

Les enjeux du nouveau collisionneur LHC

Aucune expérience de physique des particules n'a pu mettre en évidence de déviation significative par rapport au Modèle Standard. Les expériences qui seront menées à partir de 2007 auprès du Large Hadron Collider se donnent pour but d'en compléter l'exploration, en particulier en mettant en évidence le boson de Higgs, clef de voûte de notre compréhension de l'origine de la masse. En explorant une gamme d'énergie encore jamais atteinte (quelques TeV), elles tenteront aussi de mettre en évidence de nouveaux phénomènes. Nous décrivons ici le LHC et passons en revue son état d'avancement.

Alors que le LEP entreprenait l'étude des désintégrations du boson Z au début des années 1990, on commençait déjà à réfléchir à son successeur au CERN. En effet, l'évolution de la physique des particules a toujours été caractérisée par une montée progressive de l'énergie des collisions effectuées. Il était donc naturel de réfléchir bien avant la fin du LEP à un successeur d'énergie plus élevée, qui servirait soit à tenter de mettre en évidence une nouvelle physique si celle-ci n'était pas découverte auprès du LEP, soit à l'étudier plus avant dans le cas contraire. Les réflexions ont débouché sur un collisionneur proton-proton, le LHC (Large Hadron Collider), installé au CERN dans le tunnel du LEP (voir figure 1).

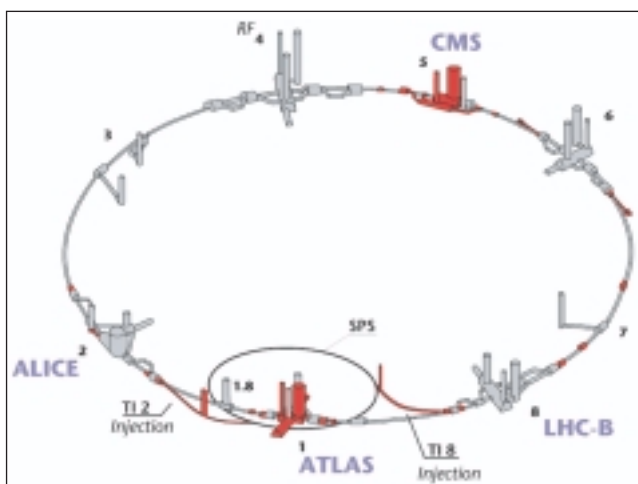


Figure 1 - Les infrastructures associées au LEP et au LHC, avec les emplacements destinés à chaque expérience (© CERN).

Pour obtenir des collisions à une énergie plus élevée que celle du LEP, il est nécessaire d'augmenter la puissance accélératrice. Or, la puissance perdue par les particules (et qu'il faut donc injecter en permanence dans l'accélérateur) est proportionnelle à la puissance quatrième du rapport entre l'énergie du faisceau et la masse des particules accélérées et inversement proportionnelle au rayon de l'accélérateur.

Augmenter la puissance accélératrice ne mène donc pas loin, étant donné l'augmentation très rapide du coût énergétique de l'opération : doubler l'énergie du faisceau implique de multiplier la dépense d'énergie par seize. Une autre solution est d'augmenter le rayon de l'accélérateur, ce qui pose là aussi des problèmes pratiques très difficiles à résoudre pour aller au-delà de la taille de l'anneau du LEP. Une échappatoire à ces problèmes peut être trouvée dans le développement de collisionneurs linéaires électrons-positons. Plusieurs projets de ce type sont en cours d'étude.

Il est aussi possible de changer le type de particules accélérées, en utilisant des protons au lieu des électrons et positons. Les protons étant 2 000 fois plus lourds que les électrons, ils perdent 10^{13} fois moins d'énergie par tour que les électrons, pour une énergie de faisceau donnée. Il est donc possible avec des protons, en utilisant la technologie disponible à l'heure actuelle, d'atteindre une énergie par faisceau de 7 TeV, et c'est le choix qui a été fait pour le LHC. Comme les protons sont des objets composites, constitués de quarks et de gluons, et non pas des objets élémentaires comme les électrons et positons, chaque collision proton-proton sera en fait une collision entre deux constituants appartenant à l'un et à l'autre proton. On observera donc des collisions quark-quark, quark-gluon ou gluon-gluon. Chaque quark ou gluon ne portant qu'une fraction de l'im-

