

# Rapport annuel **2016**



# SOMMAIRE

*Le CERN, Organisation européenne pour la Recherche nucléaire, est le plus grand laboratoire de recherche en physique des particules du monde. Son complexe d'accélérateurs unique permet de mener des recherches aux limites des connaissances dans le domaine de la physique fondamentale, pour comprendre de quoi l'Univers est fait et comment il fonctionne.*

*Créé en 1954, le CERN compte aujourd'hui 22 États membres. D'autres États contribuent à l'Organisation et participent à ses programmes de recherche. Le Laboratoire est devenu un remarquable exemple de collaboration internationale, rassemblant des personnes du monde entier dans le but de repousser les limites de la science et de la technologie, dans l'intérêt de tous.*





## MESSAGE DU PRÉSIDENT DU CONSEIL

Le CERN a commencé l'année 2016 avec une nouvelle directrice générale et un nouveau président du Conseil : un cas de figure rare, qui m'a permis de nouer une relation forte avec la nouvelle équipe dirigeante. Au fil des mois, le Conseil et la Direction ont collaboré dans un esprit d'ouverture et de transparence pour faire progresser le travail du Laboratoire.

Cette année restera sans doute marquée par les performances exceptionnelles du LHC, de l'ensemble de la chaîne d'accélérateurs, des expériences et de l'informatique. De cette harmonie parfaite ont découlé des résultats scientifiques de haut niveau. Si le LHC a pu voir le jour grâce aux ressources de nombreux pays, ces résultats n'auraient pu être obtenus sans la conjonction d'efforts individuels. Ce travail mérite d'être salué, c'est pourquoi je tiens à remercier, au nom de l'ensemble des membres du Conseil, toutes les personnes qui ont contribué à faire de 2016 une année aussi réussie.

L'envergure du programme du CERN a permis d'obtenir de nombreux nouveaux résultats dans des domaines de recherche variés, qu'il s'agisse des expériences menées auprès du Décélérateur d'antiprotons et de l'installation à faisceaux radioactifs ISOLDE, de l'expérience AWAKE sur l'accélération par champ de sillage plasma entraînée par des protons, ou encore de l'expérience CLOUD pour la recherche sur le climat. Ces expériences, qui, pour la plupart, ne peuvent être réalisées qu'au CERN, illustrent les efforts faits par l'Organisation pour utiliser au mieux son infrastructure et ses ressources afin de faire progresser la science.

En ce qui concerne l'activité du Conseil, le principal accomplissement de 2016 a été d'assurer le succès futur du LHC en approuvant officiellement le projet LHC à haute luminosité. Cette machine, dont la mise en service est prévue en 2025, permettra aux expériences LHC d'améliorer la précision de leurs résultats et augmentera le potentiel de découvertes jusqu'en 2035.

Le Conseil a également procédé aux premiers préparatifs de la prochaine mise à jour de la stratégie européenne pour la physique des particules afin d'assurer l'avenir de l'ensemble des recherches menées au CERN. Le travail est à présent

lancé, et une grande partie des informations attendues devraient être présentées avant la fin 2018, les discussions au sein de la communauté européenne de la physique des particules étant prévues pour 2019. La stratégie mise à jour sera présentée au Conseil au printemps 2020.

Cette année, le CERN a accueilli un nouvel État membre : la Roumanie. Chypre a accédé au statut d'État membre associé en phase préalable à l'adhésion, et l'Ukraine est devenue État membre associé. Le Conseil a également voté en faveur de l'admission de la Slovaquie en tant qu'État membre associé en phase préalable à l'adhésion, et de l'Inde en tant qu'État membre associé. Les autorités nationales de ces pays devraient ratifier les accords correspondants en 2017. Je me félicite de voir la famille du CERN s'agrandir. La collaboration est la force vive du progrès, et il est toujours gratifiant de constater que l'idéal poursuivi par le CERN, à savoir réunir les nations et les peuples, reste d'actualité dans un monde en mutation constante. C'est unis que nous pourrions faire de grandes choses.

Pour terminer, je souhaiterais mentionner deux de mes collègues du Conseil. En 2016, Tatsuya Nakada et Charlotte Jamieson ont quitté respectivement la présidence du Comité des directives scientifiques et du Comité des finances. Je les remercie chaleureusement pour leurs nombreuses années de service, et souhaite la bienvenue à Keith Ellis et Ossi Malmberg, leurs successeurs.

Lorsque j'ai été élu président du Conseil, en septembre 2015, j'avais déclaré que le CERN était une entreprise ambitieuse, en mesure de faire avancer la physique des particules grâce au LHC. Un an plus tard, cela me semble plus vrai que jamais.

Sijbrand de Jong

## MESSAGE DE LA DIRECTRICE GÉNÉRALE

L'année 2016 a été un excellent cru pour la recherche au CERN et l'ensemble des activités de l'Organisation. Elle a commencé par un changement organisationnel engagé par la nouvelle Direction, avec la création du secteur Relations internationales, qui recouvre les relations avec les États membres, l'élargissement géographique, ainsi que l'éducation, la communication et les activités grand public, et qui vient s'ajouter aux trois secteurs existants du CERN (Recherche et informatique, Accélérateurs et technologie, Finances et ressources humaines).

Le LHC a dépassé sa luminosité nominale et fonctionné avec la régularité d'un métronome. Alimenté par les injecteurs, il a fourni des données pour la physique pendant la moitié de sa durée d'exploitation : un exploit inédit pour un accélérateur, qui plus est aussi complexe. Les expériences ATLAS et CMS ont ainsi pu dépasser de plus de 50 % leur objectif de données enregistrées sur l'année, et l'ensemble des expériences LHC ont pu bénéficier d'importantes ressources pour la recherche d'une nouvelle physique et les études sur la physique connue avec une précision toujours plus grande. Lorsque le volume de données augmente, l'infrastructure informatique doit relever de nouveaux défis ; celle-ci a admirablement fonctionné en 2016, avec 50 pétaoctets de données du LHC enregistrés, un débit de transfert de données moyen de 35 gigaoctets par seconde et deux millions de calculs effectués par jour. Meilleure précision rime avec davantage de travail pour les théoriciens, qui doivent fournir des calculs de plus en plus pointus pour permettre des comparaisons avec les résultats des expériences. Le LHC n'a pas été le seul à produire une moisson de résultats passionnants. L'expérience ALPHA a effectué la première mesure de raies spectrales d'antihydrogène, et l'expérience CLOUD a continué de produire des données intéressantes pour la modélisation climatique. L'extension du hall de la zone Nord, qui abrite une partie de la plateforme neutrino du CERN, a été achevée, et les travaux de rénovation, de développement et de construction de détecteurs pour les expériences neutrino aux États-Unis et au Japon ont remarquablement progressé.

