

Recueil de questions élèves
(Stage de formation des enseignants français au CERN à Meyrin, Suisse)
(vacances de la Toussaint 2014)

Information à l'ensemble des élèves de Mme Pagès,

Ma candidature au stage de formation des enseignants français au CERN des vacances de la Toussaint a été acceptée.

C'est une occasion exceptionnelle de me trouver au contact de professionnels scientifiques dans leurs lieux d'exercice et de me permettre d'être une liaison entre les chercheurs et les élèves (futurs scientifiques ou futurs citoyens) puis d'en faire profiter mes élèves et mes collègues du lycée.

De nombreux domaines seront évoqués directement ou indirectement :

- les nouveaux programmes de physique de lycée et les sujets de baccalauréat (physique des particules, compréhension de l'Univers, exercice de bac physique-chimie juin 2014 sur le LHC, construction et utilisation du LHC, supraconducteurs en spécialité physique-chimie de TS, valeurs impressionnantes des champs magnétiques utilisés ou des dimensions du LHC et de ses dispositifs nécessaires à la réalisation des expériences, caractéristiques hors du commun du LHC, ...).
- la démarche scientifique/expérimentale (observer, comprendre, agir),
- l'écrit scientifique,
- l'orientation des élèves de la série S : intérêt pour les Sciences, choix des métiers (regard différent sur les nombreux corps de métiers représentés au CERN),
- l'actualité scientifique,
- la recherche fondamentale et son intérêt dans notre société,
-

Aussi, je vous sollicite pour être les auteurs de questions destinées aux différents intervenants au CERN, que je pourrai leur soumettre pour ensuite les exploiter en classe avec vous à mon retour (expositions, rédaction de « web infos scientifiques » sur le site du lycée, ...)

Je vous remercie de la contribution que vous apporterez à ce recueil de questions sur les différents domaines précédemment listés.

Mme PAGES



Professeur-formateur de physique-chimie
Lycée régional Simone Veil –Valbonne

NOM : Prénom : Classe :

Différents domaines :

1. Nouveaux programmes de physique de lycée et les sujets de baccalauréat.
2. Démarche scientifique/expérimentale (observer, comprendre, agir).
3. Ecrit scientifique.
4. Orientation des élèves de la série S.
5. Actualité scientifique.
6. Recherche fondamentale.
7. Autres domaines.

Différents domaines :

1. Nouveaux programmes de physique de lycée et les sujets de baccalauréat.

- Le CERN et ses recherches et ses découvertes ont-ils une influence sur les programmes de physique du lycée et sur les sujets de bac ?

Non, pas d'influence directe – il n'y a pas beaucoup de science « moderne » dans les programmes du lycée. Après, il est possible que les professeurs en charge des sujets du bac cherchent parfois à « coller » à l'actualité scientifique.

- Un sujet de bac sur le LHC ne serait-il pas trop « compliqué » pour des élèves ?

Non : il y en a d'ailleurs eu un cette année (2014).

2. Démarche scientifique/expérimentale (observer, comprendre, agir).

3. Ecrit scientifique.

4. Orientation des élèves de la série S.

- Comment devient-on « chercheur » ?

En faisant beaucoup d'études (bac+8 : licence + master + doctorat, ou grande école + doctorat), en acceptant un « plan de carrière » différent de celui du milieu de l'entreprise classique (travail dans des collaborations internationales, séjours fréquents et/ou de longue durée à l'étranger, un ou plusieurs CDD chercheurs (les contrats « post-doc ») après la thèse) et enfin un petit coup de pouce du destin au moment de passer le concours de recrutement.

- Comment travailler au CERN ?

Le CERN a pour mission de fournir l'infrastructure de recherche aux scientifiques qui viennent y faire des recherches. Dès lors, le CERN engage principalement des techniciens, des ingénieurs, des administratifs, mais également des professions spécialisées : pompier, infirmier, chaudronnier etc. Les domaines d'ingénierie sont très variés : électrotechnique, informatique, électronique, vide, cryogénie, géodésie, électronique, science des matériaux et mécanique, etc... Outre des contrats d'emploi classiques (CDD de 5 ans avec possibilité d'obtenir par la suite un CDI), le CERN offre des opportunités de stage (apprentissage, étudiants technique, doctorants...) et de premier emploi (boursier...).

Toutes ces offres sont disponibles (en anglais, langue de travail pour la plupart des collaborateurs du CERN) sur le site <http://cern.ch/jobs>.

Les scientifiques qui viennent faire des recherches au CERN ne sont pas employés par l'Organisation, mais par leur institut de recherche qui les envoie pour quelques jours, mois ou années au CERN dans le cadre de collaborations internationales. Ils sont membres du personnel associé mais pas employés par le CERN.

Ainsi, et paradoxalement, le CERN engage peu de physiciens de recherche, mais beaucoup d'ingénieurs et techniciens au service de la physique.

- Faut-il automatiquement un bac S pour travailler au CERN ?

Non : comme toute structure de taille équivalente (laboratoire, centre de recherche, entreprise, etc.), le CERN a également besoin de personnels spécialisés en ressources humaines, en gestion, etc. Mais le CERN est avant tout un laboratoire de recherche et donc les ingénieurs et les techniciens avec un profil scientifique représentent une part importante de son personnel.

- Combien de personnes travaillent au CERN ?

Environ 2 200 personnes sont employées par le CERN. Un chiffre en baisse régulière année après année comme dans de nombreux laboratoires partout dans le monde. A ces personnes s'ajoutent plus de 10 000 chercheurs invités, 500 étudiants et 2 000 personnels d'entreprises extérieures.