Article proposé par :

Philippe Schwemling, schwemli@lpnhep.in2p3.fr, Laboratoire physique nucléaire et hautes énergies (LPNHE), CNRS/Université Pierre et Marie Curie.

pulsion totale des 7 TeV des protons du faisceau, en pratique le LHC permettra d'explorer un domaine d'énergie allant jusqu'à 2-3 TeV. Par ailleurs, on ne sait pas collision par collision quelle est la fraction d'impulsion mise en jeu, ni quelle est la nature précise (quark ou gluon) des particules ayant interagi. Cette relative ignorance de l'état initial par rapport aux collisionneurs e^+e^- rendra plus complexe qu'au LEP la compréhension des phénomènes observés.

Caractéristiques du LHC

Une caractéristique essentielle du LHC sera son importante luminosité, 100 à 1 000 fois plus importante que celle de toutes les machines du même type qui l'ont précédé. La probabilité élémentaire d'interaction (ou section efficace) est fixée par la nature, alors que la luminosité dépend de l'accélérateur, et le taux observé d'événements est le produit des deux (voir encadré 1 de l'article de P. Janot). Comme la section efficace des processus physiques que l'on veut étudier auprès du LHC est extrêmement faible il faut une luminosité élevée, et donc beaucoup de particules par faisceau, et une taille transverse faible. Outre les processus intéressants, potentiellement porteurs de découvertes, se produiront inévitablement des interactions beaucoup plus probables (avec des sections efficaces jusqu'à 10^9 fois plus importantes), bien connues et donc moins intéressantes. Pour voir quelques événements intéressants, il faudra donc étudier un très grand nombre d'interactions. Par ailleurs, les interactions entre le faisceau et la structure de la machine posent de délicats problèmes d'ingénierie, liés en particulier à la minimisation du taux de création d'ions parasites dans le tube à vide, et à l'échauffement de la structure. (Voir encadré 1).

La construction du LHC s'accompagne de développements technologiques importants. Ainsi, pour maintenir les protons sur leur trajectoire, il faut produire un champ magnétique de l'ordre de 8 Tesla sur une fraction appréciable de la circonférence de l'accélérateur. Ceci sera effectué par 1 232 aimants dipolaires supraconducteurs d'une quinzaine de mètres de long chacun, refroidis à 1,8 K par de l'hélium superfluide. La mise au point de ces aimants aura été une étape importante du projet. De même, bien des tech-

nologies qui seront utilisées par la machine (cryogénie, ultra-vide), déjà utilisées et connues par le passé, auront nécessité des études importantes pour les valider ou les adapter au cadre du LHC. Les études sont souvent menées en collaboration avec des industriels, lesquels effectuent ensuite la production des éléments ainsi développés. Très souvent, de tels contrats apportent à l'industrie la motivation et les moyens d'acquérir de nouvelles compétences ou de développer de nouveaux produits.

Actuellement, la construction du LHC est bien avancée. Le tunnel du LEP est prêt à recevoir le LHC, et la production en série des différents éléments nécessaires à l'accélérateur, entamée vers 2001, progresse conformément au calendrier actuel, qui prévoit le démarrage de l'accélérateur pour 2007. Ainsi, le tiers des aimants dipolaires servant à courber la trajectoire du faisceau a déjà été produit, et le rythme de la production continue à augmenter régulièrement.