La pleine exploitation du LHC demeure notre priorité à court et moyen termes, et je remercie le Conseil du CERN d'avoir



approuvé formellement le projet LHC à haute luminosité. Une facilité de crédit obtenue cette année auprès de la Banque européenne d'investissement permettra de financer ce projet dans le cadre d'un budget constant, sans compromettre ni retarder le reste du programme scientifique. Les projets CLIC, FCC et AWAKE ont aussi enregistré des avancées importantes, AWAKE ayant démontré que le phénomène d'automodulation des faisceaux de protons qui traversent une cellule à plasma constitue la première étape de l'accélération d'un faisceau d'électrons par champ de sillage plasma.

L'éducation et la formation restent des éléments phare du programme du CERN. En 2016, quelque 1 600 boursiers, doctorants et étudiants d'été ont suivi une formation de haute qualité grâce à un large éventail de programmes. La barre des 10 000 participants a été franchie pour les programmes destinés aux enseignants du secondaire, et le nombre de visiteurs venant au CERN ne cesse d'augmenter - plus de 120 000 en 2016.

Tout cela ne serait pas possible sans notre engagement à observer les normes les plus strictes en matière de santé, de sécurité et de protection de l'environnement. L'année 2016 n'a pas fait exception, avec la création d'un comité directeur pour la protection de l'environnement et la réalisation de progrès considérables en ce qui concerne l'élimination des déchets radioactifs de faible activité.

Enfin, la famille du CERN a continué de s'agrandir en 2016, la Roumanie étant devenue le 22<sup>e</sup> État membre. Chypre a obtenu le statut d'État membre associé en phase préalable à l'adhésion et l'Ukraine est devenue État membre associé.

Tout ceci ne constitue qu'un bref aperçu du programme du CERN, à la fois riche et passionnant. J'espère que vous prendrez plaisir à en découvrir davantage au fil des pages de ce rapport.

Fabiola Gianotti

# 2016 EN IMAGES

Des prouesses du Grand collisionneur de hadrons à l'agrandissement de la famille du CERN, en passant par des centaines de nouveaux résultats de physique et par les visites de nombreuses personnalités, retour en images sur les temps forts du Laboratoire en 2016.

## 20 JANVIER



La Présidente de la Lituanie, Dalia Grybauskaitė, rend visite au CERN et découvre les expériences du laboratoire pour les écoles, S'Cool LAB.

## 15 FÉVRIER



Fabiola Gianotti, directrice générale du CERN, inaugure la grande conférence médicale co-organisée par le CERN. « *Physics for Health in Europe* » mise sur l'interdisciplinarité en réunissant physiciens, ingénieurs, médecins et informaticiens pour trouver des solutions innovantes pour l'imagerie médicale et le traitement des cancers.

## 23 JANVIER



Muhammad Nawaz Sharif (au centre), premier ministre du Pakistan, admire l'expérience CMS, guidé par Tiziano Camporesi (à droite), porte-parole de l'expérience. Le Pakistan est devenu État membre associé du CERN en 2015.



## 24 MARS

Johann Schneider-Ammann, président de la Confédération suisse, signe le livre d'or du CERN aux côtés de la Directrice générale.

## 25 MARS

Les particules circulent à nouveau dans le LHC, qui reprend du service en 2016. Après quelques semaines, les faisceaux montent en intensité et les expériences prennent des données (voir p. 21).



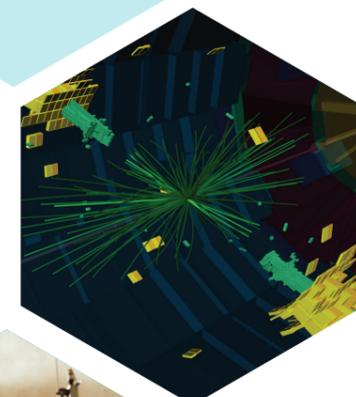
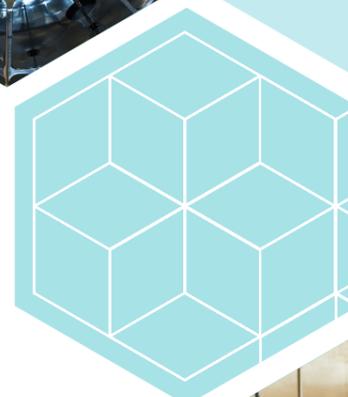
## 25 MAI

L'expérience CLOUD publie de nouveaux résultats sur la formation et la croissance des particules d'aérosol dans l'atmosphère, à l'origine des nuages. Ils laissent entrevoir un climat plus nuageux que prévu pendant l'ère préindustrielle (voir p. 17).



## 26 JUIN

La luminosité nominale du LHC est dépassée pour la première fois. La luminosité mesure l'efficacité d'un collisionneur et est proportionnelle au nombre de collisions délivrées aux expériences (voir p. 21).



## 4 AVRIL

La République de Chypre devient État membre associé du CERN en phase préalable à l'adhésion, suite à la ratification par son Parlement de l'accord signé quatre ans plus tôt. George Pamboridis, ministre de la Santé de Chypre, rend visite au CERN en mai. Il est ici entouré de Charlotte Warakaulle, directrice des relations internationales, et de Frédérick Bordry, directeur des accélérateurs.



## 17 JUIN

L'expérience AWAKE reçoit son tout premier faisceau de particules. Ce projet étudie une nouvelle technique d'accélération pour les accélérateurs du futur (voir p. 49).



