

Le FCC: Mythes et Réalités

Alain BLONDEL^{1,2*} and Patrick JANOT^{3*}

¹LPNHE, IN2P3-CNRS, 4 place Jussieu, 75005 Paris, France.

²University of Geneva, 24 rue du Général-Dufour, 1211 Geneva, Switzerland.

³CERN, 1 Esplanade des Particules, 1217 Meyrin, Switzerland.

* e-mail: alain.blondel@cern.ch patrick.janot@cern.ch.

Abstract

Une tribune publiée par Libération le 25/02/25, signée par un collectif de scientifiques majoritairement non-physiciens, appelle à « renoncer au futur méga collisionneur de particules du CERN », qu'elle qualifie de projet « énergivore, coûteux, délétère pour l'environnement, et aux retombées scientifiques incertaines ». Ces affirmations semblent résulter d'un manque d'information. Cette lettre se propose de rectifier cette situation, en expliquant ce qu'est vraiment le FCC, entreprise scientifique aux enjeux extraordinaires, portée par une collaboration mondiale et pluridisciplinaire, engagée en faveur d'une science durable et responsable. L'étude de faisabilité du Futur Collisionneur Circulaire présentera son rapport final à la communauté scientifique internationale le 31 mars 2025; on y trouvera des réponses plus détaillées.

Avertissement : cette note n'a pas pour but de représenter l'opinion du CERN. Elle vise plutôt à exposer des conclusions scientifiques et techniques ou à réfuter des affirmations scientifiques et techniques inexactes qui circulent dans le public.

Disclaimer : This note is not aimed at representing the opinion of CERN. It is rather aimed at laying out scientific and technical findings, or to refute inaccurate scientific and technical claims that run in the public.

1 Contexte – la motivation scientifique

Commençons par la science. Pourquoi le Futur Collisionneur Circulaire (FCC) ? La découverte du boson de Higgs au CERN en 2012 a motivé immédiatement la conception d'un instrument de précision pour effectuer ce que l'actuel grand collisionneur de hadrons (LHC) ne pourra pas faire : mesurer ses interactions avec précision (une part pour mille) et sans hypothèse théorique supplémentaire. Cette réalisation a mené à la conception de ce qu'on appelle « usine à Higgs » (« pépinière » serait sans doute un meilleur mot) utilisant des collisions d'électrons et positons, particules ponctuelles contrairement aux protons du LHC. Le boson de Higgs joue un rôle fascinant : modifiant les propriétés de l'Univers lors du Big Bang, il provoque l'apparition des masses des particules fondamentales, et d'une énergie latente qui en impacte l'expansion. La découverte du boson de Higgs complète le tableau des particules constituant le « Modèle Standard ». Cette théorie remarquablement cohérente est capable de faire des prédictions très précises pour un grand nombre de mesures possibles, sensibles à des phénomènes encore inconnus.

Devons-nous nous en arrêter là ? Évidemment, non. **Des faits expérimentaux incontournables rendent nécessaire une exploration plus poussée et surtout, plus large.**

- Le fait que les neutrinos ont une masse (prix Nobel 2015) implique l'existence d'au moins deux nouvelles particules, qui peuvent être très difficiles à observer (neutrinos 'stériles', par exemple), et dont la masse est aujourd'hui inconnue, mais aux propriétés de grande importance pour la constitution et l'évolution de l'Univers.
- L'existence de matière noire dans l'Univers. Sa nature reste inconnue, mais elle pourrait impliquer l'existence d'au moins une nouvelle particule, absente du Modèle Standard. L'échelle de masses possibles est extrêmement vaste. Certaines théories suggèrent un lien avec le boson de Higgs, d'autres invoquent de nouvelles symétries fondamentales. Mieux comprendre ces connexions pourrait nous aider à percer l'un des plus grands mystères de la physique moderne.
- L'Univers contemporain est constitué uniquement de matière, et l'antimatière supposée produite lors du Big Bang a complètement disparu. L'explication de ce mystère, sans lequel nous et notre monde n'existerions pas, requiert que dans l'Univers primitif se trouvent à la fois une brisure de la symétrie entre matière et antimatière, et la possibilité d'une transition entre matière et antimatière. Ceci peut être expliqué en particulier par les neutrinos 'stériles' ou par une modification observable des propriétés du boson de Higgs.

