN depuis 2010, le LHC ; installé dans un tunnel souterrain de 27 km de circonférence, c'est le plus grand et plus puissant collisionneur de particules du monde.

- Qu'est-ce que le « Modèle standard » ?

**Le Modèle standard de la physique des particules (« Modèle standard ») est la théorie actuelle qui permet d'expliquer la plupart des phénomènes observables à l'échelle des particules.**

La matière visible dans l'Univers est faite de douze constituants de base appelés particules fondamentales et gouvernée par quatre forces fondamentales. C'est le Modèle standard de la physique des particules qui nous aide le mieux. Il permet d'expliquer comment les particules qui forment la matière visible (et la vie sur Terre), ainsi que les forces qui les maintiennent ensemble, expliquent l'évolution de l'Univers depuis ses premiers instants jusqu'à aujourd'hui.

- Élaboré au début des années 1970, il a permis d'expliquer les résultats d'un grand nombre d'expériences et de prédire avec exactitude une grande variété de phénomènes. Avec le temps, et bien des expériences plus tard, le Modèle standard s'est imposé comme une théorie ayant de solides fondements expérimentaux.
- Le Modèle standard permet donc d'expliquer tous les phénomènes naturels, sauf la gravitation (<http://voyage.in2p3.fr/standard.html>).

### 1.3. Une organisation ancrée dans son territoire

- Depuis combien de temps le CERN est-il établi dans la région franco-genevoise ?
  - Depuis sa fondation en 1954
  
- Dans quelle mesure le CERN est-il un acteur dans son territoire ?

L'activité du CERN a plusieurs implications directes sur le territoire

  - Économie :
    - Emplois directs, indirects et induits
    - Contrats de fourniture et de service
    - Tourisme
    - Collaboration scientifique avec des universités et organismes de recherche (p. ex. pour la radiothérapie FLASH avec l'Université de Lausanne)
    - Création d'entreprises (p. ex. AAA à Saint-Genis spécialisée dans le domaine médical (aujourd'hui Novartis) ou Proton Mail à Genève, spécialiste des courriers électroniques cryptés).
  - Formation/enseignement :
    - Programmes d'éducation et de sensibilisation du CERN pour jeunes de tous âges (p. ex. élèves du primaire et du secondaire, apprentis et étudiants universitaires, visites de classes) et pour enseignants du secondaire
    - Visites guidées et expositions pédagogiques et ludiques.
  - Développement d'infrastructures locales :
    - Routes et transports (p. ex. pistes cyclables)
    - Réseau internet (p. ex. point d'échange Internet CIXP du CERN)
    - Amélioration des infrastructures de production et de distribution d'énergie (p. ex. récupération de chaleur provenant des installations du CERN à Ferney-Voltaire)
    - Cité Scolaire Internationale de Ferney-Voltaire.
  
- Combien de personnes travaillent-elles au CERN ou avec le CERN ?
  - Env. 2 500 personnes sont directement employés par le CERN (essentiellement ingénieurs, techniciens et personnel administratif originaires des États membres).
  - Plus de 12 200 scientifiques sont employés par des universités et instituts de recherche dans plus de 70 pays (essentiellement physiciens, ingénieurs et techniciens d'environ 110 nationalités).
  - Env. 1 000 employés d'entreprises contractantes (personnel technique et administratif en grande partie originaire de la région).
  - On compte environ 8 800 personnes liées au CERN qui sont résidentes dans la région dans les cantons Genève et Vaud en Suisse et dans les départements Ain et Haute-Savoie en France.
  
- Le CERN est-il ouvert au public ?
  - Le Portail de la science, inauguré en 2023, a pour vocation l'éducation et la communication grand public. <https://visit.cern/fr/science-gateway>
  - Il permet de mieux comprendre le travail des milliers de scientifiques du CERN.
  - Grâce à lui, la capacité d'accueil de visiteurs est passée de 150 000 à 300 000 personnes par an (55 % des visiteurs viennent exclusivement pour voir le CERN et 45 % à l'occasion de la visite d'autres sites touristiques de la région franco-genevoise).

## 2. Le FCC

### 2.1. Un projet majeur pour l'avenir de la recherche scientifique

- Que veut dire le sigle FCC ?
- Futur collisionneur circulaire (*Future Circular Collider*)

#### Pourquoi un nouveau collisionneur de particules ?

Le collisionneur de particules est l'instrument scientifique que la communauté scientifique mondiale considère comme le plus prometteur en termes de perspectives de recherche et de variété de sujets d'étude en physique des particules moderne. Il permettrait notamment d'exploiter pleinement la découverte du boson de Higgs et d'étudier plus avant le Modèle standard.

