

# LE GRAND COLLISIONNEUR DE HADRONS DU CERN : LA MACHINE QUI A DECOUVERT LE BOSON DE HIGGS

Elias METRAL

Physicien des accélérateurs au CERN

*Une nouvelle particule élémentaire, similaire au boson de Higgs [1,2], a été identifiée dans le grand collisionneur de hadrons du CERN [3], appelé le LHC (Large Hadron Collider en anglais). Cette découverte a été annoncée le 4 juillet 2012 et elle a valu le prix Nobel de physique 2013 (décerné le 08/10/2013) aux deux physiciens F. Englert and P. Higgs pour leurs travaux théoriques sur le boson de Higgs en 1964.*

## Bref historique du CERN

Le CERN, qui a été créé en **1954**, a changé plusieurs fois de nom au cours de son histoire mais a toujours gardé le même acronyme, qui lui vient de son premier nom : *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*. Il se nomme désormais *laboratoire européen pour la physique des particules* et se situe sur la frontière franco-suisse proche de Genève (voir Fig. 1). Le CERN est composé de 20 états membres, environ 2500 personnes et son budget annuel est d'environ un milliard de francs suisses. Les dates clefs du CERN sont les suivantes :

**1957** : premier accélérateur appelé Synchrocyclotron ;

**1965** : premières observations d'anti-noyaux (anti-deuteron) ;

**1968** : G. Charpak développe la « chambre proportionnelle multi-fils » qui lui vaudra le prix Nobel de physique 1992 ;

**1971** : premières collisions de protons dans les ISR (un des accélérateurs du CERN) ;

**1981** : premières collisions proton anti-proton dans les ISR ;

**1983** : découverte des particules W et Z dans le SPS (un autre accélérateur du CERN), qui a valu le prix Nobel de physique 1984 à C. Rubbia et S. Van der Meer ;

**1990** : T. Berners-Lee définit les concepts de base du « World Wide Web » (adresse URL, protocole http et langage html) ;

**1995** : premiers anti-atomes produits (anti-hydrogène) dans le LEAR (un autre accélérateur du CERN) ;

**04/07/2012** : découverte d'une particule similaire au boson de Higgs dans le LHC.



**Figure 1** : Grand collisionneur de hadrons du CERN (appelé LHC), proche de Genève. On peut voir aussi le lac Léman ainsi que les Alpes et le Mont-Blanc.

## Les recherches du CERN

Au CERN, nous faisons de la recherche fondamentale et étudions les composants de la matière et les forces qui interagissent entre eux. Après un siècle de découvertes et de mesures, les physiciens des particules ont développé le « modèle standard » pour décrire cela et nos connaissances actuelles nous disent que la matière est composée de 12 quarks (6 quarks et 6 anti-quarks) et 12 leptons (6 leptons et 6 anti-leptons). Les 6 quarks se nomment Haut, Bas, Charme, Étrange, Beauté et Top alors que les 6 leptons se nomment Électron, Muon, Tau, Neutrino Électron, Neutrino Muon et Neutrino Tau. Par définition, une anti-particule a une charge électrique opposée à sa particule correspondante et s'annihile avec cette dernière en produisant de l'énergie pure. Il est important de noter que la matière ordinaire n'est composée que de 2 quarks (Haut et Bas) qui composent le noyau de chaque atome (dans le noyau il y a des protons et des neutrons, composés de 3 quarks) et d'un type de leptons (électrons) qui gravitent autour du noyau. Et il y a 4 forces fondamentales dans l'univers :

- la gravitation,
- la force électromagnétique,
- la force d'interaction forte et
- la force d'interaction faible,

dont les particules messagères sont respectivement le graviton, le photon, le gluon et les particules  $Z^0$ - $W^-$ - $W^+$ . Enfin, une dernière particule, appelée boson de Higgs, est sensée donner la masse à toutes les particules. En assemblant des quarks on crée des hadrons et les protons (composés de 3 quarks) sont donc des hadrons. Il reste cependant plusieurs mystères non encore élucidés : pourquoi est-ce que l'expansion de l'univers semble s'accélérer ? Où est l'anti-matière qui a été créée avec la matière lors du Big-Bang ? (ou pourquoi y a-t-il quelque chose plutôt que rien ?) Qu'est-ce que et où se trouve la matière noire (pour expliquer la rotation des galaxies) et l'énergie noire ? Etc. C'est ce que le CERN essaie de comprendre.