Sans compter évidemment de nombreuses questions théoriques plus profondes, concernant par exemple les valeurs des masses et la structure même du Modèle Standard.

Nous sommes donc dans une situation inédite depuis de nombreuses décennies : de nouveaux phénomènes ou particules sont nécessaires, mais leur masse et leur nature nous sont inconnues. Un dispositif expérimental nouveau est nécessaire, qui allie une sensibilité considérablement augmentée, une précision de mesure sans précédent dans notre domaine, et l'exploration d'un régime d'énergies et d'intensités jusqu'ici inexplorées. Pour s'adapter à ce nouveau panorama, la proposition la plus puissante scientifiquement, autant qu'efficace au niveau énergétique, se trouve être le FCC.

Un nouveau tunnel, plus grand, permet la mise en œuvre en succession d'au moins deux machines synergétiques et complémentaires. La première étape, le FCC-ee, un collisionneur à électrons d'extrême sensibilité et précision, est maintenant en discussion pour recommandation en 2025 et décision en 2028. L'étape suivante possible, le FCC-hh, une version plus puissante du LHC, pourra produire jusqu'à plus de 500 fois plus de bosons de Higgs que celui-ci. Un collisionneur à muons pourrait aussi profiter du même tunnel. Le programme de physique est extrêmement riche et exploratoire, comme ça a été noté par les comités d'évaluation du rapport de l'étude de faisabilité à mi-parcours.

2 Une communauté scientifique planétaire

Le CERN, organisation européenne pour la physique des particules, a 15000 utilisateurs (chercheurs, chercheurs enseignants et étudiants) et environ 2500 employés, venant des 24 états membres du CERN plus deux en cours d'adhésion, des 8 états associés (dont l'Inde, le Pakistan, le Brésil) et les 6 états observateurs dont l'Union Européenne, l'UNESCO et les Etats Unis. Des chercheurs chinois, sud-africains et australiens, turcs, iraniens pour n'en mentionner que quelques-uns, sont aussi de la partie.

Il s'agit, en collaboration avec les astronomes, astrophysiciens et cosmologistes, de comprendre les origines de l'Univers et comment il fonctionne. Cette question fascine l'humanité depuis des temps immémoriaux, faisant naître des mythes et des dogmes aussi divers et nombreux que les peuples qui y adhèrent. Ces mythes ont hélas souvent servi d'excuse à des guerres et des exactions qui nous désolent jusqu'à ce jour. Il n'est pas anodin que cette recherche si fondamentale se fait sur la base de faits et observations expérimentaux reproductibles, exprimés et interprétés dans un langage mathématique, rigoureux et universel. A l'époque où l'urgence écologique réclame l'union de tous derrière une vision scientifique et factuelle, cette unité internationale doit être conservée précieusement.

3 Des retombées scientifiques garanties

L'incertitude est le propre de la recherche fondamentale. Si le résultat des recherches étaient connus à l'avance, l'intérêt d'une telle recherche serait pour

le moins discutable. Prenons l'exemple des nombreuses mesures de précision au FCC-ee, qui améliorent l'état de l'art d'un facteur allant jusqu'à 500. De la même manière que les mesures de précision de l'orbite d'Uranus a permis, en 1843, de prévoir l'existence et la position d'une nouvelle planète (Neptune, découverte au bon endroit en 1846), ou les mesures de précision de l'orbite de Mercure ont permis en 1916 de confirmer la théorie de la relativité générale d'Einstein (mise en œuvre par chacun et chacune d'entre nous lorsque nous utilisons notre GPS), les nombreuses mesures de précision avec le FCC-ee permettront de mettre le doigt sur de nouveaux phénomènes et d'orienter le développement de nouveaux modèles en conséquence, qui, le cas échéant, pourront être testés directement avec le FCC-hh, ou dans d'autres expériences.

