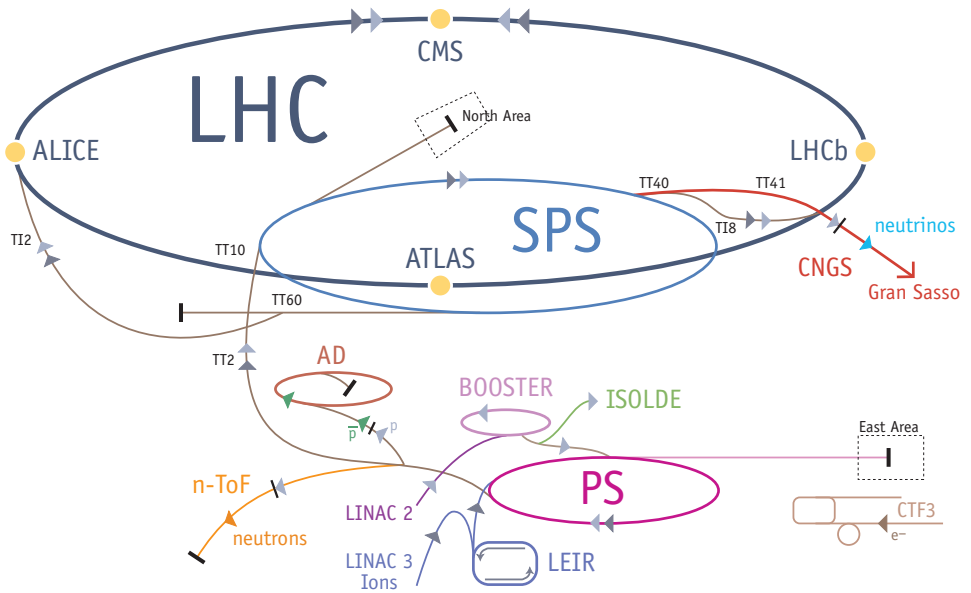


CERN *faq*

Guide du LHC



Le présent guide expose, sous forme de questions-réponses, un ensemble de faits et de chiffres relatifs au Grand collisionneur de hadrons (LHC). Les questions sont regroupées en rubriques, et les réponses sont souvent en deux parties, la seconde étant plus détaillée. NB : le terme « interaction » est synonyme de « collision » lorsqu'on parle de collisions de particules dans l'accélérateur.

Ce guide est constamment mis à jour, veuillez consulter la dernière version en ligne à l'adresse :

<http://multimedia-gallery.web.cern.ch/multimedia-gallery/Brochures.aspx>

faq

<i>Quelques notions de physique</i>	1
<i>Le LHC en général</i>	15
<i>La machine</i>	27
<i>Les détecteurs</i>	37
<i>L'environnement</i>	49
<i>Le LHC en 10 faits remarquables</i>	55
<i>Annexe 1</i>	56
<i>Annexe 2</i>	57

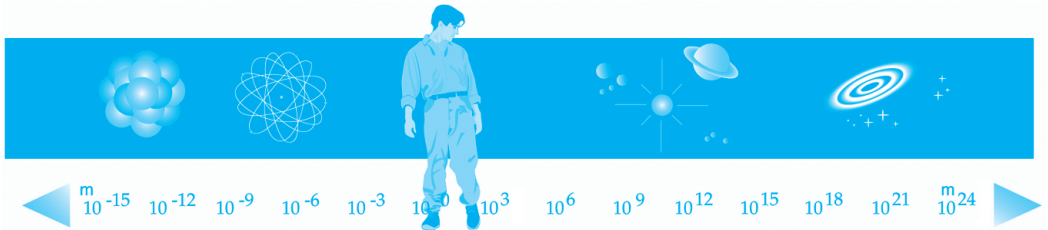


Puissances de dix

Les puissances de dix sont couramment utilisées en physique et en informatique. C'est un moyen pratique d'abrégé les nombres très grands ou très petits.

Puissances de dix	Nombre	Symbole
10^{-12}	0.000000000001	p (pico)
10^{-9}	0.000000001	n (nano)
10^{-6}	0.000001	μ (micro)
10^{-3}	0.001	m (milli)
10^{-2}	0.01	
10^{-1}	0.1	
10^0	1	
10^1	10	
10^2	100	
10^3	1000	k (kilo)
10^6	1 000 000	M (mega)
10^9	1 000 000 000	G (giga)
10^{12}	1 000 000 000 000	T (tera)
10^{15}	1 000 000 000 000 000	P (peta)

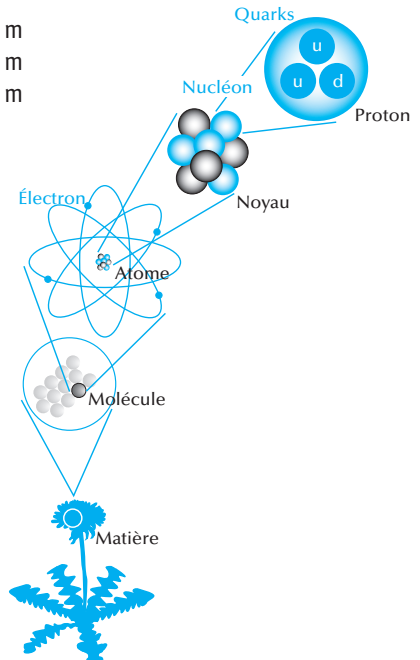
À l'intérieur de l'atome



La physique des particules étudie les composantes les plus minuscules de la nature. Elle s'intéresse à l'infiniment petit, aux éléments fondamentaux, mais également à l'infiniment lointain dans le temps, c'est-à-dire quelques instants seulement après le Big Bang. Voici quelques exemples de dimensions auxquelles ont affaire les physiciens des particules.

- Atome : 10^{-10} m
- Noyau : 10^{-14} m
- Quarks : $< 10^{-19}$ m

Si les protons et les neutrons avaient un diamètre de 10 cm, les quarks et les électrons mesureraient moins de 0,1 mm et un atome entier ferait environ 10 km de diamètre. Un atome est constitué à plus de 99,99 % de vide.



Unités d'énergie en physique

En physique, il existe beaucoup d'unités de mesure de l'énergie, telles que les joules, les calories et les kilowattheures, qui s'emploient chacune dans des contextes différents. Ces trois unités sont liées par des facteurs de conversion, mais seul le joule fait partie du Système international d'unités (SI). En physique des particules, l'unité d'énergie la plus fréquemment utilisée est l'électronvolt (eV) et ses dérivés, les keV (10^3 eV), MeV (10^6 eV), GeV (10^9 eV) et TeV (10^{12} eV). L'électronvolt est une unité commode car les quantités d'énergie étudiées par les physiciens des particules sont très petites. Dans le cas du LHC par exemple, l'énergie totale dégagée par une collision est de 14 TeV, ce qui en fait l'accélérateur de particules le plus puissant du monde. Pourtant, si l'on convertit cette quantité en joules, on obtient :

$$14 \times 10^{12} \times 1.602 \times 10^{-19} = 22.4 \times 10^{-7} \text{ joules.}$$

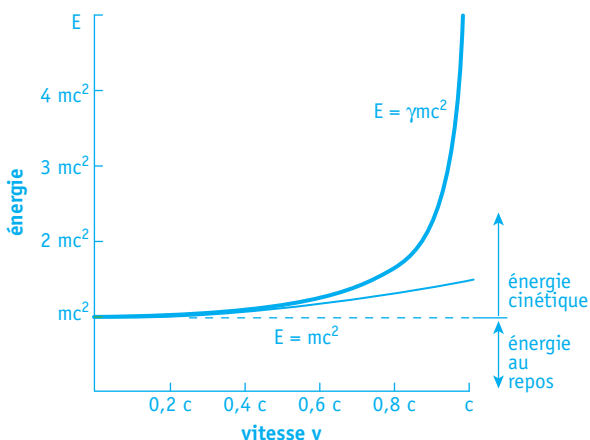
Il s'agit d'une très petite quantité d'énergie si on la compare, par exemple, à l'énergie dégagée par la chute d'une hauteur de 1 m d'un objet pesant 1 kg, à savoir : 9,8 joules = $6,1 \times 10^{19}$ électronvolts.

La définition de l'électronvolt découle d'un calcul simple : un électron accéléré par une différence de potentiel de 1 volt a une quantité d'énergie discrète, $E = qV$ joules, où q représente la charge de l'électron en coulombs et V la différence de potentiel en volts. D'où $1 \text{ eV} = (1.602 \times 10^{-19} \text{ C}) \times (1 \text{ V}) = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$.

Énergie et vitesse d'une particule

Aucune particule ne peut se déplacer à une vitesse supérieure à celle de la lumière dans le vide. En revanche, l'énergie que peut atteindre une particule est illimitée. Or, dans les accélérateurs de haute énergie, les particules circulent normalement à une vitesse très proche de celle de la lumière. Dans ces conditions, lorsque la quantité d'énergie s'accroît, la vitesse augmente très peu. Dans le LHC par exemple, les particules se déplacent à 0,999997828 fois la vitesse de la lumière au moment de l'injection (énergie = 450 GeV) et à 0,999999991 fois la vitesse de la lumière à énergie maximale (énergie = 7000 GeV). C'est pourquoi, en physique des particules, on ne se réfère généralement pas à la vitesse, mais plutôt à l'énergie d'une particule.

Le rapport newtonien classique entre vitesse et énergie cinétique ($E_c = (1/2)mv^2$) ne fonctionne que pour des vitesses largement inférieures à celles de la lumière. Pour les particules se déplaçant à une vitesse proche de celle de la lumière, il convient d'utiliser l'équation de la relativité restreinte d'Einstein : $E_c = (\gamma - 1)mc^2$ où c représente la vitesse de la lumière, m la masse des particules au repos et où γ est lié à la vitesse par l'équation $\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$; $\beta = v/c$



Réf: http://www.phys.unsw.edu.au/einsteinlight/jw/module5_equations.htm

Énergie cinétique d'un proton (K)	Vitesse (%c)	Accélérateur
50 MeV	31.4	Linac 2
1.4 GeV	91.6	Booster PS
25 GeV	99.93	PS
450 GeV	99.9998	SPS
7 TeV	99.9999991	LHC

Relation entre l'énergie cinétique et la vitesse d'un proton dans les accélérateurs du CERN. La masse au repos du proton est $0.938 \text{ GeV}/c^2$

Énergie et masse







Énergie et masse sont deux aspects d'un même phénomène. Conformément à la célèbre équation d'Einstein ($E = mc^2$), la masse peut se transformer en énergie et inversement. Dans le LHC, une telle transformation se produit lors de chaque collision. En outre, en raison de cette équivalence, masse et énergie peuvent être mesurées avec les mêmes unités. À l'échelle de la physique des particules, il s'agit de l'électronvolt et de ses multiples (voir « Unités d'énergie en physique »).

Le modèle standard







Le modèle standard est un ensemble de théories intégrant toutes les connaissances actuelles sur les particules et les forces fondamentales. Selon ce modèle, étayé par les résultats de nombreuses expériences, les quarks sont les constituants de base de la matière et les forces agissent par l'intermédiaire de particules porteuses circulant entre les particules de matière. Les forces se distinguent également par des intensités différentes. Les illustrations suivantes résument les points principaux du modèle standard.