- Des géologues peuvent-ils être amenés à travailler avec les scientifiques du CERN ?

Oui. Par exemple quand il a fallu creuser dans les années 1980 le tunnel qui abrita le collisionneur électron-positron LEP (1989-2000) avant d'accueillir aujourd'hui le LHC. Plus généralement, la plupart des accélérateurs du CERN sont enterrés (PS, SPS et LHC notamment). Un accélérateur doit être très stable pour avoir des performances optimales : il faut bien choisir la couche de terrain dans laquelle on fait les travaux de génie civil. Creuser les cavernes qui abritent les détecteurs et les puits d'accès associés ont également été des chantiers complexes. Encore aujourd'hui, pour les besoins de ses projets futurs, le CERN fait appel à des géologues. Le CERN compte par ailleurs, et c'est peu connu, une équipe de géomètres à la pointe de leur domaine. Ils travaillent sur l'alignement des détecteurs, des accélérateurs et des faisceaux et sont parfois amenés à collaborer avec des géologues par exemple pour envoyer un faisceau de neutrinos à travers l'écorce terrestre en direction du laboratoire souterrain du Gran Sasso en Italie.

- Quels sont les métiers liés à l'étude de l'Univers ?

Tous les métiers scientifiques : techniciens, ingénieurs et chercheurs ! Et dans de nombreux domaines : informatique, électronique, mécanique, etc. (voir plus haut)

- Quelles études faire pour espérer faire partie du CERN et plus spécifiquement maîtriser le LHC ?

Voir les réponses précédentes : de très nombreux métiers sont représentés au CERN. Les instruments actuels comme le LHC sont bien trop complexes pour être « maîtrisés » par une seule personne. De nombreuses équipes collaborent sur de tels équipements. Mais des études techniques seront les plus à même de donner accès aux professions qui s'occupent du pilotage du LHC.

- Quels types de métiers basés sur l'étude de l'Univers trouve-t-on au CERN ? Quelles qualifications demande-t-on ?

Points déjà abordés dans les réponses aux questions précédentes.

5. Actualité scientifique.

- Un accélérateur de particules peut-il créer un trou noir ?

La formation d'un micro trou noir est une conséquence d'une des très nombreuses théories proposées pour aller au-delà du Modèle Standard, la théorie utilisée avec succès depuis près de 40 ans pour décrire le monde des particules élémentaires. Toutes ces théories dites « de nouvelle physique » sont actuellement testées au LHC et dans d'autres accélérateurs ; il est trop tôt pour dire laquelle sortira éventuellement du lot. Une théorie n'est valide que si elle a été confirmée par l'expérience – dit autrement : deux théories qui ont des prédictions en désaccord sur un sujet donné ne peuvent être départagées que si une expérience permet de tester ces prédictions. Tant qu'une théorie donnée n'a pas passé cette étape, ses prédictions ne sont que des spéculations. Ce qui est certain, c'est que des collisions bien plus énergétiques que celles enregistrées au LHC se produisent régulièrement dans la nature lorsqu'un rayon cosmique de très haute énergie (une énergie de l'ordre du joule portée par une seule particule) issu du cosmos interagit avec l'atmosphère terrestre. Et on n'a encore jamais vu de trou noir associé à ces phénomènes : la probabilité de formation d'un tel phénomène est soit nulle, soit si faible

que ça n'arrivera pas au LHC ! D'ailleurs, dans la théorie susmentionnée, ces trous noirs devaient disparaître – s'évaporer – à peine formés.

- Le CERN a-t-il et peut-il apporter des solutions dans le domaine écologique ?

Le CERN est un laboratoire de recherche fondamentale. Les progrès scientifiques accomplis vont de pair avec les progrès technologiques. Et les technologies mises au point au CERN ou pour des expériences CERN peuvent ensuite trouver des applications pratiques dans la société. Par exemple, les techniques d'ultra-vide (UHV) développées pour le LHC ont été réutilisées par la société SRB Energy en Espagne. Ainsi elle développe des panneaux solaires bien plus efficaces en terme énergétique. Voir <http://press.web.cern.ch/fr/press-releases/2012/03/des-panneaux-solaires-issus-des-technologies-du-cern-remportent-un-important>. Par ailleurs, le CERN est à la pointe de la technologie des supraconducteurs, matériaux prometteurs pour le transport d'électricité sans perte d'énergie. Les supraconducteurs sont encore très loin d'être matures pour des applications à grande échelle, mais les développements au CERN pour les besoins des accélérateurs font progresser ces technologies, et qui sait si des applications n'en découleront pas ?

- Quel pourrait être l'impact des nanotechnologies sur notre quotidien ?

Voir un spécialiste : <https://indico.cern.ch/event/314904> ! On prédit que ces nouvelles technologies vont devenir importantes dans tous les domaines des sciences de l'ingénieur et des sciences physiques. Dans ce cas, les nanotechnologies joueront également un grand rôle au CERN. Toutefois, on peut préciser ici que le CERN n'a pas pour objectif de faire de la recherche sur les nanotechnologies. Ses équipes peuvent être amenées à exploiter ces techniques – parmi beaucoup d'autres – pour améliorer leurs instruments scientifiques.

- Est-il prévu de créer un satellite pour explorer le reste de l'Univers ?