## Accélérateurs et collisionneurs

Pour faire toutes ces études, nous créons des particules que nous accélérons et que nous envoyons soit sur des cibles fixes (comme pour l'expérience CNGS = « CERN Neutrino to Gran Sasso » qui étudie l'oscillation des neutrinos entre le CERN et Gran Sasso situé à environ 730 km, proche de Rome, en envoyant des protons sur une cible fixe et générant des neutrinos) soit sur d'autres particules venant en sens inverse. Ce dernier mode, appelé mode collisionneur, est celui utilisé dans le LHC où des protons (d'où le nom de hadrons) sont mis en collision.

Le LHC est le plus grand accélérateur de particules du CERN, et le plus grand jamais construit au monde, avec une circonférence d'environ 27 km. Cependant, bien que le LHC soit le projet phare du programme expérimental du CERN, il n'en est pas moins qu'un parmi d'autres et seulement 0,018 % des protons produits en 2012 ont été utilisés par le LHC.

Les accélérateurs de particules sont des machines qui manipulent des particules à l'aide de champs électromagnétiques, ce qui s'accompagne de 3 conditions :

- (i) les particules doivent être chargées électriquement ;
- (ii) les particules doivent être stables pendant tout le processus (c'est-à-dire que les particules ne doivent pas se désintégrer) - ces deux conditions limitent les particules qui peuvent être accélérées en pratique aux électrons ( $e^-$ ), protons ( $p^+$ ) et ions ainsi que toutes leurs anti-particules ;
- (iii) enfin, un « vide » suffisant (où les particules circulent) doit être créé pour que les particules ne soient pas perturbées par les molécules de l'air. Le moteur des recherches sur la physique des particules a toujours été la physique des hautes énergies mais celle-ci ne représente en fait de nos jours qu'un très faible pourcentage de cette activité car des milliers d'accélérateurs de particules sont utilisés dans de nombreux pays pour de multiples applications (physique appliquée, médecine, etc.).

Avec un collisionneur de particules, on fait l'opposé de ce qui est fait dans une centrale nucléaire : on crée de la matière (nouvelles particules) à partir de l'énergie alors que dans des centrales nucléaires on crée de l'énergie à partir de la matière (uranium). Le paramètre clef d'un collisionneur de particules est la luminosité qui est le nombre d'évènements par seconde générés dans les collisions divisé par la section efficace (liée à la probabilité) de la réaction étudiée. Cette dernière est d'autant plus grande que le nombre de paquets de particules est grand, que le nombre de particules par paquet est grand et que les dimensions transversales des paquets aux points de collision (appelés points d'interaction) sont petites. Le défi expérimental du LHC est de trouver des évènements extrêmement rares, ce qui nécessite une grande statistique et donc une grande luminosité. La luminosité requise par les physiciens des particules (au début des collisions) est de  $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , ce qui a engendré les paramètres suivants : 2808 paquets de

protons ( $p^+$ ) d'une longueur d'environ 30 cm, séparés par environ 7,5 m, comprenant chacun  $1,15 \cdot 10^{11} p^+$  / paquet avec des dimensions de paquets horizontales et verticales d'environ 17  $\mu\text{m}$  (au point d'interaction), c'est-à-dire bien plus petite qu'un cheveu humain, dont la taille est d'environ 50-100  $\mu\text{m}$ . Pour pouvoir valider la découverte d'une nouvelle particule il faut pouvoir atteindre la limite de « 5 sigmas » (dans le jargon des physiciens), qui correspond à un degré de confiance de 99,99994 %.