Bien qu'il s'agisse d'une théorie très performante, le modèle standard s'avère incapable d'expliquer certains phénomènes observés récemment, tels que la matière noire et l'absence d'antimatière dans l'Univers (voir page 22).

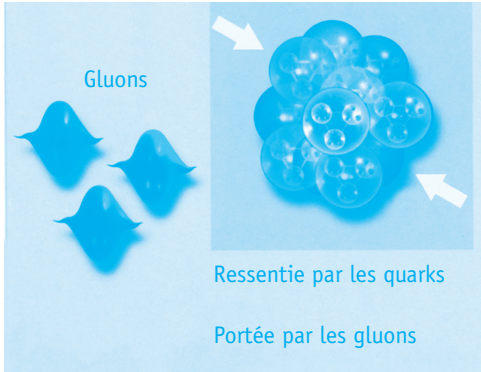
LEPTONS

Composants de la matière	Électron Un des composants de l'atome, avec le nucléon. 	Neutrino-Électron Particule sans charge électrique et avec une très petite masse. Des milliards de ces particules traversent votre corps à chaque seconde. 
	Muon Très proche de l'électron, mais plus lourd ; il a une durée de vie de 2 milliardièmes de secondes. 	Neutrino-Mu Créé en même temps que les muons quand certaines particules se désintègrent. 
	Tau Encore plus lourd ; il est légèrement instable. Il a été découvert en 1975. 	Neutrino-Tau Découvert en 2000. 

QUARKS

Composants de la matière	Up Sa charge électrique est $+ 2/3 e$; les protons en contiennent deux, les neutrons en contiennent un. 	Down Il a une charge électrique de $-1/3 e$; les protons en contiennent un, les neutrons en contiennent deux. 
	Charmé Un proche du « Up », mais plus lourd. Découvert en 1974. 	Étrange Un proche du « Down », mais plus lourd. 
	Top Encore plus lourd ; découvert en 1995. 	Beauté Encore plus lourd ; mesurer les quarks beauté est un test important de la théorie électro-faible. 

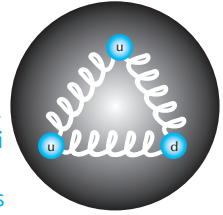
FORCE FORTE



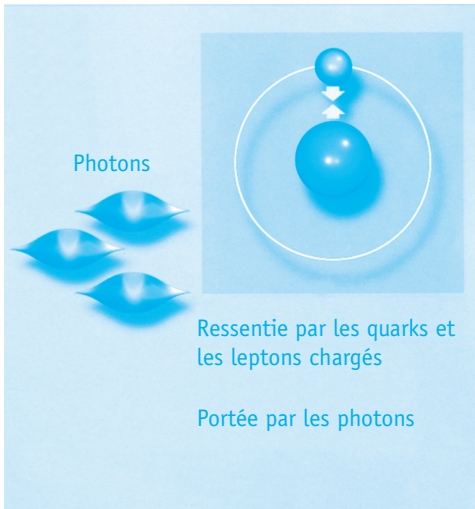
Phénomènes associés

La force forte lie entre eux les quarks, qui constituent ainsi des protons et des neutrons (et d'autres particules).

C'est aussi elle qui lie les protons et les neutrons dans le noyau, en surmontant l'énorme répulsion électrique qui s'exerce entre les protons.



FORCE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

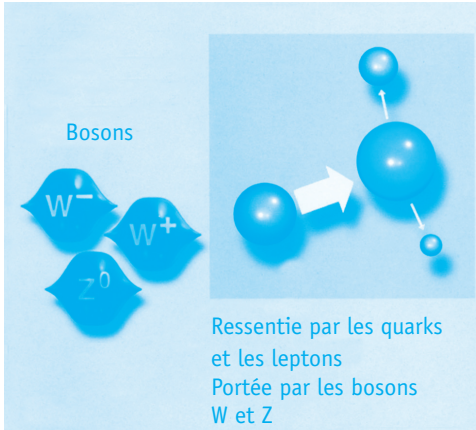


Phénomènes associés

La force électromagnétique lie les électrons au noyau, à l'intérieur de l'atome, permet aux atomes de former des molécules, et est à l'origine des propriétés des solides, des liquides et des gaz.

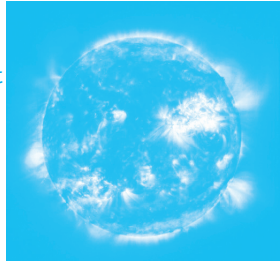


FORCE FAIBLE

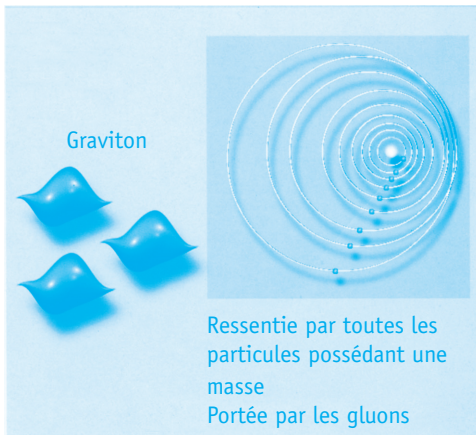


Phénomènes associés

La force faible est celle qui suscite la radioactivité naturelle, par exemple celle qu'on trouve dans la Terre. C'est aussi un facteur essentiel des réactions nucléaires dans les centres des étoiles telles que le Soleil, où l'hydrogène est converti en hélium.



FORCE GRAVITATIONELLE



Phénomènes associés

La gravité fait tomber les pommes des arbres. C'est une force d'attraction. À l'échelle astronomique, elle fait tenir la matière dans les planètes et les étoiles, et rassemble les étoiles pour former des galaxies.



Retour au Big Bang

La densité d'énergie et la température produites lors des collisions dans le LHC recréent des conditions similaires à celles qui existaient quelques instants après le Big Bang. Ainsi, les physiciens espèrent découvrir les secrets de l'évolution de l'Univers.

Évolution de l'Univers

13,7 milliards d'années

Aujourd'hui

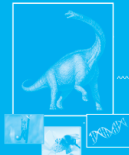


Aujourd'hui, au CERN, nous remontons le temps pour étudier les origines de la matière

-270°C

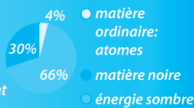
10 milliards d'années

Vie sur la Terre



Une soupe de molécules organiques apparaît sur la Terre, une petite planète bleue perdue dans l'immensité de l'Univers

Seule 4% de la matière de l'Univers est directement visible.



9,2 milliards d'années

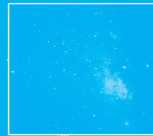
Système solaire



La gravité rassemble les débris d'étoiles pour constituer les planètes

200 millions d'années

Étoiles et galaxies



La gravité rassemble des nuages d'atomes pour constituer les étoiles

Les atomes lourds, éléments de base de la vie, sont synthétisés dans le cœur des étoiles

4000°C

380 000 ans

Atomes légers



Les électrons se lient aux noyaux atomiques pour former les atomes d'hydrogène et d'hélium

Les photons n'interagissent plus avec les électrons : l'Univers devient transparent et s'illumine



Atome d'hélium



Atome d'hydrogène

Domaine d'exploration du LHC
10⁻²⁵ secondes

3 minutes

Noyaux légers

Les protons et les neutrons se lient pour former les noyaux atomiques

Les photons sont continuellement absorbés et émis à nouveau : l'Univers est opaque

10¹²°C

0.01 milliseconde

Protons et neutrons

Les quarks et les gluons se lient pour former les protons et les neutrons

L'Univers a la taille du système solaire

10¹²°C

10⁻¹² secondes

Plasma quarks-gluons

force faible
force magnétique

L'Univers a un rayon de 300 million de km

10¹⁵°C

10⁻²⁰ secondes

10⁻³⁵ secondes

force forte
force électrofaible

L'Univers a la taille d'une pomme

10²⁷°C

10⁻⁴³ secondes

force électrofaible
gravitation
Superforce

Big Bang

L'Univers est un point infiniment petit

10³²°C

- 2 protons + 2 neutrons = noyau d'hélium
- 1 proton = noyau d'hydrogène

- Proton
- Neutron
- Méson
- Quark
- Électron
- Neutrino
- ☁ Photon
- W Force faible
- Z Force forte

10¹⁷°C

Le complexe d'accélérateurs du CERN

Ce complexe est formé d'une succession d'accélérateurs d'énergies toujours croissantes. Chacun injecte un faisceau dans la machine suivante, qui prend le relais pour porter ce faisceau à une énergie encore plus élevée, et ainsi de suite. Dans le LHC – le dernier élément de la chaîne – chaque faisceau de particules est accéléré jusqu'à l'énergie record de 7 TeV. De plus, la plupart des autres machines de la chaîne sont dotées de leur propre hall d'expérimentation, dans lequel les faisceaux sont utilisés pour des expériences réalisées à des énergies plus basses.

Voici la brève histoire d'un proton accéléré par le complexe d'accélérateurs du CERN :

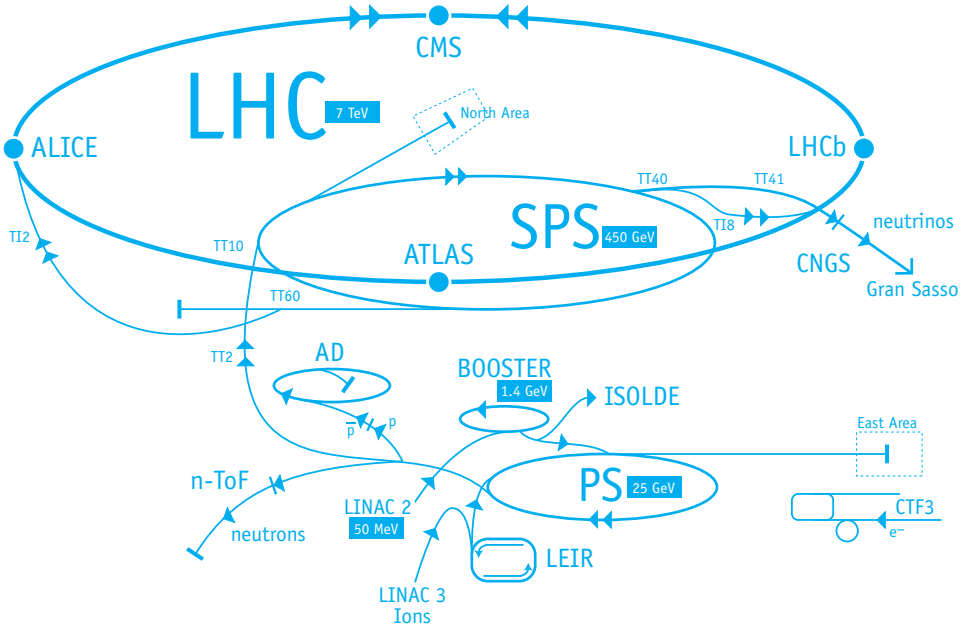
- ▶ *Des atomes d'hydrogène sont extraits d'une bouteille d'hydrogène ordinaire. On obtient des protons en arrachant à des atomes d'hydrogène leur électron en orbite.*
- ▶ *Les protons passent du Linac2 dans l'injecteur du Synchrotron à protons (PS Booster, PSB) à une énergie de 50 MeV.*

Le PSB les accélère à 1,4 GeV. Le faisceau est ensuite injecté dans le Synchrotron à protons (PS), où son énergie est portée à 25 GeV. Puis les protons sont envoyés dans le Supersynchrotron à protons (SPS), où ils sont accélérés à 450 GeV. Enfin, ils sont transférés dans le LHC (dans le sens des aiguilles d'une montre et inversement, avec un temps de remplissage de 4 min 20 s par anneau), où ils sont accélérés pendant 20 minutes pour être portés à l'énergie nominale de 7 TeV. En conditions d'exploitation normales, les faisceaux circulent pendant plusieurs heures dans les tubes du LHC.

