

Note n° 12 — Les grands accélérateurs de particules — Février 2019



Segment d'anneau d'un accélérateur de particules
© fotonat67 / Adobe Stock

Résumé

- Les accélérateurs de particules, à l'instar des autres « très grandes infrastructures de recherche » (TGIR), permettent de mener des projets de pointe et ainsi de répondre à des enjeux stratégiques : acquisition de connaissances, renforcement de l'attractivité scientifique, préparation de ruptures technologiques, diplomatie scientifique...
- Le CERN, laboratoire européen de la physique des particules, opère actuellement le plus grand accélérateur circulaire de particules au monde, le LHC, qui atteint les plus hautes énergies produites à ce jour.
- Une décision du gouvernement japonais est attendue prochainement pour le projet d'accélérateur linéaire, l'ILC, proposé depuis 2012 par la communauté scientifique de ce pays.
- La réflexion sur la future stratégie européenne pour la physique des particules a débuté en 2018 et devrait être présentée au printemps 2020. Si le gouvernement japonais confirme son intérêt pour l'ILC, cette stratégie européenne devra en tenir compte : une possible participation de l'Europe, et notamment de la France, devra être évaluée en termes de retour scientifique, de coût et de retombées industrielles.

M. Cédric Villani, Député, Premier Vice-président

Au cours de l'année 2019, seront envisagés plusieurs projets de grands équipements de recherche dans le domaine de la physique des particules, en Europe et en Asie. Leur importance stratégique, leur coût unitaire très élevé et leurs buts scientifiques différents justifient qu'on leur prête une attention particulière.

Le « modèle standard » en physique des particules

Chaque atome de matière est fait d'un noyau entouré d'électrons, le noyau étant lui-même constitué de protons et de neutrons⁽¹⁾. Électrons, protons et neutrons ont longtemps été considérés comme les constituants les plus élémentaires de la matière. Cette idée a été bouleversée par la notion de quark, apparue par la théorie dans les années 1960, et mise en évidence par les expériences menées dans les années 1970. Protons et neutrons apparaissent alors comme une combinaison de trois quarks, de type *up* et *down*⁽²⁾. **L'électron et les quarks *up* et *down* constituent ainsi les briques élémentaires de la matière ordinaire.** Une quatrième particule fondamentale, postulée en 1930, a été découverte dès 1956 : le neutrino, particule électriquement neutre, qui fascine par sa très faible masse et ses interactions quasi-nulles avec la matière⁽³⁾. Finalement, on s'accorde pour identifier douze particules fondamentales constituant la matière, ou « fermions » : six quarks⁽⁴⁾ et six leptons (électron, muon et tau ainsi que trois types de neutrinos qui leur sont respectivement associés). On appelle « hadrons » les particules constituées de quarks, comme le proton.

Les interactions entre fermions, aussi appelées forces fondamentales, sont transmises par l'échange d'un autre type de particules, les « bosons »⁽⁵⁾. Le « modèle standard »⁽⁶⁾ de la physique des particules est la théorie quantique et relativiste⁽⁷⁾, qui classe toutes ces particules et décrit leurs interactions⁽⁸⁾. Finalisé dans les années 1970, ce modèle est le fruit d'un siècle de recherches théoriques et expérimentales⁽⁹⁾, jalonné par de nombreux prix Nobel de physique.

Les accélérateurs de particules comme outil d'exploration de la matière

Les accélérateurs de particules ont été conçus pour explorer la matière à travers des états de très haute énergie qui permettent de défaire des particules en constituants (comme une valise scellée que l'on ferait exploser pour avoir des informations sur son contenu) et de créer de nouvelles particules (similairement à la création de matière qui, selon la théorie maintenant bien acceptée du *Big Bang*, a eu lieu dans des conditions d'énergie considérable). **Leur principe est d'accélérer certaines particules à une vitesse extrême (proche de celle de la lumière) et, à l'occasion, de les faire entrer en collision.**

Accélérer des particules requiert trois éléments :

- un champ électrique pour fournir de l'énergie ;
- un champ magnétique pour guider la trajectoire ;
- enfin, un vide poussé, afin d'éviter les collisions avec le gaz résiduel, qui conduirait à la perte rapide des particules.