Le FCC-ee a un potentiel de découverte important: la découverte d'un neutrino 'stérile' ou d'un candidat 'matière noire' dans les billions de désintégrations de Z serait sensationnelle, l'observation dans une ou plusieurs des mesures ultraprécises d'une déviation par rapport au modèle standard ne le serait pas moins. Et même si le résultat était « seulement » une confirmation du modèle standard, la puissance des mesures du FCC-ee contraindra très fortement les multiples théories proposant des explications pour les observations mentionnées ci-dessus ou pour des questions théoriques encore plus profondes. Quoi qu'il arrive le FCC apporterait un progrès énorme dans la compréhension de l'origine de l'univers. C'est d'ailleurs une absence de découverte, celle de l'Ether dans l'expérience de Michelson-Morley en 1887, qui a ouvert la voie de manière fondamentale à la relativité restreinte d'Einstein.

Plus récemment la physique des particules moderne abonde d'exemples de recherches au résultat négatif mais essentiel, et de mesures de précision prédictives : l'absence d'observation d'un processus rare ($K_L^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$) avait conduit à prédire l'existence du quark charmé ; l'existence et la masse du dernier quark manquant (le quark top) avait été prédite par les mesures de précision au LEP en 1994, pour n'en citer que deux.

4 L'impact environnemental du FCC

L'urgence écologique discutée dans la tribune du 25/02 est évidemment le dérèglement climatique dû à l'excès d'émissions de gaz à effet de serre provoqués par l'activité humaine. Il y a une grande urgence effectivement, mais l'urgence ne saurait justifier les chiffres avancés pour l'empreinte carbone du FCC, qui sont énormément surestimés dans la tribune.

La consommation d'énergie du FCC, comme des accélérateurs précédents, est essentiellement électrique. Les estimations concernant le FCC-ee, 1.35 TWh annuel, sont équivalentes à la consommation électrique annuelle du CERN aujourd'hui. Les progrès faits au cours des 40 dernières années sont gigantesques : Le FCC-ee produira un nombre de collisions 100 000 fois plus élevé pour une énergie donnée, que son prédécesseur des années 90, le grand collisionneur électron-positon (LEP). Le progrès technologique obtenu par les

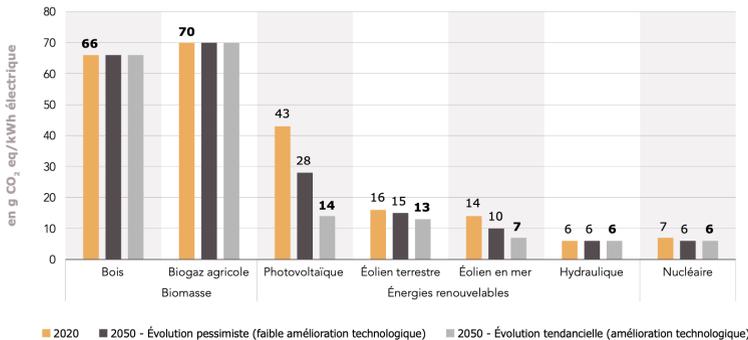
physiciens des accélérateurs permet ainsi au CERN de concevoir des outils de recherche de plus en plus respectueux de l'environnement.

Le CERN fonctionne sur la base d'un contrat avec le Réseau de Transport d'Electricité (RTE) français, qui a produit de l'électricité décarbonée à 95% en 2024. L'abondance de cette production décarbonée a ainsi suffi à elle-seule à couvrir la consommation du pays (et donc du CERN) pendant 99,5% du temps (source), réduisant son impact environnemental à 21.3g CO₂ eq. par kWh en 2024. De plus, comme c'est déjà le cas aujourd'hui, cette énergie ne sera consommée que quand il y a un surplus abondant sur le réseau électrique, de la moitié du printemps jusqu'à la moitié de l'automne. Les installations sont arrêtées pendant typiquement six mois, quand le pays se chauffe, s'éclaire et consomme davantage d'électricité.