Les protons arrivent dans le LHC sous forme de paquets, qui sont préparés dans les machines plus petites. Pour un schéma détaillé du remplissage, des champs magnétiques et des courants de particules dans la chaîne d'accélérateurs, voir les annexes 1 et 2.

Le complexe d'accélérateurs accélère, non seulement les protons, mais aussi les ions plomb.

Les ions plomb sont produits à partir d'un échantillon de plomb d'une extrême pureté chauffé à une température d'environ 500°C. Les ions ainsi produits portent des charges très variables, avec un maximum aux environs de Pb^{29+} . Ces ions sont sélectionnés puis accélérés à une énergie de 4,2 MeV/u (énergie par nucléon), avant de passer au travers d'une feuille de carbone qui les « épiluche » et les transforme pour la plupart en Pb^{54+} . Une fois accumulés, les ions Pb^{54+} sont accélérés à 72 MeV/u dans le LEIR (Anneau d'ions de basse énergie), puis transférés dans le PS. Celui-ci accélère le faisceau pour le porter à 5,9 GeV/u et l'envoie dans le SPS, après lui avoir fait traverser une seconde feuille qui l'« épiluche » totalement, produisant des Pb^{82+} . Le SPS porte le faisceau à 177 GeV/u, puis l'injecte dans le LHC, qui l'accélère à 2,76 TeV/u.





Généralités sur le LHC

faq

Que signifie « LHC »?

LHC signifie Grand collisionneur de hadrons (Large Hadron Collider) : grand en raison de ses dimensions (environ 27 km de circonférence), collisionneur parce qu'il permet à deux faisceaux de particules se déplaçant en sens opposé d'entrer en collision en quatre points de la circonférence de la machine, et de hadrons parce qu'il accélère des protons ou des ions, c'est-à-dire des hadrons.

Les hadrons (du grec « adros », qui signifie « épais ») sont des particules composées de quarks. Les protons et les neutrons, qui constituent les noyaux des atomes, appartiennent à cette famille. À l'inverse, les leptons sont des particules qui ne sont pas formées de quarks. Les électrons et les muons, par exemple, sont des leptons (du grec « leptos », qui signifie « mince »).

Quand a-t-il été conçu ?

Au début des années 80, au moment de la conception et de la construction du Grand collisionneur électron-positon (LEP), des équipes du CERN envisageaient déjà l'avenir à plus long terme. Après de longues années de travail sur les aspects techniques et les contraintes physiques d'une telle machine, leur rêve est devenu réalité. En décembre 1994, l'organe de tutelle du CERN, le Conseil, a approuvé la construction du LHC. Le feu vert a été donné à condition que le nouvel accélérateur soit construit à budget constant et que toute contribution d'un État non-membre soit utilisée pour mener le projet à bien plus rapidement et optimiser la machine. Au départ, en raison des contraintes budgétaires, le LHC devait être réalisé en deux étapes. Cependant, grâce à des contributions du Japon, des États-Unis, de l'Inde et d'autres États non-membres, le Conseil a accepté en 1995 que le projet soit mené à bien en une seule étape. Entre 1996 et 1998, quatre expériences – ALICE, ATLAS, CMS et LHCb – ont été officiellement approuvées et les travaux de construction ont débuté sur quatre sites. Depuis, deux expériences plus petites sont venues s'ajouter au projet : TOTEM, installée à côté de CMS, et LHCf, près d'ATLAS (voir « Expériences », page 37).

Pour en savoir plus sur les dates clés du LHC, voir le site Web : <http://www.cern.ch/LHC-Milestones/>

Combien ça coûte ?

La machine coûte quelque 4,6 milliards de CHF (environ 3 milliards d'euros). Le coût du projet dans son ensemble est réparti approximativement comme suit :

Coûts de construction (en milliards de CHF)	Personnel	Matériel	Total
Machine et zones LHC	0,92	3,68	4,60^{*)}
Détecteurs (part CERN)	0,78	0,31	1,09
Amélioration injecteur LHC	0,09	0,07	0,16
Informatique du LHC (part CERN)	0,09	0,09	0,18
Total	1,88	4,15	6,03

^{*)} (including 0.430 de contributions en nature)

Les collaborations pour les expériences sont des structures distinctes dont le financement est indépendant de celui du CERN. Celui-ci est toutefois membre de toutes les expériences et contribue à leur budget à hauteur de 20 % pour CMS et LHCb, de 16 % pour ALICE et de 14 % pour ATLAS. TOTEM est une expérience beaucoup plus petite, le coût total du matériel se situant aux environs de 6,5 millions de CHF. Pour ce projet, la participation du CERN s'élève à 30 %.

Pourquoi « grand » ?

L'énergie maximale que peut atteindre un accélérateur est liée à la taille de ce dernier. Dans le cas d'un collisionneur ou d'un anneau de stockage, cette énergie dépend du rayon de la machine et de l'intensité du champ magnétique des dipôles qui maintiennent les particules sur leur orbite. Le LHC réutilise le tunnel de 27 km de circonférence construit pour le LEP, le grand accélérateur précédent. Le LHC emploie certains des dipôles et des cavités radiofréquence les plus puissants du monde. La taille du tunnel, les aimants, les cavités et d'autres éléments fondamentaux de la machine sont autant de contraintes qui déterminent l'énergie nominale de 7 TeV par faisceau de protons.

Pourquoi « collisionneur » ?

Un collisionneur (c'est-à-dire une machine dans laquelle des faisceaux circulant en sens opposés entrent en collision) présente un avantage considérable par rapport à d'autres types d'accélérateurs, dans lesquels un faisceau entre en collision avec une cible fixe. En effet, lorsque deux faisceaux entrent en collision, l'énergie dégagée correspond à la somme des énergies des deux faisceaux. Un faisceau porteur de la même énergie heurtant une cible fixe produit une collision d'énergie bien inférieure.

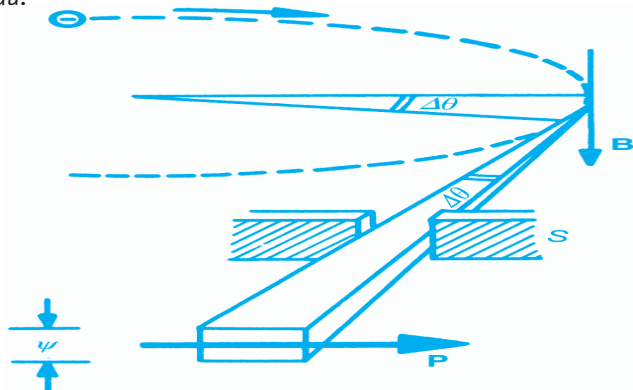
Dans les deux cas, l'énergie disponible (par exemple, pour fabriquer de nouvelles particules) est l'énergie dans le centre de masse. Dans le premier cas, il s'agit simplement de la somme des énergies des deux particules entrant en collision ($E = E_{\text{faisceau1}} + E_{\text{faisceau2}}$), alors que dans le second cas, l'énergie produite est proportionnelle à la racine carrée de l'énergie de la particule heurtant la cible ($E \propto \sqrt{E_{\text{faisceau}}}$).

Pourquoi « de hadrons » ?

Le LHC va accélérer deux faisceaux de particules du même type, composés soit de protons, soit d'ions plomb, c'est-à-dire dans les deux cas de hadrons. Un accélérateur ne peut agir que sur certains types de particules : en premier lieu, celles-ci doivent porter une charge (les faisceaux étant dirigés par des dispositifs électromagnétiques qui n'ont d'influence que sur des particules chargées) ; en second lieu, sauf cas particulier, elles ne doivent pas se désintégrer. Ainsi, le nombre de particules pouvant effectivement être accélérées se limite aux électrons, aux protons et aux ions, ainsi qu'à leurs antiparticules.

Dans un accélérateur circulaire tel que le LHC, les particules lourdes, comme les protons (dont la masse est environ 2000 fois supérieure à celle de l'électron), subissent à chaque tour moins de pertes d'énergie par rayonnement synchrotron que les particules légères, comme les électrons. C'est pourquoi, pour obtenir des collisions produisant les énergies les plus élevées dans les accélérateurs circulaires, il est plus efficace d'accélérer des particules lourdes.

On appelle « rayonnement synchrotron » le rayonnement produit lorsque des particules chargées sont accélérées dans des trajectoires courbes ou orbites. Ce type de rayonnement représente une perte d'énergie pour les particules, ce qui contraint l'accélérateur à fournir plus d'énergie pour maintenir constante celle du faisceau.



Pourquoi le LHC est-il construit sous terre ?

Le LHC réutilise le tunnel construit pour le LEP, le grand accélérateur précédent du CERN, démantelé en 2000. Ce tunnel souterrain est apparu comme la meilleure solution pour abriter une machine de 27 km de circonférence. En effet, creuser un tunnel coûte moins cher que d'acquérir du terrain pour bâtir en surface, et l'impact sur le paysage est ainsi réduit au minimum. De plus, l'écorce terrestre fournit une protection efficace contre les rayonnements.

Pour des raisons géologiques, le LHC a été construit légèrement en pente (1,4 %) à une profondeur moyenne de 100 m (d'où une incidence sur les coûts). Sa profondeur varie entre 175 m (sous le Jura) et 50 m (côté lac Léman).

Si le tunnel est en pente, c'est pour des raisons financières. En effet, à l'époque où le tunnel fut construit pour abriter le LEP, creuser des puits verticaux coûtait très cher. La longueur sous le Jura a donc été réduite. D'autres contraintes ont joué un rôle dans le tracé du tunnel :

- ▶ *le tunnel devait se trouver au moins 5 m en-dessous du sommet de la couche de molasse ;*
- ▶ *il devait passer à proximité du tunnel pilote construit pour tester des techniques d'excavation ;*
- ▶ *il devait être relié au SPS, ce qui signifie qu'il ne restait plus qu'un degré de liberté : l'inclinaison. L'angle résulte de la réduction de la profondeur des puits.*

Quelle est l'énergie de collision dans le LHC et pourquoi est-elle exceptionnelle ?

Chaque faisceau de protons circulant dans le LHC a une énergie de 7 TeV. Par conséquent, lorsque deux protons se rencontrent, l'énergie de collision est de 14 TeV. Les ions plomb comportent un grand nombre de protons qui fournissent ensemble une énergie encore plus importante. Ainsi, les faisceaux d'ions plomb ont une énergie de collision de 1150 TeV. Aucune de ces énergies n'a encore été atteinte en laboratoire.

Dans les collisions de particules, c'est la concentration d'énergie qui est exceptionnelle. Lorsque vous frappez dans vos mains, vous provoquez une « collision » d'une énergie sans doute plus élevée que celle des protons dans le LHC, mais beaucoup moins concentrée. Faites le même mouvement avec une aiguille placée perpendiculairement entre vos mains. L'effet sera certainement beaucoup plus sensible !