Les premiers accélérateurs ont été mis au point dans les années 1930 et sont nommés cyclotrons⁽¹⁰⁾. Leur technologie a été perfectionnée après la Seconde Guerre mondiale : si on fait varier le champ magnétique en fonction de l'énergie des particules accélérées, la trajectoire de ces dernières devient circulaire. Ces accélérateurs (de type « synchrotron ») ont trouvé une vaste palette d'utilisations sous forme de synchrotrons et de collisionneurs⁽¹¹⁾. Le but des synchrotrons n'est plus tant l'exploration de la physique des particules que la production de rayonnements de grande intensité et de grande cohérence, très maîtrisés (généralement du rayonnement X), et utilisés pour divers domaines d'étude : biologie, chimie, astrophysique, archéologie... Pour leur part, les collisionneurs ont toujours pour fonction d'explorer la matière par l'analyse des produits des collisions entre particules. **Inégalement réparties à travers le monde**, ces ressources constituent des enjeux de connaissance et de rayonnement scientifique, attirant compétences et collaborations.

Le LHC : accélérateur emblématique de la physique des particules

En 1952, le **Conseil européen pour la recherche nucléaire (CERN)** est créé par douze États membres⁽¹²⁾. Au lendemain de la Seconde Guerre mondiale, l'enjeu est de rétablir des relations de confiance, mais aussi d'endiguer la fuite des cerveaux vers les États-Unis, et de placer l'Europe au premier plan de la recherche en physique fondamentale, qui se limitait, à l'époque, à l'échelle des noyaux atomiques (*i.e.* nucléaire). Depuis, le CERN s'est développé, par les sujets étudiés, pour embrasser toute la physique des particules, et aussi dans sa gouvernance, puisqu'il est, aujourd'hui, géré par un consortium de vingt-deux États membres⁽¹³⁾ et accueille des chercheurs de toutes les nationalités. Basé à Genève, c'est un modèle de très grande infrastructure qui n'a été rendu possible que par la mutualisation des investissements.

La composante la plus célèbre du CERN est le grand collisionneur d'hadrons (Large Hadron Collider, ou LHC). Cent mètres sous terre à la frontière franco-suisse, d'une circonférence de 27 km et muni de 9 500 aimants dont une partie à supraconducteurs, il permet d'accélérer des protons à une énergie de l'ordre de dix mille fois leur énergie au repos. Les protons y circulent à une vitesse très « proche » de celle de la lumière⁽¹⁴⁾. Pour cela, de nouvelles technologies ont été mises au point, notamment des aimants supraconducteurs⁽¹⁵⁾ créés spécialement. Deux faisceaux de protons, ou d'autres particules selon les cas, sont accélérés dans des sens opposés, avant de collisionner⁽¹⁶⁾.

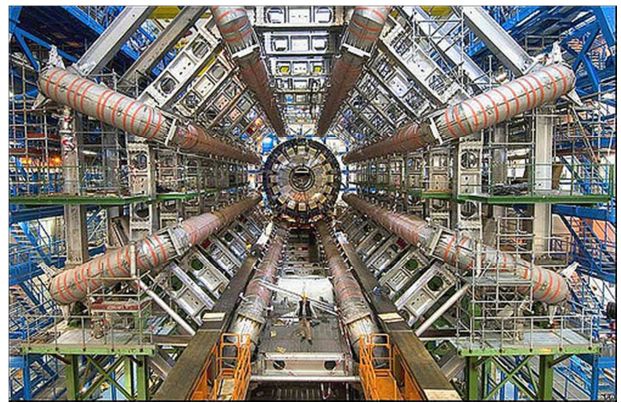


FIGURE 1. L'EXPÉRIENCE ATLAS AU LHC, QUI A PERMIS DE DÉTECTER LE BOSON DE HIGGS (source : CERN)

Depuis sa mise en service, le CERN a marqué plusieurs fois l'histoire. En sciences, par la découverte, au début des années 1980, **des bosons W et Z**⁽¹⁷⁾, conduisant à l'attribution du prix Nobel de physique 1984 à Carlo Rubbia et Simon Van der Meer. Puis, la mise en évidence en 2012 **du boson de Higgs**⁽¹⁸⁾, qui confirma le modèle standard et valut le prix Nobel 2013 à François Englert et Peter Higgs. Pour détecter avec certitude la trace du boson de Higgs, il a fallu provoquer des collisions de protons à l'énergie considérable de 6,5 TeV⁽¹⁹⁾ et analyser par de puissants outils statistiques les gigantesques masses de données produites par ces collisions⁽²⁰⁾.