- La découverte par le CERN, en 2012, de la particule fondamentale appelée boson de Higgs a complété la théorie qui décrit le comportement de la matière visible de l'Univers (Modèle standard) et a ouvert un nouveau chapitre dans la recherche. Le boson de Higgs est un outil puissant pour la recherche d'une physique au-delà du Modèle standard.
  - Cependant, de nombreuses questions restent à étudier : nous savons par l'observation des phénomènes dans l'Univers que le Modèle standard n'est pas complet. Par exemple, bien que l'observation des galaxies aient prouvé l'existence de la matière noire, la particule élémentaire associée à cette matière noire n'a pas encore été découverte. L'absence d'antimatière dans un Univers dominé par la matière reste inexplicée. Répondre à ces questions nécessite des mesures plus précises. C'est ce que permettrait le collisionneur électron-positron FCC-ee.
  - En effet, depuis 2012, le LHC continue à produire des bosons de Higgs et les expériences du LHC poursuivront leurs recherches jusqu'en 2040 ; après cette date, des accélérateurs de particules plus puissants et plus précis seront nécessaires pour faire avancer la recherche ; le FCC serait alors l'installation au service de la recherche mondiale qui répondrait à ce besoin, jusqu'à la fin du XXI<sup>e</sup> siècle.
- Quelles seraient les missions précises du FCC ?
  - Étudier en détail le boson de Higgs et ses interactions avec les autres particules fondamentales connues. Le FCC-ee n'est pas seulement une excellente usine à Higgs : c'est également une usine à interactions électrofaibles et une usine à saveur. Le FCC-ee est un instrument de précision polyvalent qui permettra de continuer à explorer la nature sous tous ses aspects à l'échelle de l'infiniment petit. Il est optimisé pour étudier avec une grande précision les interactions électrofaibles et fortes lors de la production et de la désintégration des quatre particules les plus lourdes du Modèle standard (boson Z, boson W, boson de Higgs et quark top)
  - Rechercher les moindres écarts avec les prédictions du Modèle standard.
  - Rechercher l'existence d'une nouvelle physique à des échelles d'énergie sans précédent.
  - Explorer des phénomènes rares.

- À quoi ressemblerait cet ouvrage ?

- Deux collisionneurs de particules installés successivement dans un tunnel souterrain en forme d'anneau de 91 km de circonférence, situé en sous sol profond avec des puits entre 180 et 400 m de profondeur. Le FCC est plus profond que le LHC.
- en moyenne à 200 m de profondeur (entre 50 m et 500 m)
- Ces collisionneurs seraient reliés au complexe d'accélérateurs du CERN dont certains serviraient d'injecteurs de faisceaux
- Il y aurait huit sites de surface, dont 1 en Suisse et 7 en France.
- Les superficies des sites varient selon leurs vocations entre 4 ha et 6 ha.



- Voir ici la carte :

- Une fois construit, le FCC serait-il visible ?

- Seuls les huit sites de surface, repartis le long de la circonférence du tunnel, seraient visibles.
- Le tunnel serait souterrain et donc invisible en surface.
- Les 4 sites de surface expérimentaux seront installés sur un terrain d'une surface de 8 hectares maximum, les terrains entourant les 4 sites techniques seront limités à 5 hectares maximum, intégration paysagère incluse.

- Combien de temps durerait le chantier ?

- Le chantier se déroulerait sur 10 ans environ, en plusieurs phases (préparation des chantiers, génie civil en sous-sol, construction des sites de surface).

- Quelles seraient les nuisances envisageables pour les riverains ?

- Comme dans tout grand chantier, il génèrera des impacts localisés. Le CERN mettra tout en œuvre pour limiter la durée des travaux et s'assurera d'une communication régulière et transparente avec les riverains et les collectivités locales. Des contacts sont en cours avec les territoires afin d'en limiter les nuisances, retrouvez les dates précises des rencontres sur le site dédié. [\(ajouter lien\)](#)
- Une étude de l'état initial du territoire (air, eau, environnement, etc.) est comprise dans l'étude de faisabilité. Elle a commencé en 2023.
- S'il est décidé d'aller de l'avant, une étude d'impact environnemental permettra une évaluation plus précise des impacts potentiels (biodiversité, sols, eau, air, climat, patrimoine culturel, paysage notamment).

## 2.2 Soutenir la recherche jusqu'à la fin du XXI<sup>e</sup> siècle

### 1 Un calendrier par étapes



- À quelle date le FCC serait-il mis en service ?
  - Le premier collisionneur FCC-ee (première phase FCC) serait mis en service vers 2045 pour une exploitation d'une quinzaine d'années
  - Le second collisionneur FCC-hh, installé dans le même tunnel (seconde phase FCC) prendra le relais vers 2070 pour une exploitation allant jusqu'à la fin du XXI<sup>e</sup> siècle.
- Quelles sont les étapes envisagées ?
  - 2025 : remise de l'étude de faisabilité technique actuellement en cours
  - 2026 : révision de la stratégie de la physique des particules
  - Après 2026 : commencement d'une phase préparatoire d'un projet de construction

Si la communauté scientifique voit sa priorité dans une nouvelle infrastructure de recherche basée sur l'étude FCC, elle sera incluse dans la prochaine mise à jour de la stratégie européenne pour la physique des particules (2026-2028). Dans ce cas, le Conseil du CERN pourra décider de passer à une étude de conception plus détaillée et une phase préparatoire d'un projet de construction.

  - 2026 – 2032 : phase préparatoire
  - Études complémentaires et plus approfondies commandées par les États membres du CERN.
  - Définition des conditions et des procédures d'implantation par la France et la Suisse en collaboration avec le CERN.
  - Décision des États membres du CERN, dont la France et la Suisse, réunis au sein du Conseil du CERN, concernant la réalisation du projet.
  - 2033 à 2040 : phase de travaux de génie civil
  - > 2038 : phase d'installation du FCC-ee
  - > 2045 : mise en service et exploitation du collisionneur FCC-ee (première phase FCC)
  - > 2060 : remplacement du premier collisionneur FCC-ee par le second collisionneur FCC-hh
  - De 2070 à la fin du XXI<sup>e</sup> siècle : mise en service et exploitation du collisionneur FCC-hh (seconde phase FCC)