Ces énergies ne sont pas impressionnantes si on les compare à celles auxquelles nous avons affaire au quotidien. En fait, 1 TeV correspond plus ou moins à l'énergie cinétique d'un moustique en vol. Ce qui est exceptionnel dans le LHC, c'est qu'il concentre l'énergie dans un espace environ mille milliards de fois plus petit qu'un moustique.

Quels sont les objectifs principaux du LHC ?

À l'heure actuelle, notre compréhension de l'Univers reste incomplète. Le modèle standard des particules et des forces (voir page 6) résume nos connaissances en matière de physique des particules. Le modèle standard a été mis à l'épreuve lors de diverses expériences et il s'est révélé particulièrement efficace pour prédire l'existence de particules auparavant inconnues. Cependant, il laisse sans réponse de nombreuses questions, auxquelles le LHC pourra apporter des éléments d'explication.

- ▶ Le modèle standard n'explique pas l'origine de la masse, ni pourquoi certaines particules sont très lourdes alors que d'autres ne possèdent aucune masse. La réponse se trouve peut-être dans le mécanisme de Higgs. Selon cette théorie, l'espace est entièrement rempli d'un « champ de Higgs » et les particules acquièrent leur masse par interaction avec ce champ. Les particules qui interagissent fortement avec le champ de Higgs sont lourdes, celles qui interagissent faiblement sont légères. Au moins une particule est associée au champ de Higgs : le boson de Higgs. Si une telle particule existe, les expériences du LHC devraient la détecter.
- ▶ Le modèle standard n'offre pas de description unifiée de l'ensemble des forces fondamentales, car il est difficile d'élaborer une théorie de la gravité similaire aux théories des autres forces. La supersymétrie pourrait faciliter l'unification des forces fondamentales. Cette théorie avance l'hypothèse qu'il existe pour chaque particule connue un partenaire plus massif. Si la théorie est juste, les particules supersymétriques les plus légères devraient être découvertes dans le LHC.

- ▶ Les différentes observations cosmologiques et astrophysiques ont montré que l'ensemble de la matière visible ne constitue que 4 % de l'Univers. La chasse aux particules ou aux phénomènes responsables de la matière noire (23 %) et de l'énergie sombre (73 %) est ouverte. Une théorie très en vogue postule que la matière noire est constituée de particules neutres supersymétriques, qui sont encore à découvrir.

*Le premier indice de l'existence de la **matière noire** est venu au jour en 1933, lorsque des observations astronomiques et des calculs d'effets gravitationnels ont révélé qu'il devait y avoir plus de « choses » dans l'Univers que celles que nous pouvions voir. Aujourd'hui, les scientifiques estiment que l'effet gravitationnel de la matière noire fait tourner les galaxies plus vite que ne le prévoit le calcul de leur masse apparente, et que son champ gravitationnel dévie la lumière des objets qui sont derrière. Les mesures de ces effets montrent l'existence de la matière noire, et peuvent être utilisées pour estimer sa densité, même si nous ne pouvons pas l'observer directement.*

L'énergie sombre est une forme d'énergie qui semble associée au vide de l'espace, et constitue environ 70 % de l'Univers. Elle est distribuée de façon homogène à travers l'espace et le temps. En d'autres termes, son effet n'est pas « dilué » à mesure que l'Univers s'étend. Cette répartition égale signifie que l'énergie sombre n'a pas d'effet gravitationnel local, mais plutôt un effet global sur l'Univers entier. Il en résulte une force répulsive qui tend à accélérer l'expansion de l'Univers. Le taux d'expansion et son accélération peuvent être mesurés par des expériences qui utilisent la loi de Hubble. Ces mesures, complétées d'autres données scientifiques, confirment l'existence de l'énergie sombre et ont été utilisées pour estimer sa quantité.

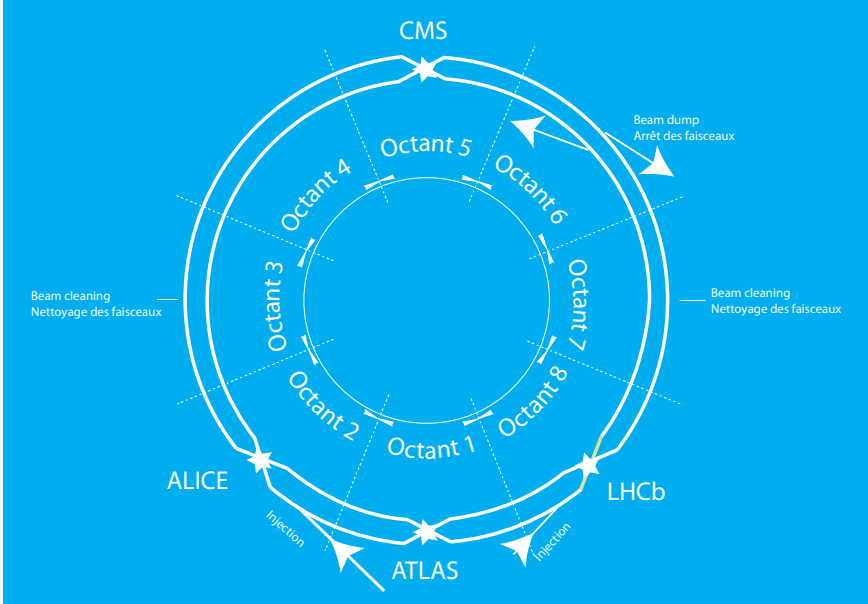
- ▶ Le LHC contribuera également à élucider le mystère de l'antimatière. Lors du Big Bang, matière et antimatière ont vraisemblablement été produites en quantités égales, mais d'après ce que nous avons pu observer jusqu'à présent, notre Univers n'est constitué que de matière. Pourquoi ? Le LHC pourrait apporter la réponse à cette question.

On croyait auparavant que l'antimatière était le « reflet » parfait de la matière, c'est-à-dire qu'en remplaçant la matière par l'antimatière et en observant le résultat comme à travers un miroir, il serait impossible de faire la différence. Nous savons maintenant que le reflet est imparfait, ce qui a pu entraîner le déséquilibre entre matière et antimatière dans notre Univers.

Les principaux indices permettant d'expliquer la quantité limitée d'antimatière dans notre Univers proviennent de l'analyse des rayons gamma cosmiques diffus et des défauts d'homogénéité du fond cosmologique diffus. Si l'Univers, après le Big Bang, s'était divisé en domaines où domine soit la matière, soit l'antimatière, des annihilations devraient se produire aux frontières entre ces domaines, créant des rayons gamma cosmiques. Dans cette hypothèse, en combinant la section efficace des annihilations, la distance et les décalages spectraux cosmologiques, on parvient à prédire la quantité de rayonnement gamma diffus qui devrait atteindre la Terre. Le paramètre libre est la taille des domaines de matière et d'antimatière. La comparaison avec le flux de rayons gamma observé conduit à exclure l'éventualité d'un domaine de taille inférieure à 3,7 milliards d'années-lumière, ce qui correspond presque à l'Univers tout entier ! Un autre facteur limitant provient de l'analyse des défauts d'homogénéité dans le fond cosmologique diffus : des domaines d'antimatière, quelle que soit leur taille, provoqueraient un réchauffement aux frontières, ce qui se traduirait par des fluctuations de densité dans le fond cosmologique diffus. La valeur observée d'environ 10^{-5} introduit de sérieuses limites à la quantité d'antimatière présente dans l'Univers primordial.

- ▶ En plus des collisions proton-proton, les collisions d'ions lourds dans le LHC permettront d'étudier l'état de la matière qui aurait existé dans les premiers instants de l'Univers, que l'on appelle « plasma quark-gluon ». Lorsque des ions lourds entrent en collision à des énergies élevées, ils forment pendant un instant une « boule de feu » constituée de matière chaude et dense qui peut être étudiée par les expériences.

Selon les théories actuelles, l'Univers, créé par le Big Bang, a connu une phase durant laquelle la matière existante formait une sorte de soupe extrêmement chaude et dense, le plasma quark-gluon, composée des constituants élémentaires de la matière. Lorsque l'Univers s'est refroidi, les quarks ont été emprisonnés sous forme de particules composites telles que les protons et les neutrons. Ce phénomène est connu sous le nom de confinement des quarks. Le LHC est capable de recréer le plasma quark-gluon en accélérant et en faisant entrer en collision deux faisceaux d'ions lourds. Lors de ces collisions, la température est plus de 100 000 fois supérieure à celle du centre du Soleil. Dans ces conditions, les quarks sont à nouveau libérés et les détecteurs peuvent alors observer et étudier la « soupe primordiale », explorant ainsi les propriétés fondamentales des particules et la manière dont elles s'agglomèrent pour former la matière ordinaire.



Qu'appelle-t-on secteurs et octants dans la machine ?

Le LHC n'est pas un cercle parfait. Il est constitué de huit arcs et de huit « insertions ». Les arcs contiennent les aimants de courbure dipolaires, à raison de 154 aimants par arc. Une insertion comprend une section droite longue et deux régions de transition (une à chaque extrémité), les « supprimeurs de dispersion ». La disposition exacte de la section droite dépend de l'utilisation particulière de l'insertion : expérience de physique (collisions de faisceaux), injection, absorption des faisceaux, nettoyage des faisceaux.

Par secteur, on entend la partie de la machine située entre deux points d'insertion. Les huit secteurs forment les unités opérationnelles du LHC : les aimants sont installés secteur par secteur, le matériel est mis en service secteur par secteur et tous les dipôles d'un secteur sont raccordés en série et sont situés dans le même cryostat continu. L'alimentation de chaque secteur est en principe indépendante.

L'octant part du milieu d'un arc et se termine au milieu de l'arc suivant ; il englobe donc une insertion complète. Par conséquent, la description par octant est plus parlante si l'on s'intéresse à l'utilisation des aimants qui dirigent les faisceaux vers les points de collision ou dans les sections d'injection, d'absorption et de nettoyage.

Quels sont les paramètres importants pour un accélérateur?

Les accélérateurs sont construits dans le but d'étudier des phénomènes, souvent rares, dont la probabilité varie avec l'énergie de collision. C'est pourquoi les paramètres les plus importants pour les physiciens sont l'énergie du faisceau et le nombre de collisions intéressantes. Dans un collisionneur tel que le LHC, la probabilité d'un phénomène varie avec ce qu'on appelle la luminosité, grandeur qui dépend du nombre de paquets dans le faisceau, du nombre de particules par paquet, de la fréquence des révolutions autour de l'anneau, et de la section efficace du faisceau. En résumé, il faut concentrer le maximum de particules dans l'espace le plus réduit possible autour de la région d'interaction.

Quels sont les éléments principaux d'un accélérateur?

Dans un accélérateur, les particules circulent dans un tube à vide et sont dirigées par des dispositifs électromagnétiques : les aimants dipolaires maintiennent les particules dans leur orbite quasi-circulaire, alors que les aimants quadripolaires concentrent le faisceau. Les cavités accélératrices, elles, sont des résonateurs électromagnétiques qui accélèrent les particules et les maintiennent ensuite à énergie constante en compensant l'énergie perdue à chaque tour.

Le vide: Le LHC a la particularité d'avoir, non pas un, mais trois systèmes de vide.