La physique auprès du LHC

Quels seront les thèmes de physique étudiés auprès du LHC ? Après le superbe effort mené auprès du LEP pour éprouver en détail le Modèle Standard et découvrir le boson de Higgs ou la supersymétrie, les physiciens auront pour but premier avec le LHC de pousser le Modèle Standard dans ses derniers retranchements. Une des priorités sera la recherche du boson de Higgs, pierre angulaire de notre compréhension actuelle de l'origine de la masse des particules élémentaires. Les états finals attendus à la suite des désintégrations de bosons de Higgs sont divers, et sont plus ou moins faciles à distinguer du bruit de fond selon la masse du boson de Higgs. Ainsi, pour un boson de Higgs de masse plutôt faible, inférieure à $130 \text{ GeV}/c^2$, l'état final le plus favorable est constitué de deux photons isolés. Pour des masses plus élevées, jusqu'à environ $1 \text{ TeV}/c^2$, peuvent être exploitées les désintégrations $H \rightarrow ZZ \rightarrow \ell\ell\ell'\ell'$ ou $H \rightarrow \ell\ell\nu\bar{\nu}$ (ℓ et ℓ' pouvant être des muons ou des électrons, et ν des neutrinos), $H \rightarrow WW \rightarrow \ell\nu jj$, ℓ et ν provenant de la désintégration du premier W , et jj correspondant aux deux jets de particules manifestant la désintégration du deuxième W en une paire de

Encadré 1

Quelques ordres de grandeur sur le LHC

- Circonférence : 26,659 km
- Energie cinétique stockée par faisceau (à 7 TeV) : 350 MJ. A titre de comparaison, l'énergie cinétique d'un TGV de 500 tonnes lancé à 300 km/h est de 1750 MJ.
- Energie magnétique stockée dans les dipôles : 8 600 MJ (7 MJ/aimant, pour un courant de 11850 A)
- Nombre total de protons dans l'anneau : $3,23 \times 10^{14}$, soit $3 \times 10^{-16} \text{ kg}$

- Intensité électrique correspondante : 0,582 A.
- Puissance émise par le faisceau sous forme de rayonnement de freinage : 3,8 kW. Le rayonnement de freinage est émis par les particules chargées lorsqu'elles sont soumises à une accélération.
- Puissance de refroidissement cryogénique : environ 240 MW
- Température des aimants (refroidis à l'Helium superfluide) : 1,8 K

quarks. La figure 2, issue d'études menées sur des données simulées, montre qu'ATLAS n'aura pas de difficultés à découvrir le boson de Higgs avec les données prises durant les trois premières années, même si sa masse est dans la gamme où la découverte est la plus difficile, c'est-à-dire en-dessous d'environ 200 GeV/c² (seuil en-deçà duquel la désintégration en ZZ ou WW est impossible). Des estimations comparables existent pour l'expérience CMS.

Des considérations théoriques rendant difficiles l'existence d'un boson de Higgs de masse plus élevée, une non-découverte nous indiquerait l'existence de profondes difficultés dans les modèles actuels.

Comme cela a été fait auprès du LEP, beaucoup d'études tenteront d'aller au-delà du Modèle Standard et de mettre en évidence phénomènes physiques et nouvelles particules prévues par les théories qui tentent de remédier aux « imperfections » du Modèle Standard (voir article de J. Iliopoulos). Ainsi, on espère bien mettre en évidence la supersymétrie si elle existe. Les manifestations expérimentales de la supersymétrie pourraient être assez spectaculaires, car elle se trahira par des états finals très peu probables pour des processus dus au seul Modèle Standard. Les interactions qui produisent des particules supersymétriques peuvent comporter après désintégration un nombre important de leptons (trois ou plus) et une forte énergie manquante dans le bilan énergétique de l'interaction, l'énergie manquante étant due à une des particules supersymétriques qui s'échappe du détecteur sans interagir avec celui-ci (voir encadré 2 de l'article de P. Janot).

Des dimensions supplémentaires d'espace pourraient être mises en évidence par le LHC. Elles se traduiraient selon leur type par la déviation du taux de production de particules ordinaires (paires de quarks ou de leptons) par rapport aux prédictions du Modèle Standard, ou par l'observation d'énergie manquante (correspondant à un graviton s'échappant du détecteur sans interagir) associée à des jets ou des photons de haute énergie, voire par l'observation de résonances de gravitons se désintégrant en paires de W, de Z ou de fermions.

De manière plus classique, la luminosité importante du LHC permettra l'étude fine des propriétés de l'interaction forte. Le LHC produira aussi de très grandes quantités de particules déjà connues, mais dont les propriétés gagneront à être inspectées en détail. De petites déviations par rapport au Modèle Standard pourraient en effet se révéler extrêmement précieuses pour nous indiquer dans quelle direction chercher de nouveaux phénomènes. A ce titre, l'étude des propriétés des quarks lourds top, bottom et du boson vecteur W est essentielle. En particulier, la mesure précise de la masse du boson W (à 15 MeV près, soit $1,8 \times 10^{-4}$) et du quark top (à 1 GeV près, soit 0,6 %) permettra, comme cela a été fait auprès du LEP et au Tevatron (voir article de P. Janot) de préciser la masse du boson de Higgs s'il n'est pas découvert auparavant par une observation directe, et donc d'orienter l'étude des données.