Le LHC du CERN en chiffres

La construction du LHC a coûté environ 8 milliards d'euros pour 15 années de travaux. Le premier faisceau de particules a été produit en 2008. En 2015, le LHC atteignait une énergie de 13 TeV. Il consomme annuellement 1,3 TWh d'énergie électrique (d'origine française) et demande un budget annuel de 880 millions d'euros. Ces chiffres impressionnants sont à comparer aux 500 TWh de production électrique annuelle française. À l'échelle européenne, ce budget équivaut au prix « d'un cappuccino par personne » selon Fabiola Gianotti, directrice du CERN depuis 2016, qui ajoute, que « chaque franc suisse ou euro investi par ses deux pays hôtes, la Suisse et la France, en rapporte entre deux et six, sous différentes formes »^(*). Le CERN compte environ 3 000 employés permanents venant de tous les continents, et collabore avec 13 000 scientifiques de 110 nationalités différentes, menant des recherches au nom de centaines d'institutions.

(*) <https://www.tdg.ch/savoirs/sciences/cern-besoin-argent-physique-demain/story/15943865>

Le CERN a eu également un très fort impact sociétal à travers **la création du World Wide Web (WWW)** en 1989⁽²¹⁾ sous la direction de Tim Berners-Lee et son collaborateur Roger Cailliau. Il s'agissait à l'origine d'une réponse au besoin des chercheurs d'échanger

simplement et instantanément un volume important de données dans le cadre de collaborations internationales. Le CERN a publié les logiciels développés sous une licence du domaine public, conformément à sa convention fondatrice⁽²²⁾ qui stipule que tous ses résultats doivent être publiés et rendus accessibles.

Le boson de Higgs

Un boson est une particule échangée entre deux particules élémentaires incarnant une force ou une interaction. Dans les années 1960, les théories précurseurs du modèle standard échouaient à expliquer la masse des bosons Z et W, représentant l'interaction faible au sein des noyaux atomiques. Pour surmonter cette difficulté, Brout et Englert d'une part, Higgs d'autre part, ont proposé en 1964 l'existence d'un champ présent dans tout l'Univers et qui serait responsable de la masse associée aux particules. Le boson de Higgs serait la manifestation physique de ce champ lorsqu'il est perturbé.

Pour se représenter informellement le lien entre le champ de Brout-Englert-Higgs et le boson, on peut imaginer un aquarium rempli d'eau. Il est difficile de deviner la présence d'eau à l'œil, mais si l'on perturbe le milieu (en heurtant les parois par exemple), une vague se forme et caractérise de manière évidente la présence d'eau. Dans cette analogie, le champ serait l'eau et le boson la vague, qui permet de fournir un mécanisme de génération de la masse des particules élémentaires, ingrédient essentiel au modèle standard. L'étude de ses propriétés offre une opportunité unique pour chercher, d'une part, des phénomènes nouveaux, d'autre part, pour ouvrir potentiellement une fenêtre vers les débuts de l'Univers.

Au-delà du modèle standard : la nouvelle physique

Grâce à la découverte du boson de Higgs, le modèle standard apparaît aujourd'hui comme un pilier solide sur lequel s'appuie la physique des particules. Pourtant, selon les dernières estimations, **le modèle standard ne rend compte que d'environ 5 % de l'Univers observable**⁽²³⁾, le reste étant constitué d'environ 27 % de matière noire et de 68 % d'énergie sombre qui, à l'heure actuelle, ne peuvent être détectées qu'indirectement⁽²⁴⁾. Cette « zone d'ombre » appelle à la quête d'une théorie plus exhaustive et plus fondamentale que le modèle standard, qui apparaît alors comme une première approximation dans la description de la matière. C'est dans cette quête d'une nouvelle théorie que les accélérateurs de particules, et leurs énergies toujours plus élevées, pourront apporter des éléments de réponse⁽²⁵⁾ en confirmant ou infirmant certaines théories émergentes⁽²⁶⁾.

Vers des accélérateurs linéaires

Les **accélérateurs circulaires**, formés en réalité d'une succession de nombreuses portions droites, nécessitent des cycles de décélération/accélération ; cela limite l'énergie atteignable, car le freinage d'une particule chargée produit des photons par **rayonnement de freinage** (en allemand *Bremsstrahlung*)⁽²⁷⁾. Cet effet est beaucoup plus fort pour les électrons, c'est pourquoi les collisions à très haute énergie dans le LHC sont des collisions entre protons. Quand le tunnel du LHC a abrité le programme **LEP (Large electron positron ring)** de collisions électron/positron⁽²⁸⁾ (e^+/e^-), ces collisions n'ont pu se faire qu'à énergie plus basse⁽²⁹⁾.