- vide isolant pour les cryoaimants
- vide isolant pour la ligne de distribution d'hélium
- vide pour les faisceaux

La pression dans l'enceinte à vide des faisceaux est de 10^{-13} atm (ultravide), afin d'éviter des collisions avec les molécules de gaz. Le plus grand volume de vide dans le LHC est le vide isolant pour les cryoaimants ($\sim 9000 \text{ m}^3$, soit le volume de la nef d'une cathédrale!)

Les aimants: le LHC contient une grande variété d'aimants, dont des dipôles, des quadripôles, des sextupôles, des octupôles et des décapôles, soit au total environ 9600 aimants. Chaque type d'aimant contribue à l'optimisation de la trajectoire des particules. La plupart des aimants de correction sont intégrés dans la masse froide des dipôles et des quadripôles principaux. Les aimants du LHC sont soit à double ouverture (par exemple, les dipôles principaux), soit à simple ouverture (par exemple, certains des quadripôles d'insertion). Les quadripôles d'insertion sont des aimants spéciaux utilisés pour concentrer le faisceau sur la surface la plus petite possible aux points de collision, ce qui multiplie les probabilités que deux protons se percutent de plein fouet. Les plus grands aimants sont les dipôles ; le LHC en compte 1232.

Les cavités: la fonction principale des cavités du LHC est de maintenir bien groupés les 2808 paquets de protons, afin d'assurer une forte luminosité aux points de collision et d'augmenter ainsi au maximum le nombre de collisions. Leur champ électrique fournit également au faisceau de l'énergie radiofréquence (RF) durant l'accélération à l'énergie maximale. Les cavités du LHC sont supraconductrices: elles contiennent de grandes quantités d'énergie tout en limitant les pertes. Le LHC utilise huit cavités par faisceau, fournissant chacune une tension de 2 MV (un champ accélérateur de 5 MV/m) à 400 MHz. Elles fonctionnent à 4,5 K, ou $-268,7^\circ\text{C}$ (les aimants du LHC sont refroidis par de l'hélium superfluide à 1,9 K, ou $-271,3^\circ\text{C}$). Pour les besoins du LHC, les cavités sont groupées par quatre dans des cryomodules, avec deux cryomodules par faisceau, et installées dans une section droite longue de la machine, où la distance transversale entre les faisceaux est portée de 195 mm (distance normale) à 420 mm.

Le tableau ci-dessous présente les chiffres à retenir concernant le LHC.

Caractéristique	Valeur
Circonférence	26 659 m
Température d'exploitation des dipôles	1,9 K (-271.3°C)
Nombre d'aimants	9593
Nombre de dipôles principaux	1232
Nombre de quadripôles principaux	392
Nombre de cavités radiofréquence	8 par faisceau
Énergie nominale, mode protons	7 TeV
Énergie nominale, mode ions	2,76 TeV/u (*)
Champ magnétique dipolaire maximal	8.33 T
Distance min. entre les paquets	~7 m
Luminosité nominale	$10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Nombre de paquets par faisceau de protons	2808
Protons par paquet (au départ)	$1,1 \times 10^{11}$
Nombre de tours par seconde	11 245
Nombre de collisions par seconde	600 millions

(*) Énergie par nucléon

L'énergie

du faisceau du LHC sera-t-elle influencée par la Lune, comme c'était le cas pour l'accélérateur LEP ?

La Lune a à peu près la même influence sur l'énergie du faisceau au LHC que dans le LEP. L'énergie de collision absolue n'est pas aussi critique pour les expériences du LHC qu'elle l'était pour le LEP, mais il faut tenir compte des variations dues aux marées terrestres lors de l'injection des faisceaux dans le collisionneur.

Le phénomène des marées, dû à l'influence de la Lune (et, dans une moindre mesure, du Soleil) sur les océans, est bien connu. Il provoque une hausse puis une baisse du niveau de l'eau en bord de mer par cycles d'environ 12 heures. Le sol subit également l'effet de l'attraction lunaire car les roches qui le composent sont élastiques. Ainsi, lors de la nouvelle lune ou de la pleine lune, l'écorce terrestre se soulève de quelque 25 cm dans la région genevoise sous l'effet de ces « marées terrestres ». Ce mouvement entraîne une variation de 1 mm de la circonférence du LHC (pour une circonférence totale de 26,6 km), provoquant ainsi des changements dans l'énergie du faisceau. C'est pourquoi les physiciens doivent tenir compte dans leurs mesures de l'influence de la Lune.

Quelles sont les particularités des aimants dipôles?

Les aimants dipôles ont représenté le défi technologique le plus important dans la conception du LHC. Dans un accélérateur de protons comme le LHC, pour une circonférence d'accélération donnée, l'énergie maximale pouvant être atteinte est directement proportionnelle à l'intensité du champ des aimants dipôles. Les aimants dipôles du LHC sont supraconducteurs et peuvent fournir un champ magnétique très élevé – 8,3 tesla – sur toute leur longueur. Il n'aurait pas été possible d'utiliser des aimants résistifs à température ambiante.

Les dipôles du LHC utilisent des câbles en niobium-titane (NbTi), qui deviennent supraconducteurs à une température inférieure à 10 K (-263,2°C), ce qui signifie qu'ils n'offrent plus aucune résistance au passage du courant électrique. En fait, le LHC fonctionne à une température encore plus basse, 1,9 K (-271,3°C), température inférieure à celle de l'espace intersidéral (2,7 K, -270,5°C). Un courant de 11 700 ampères circulant dans les dipôles génère un champ magnétique élevé, 8,3 T, nécessaire pour incurver les faisceaux de 7 TeV dans l'anneau de 27 km du LHC. Si les aimants étaient utilisés à une température de 4,5 K (-268,7°C), ils ne produiraient qu'un

champ magnétique de 6,8 T. À titre de comparaison, pour une maison familiale moyenne, le courant total maximal est d'environ 100 A. On atteint la température de 1,9 K (-271,3°C) en injectant de l'hélium superfluide dans les systèmes magnétiques. Chaque dipôle mesure 15 m de long et pèse environ 35 t.

Les bobines magnétiques du LHC sont formées d'un câble enroulé qui comprend jusqu'à 36 brins torsadés de 15 mm de diamètre, eux-mêmes composés d'un maximum de 6400 filaments individuels de 7 micromètres d'épaisseur seulement (à titre de comparaison, un cheveu humain mesure environ 50 micromètres de diamètre). Avec ses 27 km de circonférence, le LHC nécessite 7600 km de câble, ce qui correspond à 270 000 km de brin – une longueur suffisante pour encercler six fois la Terre à l'Équateur. Si on déroulait tous les filaments constituant les bobines, leur longueur correspondrait à cinq allers retours entre la Terre et le Soleil, plus quelques trajets jusqu'à la Lune (voir à la page 55).

Quelles sont les spécificités du système cryogénique ?

Le LHC est le plus grand système cryogénique du monde et l'un des endroits les plus froids de la Terre. En effet, une température extrêmement basse est requise pour exploiter les aimants qui maintiennent les protons sur leur trajectoire (voir le paragraphe : « Quelles sont les particularités des aimants dipôles ? ») Afin de maintenir son anneau de 27 km (4700 tonnes de matériel dans chacun des huit secteurs) à la température de l'hélium superfluide (1,9 K, soit -271,3°C), le système cryogénique du LHC doit fournir une capacité totale de réfrigération sans précédent : environ 150 kW pour les réfrigérateurs à 4,5 K et 20 kW pour ceux à 1,9 K. Le système de réfrigération est conçu sur la base de cinq «îlots cryogéniques». Chaque «îlot» doit véhiculer le fluide de refroidissement et transporter des kilowatts de puissance réfrigérante sur une longue distance. L'ensemble du processus de refroidissement dure quelques semaines.

Le processus de réfrigération se déroule en trois phases :

- 1) refroidissement à 4,5 K (-268,7°C)
- 2) remplissage des masses froides des aimants avec de l'hélium liquide
- 3) refroidissement final à 1,9 K (-271,3°C).

La première phase se déroule en deux étapes : tout d'abord, l'hélium est refroidi à 80 K dans les échangeurs de chaleur des réfrigérateurs, une opération nécessitant environ 10 000 tonnes d'azote liquide. Ensuite, les turbines des réfrigérateurs abaissent la température de l'hélium à 4,5 K (-268,7°C), le préparant ainsi à l'injection dans les masses froides des aimants. Une fois les aimants remplis, les unités de réfrigération à 1,8 K abaissent la température à 1,9 K (-271,3°C). Au total, ce sont à peu près 120 t d'hélium qui sont nécessaires, dont environ 90 employées dans les aimants et le reste dans les tuyaux et les unités de réfrigération.

Pour éviter tout risque d'asphyxie dans le tunnel souterrain, l'azote liquide n'est jamais injecté directement dans le LHC.

Pourquoi de l'hélium superfluide ?

Le choix de la température de fonctionnement du LHC est autant lié aux « superpropriétés » de l'hélium qu'à celles de l'alliage supraconducteur de niobium-titane dans les bobines des aimants. À la pression atmosphérique, l'hélium gazeux se liquéfie à environ 4,2 K (-269,0°C), mais si on le refroidit davantage, il subit un deuxième changement de phase autour de 2,17 K (-271,0°C) et passe à l'état superfluide. L'hélium superfluide possède de nombreuses propriétés remarquables, notamment une conductivité thermique très élevée qui en fait un réfrigérant de choix pour refroidir et stabiliser de grands systèmes supraconducteurs (voir également le paragraphe : « Quelles sont les spécificités du système cryogénique ? »).

En tout, le système cryogénique nécessite 40 000 joints de tuyauterie étanches. Le LHC consomme 120 tonnes d'hélium pour maintenir ses aimants à leur température de fonctionnement (1,9 K) : 60% pour les masses froides des aimants et les 40% restants pour le système de distribution et les réfrigérateurs. En période d'exploitation courante, la majeure partie de l'hélium circule dans des boucles de réfrigération fermées. Néanmoins, chaque année, un certain pourcentage du stock pourrait être perdu en raison d'arrêts des infrastructures, de fuites dans l'atmosphère, du conditionnement des installations ou de problèmes techniques.

Pourquoi parle-t-on de paquets ?

Les protons injectés dans le LHC circulent sous forme de paquets à la structure bien définie. La structure des paquets d'un accélérateur moderne est directement liée au schéma d'accélération radiofréquence (RF). Les protons ne peuvent être accélérés que si le champ RF est orienté correctement lorsque les particules traversent une cavité accélératrice, ce qui n'arrive qu'à des moments bien définis pendant un cycle RF.

Dans le LHC, en conditions de fonctionnement nominales, chaque faisceau de protons contient 2808 paquets, chacun étant composé d'environ 10^{11} protons.

La taille d'un paquet n'est pas constante le long de l'anneau. En effet, chaque paquet qui circule dans le LHC est tour à tour comprimé et dilaté. Il est comprimé autant que possible aux points d'interaction afin d'augmenter les chances de collision. Les paquets de particules mesurent quelques centimètres de long et un millimètre de large lorsqu'ils sont loin d'un point de collision. Toutefois, lorsqu'ils s'en approchent, ils sont comprimés jusqu'à ne mesurer qu'environ 16 μm (un cheveu humain a une épaisseur d'environ 50 μm) pour augmenter la probabilité de collisions proton-proton.