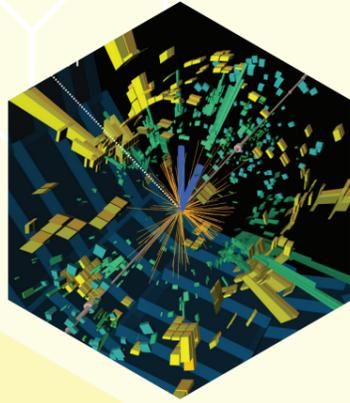
### 28 JUIN

L'expérience LHCb observe trois nouvelles particules exotiques et confirme l'existence d'une quatrième. Elles sont formées de deux quarks et deux antiquarks (voir p. 16).



### 19, 21 JUILLET ET 13 SEPTEMBRE

Quand la physique rencontre la musique... Le célèbre groupe de rock Muse, avec son chanteur Matt Belamy (à gauche), découvre les coulisses de la science au Centre de contrôle du CERN. Deux jours plus tard, les quatre membres du groupe anglais Bastille (en haut à gauche) visitent le hall des expériences sur l'antimatière. En septembre, le CERN reçoit la visite du groupe canadien Nickelback (au centre).



### 5 AOÛT

En route pour Chicago ! Les physiciens des particules se réunissent aux États-Unis pour leur grand rendez-vous bisannuel, la Conférence internationale sur la physique des hautes énergies ICHEP. Grâce à la formidable performance du Grand collisionneur de hadrons (LHC), les expériences ont enregistré de grandes quantités de données et peuvent présenter une centaine de nouveaux résultats.

### 10 AOÛT

La collaboration MoEDAL fête la publication de ses premiers résultats de physique. L'expérience recherche une particule hypothétique, le monopôle magnétique (voir p. 15).



### 16 SEPTEMBRE

Les élèves des deux équipes gagnantes de l'édition 2016 du concours *Ligne de faisceau pour les écoles*, venus de Pologne et du Royaume-Uni, sont accueillis durant une semaine pour mener leur expérience sur un accélérateur du CERN.



### 5 SEPTEMBRE

La famille du CERN s'agrandit ! Le Laboratoire accueille la Roumanie en tant que 22<sup>e</sup> État membre. Le drapeau bleu, jaune et rouge est hissé aux côtés de ceux des 21 autres États membres en présence du Président du Conseil du CERN, Sijbrand de Jong, de la Directrice générale du CERN, Fabiola Gianotti, du Président de la Roumanie, Klaus Iohannis, et du ministre de l'Éducation et de la Recherche scientifique roumain, Mircea Dumitru.

### 30 SEPTEMBRE

Quelque 600 personnes se pressent au Globe de la science et de l'innovation et dans le Centre de visite de l'expérience ATLAS à l'occasion de la *Nuit européenne des chercheurs*.

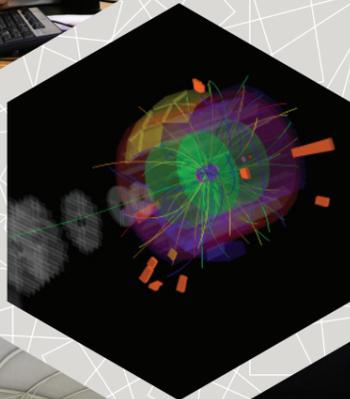


### 5 OCTOBRE

L'Ukraine devient État membre associé du CERN, suite à la ratification par son Parlement de l'accord signé en octobre 2013.

## 10 OCTOBRE

UNOSAT, le programme des applications satellitaires opérationnelles de l'Institut des Nations Unies pour la formation et la recherche, fête ses 15 ans. UNOSAT utilise les infrastructures du Centre de calcul du CERN à des fins humanitaires, en produisant des cartes géographiques très précises de régions du monde touchées par une catastrophe naturelle ou un conflit.



## 25 OCTOBRE

Le Linac 4 accélère son premier faisceau à l'énergie nominale de 160 MeV. L'accélérateur sera connecté à la chaîne des accélérateurs du CERN en 2019 (voir p. 46).



## 3 NOVEMBRE

L'expérience ASACUSA, consacrée à l'antimatière, annonce une nouvelle mesure de précision de la masse de l'antiproton par rapport à celle de l'électron (voir p. 17).

## 5 NOVEMBRE

Sur le thème « Vagues de curiosité », l'édition 2016 de TEDxCERN réunit douze personnalités pionnières dans leur domaine scientifique : leurs idées ont formé des vagues de changements (voir p. 38).

## 10 NOVEMBRE

Les noyaux d'atomes de plomb entament leur course dans le Grand collisionneur de hadrons (LHC). Jusqu'à l'arrêt technique hivernal, l'exploitation du LHC est consacrée aux collisions entre protons et ions plomb. Ci-contre, l'une des premières collisions visualisée par l'expérience ALICE.

## 21 NOVEMBRE

Fabiola Gianotti, directrice générale du CERN, et Sekhar Basu, président de la Commission de l'énergie atomique et secrétaire du département de l'énergie atomique (DAE) de l'Inde, signent un accord en vue d'octroyer à l'Inde le statut d'État membre associé du CERN.



## 30 NOVEMBRE

SESAME boucle la boucle. L'accélérateur du Centre international de rayonnement synchrotron pour les sciences expérimentales et appliquées au Moyen-Orient, qui fait collaborer de nombreux pays de la région, est en place. En juillet, le premier synchrotron du Moyen-Orient, installé en Jordanie, lançait le premier appel à propositions pour des expériences qui débiteront en 2017. Le CERN a contribué au projet en développant les aimants dans le cadre du projet CESSAMag, cofinancé par la Commission européenne.

## 19 DÉCEMBRE

L'expérience ALPHA, consacrée à l'antimatière, observe pour la première fois le spectre de lumière de l'antimatière (voir p.17).



## 16 DÉCEMBRE

La ministre de l'Éducation, de la Science et des Sports de la Slovénie, Maja Makovec Brenčič (à gauche), et la Directrice générale du CERN, Fabiola Gianotti, signent un accord au terme duquel la République de Slovénie deviendra État membre associé en phase préalable à l'adhésion.