Le « reste de l'Univers » est un terme à la fois flou et ambitieux, vu la complexité de l'Univers et la diversité des astres qui le composent. De nombreux satellites ont été et sont envoyés dans l'espace pour étudier l'Univers visible, sa composition et sa structure. Chacun de ces satellites a une fonction bien particulière et ses données sont utilisées avec celles de beaucoup d'autres expériences pour améliorer notre compréhension globale de l'Univers et obtenir une vision cohérente de sa dynamique et de son évolution.

- Quelle est l'origine de la gravité ?

Très bonne question ! Si vous pensez avoir la réponse, écrivez au comité Nobel à Stockholm (Suède)...

Plus sérieusement, on ne sait pas aujourd'hui décrire dans un même cadre mathématique la gravité et les trois autres interactions fondamentales (l'électromagnétisme et les interactions forte et faible). Pour la gravité on utilise la relativité générale (Einstein 1915) tandis que les autres forces sont regroupées dans le Modèle Standard, développé dans les années 1960-1970 et basé sur les théories quantiques des champs. Si une description unifiée était trouvée un jour, elle pourrait impliquer que la gravité soit également transmise par une particule, appelée « graviton », dont la nature reste à éclaircir et qui est inaccessible à l'observation par les technologies actuelles.

- La première scène du film « Anges et démons » se déroule au CERN. Est-ce que ce scénario (matière et antimatière qui produiraient une explosion) est possible ?

Il est exact que la matière et l'antimatière s'annihilent quand elles se rencontrent. Par contre, l'antimatière est absente de notre Univers : il faut donc la créer artificiellement pour pouvoir l'utiliser. Et ce processus est à la fois très peu rentable et très coûteux : il faudrait un temps très long, beaucoup d'énergie et des ressources financières colossales pour parvenir à produire assez d'antimatière pour faire une bombe ! Au rythme où le CERN produit des atomes d'antihydrogène aujourd'hui, il faudrait environ 1

milliard d'années pour produire 1 gramme d'antimatière (la quantité de la « bombe » du film). Voir <http://angelsanddemons.web.cern.ch/fr/faq/bomb-from-antimatter>

- Les recherches faites sur les particules ou autres peuvent-elles permettre l'innovation de matériaux plus résistants aux raz-de-marée par exemple ou à d'autres risques naturels ?

Des matériaux plus résistants aux rayonnements ionisants intenses certainement. C'est une autre histoire que de savoir si de tels matériaux pourront servir dans d'autres circonstances.

6. Recherche fondamentale.

- Quels changements les découvertes du CERN apportent-elles à la vie quotidienne ? Quelles en sont ces applications ?

Les technologies développées pour les accélérateurs de particules et les détecteurs ont également des applications dans le domaine médical par exemple, notamment dans la thérapie des cancers. La plupart des accélérateurs de particules dans le monde ne servent pas à la recherche, mais aux traitements des cancers, en ciblant des tumeurs avec des faisceaux. Et cette technologie (hadronthérapie) est directement issue de la physique des particules. De même, les technologies de détection des particules pour la recherche ont trouvée des applications pour l'imagerie médicale, dont la plus connue est la tomographie par émissions de positrons (TEP ou PET-scan). Des développements se poursuivent dans ces deux domaines (traitement et imagerie), avec des équipes du CERN notamment. Le CERN est aussi moteur dans le développement de technologies informatiques : comment transporter toujours plus de données le plus rapidement possible, comment augmenter encore la puissance de calcul, comment stocker toutes ces informations de manière durable, etc. Le web a été inventé au CERN à la charnière des années 1980 et 1990 pour permettre aux physiciens de mieux échanger leurs informations. Pouvez-vous imaginer le monde d'aujourd'hui sans le web ? Actuellement, des technologies de grille de calcul (réseau mondial de centres informatiques qui mettent en commun leurs puissances de calcul et de stockage des données) sont développées au CERN et mises à disposition pour d'autres branches scientifiques (climatologie, recherche de médicaments, etc.) D'autres domaines, moins connus, bénéficient également des développements du CERN : procédés industriels comme la soudure, électrotechnique, ou panneaux solaires (voir plus haut).

- La fusion nucléaire pourrait-elle être réalisée au CERN ?

Non. Il y a d'autres installations dans le monde (notamment le centre ITER, en construction à Cadarache) qui étudient la fusion nucléaire – un phénomène très complexe, à l'œuvre dans les étoiles, mais extrêmement difficile à reproduire sur Terre puis à maîtriser.

- Existe-t-il de nouvelles particules ?

Par définition ce qui est nouveau n'a pas encore été découvert ! Il y a sans doute des particules encore inconnues dans la nature. Comme on ne connaît pas leurs caractéristiques, on ne sait pas a priori si elles pourront être produites au LHC et/ou mises en évidence de manière indirecte. On ne peut que l'espérer – tout en sachant que le collisionneur et ses expériences associées ont été conçus pour être sensibles à la plus grande variété possible de phénomènes nouveaux.

- Fera-t-on un jour de la fusion nucléaire au CERN ?

Voir la réponse à une question similaire un peu plus haut.

- Quelles sont les applications en médecine ?

Deux domaines bénéficient principalement des développements en physique des particules : l'imagerie médicale et la lutte contre les cancers. (voir plus haut)

Voir <http://home.web.cern.ch/fr/about/experiments/ace>

- Est-ce qu'une découverte récente a bouleversé le monde scientifique ?