Augmenter le nombre de paquets est l'un des moyens d'augmenter la luminosité dans un accélérateur. Dans le LHC, on a opté pour un espacement entre paquets de 25 ns (soit environ 7 m), ce qui implique de nombreuses contraintes techniques. (Le prédécesseur du LHC, le LEP, ne faisait circuler que quatre paquets.)

L'espacement de 25 ns entre les paquets correspond à une fréquence de 40 MHz, ce qui signifie que les paquets devraient traverser chacun des points de collision 40 millions de fois par seconde. Cependant, pour des raisons pratiques, il y a plusieurs intervalles plus grands dans la disposition des paquets, entre autres pour laisser le temps aux aimants de déflection rapide d'entrer en action pour injecter ou absorber le faisceau. Le taux de croisement moyen est égal au nombre total de paquets multiplié par le nombre de tours par seconde dans le LHC: $2808 \times 11245 = 31.6$ MHz.

Combien y a-t-il de collisions par seconde dans le LHC ?

Chaque faisceau de protons est composé de près de 3000 paquets de particules, chacun d'eux contenant 100 milliards de particules. Les particules sont si petites que la probabilité d'une collision est infime. Au moment où les paquets se croisent, il ne se produit qu'une vingtaine de collisions parmi les 200 milliards de particules. Cela dit, les paquets se croisent à la cadence d'environ 30 millions de fois par seconde (voir le paragraphe précédent) ; ainsi, le LHC génère jusqu'à 600 millions de collisions par seconde.

Quelle est la durée de vie du faisceau dans l'accélérateur ?

Un faisceau peut circuler pendant 10 heures, parcourant plus de 10 milliards de kilomètres, soit deux fois la distance Terre-Neptune. À une vitesse proche de celle de la lumière, un proton accomplit 11 245 tours par seconde dans le LHC.



Comment « voir » les particules?

Pour chaque collision, l'objectif du physicien est de compter, de suivre et de caractériser toutes les différentes particules produites, de manière à reconstituer l'ensemble du processus. La trace laissée par la particule fournit de nombreuses informations utiles, surtout si le détecteur est placé dans un champ magnétique : la charge de la particule, par exemple, est clairement détectable, puisque les particules à charge électrique positive sont déviées dans un certain sens et celles à charge négative dans le sens opposé. De même, il est possible de déterminer l'impulsion de la particule (la « quantité de mouvement » égale au produit de la masse par la vitesse) : les particules à impulsion élevée se propagent en ligne presque droite, tandis que les particules à faible impulsion décrivent des spirales serrées.

	Trajectographe électromagnétique	Calorimètre électromagnétique	Calorimètre hadronique	Détecteur de muons
Photons				
Électrons ou positons				
Muons				
Pions ou protons				
Neutrons				

Quels sont les détecteurs du LHC ?

Il y a six expériences installées dans le LHC : ALICE (A Large Ion Collider Experiment), ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS), CMS (Compact Muon Solenoid), LHCb (Large Hadron Collider beauty experiment), LHCf (Large Hadron Collider forward experiment) et TOTEM (TOTal Cross Section, Elastic Scattering and Diffraction Dissociation at the LHC). Les expériences ALICE, ATLAS, CMS et LHCb sont installées à l'intérieur de quatre énormes cavernes souterraines construites autour des quatre points de collision des faisceaux du LHC. L'expérience TOTEM est placée près du point d'interaction de CMS, tandis que LHCf se trouve près d'ATLAS.

ALICE, c'est quoi ?

ALICE est un détecteur spécialisé dans l'analyse des collisions d'ions plomb. Il étudie les propriétés du plasma de quarks et de gluons, un état de la matière dans lequel les quarks et les gluons, dans des conditions de température et de densité très élevées, ne sont plus confinés dans les hadrons. Un tel état de la matière a probablement existé immédiatement après le Big Bang, juste avant la formation de particules telles que les protons et les neutrons. La collaboration internationale ALICE comprend plus de 1500 membres provenant de 104 instituts dans 31 pays (données de juillet 2007).

Taille	26 m de long, 16 m de large, 16 m de haut
Poids	10 000 tonnes
Conception	tonneau central et un spectromètre à muons à un seul bras
Coût du matériel	115 MCHF
Situation	St Genis-Pouilly (France)

Pour en savoir plus, voir le site Web: <http://aliceinfo.cern.ch/Public/>

ATLAS, c'est quoi?

ATLAS est un détecteur polyvalent conçu pour couvrir les aspects les plus divers de la physique au LHC, de la recherche du boson de Higgs à celle de la supersymétrie (SUSY) en passant par la quête de dimensions supplémentaires. Le détecteur ATLAS est principalement caractérisé par son énorme système magnétique toroïdal. Celui-ci est composé de huit bobines magnétiques supraconductrices de 25 mètres de long disposées en cylindre autour du tube de faisceau. ATLAS est le plus grand détecteur jamais construit pour un collisionneur. Sa collaboration compte plus de 1900 membres provenant de 164 instituts dans 35 pays (données d'avril 2007).

Taille	46 m de long, 25 m de large, 25 m de haut
Poids	7000 tonnes
Conception	tonneau fermé par deux bouchons
Coût du matériel	540 MCHF
Situation	Meyrin (Suisse)

Pour en savoir plus, voir le site Web: <http://atlas.ch/>

CMS, c'est quoi?

CMS est un détecteur polyvalent qui poursuit les mêmes objectifs de physique qu'ATLAS, mais avec une conception et des solutions techniques différentes. Il est construit autour d'un énorme solénoïde supraconducteur. Ce dernier se présente sous la forme d'une bobine cylindrique de câble supraconducteur produisant un champ magnétique de 4 tesla, une valeur environ 100 000 fois supérieure au champ magnétique terrestre. Plus de 2000 personnes provenant de 181 instituts dans 38 pays collaborent à CMS (données de mai 2007).

Taille	21 m de long, 15 m de large, 15 m de haut
Poids	12 500 tonnes
Conception	tonneau fermé par deux bouchons
Coût du matériel	500 MCHF
Situation	Cessy (France)

Pour en savoir plus, voir le site Web: <http://cmsinfo.cern.ch/outreach/>

LHCb, c'est quoi?

LHCb est consacré à l'étude de la légère asymétrie entre matière et antimatière, par l'observation des mésons B (particules contenant le quark b). La compréhension de ce phénomène pourrait permettre aux physiciens de répondre à une question fondamentale : pourquoi notre Univers est-il constitué de matière et non d'antimatière ? Au lieu d'entourer entièrement le point de collision d'un détecteur fermé, l'expérience LHCb utilise une série de sous-détecteurs alignés qui détectent principalement les particules s'échappant vers l'avant. Le premier sous-détecteur est installé près du point de collision, les suivants sont alignés l'un à côté de l'autre sur une longueur de 20 m.

La collaboration LHCb comprend plus de 650 membres provenant de 47 instituts dans 14 pays (données de mai 2007).

Taille	21 m de long, 13 m de large, 10 m de haut
Poids	5600 tonnes
Conception	un spectromètre à petit angle avec détecteurs plans
Coût du matériel	75 MCHF
Situation	Ferney-Voltaire (France)

Pour en savoir plus, voir le site Web: <http://lhcb.web.cern.ch/lhcb/>

LHCf, c'est quoi?

LHCf est une expérience plus petite destinée à mesurer les particules émises selon un angle très petit par rapport à la direction du faisceau lors des collisions proton-proton dans le LHC. L'objectif est de mettre à l'épreuve les modèles utilisés pour estimer l'énergie primaire des rayons cosmiques de très haute énergie. Ses détecteurs sont placés à 140 m du point de collision d'ATLAS. La collaboration LHCf comprend 21 membres provenant de 10 instituts dans 6 pays (données de mai 2007).

Taille	deux détecteurs mesurant chacun 30 cm de long, 10 cm de large, 10 cm de haut
Poids	40 kg chacun
Situation	Meyrin (Suisse), près d'ATLAS

TOTEM, c'est quoi?

TOTEM mesure la taille réelle, ou « section efficace », des protons dans le LHC. Pour ce faire, TOTEM va détecter les particules produites au plus près des faisceaux du LHC. L'expérience est dotée de détecteurs abrités dans des chambres à vide spécialement conçues; ces détecteurs, appelés « pots romains », sont reliés aux tubes de faisceaux du LHC. Huit pots romains sont placés par paires en quatre emplacements proches du point de collision de l'expérience CMS. La collaboration TOTEM comprend plus de 70 membres provenant de 10 instituts dans 7 pays (données de mai 2007).

Taille	440 m de long, 5 m de large, 5 m de haut
Poids	20 tonnes
Conception	pots romains, détecteurs GEM (multiplicateurs d'électrons à gaz) et chambres à rubans cathodiques
Coût du matériel	6,5 MCHF
Situation	Cessy (France), près de CMS

Pour en savoir plus, voir le site Web: <http://totem.web.cern.ch/Totem/>

Qu'est-ce qui détermine la forme générale des détecteurs de particules du LHC ?

Un détecteur polyvalent moderne pour la physique des hautes énergies, tel qu'ATLAS et CMS, doit être hermétique, afin que la probabilité qu'une particule (détectable) s'échappe sans être détectée soit faible. Par commodité technique, la plupart des détecteurs modernes installés sur des collisionneurs de particules tels que le LHC sont conçus selon le modèle tonneau fermé par deux bouchons. Dans cette configuration, un détecteur cylindrique entoure la zone

centrale du collisionneur et deux bouchons circulaires et plats couvrent les régions d'extrémité, à savoir les zones proches du faisceau. Par contre, ALICE et LHCb ont une forme asymétrique, car ces expériences visent des domaines plus spécifiques de la physique.

Quelles sont les parties principales d'un détecteur ?

Le but des grands détecteurs du LHC est d'identifier les particules secondaires produites lors des collisions et de mesurer leur position dans l'espace, leur charge, leur vitesse, leur masse et leur énergie. Pour ce faire, les détecteurs comportent de nombreuses « couches », ou sous-détecteurs, dont chacun a un rôle précis dans la reconstitution des collisions. Un système magnétique vient compléter le dispositif. Il sépare les différentes particules suivant leur charge et permet de mesurer leur impulsion, une grandeur physique liée à la masse et à la vitesse de la particule.

Il existe deux catégories importantes de sous-détecteurs :

- ▶ **Les trajectographes** révèlent les trajectoires des particules électriquement chargées grâce aux traces que laissent ces dernières en ionisant la matière. À l'intérieur d'un champ magnétique, ils permettent de mesurer la courbure de la trajectoire d'une particule, et donc son impulsion, ce qui contribue à l'identification de la particule. Dans la plupart des trajectographes modernes, les traces des particules ne sont pas directement visibles. Elles se traduisent par des signaux électriques qui peuvent être enregistrés sur ordinateur. Un programme informatique reconstitue ensuite les trajectoires à partir des données recueillies. Les détecteurs de vertex et les chambres à muons sont deux types de trajectographes spécialisés. Les détecteurs de vertex sont installés près du point d'interaction (vertex primaire), tandis que les chambres à muons sont situées sur les couches extérieures du détecteur, car les muons sont les seules particules chargées capables de traverser plusieurs mètres de matériau dense.