Pour dépasser ces limitations et communiquer à des électrons des énergies très élevées, on en vient à planifier des **accélérateurs complètement linéaires**, évitant le *Bremsstrahlung* en phase d'accélération. C'est le principe de l'accélérateur linéaire d'électrons expérimental bâti à Hambourg (Allemagne) : **l'E-XFEL (European X-ray free-electron laser)**. D'un coût total de 1,2 milliard d'euros, il permet d'accélérer des électrons sur une seule branche linéaire, jusqu'à 17,5 GeV sur une longueur totale de 3,4 km⁽³⁰⁾. Imitant le comportement d'un laser, il fait osciller le faisceau d'électrons dans des structures magnétiques, engendrant des émissions pulsées de rayons X à très haute intensité. Ses excellents résultats permettent de considérer les infrastructures linéaires comme désormais maîtrisées.

Le projet ILC au Japon

En 2012, un projet a été proposé au ministère japonais de l'Éducation, de la culture, des sports, des sciences et de la technologie (MEXT), par un consortium international de chercheurs⁽³¹⁾.

Préparé depuis la fin des années 1980, ce projet porte sur la **création d'un accélérateur linéaire international de grandes dimensions (International Linear Collider ou ILC) permettant des collisions e^+/e^- à très haute énergie** (500 GeV, 15 km, 8 milliards d'euros environ). Il a fait l'objet d'un *Technical Design Report* (TDR)⁽³²⁾ en 2013, ce qui en fait le plus avancé des différents projets de grands collisionneurs linéaires à travers le monde.

En 2016, le Japon envisage de financer une partie du projet à condition de réduire le coût total d'un tiers, soit un coût total de 5 à 6 milliards d'euros. Ce compromis budgétaire limitait alors **l'énergie du collisionneur à 250 GeV : insuffisant pour explorer la physique des ultra-hautes énergies, mais suffisant pour réaliser des mesures de précision sur le boson de Higgs via des collisions e^+/e^- avec un bruit de fond très réduit par rapport aux collisions p/p du LHC**. Il est à noter qu'une montée en énergie serait toujours possible dans une phase

ultérieure, via un allongement des branches d'accélération.

Le projet prévoit une installation dans la région de Tohoku au nord-est de l'île principale d'Honshū, encore gravement affectée par le séisme de 2011. Ce séisme a été responsable de l'accident nucléaire de Fukushima. Cette localisation pose la question de l'impact d'un éventuel séisme. Au vu des coûts induits des installations et des énergies mises en jeu, il s'agit d'un point central sur lequel un effort de sécurité et de recherche en amont a été réalisé. Le Japon prendrait à sa charge les opérations de génie civil et la production de quelques structures de haute technologie pour lesquelles il possède une expertise reconnue. Les autres infrastructures (cryomodules, cavités supraconductrices...) dépendraient de financements internationaux. **Les discussions en cours évoquent des participations en nature émanant de l'Europe et des États-Unis, à hauteur d'un milliard d'euros chacun, et une contribution asiatique complémentaire (Chine, Corée du Sud, Inde).**

Le développement de l'ILC a également contribué à l'avancée de projets parallèles : ainsi, la technologie supraconductrice des cavités et des cryomodules du faisceau d'électrons du X-FEL est le résultat direct de la R&D mise au point pour l'ILC et développée par l'industrie européenne. Le budget de fonctionnement annuel s'élèverait, en complément, à 300 millions d'euros. La faisabilité de l'ILC dépendra en particulier de la décision du Japon, qui pourrait être annoncée en mars 2019⁽³³⁾, et de celle des pays européens, qui l'ont inscrit dans les projets prioritaires de la stratégie européenne 2013-2020⁽³⁴⁾. Les deux décisions sont fortement liées.

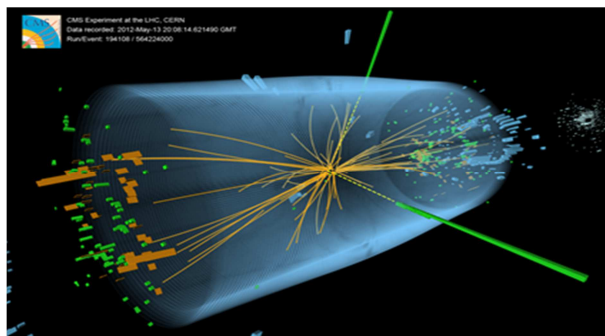


FIGURE 2. SIMULATION D'UNE COLLISION DE PARTICULES DANS L'EXPERIENCE CMS AU LHC (source : CERN)

Les autres projets à moyen et long terme

Les calendriers de décisions du gouvernement japonais, d'une part, et des investisseurs étrangers, d'autre part, ne sont pas synchronisés : si le premier doit rendre publique sa décision vis-à-vis de l'ILC au premier trimestre 2019, l'élaboration de la stratégie européenne, à laquelle participe le CERN, vient tout juste de débuter et sera rendue publique seulement en 2020.