Difficile à dire – « bouleverser » est un verbe fort ! La découverte du boson de Higgs en 2012, 48 ans après la prédiction théorique de son existence et après plusieurs décennies de recherches infructueuses, est évidemment une étape très importante sur le chemin du progrès scientifique. Pour rester dans le monde des particules élémentaires, les découvertes sur les neutrinos se sont enchaînées ces dernières années.

Côté infiniment grand, notre compréhension de l'Univers a beaucoup progressé depuis la fin du siècle dernier ce qui a permis de définir un « Modèle Standard cosmologique » qui fonctionne très bien. La « matière noire » reste toujours une énigme mais on pense qu'il s'agit d'une nouvelle forme de matière – encore inconnue. Par contre, personne n'a la moindre idée de ce que serait la mystérieuse « énergie noire », la composante prédominante de l'Univers et qui est responsable de l'accélération de son expansion.

- La recherche fondamentale du CERN peut-elle apporter des solutions écologiques ?

Cf. supra.

- Est-on capable de créer un « mini Big Bang » au CERN ?

On ne sait pas ce qu'a été exactement le Big Bang. En physique, chaque équation a son domaine de validité et, plus on s'approche du Big Bang, plus les conditions qui régnaient à ce moment-là s'éloignent de celles que nous connaissons. En remontant le temps vers le Big Bang, il arrive donc forcément un moment où les lois de la physique que nous utilisons ne sont plus valables : nous n'avons pas accès à ce qui se passe au-delà. Par contre, les collisions au LHC permettent de créer des énergies très élevées qui reproduisent en partie des conditions qui se sont produites une fraction de seconde après le Big Bang.

- Une nouvelle énergie (encore inconnue ou non maîtrisée) pourrait-elle être utilisée par l'Homme ?

On peut l'espérer étant donné que les énergies fossiles ne seront pas éternelles ! Mais ce qui est encore inconnu reste par définition à découvrir. Parmi les formes d'énergie actuellement connues, la fusion nucléaire est une piste prometteuse mais il faudra encore des décennies pour, peut-être, arriver à la domestiquer – et, en particulier, mettre au point une « centrale à fusion nucléaire » qui produirait plus d'énergie qu'elle n'en consomme.

- Quel est le lien entre « collisions » et « expansion de l'Univers » ?

Il n'y en a pas de manière directe. Par contre, les collisions très énergétiques permettent de reproduire des conditions qui ont existé juste après le Big Bang et plus jamais depuis. Augmenter l'énergie des collisions revient donc un peu à remonter le temps vers le Big Bang.

- Fabrique-t-on beaucoup d'antimatière ? Quelles en sont les applications ?

Au LHC on fabrique autant de matière que d'antimatière lors des collisions proton-proton. Les propriétés de ces antiparticules (masse, charge, énergie, modes de désintégration) sont étudiées grâce aux grands détecteurs installés autour des quatre points de collision. Ces résultats permettent de tester le Modèle Standard avec précision et de chercher des effets de physique nouvelle. L'étude spécifique des différences entre matière et antimatière a une motivation supplémentaire : essayer de comprendre pourquoi notre Univers n'est fait que de matière alors que matière et antimatière ont dû être créées en quantités égales lors du Big Bang.

Ailleurs au CERN, dans l'anneau AD (Antimatter Decelerator), on utilise de l'antimatière pour fabriquer des antiatomes. L'antihydrogène est formé d'un antiproton et d'un antiélectron, ou positron dont on cherche à mesurer les propriétés : spectre d'émission, comportement en présence d'un champ de

pesanteur, etc. On peut également imaginer utiliser des faisceaux d'antiparticules aux propriétés soigneusement définies pour détruire des tumeurs cancéreuses.

- Quelles relations que l'on connaît interviennent dans le fonctionnement d'un accélérateur de particules ? (« on » = élève de TS)

Pas beaucoup malheureusement !

- La force électromagnétique explique comment on accélère (via une onde électromagnétique, un champ électrique particulier) et pilote (via des champs magnétiques) les faisceaux de particules.
 - Les relations entre vitesse, accélération et énergie sont données par la théorie de la relativité restreinte dont les formules de mécanique classique (comme par exemple l'énergie cinétique : $E_c = \frac{1}{2}mv^2$) ne sont que des approximations valables pour des vitesses petites par rapport à la vitesse de la lumière dans le vide (près de 300 000 km/s).
 - La formule d'Einstein $E=mc^2$ posant l'équivalence entre énergie (E) et masse (m) est également fondamentale pour comprendre le principe de fonctionnement des collisionneurs comme le LHC.
 - La fonction exponentielle est la loi générale qui gouverne les désintégrations des particules instables.
- Quelles sont les applications de l'accélérateur de particules ?

Elles sont très variées ! On trouve des accélérateurs de particules dans les hôpitaux (imagerie médicale, radiothérapie, hadronthérapie, etc.), dans l'industrie (par exemple pour réaliser des soudures de grande qualité), dans des musées (grâce aux particules, on peut étudier des objets antiques, souvent uniques, de manière non destructive), etc. Le rayonnement synchrotron, une forme de lumière particulière émise par des particules chargées lorsqu'elles sont accélérées, est également très utilisé dans de nombreux domaines scientifiques (chimie, biologie, science des matériaux, etc.). Les synchrotrons les plus performants en France sont SOLEIL sur le plateau de Saclay en région parisienne et l'ESRF à Grenoble.

- La fission nucléaire a-t-elle été créée au CERN ?