Les trajectographes utilisent principalement deux techniques :

- ▶ les chambres d'ionisation en milieu gazeux, où les ions ou les électrons produits sont ensuite attirés sur des électrodes (généralement en forme de fils ou de damiers) grâce à de forts champs électriques. Dans les chambres à dérive, la trajectoire est déterminée par le calcul du temps de parcours des électrons jusqu'au fil d'anode. On obtient ainsi une meilleure résolution spatiale malgré une plus grande distance entre les fils: en effet, les cellules de dérive ont généralement une largeur de plusieurs centimètres, et permettent une résolution spatiale de 50-100 μm . Dans une chambre à projection temporelle, le volume est beaucoup plus important – la dérive peut dépasser les 2 m – et les fils de lecture sont disposés à l'une des extrémités ;
- ▶ les détecteurs à semi-conducteurs, dans lesquels la particule qui passe crée des électrons et des trous dans un semi-conducteur polarisé en inverse, généralement du silicium. Les détecteurs sont divisés en bandes ou en pixels. La résolution typique est 10 μm .

- ▶ **Les calorimètres** sont des dispositifs qui stoppent les particules qui les traversent et mesurent l'énergie qu'elles y ont déposée. Il existe deux principaux types de calorimètres : les calorimètres électromagnétiques (ECAL) et les calorimètres hadroniques (HCAL). Ils sont constitués de différents matériaux, selon le type de particules qu'ils stoppent. Les détecteurs ECAL sont conçus pour absorber complètement les électrons et les photons par l'intermédiaire de la force électromagnétique. Les particules soumises à l'interaction forte (les hadrons, tels que protons et pions) peuvent commencer à perdre de leur énergie dans l'ECAL, mais sont complètement stoppées dans le HCAL. Les muons (et les neutrinos) traversent les deux types de calorimètres sans interagir. Les particules neutres, comme les photons et les neutrons, sont principalement détectées par les calorimètres ; bien qu'elles soient invisibles pour les trajectographes, ces particules sont révélées par l'énergie qu'elles déposent dans les calorimètres.

En général, les calorimètres sont constitués de couches d'un matériau de haute densité "passif" ou "absorbant" (du plomb par exemple), intercalées avec des couches d'un milieu "actif" tel que du verre au plomb solide ou de l'argon liquide.

Les détecteurs comportent souvent des sous-détecteurs qui mesurent la vitesse des particules chargées – un facteur essentiel pour pouvoir identifier les particules.

Il existe deux grandes techniques pour mesurer la vitesse des particules :

- ▶ *le rayonnement Tchérénkov : lorsqu'une particule chargée traverse un milieu, elle émet, à partir d'une certaine vitesse, des photons selon un angle particulier qui dépend de cette vitesse. Si l'on mesure l'impulsion de la particule, on peut, à partir de sa vitesse, déterminer sa masse, et donc sa nature. Pour que l'émission Tchérénkov se produise, il faut que la particule traverse le milieu à une vitesse supérieure à celle de la lumière dans le milieu en question.*
- ▶ *le rayonnement de transition : lorsqu'une particule relativiste chargée traverse un milieu non homogène, en particulier la limite entre des matériaux qui possèdent des propriétés électriques différentes, elle émet un rayonnement plus ou moins proportionnel à son énergie. Cette technique permet de distinguer les différents types de particules.*

Quelle sera la quantité de bosons de Higgs produite au LHC ?

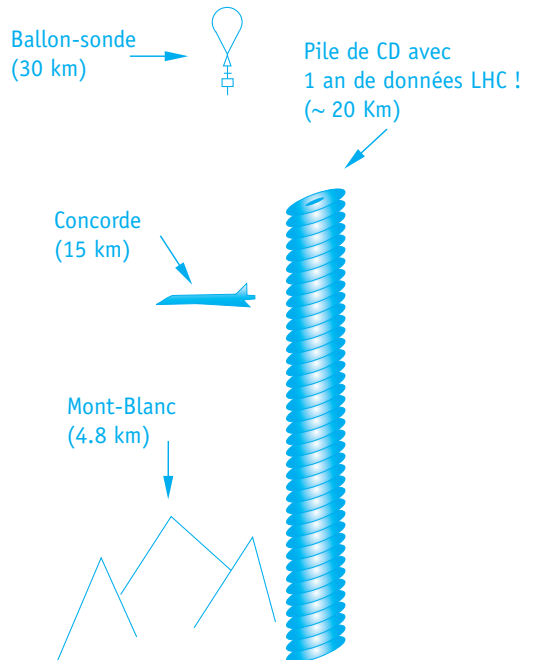
Malgré un nombre très élevé de collisions de particules au LHC, la quantité de bosons de Higgs produite sera tellement minime que les physiciens estiment qu'il faudra au moins deux à trois années de prise de données pour avoir suffisamment de statistiques. La production de bosons de Higgs à attendre est étroitement liée au modèle théorique et aux méthodes de calculs utilisés. Dans de bonnes conditions, chaque expérience devrait produire 1 boson de Higgs à intervalle de quelques heures. Il en va de même pour les particules supersymétriques. Les physiciens estiment qu'il faudra environ un an de prise de données à pleine luminosité avant d'obtenir les premiers résultats probants.

Quel devrait être le flux de données provenant des expériences LHC ?

Les expériences LHC comptent environ 150 millions de capteurs qui enregistrent 40 millions de données par seconde. Ces données une fois filtrées, restera une centaine de collisions par seconde potentiellement intéressantes. Le flux de données provenant des quatre expériences s'élèvera à environ 700 mégaoctets par seconde (Mo/s), soit quelque 15 000 000 Go (15 Po) par an - l'équivalent d'une pile de CD-ROM haute de 20 km.

Des milliers de scientifiques à travers le monde accéderont à cette gigantesque quantité de données, qu'ils analyseront. La Grille de calcul pour le LHC a pour mission de mettre en place et d'entretenir une infrastructure de stockage et d'analyse de données pour tous les chercheurs en physique des hautes énergies appelés à utiliser le LHC.

- ▶ *ATLAS produira 320 Mo/s*
- ▶ *CMS produira 220 Mo/s*
- ▶ *LHCb produira 50 Mo/s*
- ▶ *ALICE produira 100 Mo/s*





Quelle est la consommation d'électricité du LHC ?

Environ 120 MW (230 MW pour tout le CERN), ce qui correspond à peu près à la puissance consommée par l'ensemble des ménages du canton de Genève. En supposant que l'accélérateur fonctionne 270 jours par an (la machine s'arrête pendant la période d'hiver), la consommation annuelle d'énergie du LHC en 2009 devrait être d'environ 800 000 MWh. Ce chiffre comprend la consommation de la machine, de ses infrastructures et des expériences. Le coût annuel total pour faire fonctionner le LHC sera alors d'environ 19 millions d'euros. Le CERN est principalement alimenté en électricité par la compagnie française EDF (les compagnies suisses EOS et SIG Swiss fournissent également de l'électricité en cas de pénurie côté français).

Une grande partie de la consommation électrique du LHC servira à maintenir le système d'aimants supraconducteurs à ses températures de fonctionnement (1,8 K ou 4,2 K selon les aimants). Grâce à la technologie supraconductrice utilisée pour les aimants, la consommation nominale du LHC n'est pas beaucoup plus élevée que celle du Supersynchrotron à protons (SPS), alors que le LHC est beaucoup plus grand et fonctionne à une énergie bien plus élevée.

Les collisions se produisant dans le LHC sont-elles dangereuses ?

Le LHC peut atteindre des énergies qu'aucun accélérateur de particules n'a atteintes auparavant. Jusqu'à présent, ce n'est que dans la nature qu'on trouve des énergies aussi élevées. Seule une machine aussi puissante peut permettre aux physiciens de continuer à sonder les grands mystères de l'Univers. Des craintes se sont exprimées à l'égard de ce qui pourrait être créé lors de collisions de particules à haute énergie. Il n'y a pourtant aucune raison de s'inquiéter.

- ▶ *Des collisions d'une énergie sans précédent ?* Sans précédent sur Terre ! Les accélérateurs ne font que recréer, dans des conditions de laboratoire, le phénomène naturel des rayons cosmiques, ces particules produites dans l'espace intersidéral lors d'événements tels que la formation de supernovae ou de trous noirs, et accélérées à des énergies dépassant largement celles du LHC. Les rayons cosmiques voyagent à travers l'Univers et bombardent l'atmosphère de la Terre de manière ininterrompue depuis sa formation, il y a 4,5 milliards d'années. Bien que la puissance du LHC soit impressionnante si on la compare à celles d'autres accélérateurs, les énergies produites lors des collisions sont bien faibles par rapport à celles de certains rayons cosmiques. Comme les énergies très supérieures dégagées par les collisions qui ont lieu dans la nature depuis des milliards d'années n'ont pas eu de conséquences néfastes pour la Terre, il n'y a aucune raison de penser que les événements produits dans le LHC pourraient en avoir. Les rayons cosmiques n'entrent pas en collision uniquement avec la Terre, mais aussi avec la Lune, Jupiter, le Soleil et d'autres corps célestes. Le nombre total de ces collisions est gigantesque comparé à celui que l'on espère atteindre avec le LHC. Le fait que les planètes et les étoiles soient encore intactes nous conforte dans l'idée que les collisions se produisant au LHC sont sûres. L'énergie du LHC, énorme, il est vrai, pour un accélérateur, n'est que bien modeste à l'échelle de la nature.

- ▶ *Des Big Bangs miniatures ?* Bien que la concentration (ou densité) d'énergie lors des collisions de particules au LHC soit très élevée, l'énergie absolue est très faible comparée aux énergies auxquelles nous avons affaire au quotidien, ou aux énergies produites par les collisions entre rayons cosmiques. Cependant, à l'échelle, très petite, d'un faisceau de protons, cette concentration d'énergie reproduit la densité d'énergie qui a existé quelques instants après le Big Bang : c'est pour cela que les futures collisions au LHC sont parfois qualifiées de « Big Bangs miniatures ».
- ▶ *Des trous noirs ?* Dans l'Univers, l'effondrement d'étoiles massives crée des trous noirs massifs, des objets qui renferment d'énormes quantités d'énergie gravitationnelle attirant la matière environnante. La force gravitationnelle d'un trou noir est liée à la quantité de matière ou d'énergie qu'il contient : moins il y a de matière, plus sa force d'attraction est faible. Certains physiciens pensent que des trous noirs microscopiques pourraient être produits lors des collisions dans le LHC. Cependant, ceux-ci seraient créés avec les énergies des particules entrant en collision (équivalant aux énergies de nos moustiques) ; par conséquent, aucun trou noir microscopique produit à l'intérieur du LHC ne pourrait générer une force gravitationnelle suffisante pour absorber la matière environnante. Si le LHC peut produire des trous noirs microscopiques, les rayons cosmiques, d'énergie beaucoup plus élevée, en ont nécessairement déjà produit beaucoup plus. Et comme la Terre est toujours là, il n'y a aucune raison de penser que les collisions à l'intérieur du LHC soient dangereuses.

Les trous noirs perdent de la matière en émettant de l'énergie par un processus mis en lumière par Stephen Hawking. Les trous noirs qui ne peuvent attirer de la matière, tels que ceux qui pourraient être produits au LHC, rétrécissent, s'évaporent et disparaissent. Plus le trou noir est petit, plus vite il s'évanouit. Si des trous noirs microscopiques devaient se former dans le LHC, ils n'existeraient que pendant un instant fugace. Leur existence serait si courte que la seule façon de les repérer serait de détecter les produits de leur désintégration.