En physique des particules, l'unité d'énergie couramment utilisée est l'électron-Volt (eV), c'est-à-dire l'énergie acquise par un  $e^-$  accéléré par une différence de potentiel de 1 Volt et qui correspond donc à  $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$  (le Joule étant l'unité du système international). Dans le LHC, l'énergie de chaque  $p^+$  est de 7 TeV (c'est-à-dire  $7 \cdot 10^{12} \text{ eV}$ ) et l'énergie disponible dans le centre de masse des deux  $p^+$  qui collisionnent (et qui est donc disponible pour créer de nouvelles particules) est de 14 TeV. Cette énergie est infiniment plus faible que les énergies dont on discute dans la vie de tous les jours. En effet, 1 TeV est environ l'énergie d'un moustique en plein vol mais ce qui rend le LHC si extraordinaire est qu'il confine cette énergie dans un espace environ un million de fois plus petit que celui d'un moustique. Le second rôle de l'énergie (le premier étant de produire de nouvelles particules) est d'explorer la structure interne de la matière et plus l'énergie est élevée plus on peut étudier des éléments de petites tailles. Avec son énergie de 14 TeV, le LHC est un super-microscope qui permet d'analyser la structure de la matière à environ  $10^{-19} \text{ m}$ .

Le LHC est le collisionneur à plus haute énergie jamais atteinte mais il y a eu aussi d'autres collisionneurs dans le passé et d'autres collisionneurs sont encore en fonctionnement. Pour ne donner que quelques exemples, le précédent collisionneur du CERN (le LEP) dont le tunnel est actuellement utilisé pour le LHC, faisait des collisions d'électrons ( $e^-$ ) et anti-électrons ( $e^+$ ) à une énergie par particule de 104,5 GeV, qui est la plus haute énergie jamais atteinte pour une machine à leptons (il a fermé en 2000). Le Tevatron aux USA (Fermilab), qui s'est arrêté en 2011, a permis la découverte du quark Top. KEKB au Japon (KEK), qui s'est arrêté en 2010, détient le record de luminosité la plus haute jamais atteinte dans un collisionneur avec  $\sim 2,1 \cdot 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . PEP-II aux USA (SLAC), qui s'est arrêté en 2008, détient le record de courant stocké dans l'accélérateur (c'est-à-dire le nombre de charges / seconde) avec  $\sim 3,2 \text{ A}$ . Enfin, le SLC aux USA (SLAC), qui s'est arrêté en 1998, a été le premier et unique collisionneur linéaire d' $e^- - e^+$ . Les collisionneurs actuellement en fonctionnement sont RHIC (proche de New-York), DAFNE (proche de Rome), BEPC-II (en Chine), VEPP-200 et VEPP-4M (en Russie).

### Les grandes dates du LHC

À ce jour, les dates clefs du LHC sont les suivantes :

**1983** (c'est-à-dire quelques années avant le démarrage du LEP) : premières idées et estimations ;

**1994** (déc) : le projet LHC est approuvé par le conseil du CERN ;

**1995** (oct) : le rapport de conception du LHC est publié ;

**1996** (déc) : le conseil du CERN passe une résolution qui approuve la construction du LHC à 14 TeV en une seule étape (initialement, des contraintes budgétaires imposaient de construire le LHC en deux étapes). Le LHC est la première machine construite au CERN avec une contribution en matériel substantielle d'états non-membres, comme le Canada, l'Inde, le Japon, la Russie et les USA ;

**2007** : le LHC est terminé ;

**2008** : le démarrage avec l'inauguration le 10/09/2008 ;

**30/03/2010** : le LHC faisait ses premières collisions à 7 TeV dans le centre de masse (c'est-à-dire 3.5 + 3.5 TeV).

Enfin, le **04/07/2012** : la découverte d'une nouvelle particule élémentaire, similaire au boson de Higgs, est annoncée officiellement. Cela aura été le travail de nombreuses personnes pendant de nombreuses années. Pour ne citer que quelques personnes, Lyn Evans a été le chef du projet LHC, Rolf Heuer est l'actuel directeur général du CERN et Steve Myers est l'actuel directeur des accélérateurs. Le coût du LHC pour la machine seule est d'environ 5 milliards de francs suisses (~ 4 milliards d'euros).