Au CERN, le LHC est maintenant en arrêt pour travaux. Il reprendra une activité à 14 TeV en 2021-2023 avant de s'arrêter à nouveau en 2024-2025 et de commencer, en 2026, la phase de « haute luminosité » c'est-à-dire avec un nombre plus élevé de collisions en un temps donné⁽³⁵⁾.

Le CERN envisage également un collisionneur circulaire à haute énergie, avec le **projet FCC (Futur collisionneur circulaire)** près de l'actuel site. Il serait doté d'une circonférence de 80 à 100 km et pourrait monter à une énergie dix fois plus importante qu'au LHC, pour atteindre des énergies de l'ordre de 300 GeV pour les électrons et 150 TeV pour les protons. Il hébergerait des collisions e^+/e^- dès 2040 (pour un coût total de 9 milliards d'euros, dont 5 milliards d'euros pour la construction du tunnel) et des collisions proton-proton vers 2055 (pour un coût de 15 milliards d'euros). Le *Conceptual Design Report* (CDR) a été publié en janvier 2019⁽³⁶⁾.

D'autres propositions du CERN sont contenues dans le **projet CLIC (Compact Linear Collider)**, dont le principe et le fonctionnement se rapprochent de l'ILC, avec des énergies cependant supérieures. Le CLIC permettrait de dépasser l'énergie de 1 TeV, soit quatre fois ce qu'annonce l'ILC dans sa version actuellement envisagée, et deux fois ce que l'ILC annonçait dans sa version originale. Ce projet bénéficierait des installations et du savoir-faire des équipes locales du CERN, permettant aussi de conserver en Europe l'expertise actuelle en physique des particules. Il est cependant plus lointain (mise en fonctionnement sans doute après 2050) et encore hypothétique.

En Chine se prépare également un autre projet majeur, le **CepC (Circular electron positron collider)**, éventuellement suivi par le projet **CppC (Circular proton proton collider)** en compétition directe avec le FCC européen.

Tous ces projets⁽³⁷⁾ doivent s'appréhender sous des aspects multiples : enjeux scientifiques, attraction de talents, retombées technologiques, contraintes financières, diplomatie scientifique et technologique.

Par ailleurs, à moyen et long termes, le paradigme des accélérateurs de particules toujours plus grands et plus coûteux pour être plus performants, sera sans doute confronté à l'émergence de nouvelles technologies d'accélération actuellement encore en développement pour des énergies limitées, comme les lasers à très haute intensité⁽³⁸⁾. Ceux-ci pourraient permettre de construire des accélérateurs d'une taille bien moindre, et trouvent des applications dans différents domaines.

Sites Internet de l'OPECST :

<http://www.assemblee-nationale.fr/commissions/opecst-index.asp>

<http://www.senat.fr/opecst/>

Références

¹ Dans le tableau périodique des éléments, établi par Mendeleïev en 1869, le nombre de protons (égal à celui des électrons) définit l'espèce chimique de l'atome.

² Un proton est constitué de 2 quarks *up* et d'1 quark *down* et un neutron d'1 quark *up* et de 2 quarks *down*.

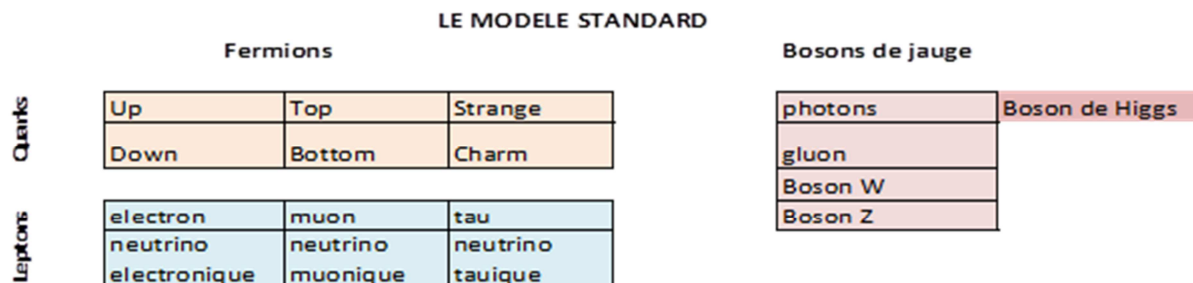
³ Pour donner un ordre de grandeur, chaque centimètre carré de notre peau est traversé, à chaque seconde, par environ mille milliards (10^{12}) de neutrinos, sans la moindre interaction. À l'heure actuelle, on sait peu de choses sur les trois types de neutrinos (électronique, muonique et tau). Une des principales découvertes à leur sujet est leur « oscillation » c'est-à-dire leur capacité à changer de type lors de leur durée de vie. Ce résultat a permis d'établir que la masse de deux d'entre eux au moins est non nulle.