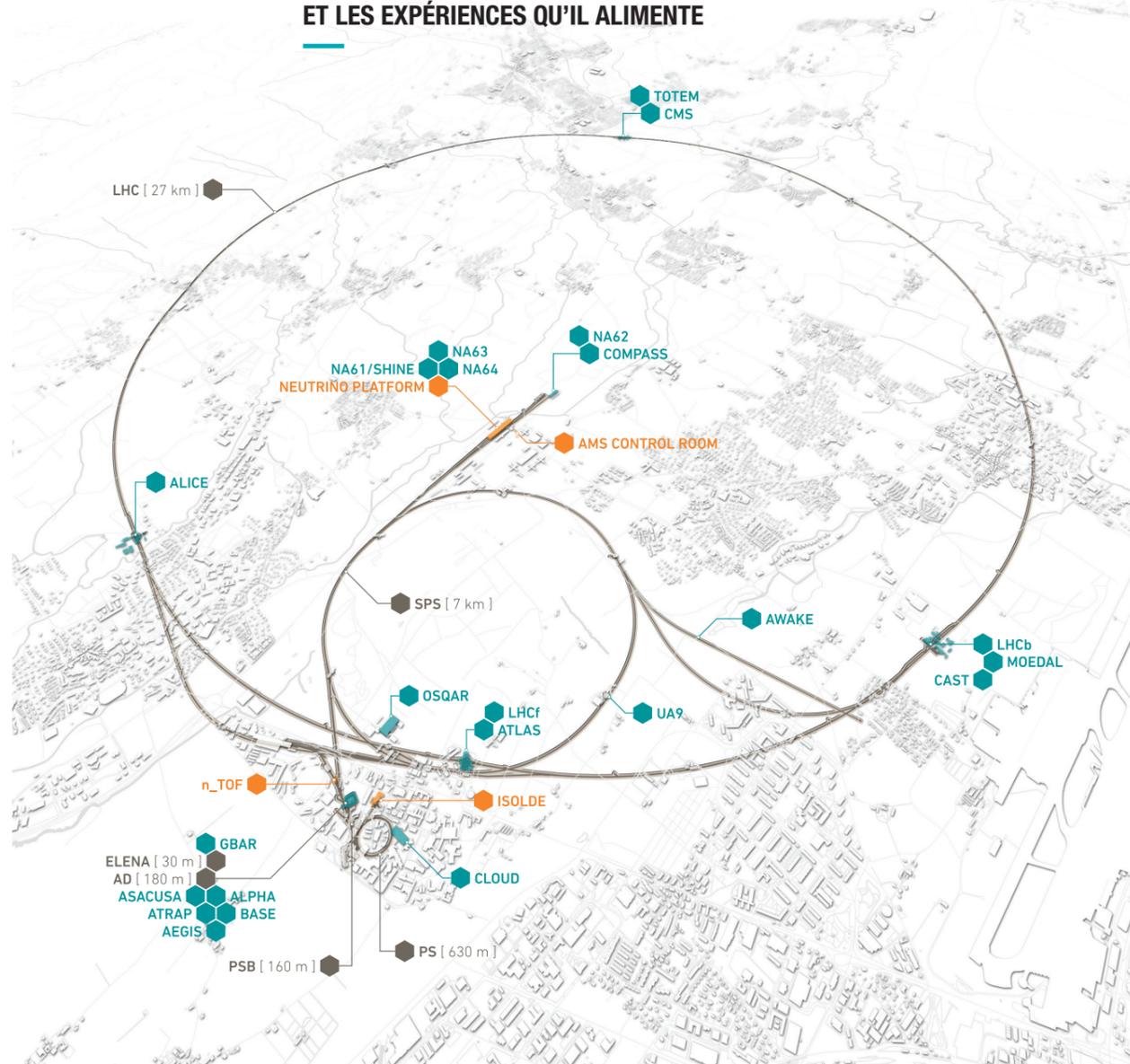
## 19 DÉCEMBRE

Arturo Cabrera (à gauche), représentant permanent adjoint de l'Équateur auprès de l'Office des Nations Unies et des autres organisations internationales à Genève, et Eckhard Elsen, directeur de la recherche et de l'informatique au CERN, se félicitent du don de matériel informatique à un établissement d'enseignement équatorien, le dixième de ce type. Grâce à ce matériel, l'École polytechnique nationale mettra en place un centre de données qui fera partie de la Grille de calcul mondiale pour le LHC (WLCG).

# EXPLORER LA NATURE DE L'UNIVERS

*Pour explorer l'infiniment petit, des physiciens du monde entier étudient au CERN des collisions de particules produites par des accélérateurs. Le Laboratoire compte un grand nombre d'expériences qui mènent des recherches pour mieux comprendre les constituants fondamentaux de la nature et les lois qui les régissent.*