Les désintégrations des quarks b manifestent une dissymétrie fondamentale des processus physiques par rapport au renversement du sens d'écoulement du temps. L'étude fine de cette dissymétrie, possible au LHC, ouvre la perspective de découvertes de phénomènes au-delà du Modèle Standard. L'expérience LHCb a été tout particulièrement optimisée et conçue en vue de l'étude de ces phénomènes.

Le LHC pourra également effectuer des collisions d'ions lourds, en particulier plomb-plomb. De telles interactions permettront l'étude d'un plasma de quarks et de gluons et du comportement de la matière nucléaire aux temps proches du Big-Bang. De manière plus exotique, certains théoriciens prévoient la formation de minuscules trous noirs, heureusement sans danger, car s'évaporant instantanément par l'intermédiaire du rayonnement de Hawking.

Durant les années passées les théoriciens ont mené un important travail de compréhension des interactions proton-proton et ion-ion. Le but est de prédire les caractéristiques des bruits de fonds dus au Modèle Standard lors de la recherche de nouveaux phénomènes, et d'évaluer les caractéristiques de la production de W, Z, t etc. afin de permettre aux expérimentateurs d'évaluer la précision et la difficulté de chaque mesure. A partir des informations données par les modèles théoriques, les expérimentateurs ont quant à eux mené un effort de simulation des interactions proton-proton au sein de chaque détecteur, afin de s'assurer que les performances obtenues seront suffisantes et que les algorithmes d'analyse et de reconstruction des données sont suffisamment maîtrisés pour mener à bien les recherches de physique. L'ensemble des informations et les ordres de grandeur qui ont été donnés ici proviennent de ces travaux.

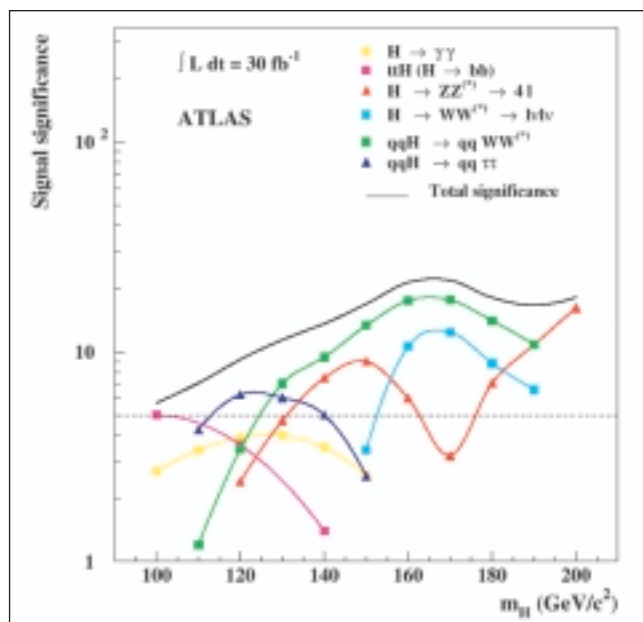


Figure 2 - Potentiel de découverte du boson de Higgs en trois ans pour ATLAS (luminosité intégrée 30 fb^{-1}), en utilisant plusieurs voies de désintégration. Le potentiel de découverte (« signification » sur la figure) est égal au nombre d'événements de signal divisé par la racine carrée du nombre d'événements de bruit de fond. Un potentiel de découverte plus grand que 5 (ligne pointillée) est considéré comme conduisant à une découverte assurée, s'il existe effectivement.