## 2.3 Un bénéfice important pour les territoires

- **Quels sont les bénéfices prévus du FCC pour les territoires ?**
- Pérennisation de la présence d'environ 9 000 résidents dans la région, contribuant à l'économie locale pour environ 115 millions d'euros par an.
- Poursuite des contrats de services et des emplois dans la région à l'échelle d'environ 600 millions d'euros par an.
- Emploi direct locale pour le projet.
- Formation multidisciplinaire (p.ex. langues, haute technologies, relations internationales)
- Maintien de l'attractivité de la région pour du personnel hautement qualifié.
- Engagement des industries de la construction, des transports publics, et de technologie.
- Développement durable du secteur du tourisme comptant sur environ 300 000 visiteurs par année liés au CERN et au FCC.
- Contribution à la qualité et la durabilité des services publics comme les services d'urgence et d'intervention (p.ex. pompiers).
- Contribution à la qualité et la stabilité des infrastructures techniques comme la fourniture d'électricité, le traitement des eaux usées, la mobilité et la mobilité douce.
- Création durable des nouvelles entreprises en lien avec des activités du CERN.
  
- Bénéfices à travers l'aménagement des sites de surface et la construction
  - Fourniture de chaleur résiduelle comme énergie propre à long terme,
  - Renaturalisation des milieux naturels autour des sites, augmentation de la biodiversité,
  - Remblai des carrières en manque de matériel et renaturalisation de ces sites,
  - Potentiel de re-activation des raccordements des trains existants mais actuellement inutilisés,
  - Amenagement des friches, des terres dégradés ou pollués.
  
- **Combien de personnes viendront dans la région pour travailler sur la construction ?**

Sur les 4 sites scientifiques, il y aura jusqu'à 300 personnes actives sur chaque site pendant la construction. Sur les 4 sites techniques, il y aura jusqu'à 150 personnes actives sur chaque site. Au total on compte donc environ 1 800 personnes pendant la phase chantier, distribués entre le canton de Genève, le département de l'Ain et la Haute Savoie.

Les entreprises de travaux publics estiment qu'environ 35 à 50 % des travailleurs seront issus de la population locale, générant ainsi des emplois pour la région. Les autres proviendront, pendant la durée des chantiers, d'autres régions ou pays, en fonction des entreprises impliquées dans les travaux de construction.



## 3. L'étude de faisabilité

### 3.1. Étudier avant de décider

- Qui prendra la décision de faire ou non le FCC ?

#### Une décision collective

Vers 2028, le choix de faire ou non le Futur collisionneur circulaire sera une décision collective des États qui vont contribuer financièrement à un tel projet.

Celle-ci impliquera :

- les États membres qui se réunissent au sein du Conseil du CERN
- les deux États hôtes, la France et la Suisse, et leurs législations respectives en matière de construction et d'installations de recherche à grande échelle.
- tout autre État supplémentaire qui participera financièrement à ce projet.

Pour informer cette décision, une étude de faisabilité est en cours ; elle s'appuie notamment sur des relations suivies avec les territoires concernés, mais aussi sur de nombreuses évaluations techniques et financières.

- La prise de décision est un processus multilatéral qui implique les États membres, les États hôtes du CERN et tout autre Etat supplémentaire qui participera financièrement à ce projet.
- Les États membres du CERN, dont la France et la Suisse, réunis au sein du Conseil du CERN, devront définir les conditions et procédures d'implantation.
- La communauté internationale des scientifiques, représentée par les États qui participeront à un tel projet, s'exprimera sur l'intention de réaliser une nouvelle infrastructure de recherche, en prenant en considération les résultats de l'étude de faisabilité.
- Quelle distinction entre étude de faisabilité FCC et projet FCC ?
- L'étude de faisabilité sert à :
  - o Estimer les conditions de réalisation
  - o Vérifier que la stratégie pensée en amont est techniquement faisable et économiquement viable
  - o Fournir des éléments à la communauté scientifique pour pouvoir peser leurs priorités
  - o Développer les éléments nécessaires pour un plan de réalisation
- Le projet FCC concerne les phases de réalisation, incluant la phase de construction, installation, mise en opération et exploitation. Le projet est nourri par l'étude de faisabilité. Entre l'étude de faisabilité et le projet on trouve la phase de préparation de projet avec les processus d'autorisation.
- Sur quoi l'étude de faisabilité FCC porte-t-elle ?
  - Études du positionnement géographique et territorial
  - Conception du programme de recherche scientifique : que va-t-on étudier et comment ?
  - Conception des accélérateurs : l'injecteur linéaire, l'accélérateur "booster" et les collisionneurs, performance des machines, modes d'opération, efficacité énergétique.