Non, cette découverte est bien antérieure à la création du CERN (29 septembre 1954) ! Le phénomène est décrit en 1938-1939 par plusieurs groupes de scientifiques (allemands, français, etc.). La seconde guerre mondiale provoque une accélération des recherches dans ce domaine, dans un but militaire. La première réaction en chaîne artificielle est obtenue à Chicago début décembre 1942. Il s'agit d'une étape importante vers la maîtrise de l'énergie nucléaire qui a débouché à la fois sur la production d'électricité dans les centrales nucléaires et sur des armes de destruction massive.

- Est-ce que les chercheurs ont à ce jour découvert la plupart des particules ?

Avec le boson de Higgs, les physiciens ont découvert toutes les particules élémentaires prévues par le Modèle Standard : 12 particules de matière réparties en trois familles de quatre particules chacune, autant de particules d'antimatière, auxquelles s'ajoutent les particules médiatrices des trois interactions fondamentales et donc le fameux boson de Higgs, associé au champ de Higgs à l'origine de la masse des particules élémentaires.

Le Modèle Standard est une théorie cohérente mais n'est sans doute pas la théorie ultime pour décrire les constituants élémentaires de la matière et leurs interactions. On ne connaît pas encore la théorie plus générale qui pourrait la remplacer : de nombreux modèles concurrents existent, peu à peu départagés par les résultats expérimentaux qui progressent. Ces théories alternatives prévoient des phénomènes nouveaux, dont le plus souvent des particules supplémentaires. Au LHC et plus généralement dans toutes les expériences de physique des hautes énergies, on espère produire ces nouvelles particules ou mettre en évidence de manière irréfutable la trace de leur existence.

- En quoi la découverte de nouvelles particules contribue-t-elle à faire progresser la science ?

Si la particule nouvellement découverte est prédite par la théorie en vigueur, elle renforce sa validité. C'est le cas pour le boson de Higgs : pour le moment, toutes ses propriétés mesurées sont en accord avec les prédictions théoriques (en tenant compte des incertitudes) et sa masse, un paramètre libre du Modèle Standard, est compatible avec les résultats d'autres mesures indépendantes mais qui sont indirectement sensibles au boson de Higgs.

Si la nouvelle particule est inattendue, sa découverte montre que la théorie est incomplète et qu'elle doit être étendue. Cette situation s'est présentée à plusieurs reprises au cours du XX^e siècle – on a coutume de citer l'anecdote suivante : peu avant la seconde guerre mondiale, un futur prix Nobel aurait dit « mais qui a commandé ce truc ? » alors qu'on l'informait de la découverte d'une nouvelle particule complètement inattendue, le muon. En fait, à l'époque, on n'avait découvert que le tiers des constituants de la matière connus aujourd'hui !

- Combien de temps de recherche faut-il pour découvrir une nouvelle particule ?

Ça dépend et c'est une question à laquelle on ne peut répondre qu'a posteriori. Trouver une nouvelle particule élémentaire est nécessairement un travail de longue haleine. Le meilleur exemple est le boson de Higgs, dont l'existence a été prédite en 1964 mais qui n'a été découvert qu'en 2012. Des recherches tous azimuts ont lieu au LHC depuis le démarrage de l'accélérateur pour trouver des particules encore inconnues mais elles se sont toutes révélées infructueuses pour le moment. La seconde phase de prise de données, à plus haute énergie (de 8 TeV à 13, voire 14 TeV) et avec une cadence de collisions plus élevée, devrait permettre d'approfondir ces résultats et peut-être de révéler de nouvelles particules pour le moment trop « discrètes » pour être vues.

- Qu'est-ce qu'un « boson » ?

Il y a deux grandes catégories de particules élémentaires : les bosons et les fermions. Toutes les particules de matière (électrons, quarks, etc.) sont des fermions. Tous les bosons connus, à l'exception du boson de Higgs, sont des particules qui transmettent une interaction fondamentale – par exemple le photon pour l'interaction électromagnétique. Le boson de Higgs, lui, est une manifestation du champ de Higgs qui emplie tout l'espace et avec lequel les particules élémentaires interagissent, ce qui leur confère une masse.

Les noms « bosons » et « fermions » sont associés à de grands physiciens du XX^e siècle (MM. Bose et Fermi respectivement). Les particules sont classées dans l'une ou l'autre catégorie selon la valeur de leur « spin », un nombre associé à un espace mathématique abstrait utilisé pour décrire le comportement des particules. Les fermions ont un spin demi-entier (1/2 en l'occurrence) tandis que le spin des bosons est entier : 1 pour tous les bosons médiateurs des interactions fondamentales, 0 pour le boson de Higgs qui est vraiment une particule d'un type nouveau. Le fait qu'une particule soit un fermion ou un boson a des conséquences très importantes : on explique ainsi par exemple la structure en couche du nuage électronique de l'atome, due au fait que les électrons sont des fermions.

Dit autrement : les fermions sont « asociaux » (et participent donc au caractère « étendu » de la matière) tandis que les bosons sont « grégaires » (et contribuent donc au caractère « additif » des forces).

- Les découvertes de nouvelles particules peuvent-elles permettre des progrès en médecine ?

Ce sont les développements des outils pour la physique des particules qui trouvent des retombées dans le champ médical (imagerie médicale et traitement des cancers, voir plus haut). On utilise par exemple en radiothérapie des isotopes radioactifs artificiels créés dans des accélérateurs de particules dédiés. Plus généralement, les technologies développées en physique des hautes énergies ont des applications dans le domaine du médical, par exemple pour l'imagerie (anatomique et fonctionnelle).