## LE COMPLEXE D'ACCÉLÉRATEURS DU CERN ET LES EXPÉRIENCES QU'IL ALIMENTE

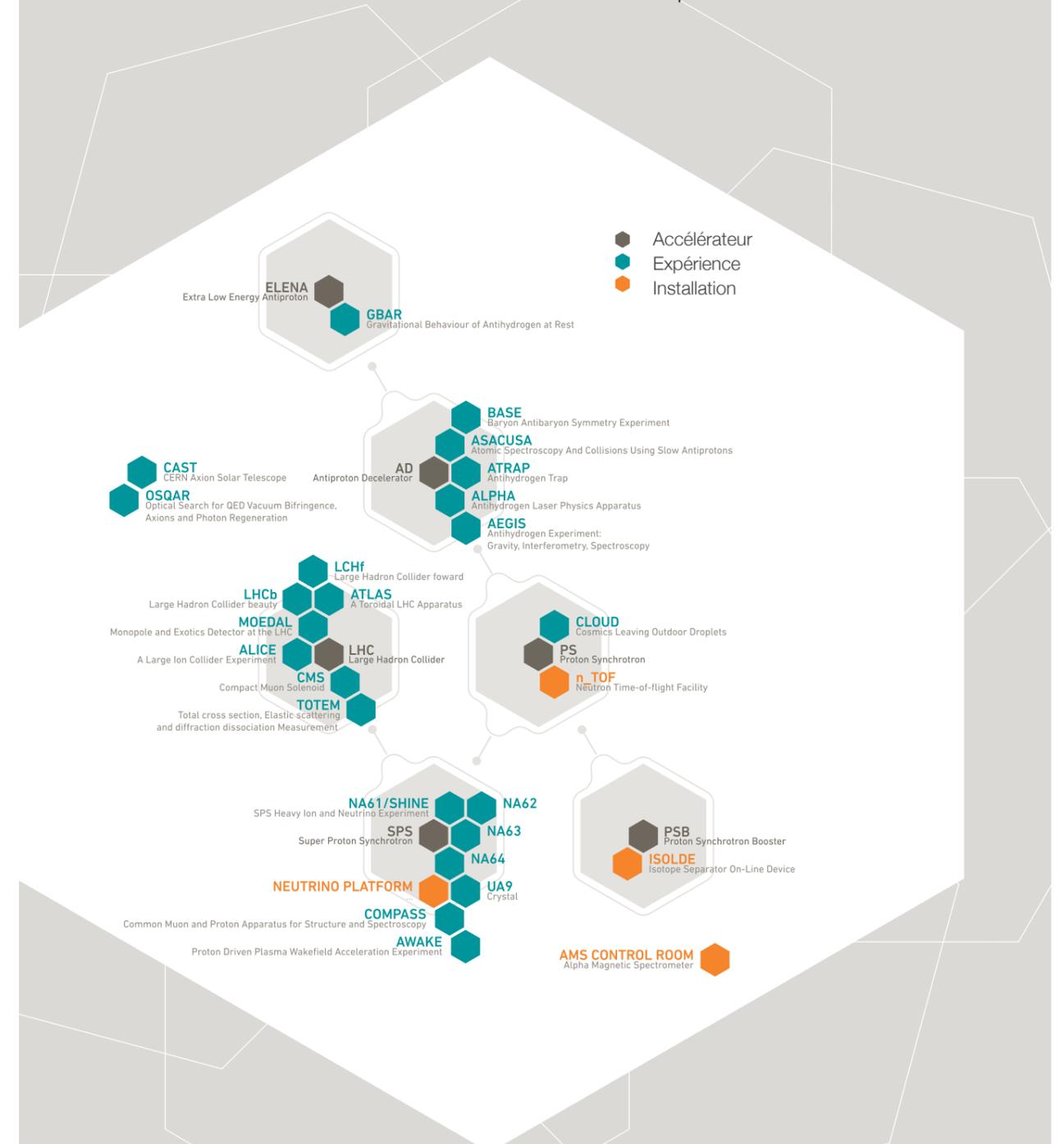


Le Grand collisionneur de hadrons (LHC) est le collisionneur le plus puissant jamais construit ; il concentre une énergie de plusieurs téraélectronvolts (TeV) dans un minuscule espace d'un milliardième de milliardième de millimètre, ce qui permet aux physiciens d'explorer un territoire subatomique inconnu.

Installé dans un tunnel souterrain de 27 kilomètres de circonférence, le LHC génère chaque jour des dizaines de milliers de milliards de collisions proton-proton au centre de quatre grands détecteurs, ALICE, ATLAS, CMS et LHCb. Grâce aux excellents résultats du LHC en 2016 (voir p. 21), les expériences ont recueilli plus de 50 % de données de plus que prévu.

Des centaines d'analyses de physique ont été entreprises et plus de 300 publications scientifiques ont été produites par les expériences LHC pendant l'année ; plus de 100 nouveaux résultats ont été validés pour la conférence ICHEP qui s'est tenue mi-2016 à Chicago.

Le LHC ne pourrait toutefois pas fonctionner sans les accélérateurs plus petits qui l'alimentent et qui sont également utilisés par diverses expériences hors LHC ; celles-ci peuvent aller des tests de haute sensibilité sur l'antimatière à des mesures précises sur la formation des nuages dans l'atmosphère. Leurs résultats illustrent la richesse du programme de physique du CERN, qui a pour mission de comprendre les lois fondamentales de l'Univers.



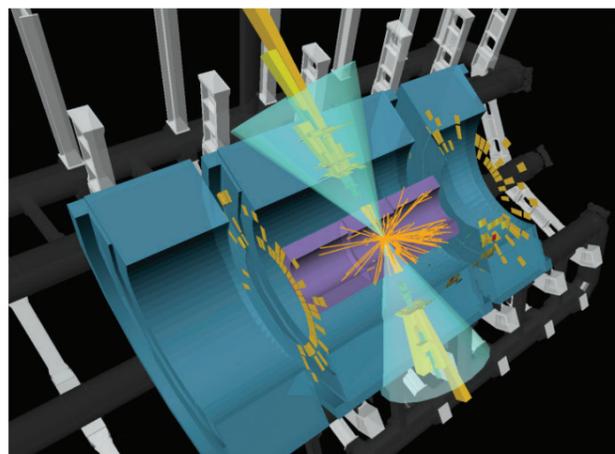


Des physiciens des expériences LHC discutent les analyses de données. Environ 10 000 physiciens participent à ces expériences. (OPEN-PHO-EXP-2017-002-1)

## AUX FRONTIÈRES DE L'ÉNERGIE

Le Modèle standard de la physique des particules regroupe l'ensemble des connaissances actuelles sur le comportement des particules élémentaires. Les physiciens ont pourtant de bonnes raisons de penser qu'il existe de nouvelles particules au-delà de celles décrites par le Modèle standard, d'autant que celui-ci ne décrit que 5 % de l'Univers (le reste étant composé de matière noire, invisible, et d'énergie noire). En 2016, deuxième année d'exploitation à l'énergie de 13 TeV, les expériences LHC ont poursuivi les recherches de nouveaux phénomènes, la caractérisation du boson de Higgs à 13 TeV et la compréhension des performances de leurs détecteurs à une énergie plus élevée. Les expériences polyvalentes ATLAS et CMS sont idéales pour chercher des signes directs de nouvelles particules. Leurs résultats concernant une « bosse » intrigante, observée pour la première fois dans les données de 2015 et semblant signaler la présence d'une particule d'environ 750 GeV de masse, étaient très attendus. L'analyse des données de 2016 a toutefois révélé que cette bosse était une fluctuation statistique ; elle a néanmoins mis en effervescence la communauté des théoriciens et fait redoubler les efforts pour rechercher de nouveaux phénomènes dans cette région de masses.