- ▶ *Des strangelets ?* Les strangelets sont d'hypothétiques petits morceaux de matière dont l'existence n'a jamais été démontrée. Ils seraient composés de quarks « étranges », des parents plus lourds et plus instables des quarks qui constituent la matière stable. Même si les strangelets existaient, ils seraient instables. En outre, leur charge électromagnétique repousserait la matière ordinaire ; ainsi, au lieu de se combiner avec des substances stables, ils se désintégreraient, tout simplement. Si des strangelets devaient être produits au LHC, ils ne feraient pas beaucoup de dégâts. Si ces strangelets existent, ils ont déjà été créés par les rayons cosmiques de haute énergie, et là non plus, aucun dégât n'est à déplorer à ce jour.
- ▶ *Des rayonnements ?* Les rayonnements sont inévitables dans les accélérateurs comme le LHC, car les collisions des particules, qui nous permettent d'étudier l'origine de la matière, génèrent également des rayonnements. Le CERN, grâce à des moyens de protection actifs et passifs, à des détecteurs de rayonnements et à diverses procédures, veille à ce que l'exposition aux rayonnements du personnel et de la population soit la plus faible possible et se situe bien en dessous des limites dictées par les normes de sécurité internationales. À titre de comparaison, la radioactivité naturelle (due aux rayons cosmiques et à la radioactivité naturelle de l'environnement) reçue par chacun en Suisse est d'environ 2400 $\mu\text{Sv}/\text{an}$; pour un aller-retour Europe-Los Angeles, comptez 100 μSv . Le tunnel du LHC est situé à 100 m sous terre, à une profondeur telle que ni les rayonnements produits pendant l'exploitation, ni la radioactivité résiduelle, ne peuvent être détectés en surface. L'air sera pompé du tunnel et filtré. Les études ont montré que la dose de radioactivité libérée dans l'air à laquelle la population sera exposée ne dépassera pas 10 $\mu\text{Sv}/\text{an}$.

Les normes du CERN pour la protection de l'environnement et du personnel sont conformes aux législations nationale suisse et française, ainsi qu'à la directive 96/29/EURATOM du Conseil de l'Union européenne. Selon les législations suisse et française, une activité professionnelle ne peut en aucun cas conduire à une dose efficace supérieure à 20 mSv par an pour les personnes professionnellement exposées et supérieure à 1 mSv par an pour les personnes non professionnellement exposées et pour la population.

Quelles sont les règles régissant l'accès au LHC ?

Hors période d'exploitation, la plus grande partie du tunnel du LHC ne sera que faiblement radioactive, l'essentiel des débits de dose résiduels étant concentrés dans des zones particulières de la machine comme les cavernes d'arrêt de faisceau, où le faisceau est absorbé dans son intégralité à la fin de chaque période d'exploitation, et les zones de collimation des faisceaux.

Seul le personnel technique autorisé pourra accéder au tunnel du LHC. Un technicien spécialiste de la radioprotection entrera d'abord pour mesurer le débit de dose à l'endroit où doit avoir lieu l'intervention demandée. Il évaluera à quel moment l'intervention pourra avoir lieu et combien de temps elle pourra durer.

Quelle est la consommation d'hélium du LHC ?

Le chiffre exact des pertes d'hélium pendant l'exploitation du LHC n'est pas encore connu. Il dépendra de plusieurs facteurs tels que le nombre de transitions résistives des aimants, d'interruptions de courant, etc. Ce que l'on sait, c'est qu'il faudra environ 120 tonnes d'hélium pour refroidir et remplir le LHC à la première mise en route.

Que se passe-t-il si le faisceau devient instable ?

L'énergie stockée dans les faisceaux du LHC est sans précédent. Une perte incontrôlée de faisceau pourrait endommager certains équipements de l'accélérateur. Tout est donc mis en œuvre pour que cela ne se produise jamais. Pour que le LHC soit exploité dans de bonnes conditions de sécurité, plusieurs systèmes doivent fonctionner correctement : les collimateurs et les absorbeurs de faisceau, les systèmes d'éjection, de surveillance et de verrouillage des faisceaux, ainsi que le système de protection contre les transitions. Si un faisceau devient instable, la perte de faisceau sera détectée et, en l'espace de trois révolutions ($< 0,3$ ms), un jeu d'aimants extraira le faisceau du LHC. Le faisceau empruntera ensuite un tunnel spécial jusqu'au bloc d'arrêt des faisceaux, le seul dispositif du LHC capable de supporter l'impact de la totalité d'un faisceau. Le cœur du bloc d'arrêt est composé d'un empilement de plaques de graphite de différentes densités.

L'énergie totale maximale de chaque faisceau est d'environ 350 MJ, ce qui correspond à l'énergie d'un train de 400 tonnes, comme le TGV, lancé à 150 km/h. Une telle énergie suffit à faire fondre environ 500 kg de cuivre. L'énergie totale stockée dans les aimants du LHC est quelque 30 fois plus élevée (11 GJ).

Le LHC en 10 propriétés remarquables

1) Lors de l'excavation du tunnel circulaire de 27 km de long, entre le lac Léman et la chaîne du Jura, les deux bouts du tunnel se sont rejoints à 1 cm près.

2) Chacun des 6400 filaments supraconducteurs de niobium-titane du câble fabriqué pour le LHC a une épaisseur de 0,007 mm, c'est-à-dire 10 fois plus fin qu'un cheveu. Mis bout à bout, tous les filaments permettraient de faire cinq fois l'aller retour entre la Terre et le Soleil, et il en resterait encore assez pour quelques voyages vers la Lune.

3) Tous les protons accélérés au CERN sont obtenus à partir d'hydrogène standard. Bien que les faisceaux du LHC contiennent de très nombreux protons, seuls 2 nanogrammes d'hydrogène(*) sont accélérés chaque jour. Il faudrait donc 1 million d'années pour accélérer un gramme d'hydrogène avec le LHC.

4) Le cœur du LHC sera le plus grand réfrigérateur du monde. Avec une température plus froide que celle de l'espace intersidéral, il contiendra du fer, de l'acier et les fameuses bobines supraconductrices.

5) La pression dans les tubes de faisceau du LHC sera environ dix fois plus faible que sur la Lune. Ce sont les conditions de l'ultravide.

6) Les protons à pleine énergie circuleront dans le LHC à une vitesse de 0,999999991 fois celle de la lumière. Chaque proton fera plus de 11 000 fois par seconde le tour de l'anneau de 27 km.

7) À énergie maximale, chacun des deux faisceaux de protons dans le LHC aura une énergie totale équivalente à un train de 400 t, comme le TGV, lancé à 150 km/h, assez pour faire fondre 500 kg de cuivre.

8) Le Soleil ne se couche jamais sur la collaboration ATLAS. Les scientifiques qui y travaillent viennent de tous les continents, sauf l'Antarctique.

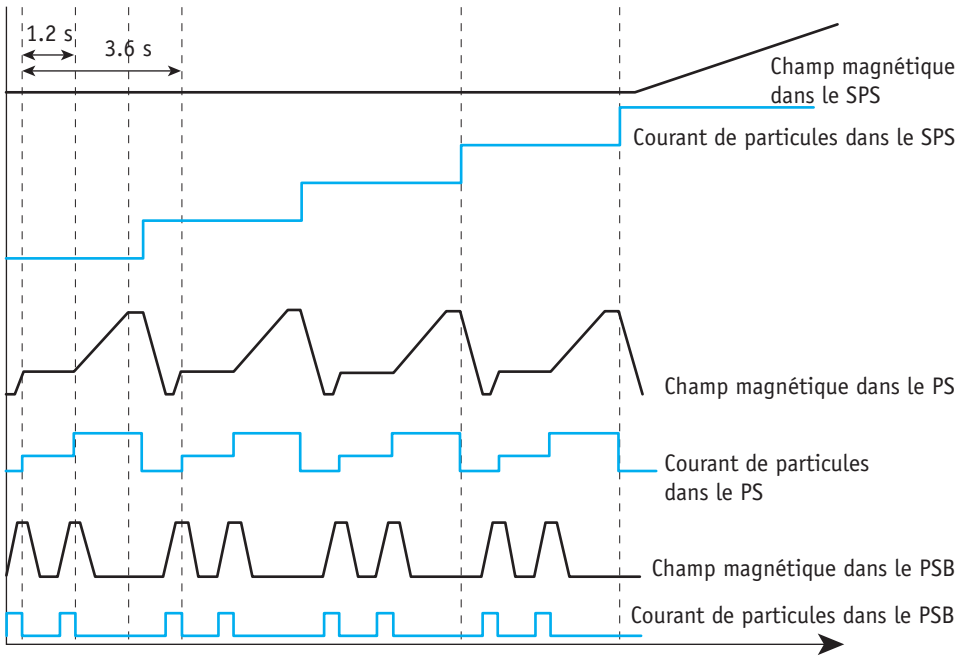
9) Le système magnétique de CMS contient environ 10 000 t de fer ; plus que la Tour Eiffel.

10) Les données enregistrées par chacune des grandes expériences du LHC rempliront l'équivalent de 100 000 DVD chaque année.

(*) la masse totale des protons est calculée au repos.

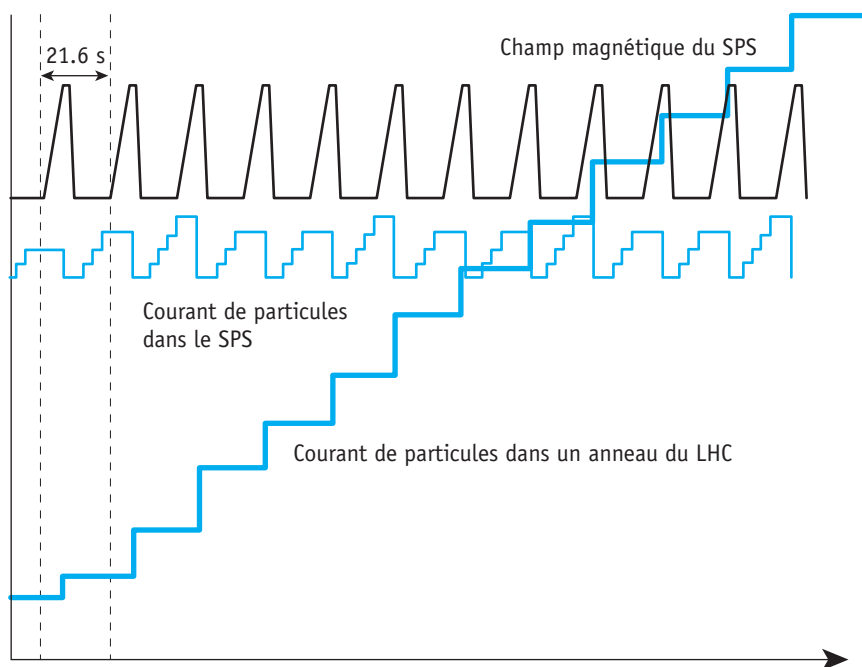
Annexe 1

Remplissage, champ magnétique et courant de particules dans le PSB, le PS et le SPS



Annexe 2

Remplissage, champ magnétique et courant de particules dans le SPS et le LHC



La section Publications tient à remercier les membres des départements AB, AT, PH et de la Commission de Sécurité qui ont apporté leur aide à l'élaboration de ce guide.