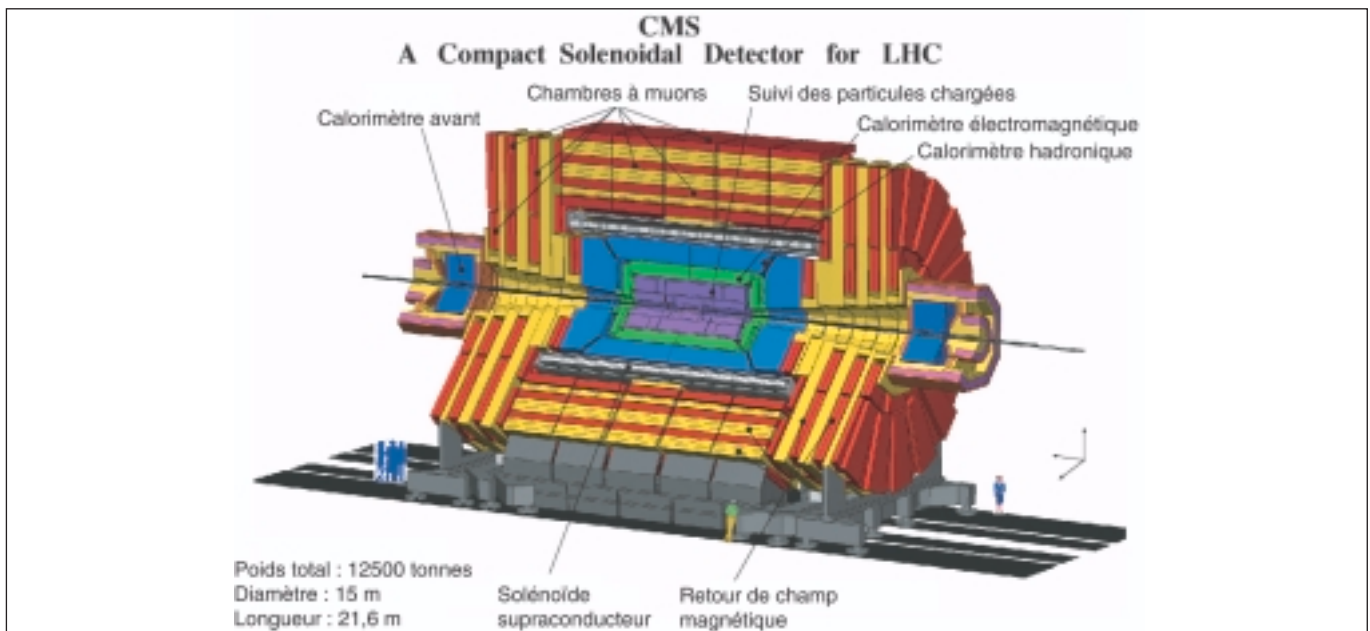


Figure 3 - Vue d'ensemble du détecteur CMS (© CERN).

Les détecteurs

Les caractéristiques des collisions proton-proton auprès du LHC, et en particulier la luminosité importante ont imposé de très fortes contraintes sur la conception des détecteurs. La luminosité s'est traduite par la nécessité de détecteurs à l'électronique extrêmement rapide, capable de traiter en temps réel le milliard d'interactions se produisant chaque seconde, à intervalles de 25 ns, et d'en extraire les quelques interactions les plus intéressantes. La forte luminosité implique aussi le choix de techniques de détection et la conception de systèmes électroniques résistant aux radiations. En effet, on s'attend à des doses allant de quelques Gray¹ à des centaines de milliers de Gray selon la position par rapport au point d'interaction, et à un flux annuel de neutrons allant jusqu'à 10^{14} par cm^2 , ce qui est bien au-delà des doses pouvant être supportées sans problème par les technologies courantes. La quantité de rayonnement émise aux alentours du détecteur a par ailleurs comme conséquence pratique que l'accès ne sera pas possible en cours de fonctionnement de l'accélérateur, par exemple pour réparer ou changer une partie défectueuse. Il faut donc construire et préparer les détecteurs en mettant en œuvre des procédures de contrôle de qualité et de suivi de production extrêmement sévères, proches dans le principe de celles utilisées dans l'industrie spatiale, où se pose le même problème d'accès en cours de fonctionnement.