En conséquence, l'empreinte en termes de gaz à effet de serre de l'opération du FCC, exprimée en équivalent-carbone, est remarquablement faible, contrairement à ce qui est prétendu dans la tribune. L'expertise, sur laquelle la tribune publiée dans Libération se base pour certaines de ses affirmations, suppose, après un raisonnement incompréhensible, que le kWh consommé au CERN aura en 2050 un impact équivalent à 450g de CO₂, plus de 20 fois plus élevé qu'en 2024. Or, lors du fonctionnement du FCC en 2050, il est prévu par RTE que le mix énergétique sera basé exclusivement sur le photovoltaïque, l'éolien, l'hydraulique et le nucléaire. Les émissions de ces sources sont représentées sur la Fig. 1, en cycle de vie, c'est-à-dire de la fabrication au démantèlement, prévoyant une moyenne de 12g CO₂ eq. par kWh.

Fig. 1: Évolution pessimiste et tendancielle des émissions en g CO₂ eq. par kWh pour les différentes sources de production d'électricité, entre 2020 et 2050. Une valeur moyenne de 12g CO₂ eq. par kWh en 2050 a été utilisée pour nos estimations la production d'électricité en France entre mi-avril et mi-novembre. (Source: Rapport de RTE sur la neutralité carbone à l'horizon 2050). Par comparaison, l'hypothèse faite dans les estimations utilisées par la tribune est de 450g CO₂ eq. par kWh (presque 40 fois plus).

Figure 12.11 Émissions en cycle de vie des technologies bas-carbone en 2020 et en 2050 (évolution pessimiste et tendancielle)



La consommation du FCC-hh, quant à elle, donnée à 4 TWh par an dans la tribune publiée dans *libération*, a déjà été réévaluée à la baisse (possible-ment jusqu'à environ 1.8 TWh/an avec des aimants refroidis à 4.5 K) grâce à des progrès constants. Les travaux sur les aimants supraconducteurs à haute température visent à diminuer encore cette consommation. Il y aura encore plusieurs décennies de recherche et développement sur le FCC-hh, ce qui continuera sans doute à améliorer son efficacité et à réduire sa consommation.

Les transports, le chauffage et les industries sont consommateurs de combustibles fossiles, polluants et générateurs de gaz à effet de serre. La fabrication du ciment, en particulier pour nos habitations, est aussi grosse émettrice de CO₂, et l'agriculture, de méthane. C'est dans ces domaines qu'est l'urgence – et la plus grande possibilité de progrès. De fait, si rien n'est fait dans ces domaines, tant les futurs utilisateurs du FCC que les 400 signataires de la tribune (et leur descendance) laisseront une empreinte carbone personnelle plus importante que le FCC pendant les 80 années à venir.

4.1 Le FCC et le climat: un défi à relever, pas à fuir

L'empreinte carbone finale du FCC sera dominée par la construction du tunnel – qui sera utilisé pendant au moins 70 années, voire un siècle. L'estimation actuelle totale est située entre 400 et 900 kilotonnes d'équivalent CO₂, ce qui est de 10 à 100 fois moins qu'annoncé dans la tribune. Ce nombre est l'équivalent des émissions de 1000 français aujourd'hui —soit environ 10 tonnes équivalent CO₂ par personne et par an ([source](#))— sur la durée de vie du tunnel (dont on espère qu'elles pourront être réduites grâce aux progrès de la société, y compris ceux motivés par la construction du tunnel du FCC, comme indiqué au point suivant). Empêcher la construction du FCC ne changera quasiment rien aux émissions mondiales. Mais sans lui, nous nous privons de la recherche fondamentale et de ses multiples retombées technologiques dont bénéficierait la société dans son ensemble, et dont certaines seront positives pour le climat. .