- Conception de certains équipements clés : p.ex. système de radiofréquences, cryogénie, aimants, alignement, systèmes de refroidissement.
  - R&D sur des composants avec des écarts technologiques : systèmes de radiofréquence, supraconducteurs, amélioration de l'efficacité énergétiques et durabilité des infrastructures de refroidissement et d'électricité.
  - Conception des futures expériences
  - Études socio-économiques : durabilité d'une telle infrastructure
  - Financement du projet
  - Gouvernance de l'ouvrage
  - Identification des cadres administratives pour la phase de la préparation d'un projet de construction
- Qui a décidé de faire l'étude de faisabilité FCC ?
    - Les États membres et les États associés du CERN, dont la France et la Suisse, en 2021, sur la recommandation émise par la communauté de la physique des particules lors de la mise à jour de la stratégie européenne pour la physique des particules en 2020.
  - Que se passerait-il pour la physique des particules sur le continent Européen si l'étude de faisabilité concluait que le modèle retenu actuellement pour le FCC n'est pas adapté ?
    - Les résultats de l'étude FCC seront publiés et soumis à la communauté scientifique mondiale en physique de particules pour analyse lors de la mise à jour de la stratégie de la physique des particules.
    - Si les résultats de l'étude ne s'avéraient pas positifs, d'autres priorités pour la recherche scientifique pourraient être mise en avant. Cela peut inclure des projets au CERN et ailleurs dans le monde.
  - Si le FCC n'est pas construit, quel sera le retour sur investissement de l'étude de faisabilité ?
    - Conformément à la politique de science ouverte du CERN, tous les résultats de recherche obtenus au cours de l'étude de faisabilité du FCC seront mis à disposition gratuitement.
    - L'étude apportera des connaissances essentielles pour le développement d'autres futurs accélérateurs et des technologies de pointe comme les revêtements en couche mince, les systèmes de conversion et distribution d'énergie, les supraconducteurs, le refroidissement, la cryogénie, les systèmes informatiques tels que les systèmes d'information environnementaux, les logiciels de modélisation et de simulation, et la valorisation des terres stériles.
    - Les jeunes ingénieurs et chercheurs formés dans le cadre du projet auront acquis une expérience de niveau international et des compétences intersectorielles lorsqu'ils entreront sur le marché du travail.
    - Plusieurs entreprises bénéficieront de l'étude grâce à la R&D et à une expérimentation qui aura été conduite au-delà de leurs rayons d'activité habituels, et ce, dans plusieurs disciplines comme, par exemple, le conseil en administration des entreprises, les études d'efficacité énergétique, la gestion du marché de l'électricité, les services juridiques, les études environnementales, géologiques ou relatives au marché du travail.
    - Au niveau local, la collaboration FCC étudiera entre autres aspects, l'état de l'environnement dans la région, la géologie du bassin franco-genevois et des méthodes innovantes pour la gestion des matériaux excavés. Ces études fourniront des données d'une grande valeur pour tout projet de génie civil dans la région.

- Si le FCC est construit, le LHC fonctionnerait-il aussi en même temps ?

Le FCC-ee ne fonctionnera pas en même temps que le LHC. Mais les infrastructures construites pour le LHC seront réutilisées pour le programme FCC-ee.

- Comment le public serait-il associé au projet ?

Actuellement, dans le cadre de l'étude de faisabilité, le CERN travaille avec les États hôtes pour engager un processus de dialogue afin que le projet soit conforme aux réglementations et pratiques françaises et suisses en matière de consultation du public.

Lors de la phase préparatoire, des représentants du public, notamment dans les communes concernées par des sites de surface seront engagés dans le développement et dans l'intégration territoriale des sites et des aménagements.

Des entreprises, des organismes publics et des représentants du public seront impliqués dans les développements des synergies afin d'assurer que le projet créera des bénéfices durables.

[Faire un lien vers l'étude de faisabilité web site.](#)

- Quel est le coût estimé du FCC ?

L'un des objectifs de l'étude de faisabilité est précisément de chiffrer le coût des travaux (construction) et de l'exploitation. Actuellement, le coût total de l'accélérateur FCC-ee est estimé à 4 milliards de francs suisses. À titre de comparaison, le coût du LHC a représenté environ 4,3 milliards de francs suisses, alors même que le tunnel de 27 kilomètres construit préalablement pour le LEP avait été réutilisé.

La construction des œuvres souterraines et des sites de surface est estimée à 5,5 milliards de francs suisses. Les infrastructures techniques coûteront environ 2.5 milliards de francs suisses. Ces éléments seront utilisés pour le FCC-ee, mais aussi plus tard pour le FCC-hh.

A cela s'ajoutent 4 expériences qui seront portées par des collaborations internationales.

Au total, le coût du FCC-ee est donc estimé à environ 14 milliards de francs suisses.

Ces investissements sont répartis sur environ 15 ans et sur tous les États qui contribueront financièrement. Cela correspond à environ 2.5 euros par imposable et par année dans ces pays.

- Quel est le coût de l'étude de faisabilité préalable au FCC ?

- Env. 20 millions de francs suisses par an pendant cinq ans.

- Qui finance l'étude de faisabilité du FCC ?

- Les États membres du CERN,
- L'Union européenne, qui a déjà financé certaines actions de l'étude (p. ex. EuroCirCol, FCCIS),
- D'autres organismes de par le monde qui participent à l'étude dans un cadre légal dédié ; le modèle de financement fait partie de l'étude en cours.

- Quelles sont les autres études menées au CERN ?

- La communauté scientifique mondiale étudie également d'autres options, mais à un niveau moins détaillé. L'ensemble sera réexaminé lors de la prochaine mise à jour de la stratégie européenne pour la physique des particules, après 2025.
- Jusqu'à aujourd'hui les scénarios suivants ont été étudiés : un collisionneur linéaire jusqu'à 50 km

de longueur au CERN (CLIC), un collisionneur linéaire au Japon (ILC), un collisionneur circulaire de 100 km de circonférence en Chine avec la même configuration que le FCC (CepC et CppC), un collisionneur des hadrons à haute énergie dans le tunnel du LHC (FCC-HE), un collisionneur à leptons pour la production des bosons de Higgs dans le tunnel du LHC (LEP3), un collisionneur entre protons et électrons en utilisant le LHC (LHeC et FCC-eh).