Les détecteurs installés auprès du LHC seront au nombre de cinq : ALICE, ATLAS, CMS, LHCb, TOTEM. Les détecteurs ATLAS et CMS sont multi-usages, tout particulièrement optimisés pour l'étude des interactions proton-proton et la recherche de nouvelle physique. Le détecteur

ALICE est optimisé pour l'étude des interactions entre ions lourds, alors que LHCb est quant à lui conçu pour l'étude des désintégrations de quarks b . Enfin, l'expérience TOTEM a pour but la mesure de la section efficace totale d'interaction proton-proton. Dans la suite, nous nous concentrerons sur ATLAS et CMS.

Ces deux détecteurs (figure 3, pour CMS) sont constitués d'une partie centrale cylindrique et de deux disques servant à fermer les extrémités du cylindre central. Une telle géométrie permet de réduire le plus possible la portion d'angle solide non instrumenté autour du point d'interaction. Les conceptions d'ALICE et de LHCb sont différentes (voir encadré 2). Les détecteurs sont volumineux : CMS pèse 12 500 tonnes pour 22 mètres de long et 15 mètres de diamètre, ATLAS pèse 7 000 tonnes, pour 44 mètres de long et 20 m de diamètre.

Les détecteurs ATLAS et CMS disposent tous les deux d'un système de détection des particules chargées. Cet ensemble de détection est entouré d'un aimant servant à courber les trajectoires de ces particules pour en mesurer l'impulsion, et de détecteurs appelés calorimètres, absorbant l'énergie totale des particules, afin de la mesurer. Chaque détecteur comporte deux calorimètres : le premier, dit électromagnétique, mesure l'énergie déposée par les électrons et photons. Le second, dit calorimètre hadronique, mesure l'énergie déposée par les autres particules, essentiellement des hadrons. Enfin, derrière les calorimètres se situe un ensemble de détecteurs suivant la trajectoire des muons, seules particules chargées capables de traverser l'ensemble des systèmes de détection précédents (voir l'encadré 2 de l'article de P. Janot).

Les choix effectués dans la conception d'ATLAS et de CMS, et donc les risques technologiques associés sont assez

1. Gray = 1 joule/kg

Expériences généralistes/expériences spécialisées

Les expériences multi-usages auprès du LHC, comme ATLAS et CMS, sont conçues de façon à fournir le maximum d'informations sur les interactions qui se produisent en leur centre, afin d'étudier les phénomènes physiques prévisibles tout en ayant la capacité de détecter l'inattendu. C'est pourquoi elles comportent de multiples sous-détecteurs complexes et sont construites de manière à couvrir la plus grande fraction possible de l'angle solide. Elles sont de ce point de vue très comparables aux expériences ayant pris leurs données auprès du LEP (voir encadré 2 de l'article de P. Janot). Ainsi, elles comportent au centre un système de détection des traces chargées baignant dans un champ magnétique. Ce système est entouré par des calorimètres, destinés à mesurer l'éner-

gie des photons, électrons, hadrons et jets de particules. L'ensemble comporte enfin un système de suivi des muons, seules particules chargées capables de traverser l'ensemble des détecteurs précédents sans être arrêtées.

Les expériences spécialisées sont quant à elles optimisées pour l'étude d'un thème de physique précis. Elles comportent donc uniquement les détecteurs utiles pour le thème de physique envisagé, et ceux-ci sont pensés en vue des caractéristiques des événements attendus. Ainsi, elles ne couvrent pas toujours tout l'angle solide, et peuvent aussi comporter des détecteurs spécifiques (par exemple, un détecteur Cherenkov dédié à l'identification des particules dans le cas de LHCb).

différents. Ceci est un gage de sécurité et de possibilité de recoupement ultérieur lors de l'analyse des données.

Dans le cas d'ATLAS, le système de suivi des particules chargées est constitué pour la partie la plus centrale de détecteurs au silicium à pixels, puis en allant de l'intérieur vers l'extérieur, de fins rubans gravés sur le semi-conducteur et constituant des diodes détectrices. Ces détecteurs sont basés sur le savoir-faire technologique acquis lors de la construction des expériences auprès du LEP ou du Tevatron. Les couches les plus externes, disposées à l'intérieur de la bobine magnétique supraconductrice, sont constituées d'un détecteur à rayonnement de transition, émis lorsqu'une particule traverse l'interface entre deux milieux de permittivités électriques différentes. Dans le cas de CMS, l'ensemble du détecteur de traces est basé sur une technologie au silicium. Chacun de ces dispositifs possède plusieurs millions de canaux de lecture et comporte plusieurs dizaines de m² de silicium. Par rapport aux détecteurs du LEP, cela représente dix fois plus de surface et de canaux, dans un environnement incomparablement plus difficile, du fait du taux de radiations et du nombre d'interactions à traiter.