ATLAS et CMS ont également présenté des résultats sur de nombreux autres phénomènes nouveaux, qui pourraient par exemple être liés à des dimensions supplémentaires de l'espace ou à de nouvelles symétries fondamentales de la nature. La recherche de particules supersymétriques dans les données, avec notamment de nouvelles limites



Un événement « dijet » sélectionné par ATLAS dans sa quête de phénomènes nouveaux. Les deux jets centraux (jaune) ont une masse combinée de 4,6 TeV. On y voit également les dépôts d'énergie dans les calorimètres et les trajectoires reconstituées dans le détecteur interne. (ATLAS-PHOTO-2016-014-8)

de production pour les « gluinos » et les « squarks » et les premières limites pour les neutralinos (partenaires supersymétriques des bosons de jauge neutres, du photon et de la particule de Higgs) à 13 TeV, a déjà repoussé les limites des masses au-delà de celles définies à des énergies de 7 et 8 TeV pendant la première exploitation du LHC, entre 2010 et 2013. D'autres recherches ont porté sur de possibles nouveaux bosons de Higgs aux propriétés différentes. Des recherches plus générales sur la nouvelle physique, par exemple la quête de résonances « dijet » et « dilepton », de particules lourdes à longue durée de vie, et de candidats à la matière noire, ont aussi avancé. Aucune trace n'ayant été détectée, ATLAS et CMS ont pu restreindre les propriétés possibles de ces particules.

L'expérience MoEDAL, à côté de LHCb, a publié les résultats de sa quête des monopôles magnétiques, particules portant une charge magnétique unique prédites par Paul Dirac dans les années 1930. Aucun monopôle n'ayant été observé, la collaboration MoEDAL a présenté des limites inédites sur la production de certains types de ces particules hypothétiques. Le LHC a fonctionné jusqu'en décembre, et les expériences LHC ont poursuivi l'analyse des données, en quête d'indices de l'existence de nouvelles particules et de nouveaux phénomènes.

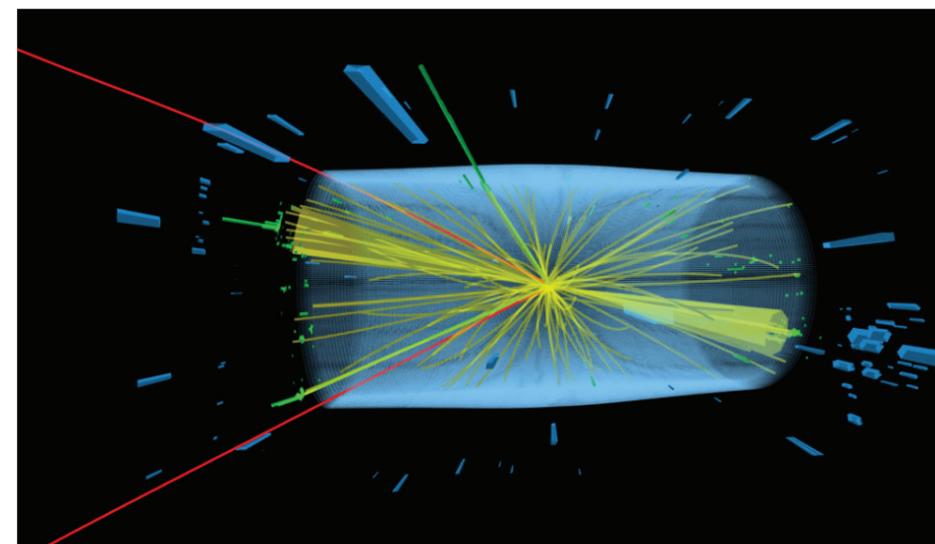
## LE BOSON DE HIGGS ET LE MODÈLE STANDARD

Découvert par ATLAS et CMS en 2012, presque 50 ans après avoir été prédit, le boson de Higgs est la dernière pièce du puzzle du Modèle standard. C'est aussi une particule scalaire, élément fondamentalement différent des autres particules telles que les quarks, et donc lié à de nombreuses questions ouvertes de la physique. D'abord repéré à une énergie de 8 TeV pendant la première période d'exploitation du LHC, le boson de Higgs a été observé à nouveau par ATLAS et CMS lors de la deuxième période, à 13 TeV, au taux prédit par le Modèle standard et avec un niveau de signification total supérieur. Vu la nature unique de ce boson, les principaux objectifs sont maintenant d'observer de nouveaux modes de sa production et de sa désintégration, et d'obtenir des mesures plus précises de ses couplages avec les autres particules. De nombreuses mesures ont été présentées cette année par ATLAS et CMS, en particulier lors de la conférence ICHEP. Elles ont confirmé les conclusions selon lesquelles, dans la limite des incertitudes statistiques actuelles, les propriétés du boson de Higgs observé sont telles que prédites par le Modèle standard.

Plusieurs mesures précises d'autres processus du Modèle standard ont été réalisées à partir des données de la première exploitation, un ensemble de données très bien connu et étalonné, y compris des mesures à quelques pour cent près de sections efficaces inclusives, qui ont exigé

des théoriciens des calculs de l'ordre sous-sous dominant. ATLAS a aussi annoncé la première mesure de la masse du boson W à partir des données du LHC avec une précision de 0,023 %, précision semblable à celle de la meilleure mesure unique obtenue par d'autres collisionneurs. Les deux expériences ont publié de nouvelles mesures du quark top, dont sa masse, sa largeur et la section efficace de la production de paires. Le quark top, particule élémentaire la plus lourde, présente un intérêt particulier pour la recherche de nouveaux phénomènes. Vu le volume de données recueilli lors de la deuxième période d'exploitation, les études de précision pourront progresser encore et permettre de vérifier tout écart entre théorie et expérimentation susceptible d'être un signe de physique au-delà du Modèle standard.