### Le fonctionnement du LHC

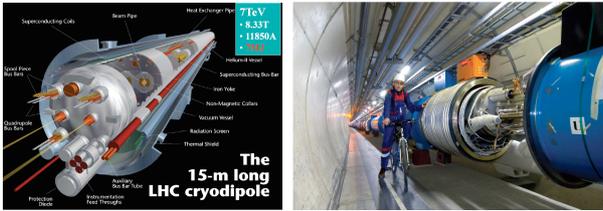
S'il on regarde maintenant plus en détail comment fonctionne le LHC, tout commence avec une bouteille à hydrogène d'où des atomes d'hydrogène gazeux (l'atome d'hydrogène est le plus simple avec un noyau composé d'un seul  $p^+$ ) sont pompés puis ionisés à l'aide d'un champ électrique (en attirant les  $e^-$  d'un côté et les  $p^+$  de l'autre). Ensuite, les  $p^+$  sont guidés et focalisés dans un tuyau autour d'une trajectoire idéale à l'aide de champs magnétiques et ils sont regroupés en paquets et accélérés à l'aide de champs électriques jusqu'à ce qu'ils entrent en collision aux points d'interaction (il y en a 4 dans le LHC). Le LHC est à la fois un accélérateur de particules et un collisionneur et il est appelé un synchrotron car durant l'accélération des particules la trajectoire reste la même (ce qui est différent par exemple d'un cyclotron, où pendant l'accélération la trajectoire des particules change en décrivant une spirale). Pour pouvoir manipuler les particules, comme mentionné plus haut, il faut dans un premier temps créer un « vide suffisant » dans le tuyau où les particules sont censées se déplacer. La pression atmosphérique (~ 1000 hPa ~ 1 bar ~ 760 Torr) correspond à ~  $3 \cdot 10^{19}$  molécules par  $cm^3$  et la pression désirée dans le LHC est  $10^{-13}$  fois plus petite, ce qui correspond à un ultravide (avec néanmoins toujours environ 3 millions de molécules par  $cm^3$ ...). En fait le LHC dispose de 3 systèmes de vide (le premier pour le vide du faisceau, comme vu précédemment, et deux autres vides d'isolation pour les aimants et la ligne de distribution d'hélium dont nous parlerons plus loin). Le plus grand volume à pomper dans le LHC est pour le vide d'isolation des aimants qui correspond à ~ 9 000  $m^3$ , ce qui revient à pomper la nef centrale

d'une cathédrale. Il faut noter que la forme et le matériau utilisé pour le tuyau de la chambre à vide sont tous les deux importants pour la performance ultime de la machine.