La calorimétrie électromagnétique d'ATLAS est basée sur la mesure de l'ionisation provoquée par les particules dans un empilement de plomb et d'argon liquide. Ce type de détecteur offre les avantages d'une réponse linéaire très uniforme et d'une grande résistance aux radiations. Dans ATLAS, ce détecteur a un diamètre de 2,5 m, et pèse environ 200 tonnes. Le calorimètre hadronique d'ATLAS est composé pour sa partie centrale de 2 900 tonnes d'un sandwich fer/scintillateur plastique, le scintillateur convertissant en lumière (détectée par des tubes photomultiplicateurs) l'énergie déposée en son sein. La partie avant du calorimètre hadronique d'ATLAS est en cuivre et argon liquide.

Le calorimètre électromagnétique de CMS est composé de cristaux scintillants en tungstate de plomb. Ce détecteur a l'avantage de posséder une excellente résolution en énergie. Quant à la calorimétrie hadronique de CMS, elle est basée sur un sandwich laiton-scintillateur.

Les impulsions des muons sont mesurées pour ATLAS par un spectromètre à muons comportant des plans de chambres à dérive. Il est équipé de bobines toroïdales. L'impulsion des muons est mesurée par CMS à l'aide de chambres situées à l'extérieur des calorimètres, la structure métallique du calorimètre hadronique servant de retour de champ pour le solénoïde central. Le champ magnétique du solénoïde supraconducteur de CMS est particulièrement intense (4 Tesla), comparé à celui du solénoïde d'ATLAS (2 Teslas).

Etat d'avancement de la construction

Après plusieurs années consacrées au développement et à la validation des techniques de détection, en particulier avec des programmes intensifs de tests à l'aide de faisceaux de particules, la construction des divers éléments des détecteurs a commencé aux alentours de l'année 2000.

Certaines parties des détecteurs sont prêtes à être installées auprès du LHC. C'est en particulier le cas des calorimètres hadroniques de CMS et d'ATLAS, ainsi que du calorimètre électromagnétique d'ATLAS. Les autres éléments sont en cours de production et d'assemblage, et tout laisse à penser que l'installation des détecteurs sera terminée en 2007.

Après la construction des détecteurs eux-mêmes, subsistent encore nombre d'études à mener, touchant à l'acquisition et à l'analyse des données. Il faut maintenant construire le système de déclenchement et d'acquisition, dont le rôle est de décider en temps réel à partir des informations brutes provenant de chaque détecteur quelles sont les interactions possédant des caractéristiques intéressantes, telles que la présence de leptons ou de jets de haute énergie. Le système de déclenchement et d'acquisition met en œuvre une série de filtres logiciels et électroniques. Des algorithmes de plus en plus sophistiqués sont appliqués au passage de chaque filtre. Ils nécessitent de plus en plus de temps d'exécution, mais traitent un volume de données de plus en plus réduit,

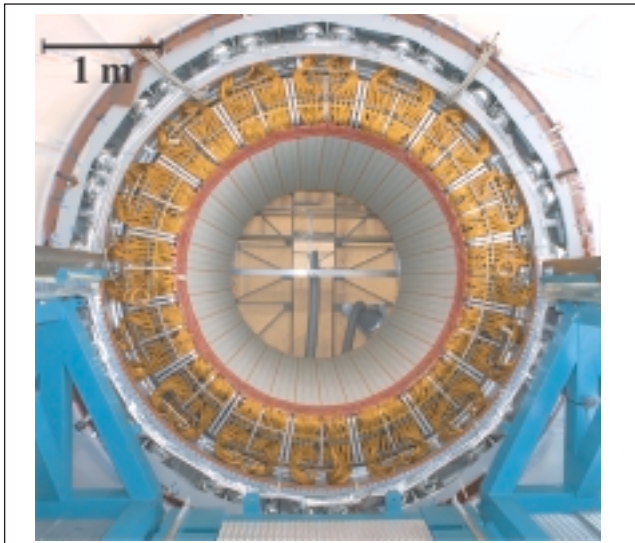


Figure 4 - Vue de la partie centrale du calorimètre électromagnétique central d'ATLAS en cours d'insertion dans son cryostat (© CERN).