L'autre aspect de l'impact environnemental, l'impact local, est similaire à l'impact des collisionneurs existants (le LEP, puis le LHC), sur le pays de Gex, et on peut de façon fiable prédire que l'impact principal à long terme sera la venue, en nombre relativement limité (quelques milliers en tout) de personnels scientifiques de haut niveau (chercheurs et universitaires), venus de nombreux pays participants, et leurs familles dans le voisinage. L'impact visible sera la présence, comme dans le cas du LHC mais bien plus dispersés géographiquement, de huit zones et bâtiments de surface de chacune de quelques hectares, pour un total de 40 hectares environ, ce qui représente moins que la surface d'une exploitation agricole moyenne (69 ha) —sans pour autant que la moindre exploitation agricole soit menacée. C'est très peu pour une activité d'une telle envergure scientifique et internationale, occupant un si grand nombre de chercheurs sur un temps si long.

A plus court terme, le chantier lui-même, qui durerait environ huit ans à partir de 2033 (selon le planning envisagé), comprendra sans aucun doute un certain nombre de nuisances : principalement le transport de matériel et matériaux d'excavation. Ces questions font l'objet d'études soignées. Les solutions qui seront proposées s'inscrivent dans les principes E.R.C. (éviter, Réduire, Compenser), appliqués par l'étude FCC dès sa conception, et les discussions avec les populations et instances locales sont en cours.

4.2 Le FCC s'inscrit profondément dans une politique de durabilité.

Le succès du CERN en tant que laboratoire de recherche peut être largement attribué à un financement stable et sans à-coups, ainsi qu'à l'utilisation extrêmement durable des infrastructures acquises grâce à ce financement. Le premier accélérateur fonctionne encore, grâce à une maintenance soignée depuis 1959; le collisionneur de protons et d'antiprotons où ont été découverts les bosons W et Z était une modification d'un accélérateur existant (le SPS), qui tourne encore; le tunnel du LEP a été réutilisé pour accueillir le LHC. Le même sens de l'efficacité économique et synergétique a conduit à proposer le FCC qui utilisera un tunnel unique pour plusieurs machines en succession, tout en profitant des infrastructures antérieures.

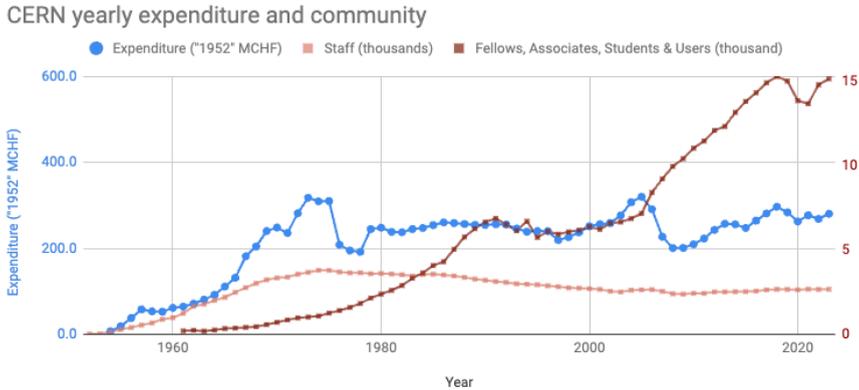
Les efforts faits pour réduire l'impact du FCC profiteront à la société dans son ensemble. Par exemple, le développement de sources de puissance radiofréquence très efficaces, le développement des matériaux supra conducteurs à haute température – qui pourraient à terme permettre un stockage sans perte de l'électricité, avec des retombées évidentes pour le développement des batteries – et enfin l'utilisation autant que possible de ciment bas-carbone « propre », etc. Ces progrès exemplaires soutenus par la motivation scientifique unique des chercheurs, profiteront à la société dans son ensemble, en collaboration avec les entreprises dans la recherche et le développement.