LHCb, qui étudie les particules contenant des quarks beauté, cherche des failles dans les processus du Modèle standard. L'énergie plus élevée de la deuxième exploitation ayant entraîné une augmentation de la section efficace des hadrons de saveurs beauté et charme, l'expérience a plus que doublé le nombre de désintégrations recueillies et obtenu de nouveaux résultats qui améliorent la précision des mesures dans le domaine des saveurs. LHCb a par exemple réalisé la première observation de la désintégration très rare  $B^0 \rightarrow K^+K^-$ , avec un rapport d'embranchement de  $8 \times 10^{-8}$ , soit la désintégration de beauté purement hadronique la plus rare jamais observée. La collaboration a également rapporté la première mesure de la polarisation du photon dans les désintégrations de mésons  $B_s$ . Elle étudie encore des écarts, par rapport au Modèle standard, de variables du domaine des saveurs, intrigants mais encore peu significatifs. En 2016, NA62 a débuté la prise de données. L'expérience produit des kaons grâce à un faisceau de protons du Supersynchrotron à protons (SPS) pour chercher des désintégrations extrêmement rares. Les désintégrations de kaons étant prédites précisément par le Modèle standard, tout écart entre les taux prédits et les mesures peut avoir des conséquences, en particulier pour la symétrie CP (charge et parité). NA62 a recueilli un gros volume de données, correspondant à presque 10 % des statistiques totales nécessaires, et fonctionnera encore au moins deux ans.



Collision proton-proton à 13 TeV dans le détecteur CMS, montrant des signes caractéristiques de la désintégration d'un boson de Higgs en deux électrons de haute énergie (vert), deux muons de haute énergie (rouge) et deux jets de haute énergie (cônes jaunes). (CMS-PHO-EVENTS-2016-007-3)

## La théorie a le vent en poupe

En 2016, le département de théorie a obtenu d'importants résultats, donnant lieu à 262 publications, dans divers domaines : la prédiction théorique la plus précise de la section efficace de production du boson de Higgs, qui constitue une contribution significative à la physique du LHC ; l'analyse systématique des effets non linéaires dans les oscillations acoustiques baryoniques, qui sont des observables cruciaux en cosmologie pour l'étude de l'énergie noire et de la

contrainte de masse sur les neutrinos ; la détermination précise du contenu en photons des protons de haute énergie, qui contribue à réduire les incertitudes sur certaines prédictions théoriques en rapport avec la physique du LHC ; l'exploration des théories de démultiplication « *clockwork* », qui proposent un mécanisme induisant la production de particules plus légères en raison d'une atténuation exponentielle des interactions. Le CERN est un centre névralgique pour la communauté mondiale de la théorie. Il a accueilli 772 scientifiques,

cinq instituts de théorie et huit ateliers en 2016. Les membres de l'équipe Théorie ont contribué à tous les groupes de travail sur la physique du LHC et ont dirigé des recherches importantes sur les possibilités de physique d'un collisionneur de hadrons de 100 TeV dans le cadre d'une étude sur un futur collisionneur circulaire. Ils sont également à l'origine d'initiatives pour lancer de nouvelles recherches de physique, à la fois dans le cadre de la plateforme neutrino et du groupe de travail sur la physique au-delà des collisionneurs (voir p. 48 et 49).

## UNE PHYSIQUE FORTE

La force forte, qui assure la cohésion des protons et des autres hadrons, est un sujet complexe. L'étude de sa nature, décrit par la chromodynamique quantique (QCD, un pilier du Modèle standard), permet aux physiciens d'étendre leur connaissance de la matière nucléaire et d'enquêter sur la boule de feu chaude et dense apparue immédiatement après le Big Bang, il y a 13,7 milliards d'années. Pour étudier ce plasma quarks-gluons, ils font entrer en collision dans le LHC des particules plus lourdes, en général des ions plomb. Un plasma quarks-gluons est alors formé, pendant moins de  $10^{-22}$  seconde, puis ce système en interaction se refroidit et se désintègre en hadrons. Ce bref moment laisse néanmoins une empreinte significative sur les distributions de particules de l'état final mesurées par les détecteurs.

L'expérience ALICE utilise les exploitations avec des ions lourds pour tenter de décrire l'évolution du plasma quarks-gluons. En 2016, la collaboration a présenté 25 articles et préparé environ 30 nouveaux résultats, présentés lors de conférences de premier plan sur les ions lourds. Ces résultats couvraient trois grands thèmes. Le premier concerne les anisotropies azimutales dans la production de particules se formant en raison du flux du plasma quarks-gluons, sur lesquelles ALICE a publié des premiers résultats issus des données de la deuxième exploitation, et des mesures plus précises des corrélations des anisotropies azimutales, permettant de faire la distinction entre les contributions des premières étapes de la collision et la dynamique du flux du plasma quarks-gluons. Le deuxième porte sur des mesures des quarkoniums, états liés de quarks lourds, qui se dissolvent dans le plasma quarks-gluons chaud, mais qui peuvent aussi être formés par la recombinaison d'un quark charmé et d'un anti-quark charmé dans le plasma quarks-gluons. Le troisième thème concerne les mesures par « sonde dure », qui utilisent des particules énergétiques et des jets pour étudier le plasma quarks-gluons.

Toutes les mesures montrent que l'énergie de collision plus élevée de la deuxième exploitation (5,02 TeV par paire de nucléons, contre 2,76 TeV lors de la première exploitation)

produit un plasma quarks-gluons plus chaud, dont la durée de vie pourrait être légèrement plus longue. Les mesures plus précises du flux et des corrélations du flux permettent d'identifier d'autres propriétés du plasma quarks-gluons, notamment sa viscosité, avec une précision croissante. Les quatre expériences LHC participent désormais au programme d'ions lourds. Cette année, ATLAS a détecté la diffusion lumière-lumière dans les puissants champs électriques générés lors de collisions périphériques d'ions lourds, et CMS a présenté plusieurs résultats, parmi lesquels l'observation de propriétés collectives dans des collisions proton-proton et une étude des effets anormaux de chiralité dans les collisions proton-plomb.

D'autres expériences étudient les motifs des hadrons issus du plasma quarks-gluons. La plupart sont des cousins exotiques de particules nucléaires connues qui composent la matière ordinaire. En 2016, LHCb a annoncé l'observation de trois nouveaux hadrons exotiques et confirmé l'existence d'un quatrième en analysant l'intégralité des données de la première exploitation. Ces particules seraient des « tétraquarks », formés de deux quarks et deux antiquarks, nouvel état dont l'interprétation théorique est encore à l'étude. LHCb et CMS ont conjointement recherché, sans confirmer son existence, un tétraquark repéré récemment par l'expérience D0 au Fermilab, aux États-Unis.