- D'autres études concernent l'analyse de faisabilité et la recherche et le développement de nouveaux accélérateurs des particules sur un horizon temps très long, comme par exemple l'accélération par plasma et l'accélération des muons.
- Même s'il est décidé de ne pas poursuivre les études après 2025, les recherches menées actuellement (p. ex. technologiques, géologiques, efficacité énergétique) seront d'une grande utilité pour le CERN et les territoires.

- Des études de ce type sont-elles menées ailleurs ?

- La Chine mène des études sur un projet très similaire au FCC (CepC et CppC).
- La communauté internationale étudie un projet d'accélérateur linéaire au Japon (ILC).
- La communauté américaine étudie des projets d'accélérateurs pour des différents buts de recherche scientifique aux États-Unis : Cool Cooper Collider pour l'étude du boson de Higgs et également la R&D pour l'accélération des muons.
- Cependant, les investissements nécessaires, la taille des projets et l'existence d'autres accélérateurs de recherche aux États Unis (SLAC, EIC, LBNF, PIP-II) et au Japon (Super KEKB) indiquent qu'un seul projet de réalisation dans le monde sera poursuivi.

- Pourquoi le CERN a-t-il privilégié une étude de faisabilité pour le FCC ?

- Pour l'efficacité du programme de recherche : le FCC est l'approche qui a été jugée la plus efficace en termes de recherche pour étudier de manière approfondie la plus grande variété de sujets prometteurs en physique des particules moderne.
- Un rapport de conception conceptuelle du FCC a été soumis en contribution à la mise à jour 2020 de la stratégie européenne pour la physique des particules. Suite à l'adoption de cette mise à jour par le Conseil du CERN en 2020, le CERN a été mandaté pour réaliser une étude de faisabilité technique et financière du FCC, afin d'être prêt pour la prochaine mise à jour de la stratégie, prévue pour 2027. Peu de temps après la découverte par le LHC du boson de Higgs, la dernière particule non détectée prédite par le Modèle Standard, qui décrit toutes les forces fondamentales connues à l'exception de la gravitation, une nouvelle stratégie a été définie pour la physique des particules en Europe. Le LHC est la seule installation au monde capable de fonctionner dans sa gamme d'énergie, et depuis la dernière mise à jour, il a été amélioré pour atteindre son énergie de conception maximale. En 2025, il devrait subir une autre mise à niveau qui augmentera considérablement le nombre de collisions qu'il peut produire. Pour s'appuyer sur ces réalisations, la nouvelle stratégie recommande la poursuite successive de deux types d'installations. La première étape serait un collisionneur électron-positron qui servirait d'"usine à Higgs", une installation spécialement conçue pour étudier les bosons de Higgs. Cette installation pourrait être une configuration de première étape du FCC, qui serait ensuite convertie en un collisionneur proton-proton pouvant atteindre des énergies de collision allant jusqu'à 100 téraélectronvolts. Décrit par la stratégie comme une "ambition" de la communauté européenne de physique des particules, un collisionneur proton-proton de cette envergure permettrait une recherche largement étendue de phénomènes à haute énergie non pris en compte dans le Modèle Standard.

## 3.2 Limiter l'impact sur l'environnement et les territoires

- Quel est le périmètre géographique de l'étude ?
- Le périmètre géographique de l'étude comprend la région dans le bassin Genevois limitée par le Jura, le Vuache, Mandallaz, Plateau des Bornes, l'Arve et le lac Lemman. Il concerne les départements de l'Ain et de la Haute-Savoie, et le canton de Genève.

### Réutiliser les matériaux excavés lors du creusement du tunnel

La quantité totale des matériaux excavés est estimée à 6.3 millions de m<sup>3</sup> en place ou environ 16 millions de tonnes pour les sept années de la durée du chantier. Le CERN développe actuellement des programmes de recherche afin de valoriser au maximum, et de préférence localement, les matériaux qui seraient extraits du sous-sol.

- Que prévoit le CERN concernant les matériaux d'excavation ?
- Une stratégie pour la gestion des matériaux est en train d'être développée avec des acteurs des États hôtes, des universités et des entreprises compétentes en la matière.
- Les matériaux qui seront caractérisés par des anomalies géogéniques seront traités localement sur les sites d'extraction. Aujourd'hui on estime qu'environ 15% des matériaux excavés font partie de cette catégorie. Les matériaux qui ne peuvent pas être utilisés seront transportés en centres de traitement et dépôt spécialisés (appelés ISDND en France). Les autres matériaux peuvent être utilisés pour les remblais des carrières et pour la production du ciment.
- Des 85% des autres matériaux, 10 à 20 % peuvent être utilisés pour la production du ciment et du béton. Aujourd'hui environ 40 % sont envisagés pour les remblais des carrières. Environ 30 % sont envisagés pour des applications dans l'agriculture, sylviculture et aménagement des terres et des friches. Ce pourcentage peut être augmenté selon les résultats du projet de démonstration dans les 5 ans à venir. Environ 10 % seraient prévus pour d'autres filières de valorisation (matériaux de construction, aménagement des friches, des chemins ruraux, création des tranchés couverts). 10% seront mis en ISDI. Il est important de noter que ce scénario est une hypothèse de travail qui sera développée en fonction des investigations en sous-sol et des résultats des différents essais et développement techniques.
- Le but est de réutiliser les matériaux localement autant que possible afin de limiter les nuisances et le stockage des matériaux.
- Cette optique est conforme au plan d'action de l'Union européenne pour l'économie circulaire et répond aux bonnes pratiques adoptées par les deux États hôtes du CERN (la France et la Suisse).
- La quantité des matériaux excavés est avec environ 16 Mt inférieur aux autres grands projets de tunnel: Lyon-Turin: 37 Mt, Gotthard: 28.2 Mt, Grand Paris: 43 Mt, HS2: 130 Mt, Stuttgart 21: 40 Mt.
- Les matériaux excavés à gérer par année pendant la phase chantier correspondent à < 2% des matériaux qui sont gérés en France, à 17% des matériaux qui sont gérés dans la région AuRA ou à 10% des matériaux gérés en Suisse Romande chaque année.
- Quelles actions concrètes sont-elles envisagées pour valoriser les matériaux d'excavation ?