Il est remarquable que ni le budget ni le personnel du CERN n'ont augmenté depuis plus de cinquante ans, comme illustré par la Figure 2 : les dépenses annuelles du CERN sont constantes (en francs suisses de 1952) depuis 1970, et le nombre d'employés est passé de 3500 à 2500 pendant la même période. Il est intéressant de réaliser que, dans le même temps, les retombées scientifiques, technologiques, et éducationnelles du CERN ont augmenté bien plus vite que son budget, grâce aux apports de la communauté internationale de ses utilisateurs.

Bien plus de la moitié du financement pour la nouvelle machine viendra de ce budget constant. Pour le reste, le CERN fait appel aux états observateurs et à des donations privées, pour lesquelles quelques promesses significatives ont déjà été avancées. Il n'y aura donc pas de taxes supplémentaires dans les États membres du CERN. Pour mémoire, la France contribue au budget du CERN à un niveau inférieur à 0.2% de ses dépenses de recherche, lesquelles se montent à

2.4% du PIB national. Pour mettre les choses en perspective, cette contribution équivaut à moins de 3 euros par citoyen et par an, un investissement modeste au regard des avancées scientifiques, technologiques et industrielles que la France retire de sa participation au CERN.

Fig. 2: (En bleu) Dépense annuelle du CERN en millions de francs constants depuis 1954. (En orange) Nombre d'employés titulaires au CERN, en milliers. (En rouge) Nombre d'utilisateurs et de boursiers du CERN, en milliers. (Sources: André David, CERN; Rapports Annuels du CERN; et Bureau Fédéral Suisse des Statistiques.)



4.3 Abandonner le FCC pour qu'il soit fait en Chine ?

Outre qu'elle fait fi, d'un côté du fait que le FCC est dès sa conception une invention de chercheurs Européens, et d'un autre, des discours unanimes des politiques Européens, réunis lors du 70ème anniversaire du CERN, sur l'importance de maintenir un des joyaux de la coopération Européenne, **cette proposition est un contresens écologique choquant** : la machine chinoise aurait sans aucun doute un bilan carbone considérablement supérieur. Malgré des investissements énormes dans les énergies décarbonnées, l'électricité en Chine est hélas encore largement produite à partir du pire des émetteurs de gaz à effet de serre, le charbon, et sa production d'électricité ne sera débarrassée des énergies fossiles que bien plus tard que la France. Par ailleurs, la Convention du CERN stipule « l'Organisation s'abstient de toute activité à fins militaires et les résultats de ses travaux expérimentaux et théoriques sont publiés ou de toute autre façon rendus généralement accessibles. » Ce principe pourrait-il être garanti en Chine ? Finalement, cette proposition, stoppant les progrès dans notre compréhension fondamentale de la nature, nous conduirait à perdre encore de notre compétitivité et de notre avance technologique y compris dans la lutte contre le changement climatique.

5 Pour conclure

La tribune citoyenne publiée par Libération pose les bonnes questions : il est normal qu'une initiative de la taille du FCC suscite des interrogations, mais il est irresponsable d'engendrer la peur dans la population en propageant des « informations » incorrectes. Nous sommes complètement convaincus de l'urgence climatique, mais il est sûrement plus efficace d'apporter des réponses en collaborant de manière mondiale, avec des valeurs de paix, ouverture, transparence, et tolérance, plutôt qu'en adoptant un ton polémique et une posture ouvertement conflictuelle entre membres de la communauté scientifique.

C'est bien dans ce cadre que le CERN a été créé, au sortir de la seconde guerre mondiale, il y a 70 ans, pour permettre aux scientifiques de tous les pays de travailler ensemble dans le respect de ces valeurs. L'existence du CERN pour (au moins) les 70 ans à venir est un gage de stabilité politique, qu'il est particulièrement important de défendre dans la période d'agitation actuelle, tous ensembles.

À lire également:

La tribune publiée dans Libération

Interview de Patrick Janot dans L'Express