les interactions les moins intéressantes étant progressivement filtrées et rejetées. Chaque seconde, le système d'acquisition traitera ainsi un volume de données de l'ordre de 500 Gbit qu'il est impensable d'enregistrer directement, pour en extraire les 3 Gbits les plus intéressants, lesquels seront écrits sur disque. Etant donné les volumes de données à gérer et à traiter, les collaborations suivent avec la plus grande attention l'évolution des capacités de stockage et de calcul informatique. La puissance de calcul nécessaire à l'analyse des données, combinée à la nécessité de répartir l'effort sur toute la planète, conduisent également au déploiement de grilles de calcul (GRID), réseaux de calcu-

lateurs permettant aux utilisateurs de disposer de manière transparente de puissance de calcul.

Les difficultés techniques de réalisation, l'échelle de temps sur laquelle se réalisent des projets comme le LHC et les détecteurs associés, la nécessité de produire des éléments de détecteur de la plus haute qualité en assurant leur traçabilité sur une durée de plusieurs années imposent aux équipes une organisation de type industriel. Ainsi, les collaborations sont dirigées de manière démocratique par des assemblées issues de l'ensemble des chercheurs, élues ou cooptées par leurs pairs pour leurs compétences scientifiques, techniques, ainsi que pour leurs qualités humaines, essentielles pour maintenir la cohésion d'une communauté de plusieurs milliers de physiciens et d'ingénieurs de dizaines de nationalités et de cultures différentes. L'activité de recherche au sein de telles expériences a donc la particularité de comporter souvent des aspects extrêmement techniques, indispensables à la mise en place puis au bon fonctionnement de l'expérience. L'étude des thèmes de physique est elle aussi effectuée au sein de groupes de travail qui mettent en place une structure de coordination, indispensable étant donné la complexité générale du détecteur et l'impossibilité pour chaque chercheur d'en comprendre tous les détails. Une telle façon de travailler peut être vue comme dévalorisante par des esprits imprégnés du fantasme du physicien génial, effectuant à lui tout seul une découverte fondamentale. Il ne faut en tout cas pas perdre de vue à quel point la compétition est vive, génératrice de progrès personnel pour chacun et stimulante au sein de grandes collaborations. Ces grandes expériences sont aussi un des rares espaces de ce monde où passent au second plan tous les cliques, et où tous cherchent à progresser vers un but commun, quelle que soit la culture ou la nationalité.

Encadré 3

Financement et coût du LHC

Le coût du LHC est de 2 milliards d'euros. A titre de comparaison, un porte avion comme le Charles de Gaulle vaut 3 milliards d'euros, et la construction d'un campus universitaire neuf représente environ 200 millions d'euros.

Le coût du LHC est payé par les 20 états membres du CERN, par l'intermédiaire de leur contribution au budget du CERN. Pour la France, cette contribution est de 16%. Certains états non membres (en particulier les USA) participent aux programmes et payent également une part du LHC. Enfin, outre leurs contribu-

tions financières, certains états (dont la France) contribuent « en nature », par la fourniture directe d'équipements destinés au LHC, ou par la mise à disposition de personnel technique qualifié. Le coût des expériences est de 310 millions d'euros chacune pour ATLAS et CMS (environ 100 k euros par chercheur, pour un retour espéré de l'ordre du millier de publications par expérience), et il est supporté directement par les états impliqués dans les expériences, en-dehors de leur contribution au CERN. Le CNRS contribue à ce titre pour environ 40 M euros.

Pour en savoir plus

Sites web des expériences LHC

<http://www.cern.ch/Atlas>

<http://cmsinfo.cern.ch/>

<http://alice.web.cern.ch/>

<http://lhcb.cern.ch/lhcb>

<http://totem.web.cern.ch/Totem/>