Réutilisation dans le projet pour la production du ciment et du béton

Réutilisation dans le projet comme matériel de construction pour des bâtiments et pour l'intégration paysagère

Remblai et renaturalisations des carrières

Réutilisation comme amendement dans l'agriculture, amélioration des espaces boisées en créant des espaces plus accessibles et reboisement avec des arbres qui sont mieux adaptés au climat, aménagement des chemins ruraux et forestiers, aménagement des bandes dérasées, valorisation des friches et des terres polluées, création des nouveaux espaces naturels comme par exemple des tranchés couverts.

- Quel type de déchets radioactifs seraient produits par le FCC-ee ?
  - Les activités scientifiques du CERN génèrent des déchets radioactifs de très faible activité (TFA) à hauteur de 95 %, et des déchets de faible et moyenne activité (FMA) à hauteur de 5 %. Ces déchets comprennent, par exemple, des pièces métalliques, des câbles et des filtres de ventilation. Le FCC-ee générera des déchets du même type.
  
- Quel volume de déchets radioactifs serait généré par le FCC-ee ?
  - Les quantités de déchets radioactifs dépendent de la conception du collisionneur, des expériences et des matériaux utilisés. Les premières estimations indiquent que les niveaux d'activation des matériaux seraient similaires à ceux du LHC.
  - La gestion de ces déchets sera réalisée en coopération avec les États hôtes, conformément à la législation en vigueur.
  - Le rapport final de l'étude de faisabilité en cours fournira des données plus concrètes permettant de réaliser des estimations précises pour le FCC-ee.
  
- Comment sont gérés les déchets radioactifs au CERN ?
  - La gestion des déchets radioactifs est régie par l'accord tripartite relatif à la protection contre les rayonnements ionisants et la sûreté des installations du CERN qui a été signé avec les autorités des États hôtes. Les données relatives à la gestion des déchets radioactifs du CERN sont disponibles dans le rapport du CERN sur l'environnement [1].
  
- Le FCC sera-t-il considéré comme une installation nucléaire de base soumise à des réglementations spécifiques ?
  - Non. Le FCC, en tant que projet du CERN, adhérera et contribuera aux systèmes de radioprotection et de sécurité internationalement reconnus. Respectant le principe de précaution, le CERN optimise en permanence ses installations et ses pratiques afin de minimiser son impact radiologique. Un accord tripartite signé avec les États hôtes du CERN en 2010 garantit la transparence et l'alignement sur les meilleures pratiques en matière de radioprotection et de sécurité. Dans le cadre de cet accord, le CERN rend compte chaque trimestre aux autorités suisses et françaises de sa surveillance radiologique de l'environnement local. L'Organisation s'efforce toujours d'appliquer les dernières évolutions des normes applicables et de s'adapter aux changements de la législation des États hôtes.

### 3.3 Préserver les ressources

- Quels sont les engagements du CERN pour l'environnement ?

- Le CERN se veut un modèle de laboratoire scientifique respectueux de l'environnement (transparence, responsabilité, durabilité). Toutes les actions en lien avec le FCC suivront ces mêmes engagements. Celles menées dans la zone locale respecteront les règles environnementales applicables en France et en Suisse (faune, flore, qualité du sol arable, qualité de l'air, ressources en eau, biodiversité, bruit, poussières, pollution lumineuse notamment), mais aussi les infrastructures existantes ou programmées par les territoires
- Application systématique du principe « éviter-réduire-compenser » (ERC)

### Une consommation électrique largement maîtrisée

Tout en étant beaucoup plus puissant que son prédécesseur le LHC, le FCC ne créerait pendant son opération pas d'augmentation significative de la consommation d'énergie.

On estime que, durant la première phase (FCC-ee) la machine consommerait 1,3 TWh par an. C'est l'équivalent de la consommation énergétique actuelle du CERN. Cette consommation correspond également à la consommation d'électricité d'un des centres de calculs de China Telecom à Hohohot et à un quart de la consommation d'une production chimique, par exemple de BASF à Ludwigshafen en Allemagne.

Le LHC ne sera pas exploité pendant la phase d'opération du FCC-ee.

La consommation d'un collisionneur varie fortement au cours de l'année. Lors des phases de collision des particules – soit environ la moitié de l'année pour le futur FCC-ee, la consommation sera élevée. Elle sera réduite durant les périodes de plus faible exploitation, ou nulle lors des arrêts, qui sont toujours fixés en hiver dans un souci de préservation des ressources énergétiques pour les besoins du territoire.

Il n'est pas encore possible d'estimer la consommation du FCC-hh, qui ne serait en activité qu'à partir de 2070, car elle dépendra des progrès technologiques des aimants supraconducteurs ainsi que du mode opératoire de la machine.

Toutefois, la consommation d'électricité annuelle sera plafonnée lors de l'élaboration d'un programme d'exploitation pour assurer une utilisation responsable de l'énergie.