⁴ On compte en tout 6 quarks appelés respectivement *up* (haut), *down* (bas), *top* (dessus), *bottom* (dessous), *strange* (étrange) et *charm* (charme). Seuls les deux premiers entrent dans la constitution de la matière ordinaire et plus précisément des protons et neutrons.

⁵ Les bosons :

Force fondamentale	Boson associé	Caractéristiques
Interaction forte	Gluon	Agit sur les quarks pour lier les protons et neutrons
Électromagnétisme	Photon	Entre 2 particules chargées
Interaction faible	Bosons W et Z	Médiateurs de l'interaction électrofaible
Gravité	Graviton	Pas encore découvert

6



⁷ On parle de régime relativiste lorsque la vitesse devient proche de la vitesse de la lumière.

⁸ À l'exception de la gravitation, qui est traitée par la théorie d'Einstein de la relativité générale. Regrouper dans une même théorie la physique fondamentale des particules et la théorie de la gravitation reste un problème ouvert majeur de la science.

⁹ Cette théorie repose sur un principe de symétrie, appelé « principe de jauge », qui classe les particules en trois familles de quatre (deux quarks, un lepton et un neutrino) et classe également les bosons. Les principes de symétrie, cruciaux en physique fondamentale, visent tout à la fois à ordonner les particules déjà connues, et le cas échéant à en prédire de nouvelles.

¹⁰ Les cyclotrons utilisent un champ magnétique d'intensité constante associé à un champ électrique variable qui contraint les particules à dessiner une trajectoire en spirale.

¹¹ Environ 30 000 accélérateurs sont utilisés dans le monde, dont presque 15 000 dans le milieu médical (radiothérapie, recherche, production de radio-isotopes), 12 000 pour le traitement des matériaux et 3 000 dans les processus industriels. Les accélérateurs de recherche en physique des particules dans le monde sont en beaucoup plus petit nombre :



Source : IN2P3 (CNRS)

En plus du CERN/LHC, on compte : Le Fermilab (ou *Fermi National Accelerator Laboratory*) aux États Unis (aux alentours de Chicago et ancien plus grand accélérateur du monde avant le LHC) ; en Chine, l'*Institute of High Energy Physics* (IHEP) et le *Beijing Electron Positron Collider* (BEPC) en service depuis 2005 ; au Japon, le J-Parc (*Japan Proton Accelerator Research Complex*) et le SuperKEK-B. Enfin à Frascati, en Italie, le synchrotron Dafne est aussi le siège de tests de collisions électrons/positrons.

¹² Les 12 États membres historiques du CERN : la Belgique, le Danemark, la France, la Grèce, l'Italie, la Norvège, les Pays-Bas, la République fédérale d'Allemagne, le Royaume-Uni, la Suède, la Suisse et la Yougoslavie.

¹³ Le CERN a ensuite accueilli l'Autriche, l'Espagne, puis le Portugal, la Finlande, la Pologne, la République tchèque, la Hongrie, la Bulgarie, Israël et la Roumanie. La République tchèque et la République slovaque sont devenues deux États membres distincts en 1993, après leur indépendance. La Yougoslavie a quitté le CERN en 1961. En dehors des États membres, de nombreux autres pays participent à ses activités, sous des formes diverses. La Serbie, Chypre et la Slovaquie sont États membres associés en phase préalable à l'adhésion. La Turquie, l'Ukraine, le Pakistan, la Lituanie et l'Inde sont États membres associés.

¹⁴ Les particules accélérées effectuent environ 10 000 tours du LHC par seconde, soit environ 300 000 km de distance parcourue. Plus précisément, les hadrons accélérés atteignent 99,999999 % de la vitesse de la lumière.

¹⁵ Un matériau supraconducteur n'oppose aucune résistance au passage d'un courant électrique et ne dissipe donc aucune énergie. Il fonctionne cependant à froid : au LHC par exemple, les aimants supraconducteurs opèrent à $-271,3^{\circ}\text{C}$ (environ $1,8^{\circ}\text{C}$ au-dessus du zéro absolu).

¹⁶ Au moment de la collision, des « paquets » de 10^{11} protons sont contenus dans $20\text{ }\mu\text{m}$ (un cheveu humain mesure environ $50\text{ }\mu\text{m}$, soit 50×10^{-6} mètres, symbolisé par $50\text{ }\mu\text{m}$) pour un rendement final d'un milliard de collisions de particules par seconde.