- Le LHC peut-il faire avancer la théorie des cordes ?

Probablement pas... Ce qu'on peut affirmer aujourd'hui c'est que les cordes seraient des objets bien plus petits que l'échelle des distances à laquelle les expériences actuelles (au LHC et ailleurs) sont sensibles – et pas par un petit facteur : une quinzaine d'ordres de grandeur, soit un facteur un million de milliards ! Et donc il est difficile d'imaginer des méthodes pour tester les prédictions de cette théorie et vérifier ainsi si elle décrit ou non les lois de la Nature. Tant que cette étape n'aura pas été franchie, on ne pourra pas dire que la théorie des cordes est la bonne extension du Modèle Standard actuel. Paradoxalement, la cosmologie, c'est-à-dire l'étude de « l'infiniment grand », apparaît comme un meilleur champ pour tester cette théorie – là encore sans doute dans un futur lointain !

- Quelles sont les particules utilisées et pourquoi ?

Dans les accélérateurs on part toujours de particules de matière chargées qui existent à profusion dans la nature : typiquement des protons ou des électrons. Ensuite, si on souhaite construire un collisionneur, il est plus facile d'y réaliser des collisions entre particules et antiparticules. Ces dernières n'existant pas dans la nature, il faut les produire – généralement en envoyant un faisceau de particules sur une cible fixe faite par exemple de tungstène. Parmi les débris de ces chocs, on récupère des antiparticules qu'on sait ensuite isoler et préparer pour les collisions. Deux exemples de collisionneur matière-antimatière : le LEP au CERN (électron-positron) et le Tevatron près de Chicago au Laboratoire National Fermi (proton-antiproton).

Par contre, la production d'antimatière est un processus délicat et dont le rendement est faible (de l'ordre de 10^{-6}). Au LHC, les intensités de faisceaux sont tellement élevées qu'il aurait été impossible de produire suffisamment d'antiprotons. Il a donc été décidé de réaliser des collisions proton-proton, le prix à payer étant un accélérateur plus compliqué à concevoir pour arriver à faire tourner en sens contraires des particules identiques (deux faisceaux de protons) et donc de même charge électrique.

- Quel est le but de l'expérience réalisée au LHC ? Qu'a-t-elle permis à ce jour ? A quelle fréquence est-elle réalisée ?

Il y a quatre expériences principales sur le LHC :

- deux généralistes (ATLAS et CMS), qui étudient le boson de Higgs et recherchent des manifestations de nouvelle physique, notamment la production de particules encore jamais observées.
- L'expérience LHCb qui étudie plus spécifiquement les hadrons de saveur lourde, c'est-à-dire des particules composées de deux (les mésons) ou trois (les baryons) quarks dont l'un au moins est un quark lourd : le quark charmé ou le quark beau. Ces particules sont un excellent laboratoire pour tester le Modèle Standard avec précision et, pourquoi pas, découvrir la fameuse « nouvelle physique » que tout le monde cherche.
- Enfin, l'expérience ALICE qui prend des données lorsque des faisceaux d'ions plomb remplacent les protons dans le LHC (environ un mois par an). Ces collisions très énergétiques recréent un état très particulier de la matière, appelé le plasma de quarks et de gluons, qui aurait existé quelques instants après le Big Bang.

Lorsque le LHC est en fonctionnement habituel, jusqu'à 600 millions de collisions entre particules ont lieu au centre des détecteurs à chaque seconde. Seule une très faible fraction de ces événements (1 sur 10 000 environ), identifiés en temps réel comme potentiellement intéressants, est conservée et enregistrée sur disque pour analyse ultérieure.

7. Autres domaines

- Où va l'énergie dégagée par les collisions ?

Une partie de l'énergie de la collision est convertie en nouvelles particules, animées d'une certaine énergie cinétique. Et cette énergie de collision vient de l'énergie cinétique des particules incidentes, mais aussi parfois de leur énergies de masse ($E=mc^2$) quand les particules initiales s'annihilent. Les particules produites lors des collisions interagissent avec le détecteur, se désintègrent éventuellement en d'autres particules qui interagissent également avec le détecteur, etc. L'énergie totale de chaque collision est faible mais elle est concentrée dans un volume minuscule, ce qui crée des densités d'énergie colossales. Ce qui est sûr, c'est que l'énergie et l'impulsion sont conservées lors des collisions !

- Les collisions produites sont-elles dangereuses ?

Lorsque qu'un faisceau circule, un accélérateur de particules génère de la radioactivité. Son accès est donc formellement interdit (et sécurisé) pendant son fonctionnement. La radioactivité décroît avec le temps, le plus souvent assez rapidement. Au bout d'un temps d'attente allant de quelques minutes à quelques heures, on peut accéder à un accélérateur une fois la circulation des faisceaux interrompue. Les zones les plus radioactives sont clairement identifiées et restent inaccessibles le temps nécessaire. Chaque personne amenée à travailler sur un accélérateur porte sur elle un dosimètre qui mesure la dose accumulée au cours du temps. Les limites sont drastiques : au plus une faible fraction de la radioactivité naturelle et par exemple nettement moins que la dose absorbée au cours d'un simple vol long-courrier. De manière générale, la protection contre les rayonnements ionisants est basée sur trois piliers : rester le plus loin possible de la source radioactive ; limiter au maximum le temps d'exposition ; enfin, confiner la source et interposer un matériau protecteur entre elle et soi-même.