L'astuce des accélérateurs pour manipuler des particules chargées repose sur le fait que la meilleure façon de garder quelque chose sous contrôle (c'est-à-dire stable) est de le faire osciller (comme par exemple les planètes autour du soleil). Et c'est bien ce que l'on fait dans les trois plans (horizontal, vertical et longitudinal) d'un accélérateur de particules où les mouvements des particules sont proches de ceux d'oscillateurs harmoniques dont le meilleur exemple est celui du pendule (à petites oscillations). Des dipôles magnétiques (créant un champ magnétique vertical) sont disposés le long de la trajectoire (circulaire) pour guider les particules et ces dipôles (voir Fig. 2) ont représenté le défi technologique le plus important pour la construction du LHC car le nombre très élevé des particules requis pour obtenir une haute luminosité a exclu la possibilité d'utiliser des anti-protons ( $p^-$ ) comme cela a été fait par exemple au Tevatron de Fermilab (où des collisions  $p^+p^-$  ont été réalisées), ce qui a exclu la possibilité d'utiliser une seule chambre à vide et une seul système d'aimants pour les deux faisceaux circulant en sens contraire. Il fallait donc utiliser deux faisceaux de  $p^+$  et comme il n'y avait pas assez de place dans le tunnel (qui a été construit pour le collisionneur précédent, le LEP) pour deux anneaux séparés, ceci a conduit à utiliser pour la première fois la technologie supraconductrice pour des aimants « deux en un » (c'est-à-dire avec les deux tuyaux dans le même aimant). En effet, en plus du concept « deux en un », la technologie supraconductrice a été rendue nécessaire par la haute énergie requise pour les faisceaux, nécessitant un champ magnétique de 8,33 T (c'est-à-dire ~ 200 000 fois le champ magnétique terrestre), et au-delà d'environ 1,5 – 2 T, des bobines supraconductrices sont nécessaires pour pouvoir générer de tels champs. En tout, 1232 dipôles sont installés dans le LHC, occupant ~ 70 % de la circonférence. Chaque dipôle coûte ~ 0,5 million de francs suisses (400 000 €), pèse ~ 37 tonnes et mesure ~ 15 m pour un courant circulant d'environ 12 000 A.

### La supraconductivité

La supraconductivité est un état que la majorité des éléments chimiques atteint au-dessous d'une température critique et qui se caractérise en particulier par l'absence de résistance au passage d'un courant électrique et donc l'absence de dissipation d'énergie par effet Joule. Les dipôles du LHC utilisent des câbles en Niobium-Titane (Nb-Ti) qui devient supraconducteur en dessous de 10°K (c'est-à-dire -263°C) sachant que le zéro absolu est 0°K et que 0°Celsius correspond à 273°Kelvin. Les câbles sont fabriqués à partir de filaments en Nb-Ti d'une épaisseur de 6  $\mu m$  (c'est-à-dire environ dix fois plus petite qu'un cheveu humain). Environ 7600 km de câbles ont été nécessaires, soit 1200 tonnes, et la longueur totale des filaments est astronomique car elle représente environ 5 allers-retours entre la terre et le soleil.



**Figure 2 :** Un dipôle du LHC (à gauche) qui a représenté le défi technologique le plus important pour la construction du LHC et une interconnexion entre deux dipôles (à droite).

Qui dit supraconductivité dit système cryogénique car il faut maintenir une température très basse dans les aimants du LHC. En fait, il a été décidé de descendre jusqu'à 1,9°K (qui, soit dit en passant, est plus froid que l'espace intergalactique dont la température est d'environ 2,7°K) en raison des « super propriétés » de l'hélium. En effet, à pression atmosphérique, l'hélium gazeux se liquéfie à ~ 4,2°K et s'il est refroidi encore plus il subit un deuxième changement de phase à ~ 2,17°K où il devient superfluide, c'est-à-dire qu'il se comporte comme un fluide sans viscosité (une grande viscosité correspond par exemple au miel). L'hélium superfluide a, entre autre, une très grande conductivité thermique, ce qui en fait un refroidissant de choix pour les grands systèmes supraconducteurs. Il est intéressant de noter que le LHC est le plus grand système cryogénique au monde et un des endroits les plus froids. Au total, ~ 120 tonnes d'hélium sont nécessaires, et le processus de refroidissement complet prend plusieurs semaines et comporte trois phases : la première se déroule en deux temps, un premier refroidissement étant réalisé jusqu'à 80°K grâce à ~ 10 000 tonnes d'azote liquide, et un second jusqu'à 4,5°K grâce à des turbines de refroidissement ; la deuxième phase consiste à remplir la masse froide des aimants avec de l'hélium liquide ; et la dernière et troisième phase est le refroidissement final jusqu'à 1,9°K. Il est aussi intéressant de noter que les lois de la thermodynamique nous disent que la chaleur dilate et le froid contracte, ce qui appliqué au 27 km du LHC correspond à une dilatation / contraction d'environ 80 m... Heureusement, des soufflets ont été installés pour absorber ces variations.