¹⁷ Ces bosons sont responsables de l'interaction faible.

¹⁸ Si le champ porte le nom de trois scientifiques (Robert Brout et François Englert, d'une part, Peter Higgs, d'autre part), la dénomination actuelle est restée celle de boson de Higgs (et est considérée comme injuste dans la communauté de physique des particules).

¹⁹ 1 eV, ou électronvolt, correspond à l'énergie cinétique acquise par un électron au repos et soumis à une différence de potentiel de 1 V. On retiendra : $1\text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19}\text{ J}$. Dans l'absolu, cette valeur est très petite, et c'est pourquoi elle est souvent exprimée en MeV (10^6 eV), GeV (10^9 eV) ou TeV (10^{12} eV). 1 TeV correspond à l'énergie cinétique d'un moustique en vol. Si cette énergie est considérée comme « colossale » au LHC, c'est qu'elle est concentrée sur des particules 10^{12} fois plus petites qu'un moustique.

²⁰ Ces outils étaient nécessaires car les collisions de protons, eux-mêmes constitués de quarks, produisent énormément de particules diverses, qui créent un « bruit de fond » dans lequel il faut trouver l'information recherchée.

²¹ Il ne faut pas confondre l'internet et le Web (toile), ce dernier n'étant qu'une application du premier, au même titre que la messagerie ou l'échange de fichiers. Internet est le réseau informatique mondial et le Web est le système qui permet de consulter des pages hébergées sur internet via un navigateur et de les relier entre elles via des liens hypertextes.

²² <https://council.web.cern.ch/en/content/convention-establishment-european-organization-nuclear-research>

²³ On appelle Univers observable la partie de l'Univers qui peut interagir avec nous par rayonnement électromagnétique.

²⁴ L'énergie noire, représentant environ 70 % de l'énergie de l'Univers, serait responsable de l'accélération de l'expansion de l'Univers. La matière noire, majoritaire dans les 30 % environ de matière, semble requise en raison des anomalies de gravité observées dans les grandes structures telles que les galaxies ou les amas de galaxies. Les chercheurs ne savent pas comment les mettre en évidence directement, mais supposent leur existence en décelant leurs effets indirects sur les structures (pour la matière noire) et sur la cosmologie (pour matière noire et énergie noire).

²⁵ Ainsi, par exemple, puisqu'elles réagissent à la gravité, les particules responsables de la matière noire seraient dotées d'une masse.

²⁶ Par exemple, la supersymétrie est une théorie apparue dès les années 1970 pour tenter de dépasser le cadre du modèle standard. Elle postule que des particules supersymétriques sont associées à chaque particule du modèle, et plus particulièrement, établissent une « symétrie » entre les fermions (constituants de matière) et les bosons (vecteurs de force). De plus, la supersymétrie suppose l'existence de particules stables aux propriétés proches de ce qui serait nécessaire pour constituer la matière noire. Cependant, aucune particule supersymétrique n'a été trouvée à ce jour.

²⁷ L'utilisation du rayonnement de freinage constitue le principe de fonctionnement des synchrotrons émetteurs de lumière, tels que le synchrotron national SOLEIL en région parisienne ou l'ESRF (*European Synchrotron Radiation Facility*) de Grenoble. Après une phase d'accélération par application de champs radiofréquences, les électrons sont stockés dans un anneau de stockage de 354 m de circonférence pour SOLEIL et de 844 m pour l'ESRF, où leur trajectoire circulaire conduit à une émission de rayonnement dans une large gamme du spectre électromagnétique (jusqu'à des énergies supérieures à quelques centaines de keV pour l'ESRF).

²⁸ Le positron est l'antiparticule de l'électron : même masse, mais charge électrique opposée. Le positron est donc chargé positivement.

²⁹ La quantité d'énergie perdue détermine la longueur d'onde du rayonnement émis (infrarouge, visible, ultraviolet, rayons X...). Ce rayonnement peut avoir des applications dans de nombreux domaines : biologie, astrophysique...

³⁰ Il est financé majoritairement par l'Allemagne (plus de 50 %) et la Russie (environ 25 %), avec le concours, à hauteur de 1 % à 3 % chacun, de dix autres pays européens dont la France (participation de 35 millions d'euros en nature, portée principalement par le CEA et le CNRS).

³¹ Depuis que les États-Unis ont choisi de se focaliser sur les neutrinos en physique des particules, le Japon occupe une place de choix dans ce domaine, derrière l'Europe qui s'impose toutefois grâce au CERN et à sa capacité à produire le boson de Higgs.