Les estimations actuelles devraient cependant évoluer favorablement grâce aux optimisations de l'efficacité énergétique qui pourraient résulter des travaux de R&D en cours. Les gains pourront provenir des nouvelles générations d'aimants supraconducteurs à haute température, de la conception de structures d'accélération plus efficaces (cavités radiofréquence, klystrons à haute efficacité), mais aussi des systèmes de refroidissement cryogéniques, de la récupération de chaleur, du stockage de l'énergie, de la création de lignes de transport de faisceaux à faible consommation d'énergie ou encore de différents scénarios d'exploitation et de compensation.

- Quelle est la consommation énergétique estimée pour le FCC-ee ?
- La consommation énergétique moyenne estimée serait en moyenne 1,3 TWh par an pendant le programme de recherche.

- La demande d'énergie dépend de la période de l'année. Le programme comprend six types de périodes : arrêt, mise en service, exploitation pour la physique, temps d'arrêt, arrêts techniques et développements machine. Ainsi, la consommation d'énergie du collisionneur électron-positron (FCC-ee) varierait d'environ 1 TWh/an à 1,77 TWh/an.
  - Bien que le FCC-ee soit un accélérateur trois fois plus grand que le LHC actuel, sa consommation énergétique resterait du même ordre de grandeur (1,3 TWh/an), car le FCC-ee fonctionnera à une énergie plus basse avec des champs magnétiques réduits, et nécessitera moins de refroidissement.
  - De plus, ces estimations pourraient encore évoluer favorablement en fonction des optimisations qui découleront des travaux de R&D effectués au cours de l'étude de faisabilité. Atteindre une consommation énergétique responsable reste l'objectif ultime.
  - On préconise une graduelle augmentation de l'utilisation de l'énergie renouvelable en considérant les plans climats en Europe.
- Quelle est la consommation énergétique estimée pour le FCC-hh ?
    - À ce stade du projet, il n'est pas possible de faire une prévision fiable de la consommation énergétique du FCC-hh, car les technologies relatives aux aimants, à la production d'énergie et à l'efficacité énergétique qui pourraient être disponibles dans la seconde moitié du XXI<sup>e</sup> siècle ne sont pas encore connues.
    - On sait que les travaux de R&D contribueront à optimiser l'efficacité énergétique des collisionneurs de particules du futur. Par exemple, le HL-LHC (mise à niveau du LHC), qui sera mis en service en 2029, soit 20 ans après le lancement du LHC, aura une performance énergétique 10 fois supérieure à celle de la machine d'origine [1]. La consommation d'énergie du FCC-hh sera ajustée en fonction de la performance requise sur le plan scientifique et des ressources en énergie renouvelable disponibles à cette période.
  - Est-il vrai que le FCC-hh consommera 4 TWh/an ?
    - Non. Cette estimation de consommation [2] a été réalisée avant l'étude de faisabilité, à partir d'une technologie de refroidissement cryogénique pour un système des aimants supraconducteurs classiques.
    - Cette analyse a servi à confirmer la faisabilité de principe d'un collisionneur aux hadrons à hautes énergies et à révéler l'écart technologique qui sera à adresser avec un programme de R&D sur environ 30 ans.
    - Les spécifications techniques du collisionneur devraient être disponibles à un horizon de 25 à 30 ans. À ce stade du projet, il n'est pas possible de prévoir de manière fiable la consommation énergétique du FCC-hh.
    - La consommation d'électricité annuelle par an sera plafonnée et le calendrier de l'opération sera optimisé en vue de la consommation d'énergie et des ressources.
  - Quels mécanismes seront mis en place pour améliorer l'efficacité énergétique du FCC ?
    - Pour optimiser l'efficacité énergétique du FCC, des recherches approfondies sont menées sur plusieurs fronts : notamment aimants supraconducteurs, adaptation aux fluctuations du réseau électrique, conception de structures d'accélération plus efficaces, récupération de chaleur, stockage d'énergie, mise en place de lignes de transport de faisceaux à faible consommation d'énergie, ainsi que différents scénarios opérationnels et mécanismes de compensation.
    - En parallèle, le CERN mène un programme intensif de R&D pour réduire la consommation énergétique de ses installations actuelles et futures.



- De plus, les technologies développées au CERN trouvent souvent des applications extérieures qui s'avèrent bénéfiques pour l'environnement. À titre d'exemple, le CERN et Airbus ont signé en 2022 un accord de collaboration concernant l'utilisation de technologies supraconductrices pour les futurs avions à faible émission.
- Peut-on envisager d'alimenter le FCC avec des énergies renouvelables ?
- Oui. La stratégie prévoit une augmentation graduelle de la couverture par des énergies renouvelables. Les résultats de l'analyse réalisée [3] dans le cadre de l'étude de faisabilité du FCC indiquent que le FCC peut être alimenté par des sources d'énergie renouvelables avec un coût maîtrisé. L'énergie éolienne en mer est considérée comme une source adaptée, mais d'autres options pourraient également être envisageables.
- La recherche permet de considérer que l'énergie renouvelable peut être compétitive, tout en réduisant l'empreinte carbone du FCC au fil du temps.
- Des implications socio-économiques et techniques, telles que la saisonnalité de l'exploitation du collisionneur et la gestion des besoins énergétiques, nécessitent encore une évaluation approfondie.
- Que peut-on envisager en matière d'écoconception ?
- L'écoconception est au cœur de l'étude FCC, depuis son lancement et tout au long de la phase d'étude. Les standards et normes EN/EN/ISO 14001, 14006 et 3100 serviraient de base pour un projet de conception technique après la phase d'étude. En application de la démarche ERC, des recherches sont menées sur la réutilisation des matériaux excavés, le développement de l'approvisionnement en énergie renouvelable et les potentielles synergies et retombées.