### Les systèmes importants du LHC

Comme nous l'avons vu précédemment, les dipôles guident les particules le long de la trajectoire circulaire. Pour les focaliser autour de cette orbite, d'autres éléments magnétiques, des quadripôles (c'est-à-dire avec quatre pôles magnétiques), sont utilisés. Il y en a 392. Enfin pour confiner les particules en paquets et les accélérer, 8 cavités accélératrices Radio-Fréquences (RF signifie que la fréquence d'oscillation est comprise entre 9 kHz et 3000 GHz) sont utilisées (par faisceau), chacune délivrant 2 MV (avec un champ accélérateur de 5 MV/m) à une fréquence de 400 MHz. Il est intéressant de noter que seulement environ 2 nano-grammes d'hydrogène sont accélérés chaque jour de fonctionnement et que par conséquent il faudrait environ un million d'années pour accélérer un

gramme d'hydrogène. De plus, aucune particule ne peut aller plus vite que la vitesse de la lumière dans le vide (d'environ 300 000 km/s) mais il n'y a pas de limite sur l'énergie qu'une particule peut atteindre et en fait le LHC ne devrait pas être appelé un accélérateur de particules mais un massificateur de particules car la vitesse des particules  $\gamma$  est quasiment constante, seule la masse des particules est multipliée par ~ 16 entre l'injection et l'énergie de collision.

L'instrumentation constitue les yeux de l'accélérateur et une bonne instrumentation est nécessaire pour mesurer le nombre de particules par paquet (ainsi que son évolution dans le temps), la longueur et le profil des paquets de particules, les tailles et profils transversaux, les endroits de perte de particules (ce qui est important aussi pour la protection de la machine), etc.

Un autre système important est le système de collimation, chargé de protéger la machine avec une énergie stockée dans les faisceaux d'environ 360 MJ, ce qui est environ aussi énergétique qu'un train de 400 tonnes comme le TGV lancé à 150 km/h. Une infime partie de l'énergie stockée suffit à faire perdre son état supraconducteur à un aimant ou même à détruire des parties de l'accélérateur : l'énergie dans les deux faisceaux est suffisante pour faire fondre environ une tonne de cuivre. Pour cette raison, de nombreux collimateurs composés de deux mâchoires en carbone sont positionnés très proches du faisceau, à une distance d'environ 2 mm pour les plus proches.

Enfin, il faut pouvoir injecter les faisceaux dans le LHC (avec d'autres types de dipôles) et les extraire rapidement (sans perte) en cas de problème ou si la qualité des faisceaux n'est plus satisfaisante. Les faisceaux extraits sont envoyés sur un absorbeur externe, qui doit être capable de résister à l'impact .

### Pourquoi le LHC est-il sous terre ?

Le LHC se situe sous terre car il réutilise le tunnel construit pour le LEP et un tunnel souterrain était la meilleure solution pour deux raisons : c'est plus économique d'excaver un tunnel plutôt que d'acquérir le terrain en surface et cela réduit l'impact sur le paysage ; la croûte terrestre fournit un bon blindage contre les radiations. La profondeur moyenne est d'environ 100 m, avec une légère pente d'environ 1.4 % : la profondeur varie entre 175 m (sous le Jura) et 50 m (en direction du lac Léman). Des considérations géologiques imposaient d'avoir une profondeur d'au moins 5 m sous la couche de molasse. Il est intéressant de noter que lorsque le tunnel a été excavé, les deux bouts étaient alignés à 1 cm près.

En passant des  $e^-$  aux  $p^+$ , la radioactivité a évolué au CERN. Les pertes de particules dans les accélérateurs de particules induisent des transmutations nucléaires et les différents éléments de la machine (chambre à vide, aimants, etc.) deviennent radioactifs, ce qui engendre des rayonnements

électromagnétiques même lorsque l'accélérateur est arrêté.