³² <http://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report>

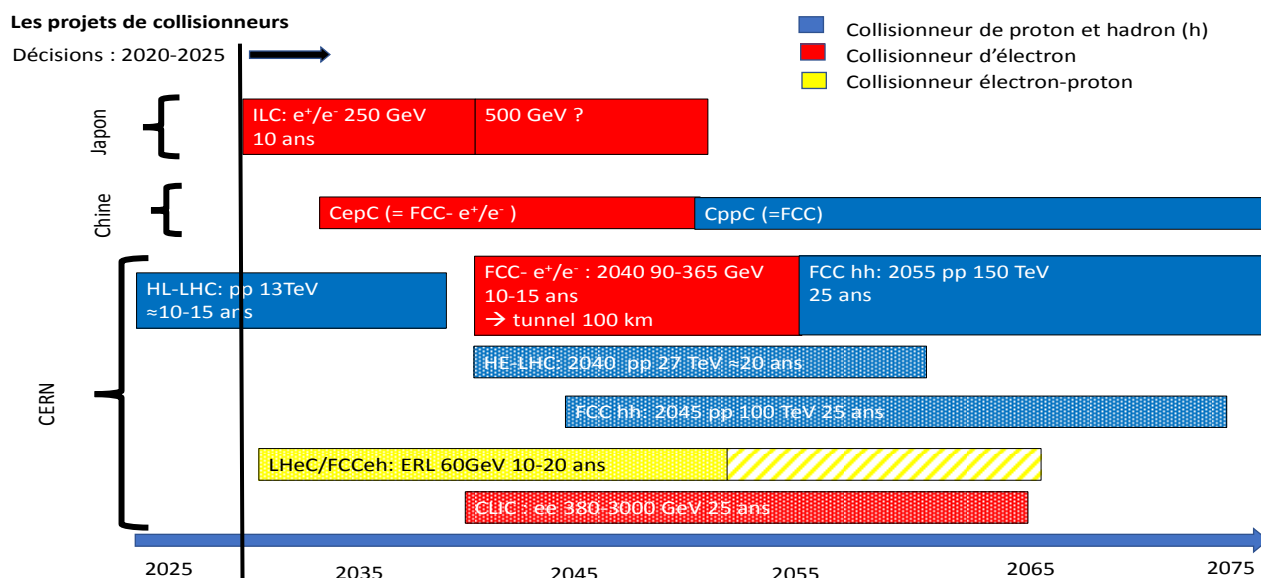
³³ La 83^e réunion de l'*International committee for future accelerators* (ICFA) doit se tenir en 2019 à Tokyo et discutera des décisions qui auront été évoquées par le gouvernement japonais.

³⁴ <https://europeanstrategy.cern/european-strategy-for-particle-physics>

³⁵ La quantité de données, qui a déjà atteint 300 pétaoctets (300 millions de gigaoctets) pour la période 2015-2018, devrait augmenter d'un facteur 10 pendant la phase de haute luminosité.

³⁶ Référence : <https://fcc-cdr.web.cern.ch/>

³⁷ Récapitulatif des différents projets d'accélérateurs de particules en cours.



Source : IN2P3 (CNRS)

³⁸ Audition par l'Office, ouverte à la presse, le 14 février 2019, de M. Gérard Mourou, directeur du Laboratoire d'optique appliquée, professeur à l'École polytechnique, Prix Nobel de physique 2018 et de M. Sydney Galès, directeur de recherche émérite, Institut de physique nucléaire d'Orsay, ancien directeur du GANIL.

Experts consultés

M. Thierry d'ALMEIDA, ingénieur de recherche au CEA.

Mme Ursula BASSLER, directrice adjointe de l'Institut de physique nucléaire et de physique des particules (IN2P3) du CNRS. Nouvelle présidente du Conseil du CERN (depuis janvier 2019).

M. Gabriel CHARDIN, président du comité Très grandes infrastructures de recherche au CNRS.

Mme Anne- Isabelle ETIENVRE, directrice de l'Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (IRFU).

M. Gautier HAMEL de MONTCHENAULT, chef du Département de physique des particules (DPPH) du CEA.

M. François Le DIBERDER, enseignant-chercheur à l'IN2P3 (Institut national de physique nucléaire et de physique des particules) et membre de l'expérience ATLAS au LHC.

M. Pierre MANIL, ingénieur-chercheur à l'IRFU/CEA.

M. Maxim TITOV, directeur de recherche à l'IRFU/CEA.

M. Patrice VERDIER, directeur adjoint scientifique pour la physique des particules à l'IN2P3.

M. Marc WINTER, directeur de recherche à l'Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien de Strasbourg.

Coordination scientifique de Mme Sarah TIGRINE, conseillère scientifique.