Le faisceau du LHC est très énergétique – l'équivalent de l'énergie cinétique d'un porte-avion de la seconde guerre mondiale. Son trajet est donc contrôlé de manière très précise et de nombreux systèmes de sécurité ont été mis en place pour éviter tout danger, tant pour l'accélérateur lui-même que pour les personnes situées à proximité. Lorsqu'il faut se débarrasser des faisceaux, les particules sont envoyées dans un « échappatoire » prévu à cet effet, un peu comme une voiture de course qui n'arriverait pas à prendre un virage serré sur un circuit. Là, l'énergie du faisceau est absorbée dans un énorme bloc composé principalement de graphite.

Au CERN (comme dans tous les laboratoires où des faisceaux de particules sont produits et utilisés pour des expériences), l'accès aux installations est très contrôlé. Seules les personnes formées à cet environnement de travail peuvent y accéder et de nombreux systèmes de sécurité sont en place : badges, clés, voire contrôles biométriques. Et, lorsqu'il y a du faisceau, les zones potentiellement dangereuses sont purement et simplement interdites : il est impossible d'ouvrir les portes qui y mènent !

- Quel est le coût du projet du LHC ?

La construction de l'accélérateur LHC a coûté un peu moins de 5 milliards de francs suisses, financés principalement par le CERN et quelques pays non-membres. La construction des expériences a coûté environ 1.2 milliard de francs suisses, financé pour 20% par le CERN et pour le reste par environ 600 laboratoires situés dans plus de 100 pays. Cela donne un coût de construction d'environ 6 milliards de francs suisses.

A cela il faut bien entendu ajouter les coûts d'opération, y compris les salaires des personnels qui travaillent sur ce projet. Le budget annuel du CERN est d'environ un milliard de francs suisses. L'essentiel du budget du CERN est utilisé pour construire des accélérateurs comme le LHC et pour les faire fonctionner.

La construction du LHC a été approuvée en 1994, elle a démarré au début des années 2000 (une fois l'accélérateur précédent, le LEP, démantelé) et la prise de données scientifiques a démarré au printemps 2010.

- Quel est le coût de fabrication du LHC ?

Voir question précédente. Le LHC n'a été et ne sera construit qu'à un seul exemplaire : séparer les coûts de développement, les coûts de construction et les coûts de fonctionnement n'a pas vraiment de sens.

- Quelle est l'origine du financement du LHC ?

Pour la part du CERN, le financement vient des contributions des 21 états membres (dont la France, l'un des douze états fondateurs du CERN en 1954), des états associés (dont les Etats-Unis, la Russie et le Japon) et des états observateurs. Ces contributions sont notamment financières mais elles peuvent aussi se traduire par la fourniture d'équipements et la mise à disposition de personnel. Pour les laboratoires, la source varie selon chaque pays mais est principalement lié aux financements publics pour la recherche fondamentale.

Member States	Candidate	Observer States
<ul style="list-style-type: none"> Austria Belgium Bulgaria Czech Republic Denmark Finland France Germany Greece Hungary Israel Italy Netherlands Norway Poland Portugal Slovak Republic Spain Sweden Switzerland United Kingdom 	<ul style="list-style-type: none"> Romania <p style="text-align: center;">Associate Members in the pre-stage to Membership</p> <ul style="list-style-type: none"> Serbia 	<ul style="list-style-type: none"> India Japan Russia Turkey USA <p style="text-align: center;">Other Observers</p> <ul style="list-style-type: none"> European Communities UNESCO
<p>Non-Member States with co-operation agreements</p> <p>Algeria - Argentina - Armenia - Australia - Azerbaijan - Belarus - Bolivia - Brazil - Canada - Chile - China - Colombia - Croatia - Cyprus - Ecuador - Egypt - Estonia - Georgia - Iceland - Iran - Jordan - Korea - Lithuania - Malta - Mexico - Montenegro - Morocco - New Zealand - Pakistan - Peru - Saudi Arabia - Slovenia - South Africa - The Former Yugoslav Republic of Macedonia - Ukraine - United Arab Emirates - Vietnam</p>		
<p>Other Non-Member States and territories with Scientific Contacts with CERN</p> <p>Cuba - Ghana - Ireland - Latvia - Lebanon - Madagascar - Malaysia - Mozambique - Palestinian Authority - Philippines - Qatar - Rwanda - Singapore - Sri Lanka - Taiwan - Thailand - Tunisia - Uzbekistan</p>		
<p>This page is maintained by DG-IR » contact information</p> <p>© CERN, 24 January 2014</p>		

- Quel est le coût de chaque expérience ?

La construction d'ATLAS a coûté 540 millions de francs suisses, celle de CMS a coûté 500 millions de francs suisses, celle d'ALICE a coûté 115 millions de francs suisse, et LHCb, quant à elle, a coûté 75 millions de francs suisse.

- Combien de personnes sont autorisées à utiliser le LHC ?

Assez peu par rapport au nombre de personnes dont le travail est en lien avec le LHC. Le complexe accélérateur du CERN et les détecteurs sont des instruments uniques et de haute technologie : ce sont donc des équipes spécialement entraînées qui les font fonctionner – un peu comme les pilotes d’avion, peu nombreux par rapport au nombre de personnes qui prennent l’avion. Par contre, chaque membre d’une collaboration donnée (ALICE, ATLAS, CMS et LHCb) a accès aux données de l’expérience : ce droit provient du travail qu’il effectue pour la collaboration, dont le succès dépend de la somme des contributions individuelles à sa bonne marche. Et au final, toutes les publications sont publiques, elles sont consultables en ligne.