La consommation électrique du LHC est de l'ordre de 120 MW (celle du CERN en entier est d'environ 230 MW) et elle correspond à la consommation électrique des ménages dans le canton de Genève. Le CERN est fourni en électricité par le réseau français EDF (400 kV) et uniquement en cas de problème des compagnies suisses prennent le relais. Une large fraction de la consommation électrique du LHC est utilisée pour maintenir les basses températures nécessaires au bon fonctionnement des aimants supraconducteurs.

Enfin, la performance du LHC est limitée par plusieurs effets : le champ magnétique dipolaire maximum, l'énergie stockée dans les faisceaux circulants, l'ouverture mécanique, etc., ainsi que par les effets collectifs, c'est-à-dire l'interaction entre : les  $p^+$  eux-mêmes, les  $p^+$  et leur environnement (la chambre à vide, etc.), les deux faisceaux de  $p^+$  en sens inverse se croisant aux points d'interaction et les  $p^+$  et un nuage d' $e^-$  qui peut être créé dans la chambre à vide sous certaines conditions.

### L'avenir

En conclusion, le LHC a déjà permis la découverte d'une nouvelle particule (qui ressemble au boson de Higgs), ce qui est un magnifique départ. Mais ce n'est que le début et la luminosité nominale n'a pas encore été atteinte, uniquement  $\sim 77\%$  ont été atteints en 2012. De plus, exactement neuf jours après le démarrage du LHC, lors de tests de puissance le 19/09/2008, une faute électrique dans une interconnexion supraconductrice entre un dipôle et un quadripôle a libéré accidentellement 600 MJ stockés dans un secteur du LHC, ce qui a engendré des dommages mécaniques. Cet incident a retardé le LHC d'environ un an, et c'est aussi la raison pour laquelle les premières collisions ont eu lieu à 7 TeV dans le centre de masse ( $3.5 + 3.5$ ) et qu'en 2012 l'énergie n'a été augmentée que jusqu'à 8 TeV ( $4 + 4$ ). Le LHC est maintenant en arrêt (pendant 2013-2014) pour en particulier implémenter des mesures de sécurité pour pouvoir augmenter l'énergie jusqu'à 13-14 TeV, en plus des autres tâches de maintenance. Il y a environ 10 000 connexions supraconductrices entre les aimants du LHC. Le but est d'ajouter une pièce – un « shunt » – aux connexions supraconductrices. Ce « shunt » est une connexion à basse résistance qui forme un chemin alternatif pour une portion du courant dans le cas où la connexion supraconductrice perdrait son état supraconducteur. Un total de 27 000 « shunts » doit être installé. En ce qui concerne le futur, le but est de redémarrer en 2015 pour 3 ans à 13-14 TeV avec une luminosité supérieure à la luminosité nominale ( $\sim 1-2 \cdot 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ). Pour le moyen terme, un programme a été mis en place pour les 20 prochaines années. Enfin, pour le long terme, depuis la découverte d'un boson à une énergie relativement faible ( $\sim 125 \text{ GeV} / c^2$ ), il y a beaucoup de discussions sur un nouveau tunnel de 80 ou 100 km qui pourrait servir de collisionneur de

leptons avec une énergie de collision jusqu'à 350 GeV, puis de collisionneur de  $p^+$  avec une énergie de collision d'environ 100 TeV ! Les idées ne manquent pas...

### Références

[1] P.W. Higgs, Broken symmetries and the masses of gauge bosons, Physical Review Letters, Vol. 13, n. 16, 19 October 1964.

[2] F. Englert and R. Brout, Broken symmetry and the mass of gauge vector mesons, Physical Review Letters, Vol. 13, n. 9, 31 August 1964.

[3] CERN : <http://home.web.cern.ch/about>.