**Le coût de l'électricité à la charge des États membres et États membres associés**

Actuellement les dépenses en électricité du CERN sont financées par les contributions des États membres et États membres associés. L'électricité représente environ 5 % des charges de l'Organisation chaque année.

L'étude FCC prévoit le développement de nouveaux modèles de financement et d'organisation pour la construction comme pour l'exploitation. Les résultats de ces études proposeront des solutions innovantes pour l'approvisionnement en énergie en considérant des aspects financiers, techniques, réglementaires et de durabilité.

Les études menées récemment par les cabinets McKinsey et Accenture sur les perspectives d'utilisation d'énergies renouvelables (ENR) pour le FCC ont notamment établi que le FCC pourrait recourir aux ENR durant la construction et l'exploitation, et que l'investissement du CERN dans ces énergies, éoliennes en mer notamment, permettrait de soutenir la filière sans affecter la disponibilité des sources d'énergie actuelle.

- Quelle serait l'empreinte carbone de l'ensemble du projet FCC ?

L'empreinte carbone pour le projet FCC est en train d'être étudiée en appliquant les normes internationales applicables et en utilisant des outils de l'état de l'art avec des partenaires industriels qui sont experts en matière. Les premiers résultats pour la phase génie civil seront prêts en 2024.

L'empreinte carbone des autres phases du cycle de vie dépendent fortement des évolutions et des

choix technologiques qui ne peuvent seulement être faits que pendant la phase de conception technique détaillée des accélérateurs des expériences. Les principes d'écoconception et de "éviter, réduire, compenser" guident les investissements en R&D et les choix techniques.

Pour la phase de l'exploitation du FCC-ee, l'empreinte carbone liée à l'opération du collisionneur et des expériences est en moyenne de 40'000 t par an. Cela correspond à l'empreinte carbone du clip music "Despacito" vue par 8.5 milliards de personnes sur Youtube. Il est également comparable à l'empreinte carbone de l'Opéra de Paris ou à un fournisseur d'Internet en France. Pour comparaison, l'empreinte carbone annuelle en France des centres de calculs est supérieure à 600 000 tonnes de CO<sub>2</sub>e. Par contribuable qui finance le FCC, l'empreinte carbone représente environ 100 g des 11 tonnes, l'équivalent de deux heures de Netflix ou d'une dizaine des e-mails.

Avec la mise en place de la valorisation de chaleur, l'empreinte carbone peut être baissée de manière importante, car cette chaleur peut compenser l'utilisation des énergies fossiles. Une étude techno-économique à ce sujet est en train d'être réalisée.

- Quel serait l'impact du FCC sur les nappes phréatiques ?
  - Le tracé prévu pour le FCC évite les interactions avec des nappes phréatiques connues. Le tunnel et les structures seraient situés plus profond que ces nappes.
  - Les études géologiques approfondies menées dans le cadre de l'étude de faisabilité permettront de mieux connaître les nappes phréatiques existantes.
  - Des éventuels impacts résiduels pourront donc être estimés une fois ces informations obtenues.
  
- D'où viendra l'eau requise pour le fonctionnement du FCC-ee ?
  - L'eau brute pour les systèmes de refroidissement vient d'une ligne d'approvisionnement des Services Industriels de Genève (SIG) existante qui fournit aussi de l'eau pour le CERN et ses actuels accélérateurs des particules. Un raccordement sera créé depuis cette ligne pour directement alimenter le site de surface à Ferney-Voltaire, qui est situé à côté de ce tuyau.
  - La consommation sera en moyenne de 2 millions de m<sup>3</sup> par an pour le programme de recherche, comparable à la consommation de l'eau du CERN actuellement.
  - Les systèmes de refroidissement fonctionnent avec des circuits fermés, qui perdent de l'eau à travers des tours d'évaporation et à la suite de purges régulières des circuits qui sont nécessaires.
  - Pour diminuer encore la consommation d'eau par des systèmes de refroidissement par circuits fermés, des systèmes de récupération et valorisation de chaleur sont prévus.
  - Des études techniques sont en cours pour vérifier si une partie de l'eau brute nécessaire peut être fournie par des stations d'épuration. Si techniquement cette option peut être réalisée dans les 15 prochaines années, cela permettrait de réduire de manière importante la consommation de l'eau brute.
  - Le FCC n'utilisera pas l'eau des nappes phréatiques.
  -
  
- D'où proviendront les matériaux qui seront utilisés pendant les travaux et lorsque le FCC sera opérationnel ?
  - Ce type d'étude ne peut être effectué qu'à un stade ultérieur, lorsque la conception technique sera bien définie et que les appels d'offres pourront être lancés.
  - Cependant, il est actuellement étudié s'il est techniquement, économiquement et écologiquement avantageux de produire une certaine quantité du béton en bas quantité carbone et en béton recyclé pour le génie civil localement à proximité du FCC.

## RÉFÉRENCES :

- [1] CERN. Rapport sur l'environnement 2021-2022. <https://doi.org/10.25325/CERN-Environment-2023-003>
- [2] Abada, A, Abbrescia, M, AbdusSalam, S y Duarte, L. (2019.). FCC-hh : The Hadron Collider. EN: The European Physical Journal Special Topics, 2019, 228: 755-1107. 353 h.