- Comment fonctionne un accélérateur de particules ? De quelle manière les particules sont-elles accélérées ?

Schématiquement on part d’une source de particules chargées. Ces particules sont ensuite rassemblées en paquets denses, lesquels sont alors accélérés par des champs électriques et pilotés ou mis en forme par des champs magnétiques.

- Pourquoi l’accélérateur est-il construit sous terre ?

Pour plusieurs raisons : financière tout d’abord, car à 100 m sous terre on se trouve dans une couche géologique, la molasse, qui est plus facile à creuser que les couches supérieures. Cela coûte également moins cher de creuser un tunnel de 27 km que d’acquiescer tous les terrains en surface (de plus, accepteriez-vous de voir le LHC traverser votre jardin ?). Pour des raisons de protection ensuite : protection de la population contre les radiations issues de l’accélération des particules mais également protection des détecteurs contre le bruit de fond généré par les rayons cosmiques qui sont en grande partie absorbés par la couche de terre. Pour des raisons de stabilité géologique enfin : la finesse des faisceaux qui doivent se heurter de front exigent un niveau de stabilité qu’on ne peut pas obtenir près de la surface.

- Quelles dimensions fait le LHC ?

Le LHC est un anneau quasi-circulaire de 26,659 km de circonférence. Les particules passent par plusieurs accélérateurs successifs (le linac 2, le booster, le PS et le SPS) avant de pénétrer dans le LHC. L’accélération aux énergies record du LHC est un peu l’équivalent de la mise sur orbite d’un vaisseau spatial qui nécessite une fusée à plusieurs étages, chacun jouant un rôle précis dans le processus.

- Quel est l’intérêt du CERN ?

Les missions du CERN sont le progrès de la connaissance, les développements technologiques, la collaboration internationale et l’éducation.

- Quelle énergie utilise-t-on pour mettre en mouvement les particules ? De quelle grandeur est-elle ? Quelle est sa puissance ?

On utilise des champs électromagnétiques pour accélérer et piloter les particules. Les champs électriques accélérateurs dans le LHC sont de l’ordre de 5 MV/m. Un proton soumis à un champ d’un mégavolt sur un mètre gagne une énergie d’un MeV, soit environ l’équivalent d’un millième de son énergie de masse. C’est peu par rapport à l’énergie nominale du LHC, 7 millions de MeV par faisceau, mais un proton fait un peu plus de 11 000 tours du LHC par seconde et donc il lui faut moins d’un quart d’heure pour atteindre le niveau d’énergie souhaité. Les champs magnétiques peuvent atteindre 8 teslas et nécessitent des courants jusqu’à 11 000 ampères. Les aimants du LHC sont maintenus à une température de -271 degrés Celsius ce qui leur permet d’être supraconducteurs : le courant électrique y circule sans perte et peut donc atteindre des intensités record.

Au final, le LHC consommera environ 120 MW (230 MW pour tout le CERN, l'équivalent de la consommation des ménages du canton de Genève).

- De quels matériaux est constitué l'accélérateur de particules ?

Prenez un nanogramme de protons, faites-le circuler dans un vide presque parfait (dix fois meilleur que le vide régnant à la surface de la Lune), entourez le tout d'un tube de 27 km en acier inoxydable et vous avez le LHC ! Evidemment la réalité est bien plus complexe, vu les contraintes de température et de pression que doit satisfaire cette machine. Aller au-delà dépasserait largement le cadre de cette foire aux questions mais des informations bien plus détaillées sont disponibles sur internet – voir par exemple <http://www.lhc-france.fr/foire-aux-questions/l-accelerateur-41/fonctionnement-et-technologie-de-l>.

- Comment fonctionne le CERN ?

Le CERN est une organisation internationale, avec un « parlement », le Conseil, où siègent les 21 représentants des 21 Etats membres et qui décide de la stratégie, comme le programme de recherche et les développements de machines, et un « gouvernement », le Directeur général et son directoire, qui applique la stratégie. Le Directeur Général est nommé pour un mandat de cinq ans : il décide de la structure hiérarchique sous-jacente. Actuellement le CERN comporte huit départements regroupés en trois secteurs : Recherche et Informatique ; Accélérateurs et Technologie ; Administration et Infrastructure Générale. Le CERN emploie environ 2 200 personnes issues uniquement des pays membres et accueille plus de 10 000 scientifiques du monde entier. Son fonctionnement est proche de celui d'une grande entreprise.

- Quelles ont été les retombées technologiques de ces expérimentations ?

Question déjà abordée plusieurs fois !

- Quelle ont été les attentes des scientifiques par rapport à cette technologie ? Quelles questions pensaient-ils résoudre ?

Idem.

- Cette technologie permettrait-elle de résoudre des problèmes jusqu'alors irrésolus ?

C'est le genre de question à laquelle on ne peut répondre qu'a posteriori.

Décembre 2014.

Les réponses à ces questions ont été préparées par :

- Nicolas ARNAUD (narnaud@lal.in2p3.fr), chercheur au Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire (LAL, CNRS/IN2P3 et Université Paris-Sud)
- Sébastien DESCOTES-GENON (Sebastien.Descotes-Genon@th.u-psud.fr), chercheur au Laboratoire de Physique Théorique (LPT, CNRS et Université Paris-Sud)

avec l'aide de François BRIARD, Corinne PRALAVORIO et Laurianne TRIMOULLA du CERN – merci à eux trois !