Le détecteur LHCb dans sa caverne. (CERN-PHOTO-201609-209-2)



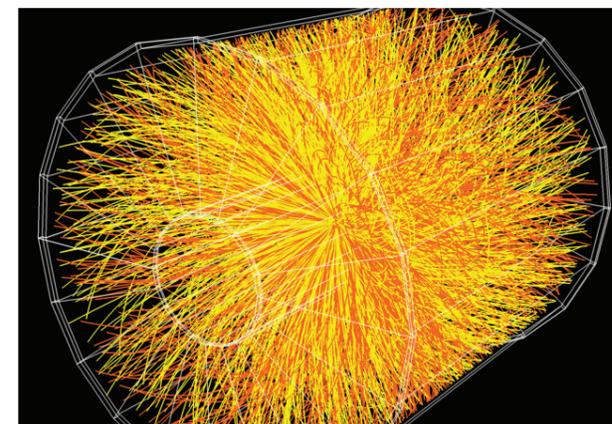
Les faisceaux de particules du Synchrotron à protons (PS) sont injectés dans l'environnement contrôlé et ultra-propre de CLOUD afin de simuler l'ensemencement des nuages. (CERN-EX-1310264-03)

## CLOUD fait progresser la climatologie

À l'avenir, les prévisions climatiques reposeront sur des bases empiriques plus solides grâce à des mesures de la production et du taux de croissance des particules d'aérosol de l'atmosphère publiées en 2016 par l'expérience CLOUD (*Cosmics Leaving Outdoor Droplets*).

Selon le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), si la quantité de dioxyde de carbone double dans l'atmosphère d'ici à 2050, la température terrestre médiane devrait augmenter de 1,5 à 4,5 °C. L'une des principales causes de l'incertitude de ces prévisions de températures est le manque de connaissances sur les particules d'aérosol dans l'atmosphère et leurs effets sur les nuages. Pour la production d'aérosols, tous les modèles de climat utilisent des paramétrisations relativement simples qui ne sont pas fondées sur des données expérimentales.

En mesurant la formation des aérosols en conditions atmosphériques dans un environnement contrôlé en laboratoire, CLOUD a découvert les principaux processus responsables de la formation de nouvelles particules dans la troposphère, source d'environ la moitié des particules qui sont à l'origine de la formation des nuages. Dans un article publié en 2016, la collaboration a démontré que des particules peuvent se former à partir de vapeurs organiques produites naturellement par la biosphère. CLOUD a également publié le tout premier modèle sur les aérosols fondé exclusivement sur des mesures de laboratoire, qui se rapproche des observations atmosphériques. Les taux de production mesurés de ces processus atmosphériques subtiles peuvent à présent être utilisés dans les modèles de circulation pour déterminer avec plus de précision les prévisions de températures mondiales.



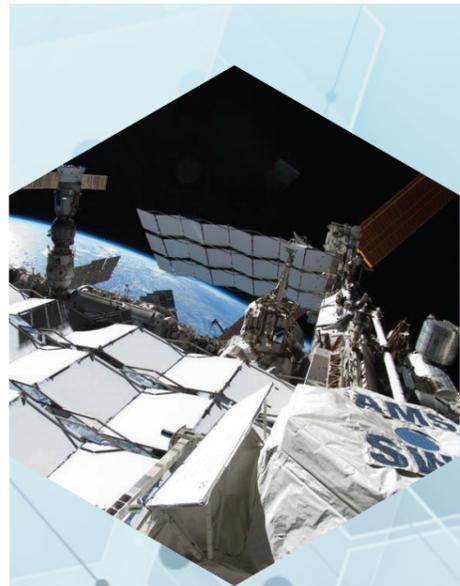
Représentation d'une collision plomb-plomb enregistrée par le détecteur ALICE, dans laquelle un total de 3 161 particules chargées ont été détectées. (ALICE-PHO-GEN-2016-001-3)

L'expérience DIRAC, qui étudie les hadrons instables produits à partir d'un faisceau du Synchrotron à protons (PS), a observé un nouveau type d'atome exotique, composé d'un pion et d'un kaon, permettant de tester la chromodynamique quantique aux basses énergies. Deux expériences du SPS ont livré de nouveaux résultats permettant de mieux comprendre des aspects obscurs de la force forte. L'installation COMPASS a réalisé des mesures de processus exclusifs pour l'étude des distributions partoniques généralisées, essentielles pour comprendre des contributions de la chromodynamique quantique au LHC. L'expérience NA61/Shine a recueilli ses premières données pour l'étude sur la production de particules avec des cibles neutrino.

## LES FACÉTIES DE L'ANTIMATIÈRE

La fabrication au CERN des premiers antiatomes en 1995 a marqué le début d'une ère de tests visant à déterminer si l'antimatière se comporte comme la matière ordinaire. Dans le cas contraire, cela pourrait être le signe d'une violation des symétries fondamentales, comme la symétrie charge-parité-temps (CPT), et donc de l'existence d'une nouvelle physique au-delà du Modèle standard. Le Décélérateur d'antiprotons (AD) héberge cinq expériences sur l'antimatière, une sixième étant en phase de construction. L'une d'elles, BASE, a annoncé en décembre avoir conservé des antiprotons plus d'un an, un record de durée de vie de l'antimatière dans l'Univers. Stocker l'antimatière en la maintenant à basse température permet de réaliser des mesures plus précises de ses propriétés.

En 2016, l'expérience ALPHA a atteint un des buts poursuivis depuis des années par la communauté de l'antimatière : la première mesure du spectre de l'antihydrogène, ouvrant ainsi la voie à la spectroscopie de précision et à de nouveaux tests de la symétrie CPT. Dans le même temps, la collaboration ASACUSA a réalisé la mesure la plus précise à ce jour du rapport de masses antiproton sur électron. Ces mesures, avec celles réalisées par ATRAP, BASE et ALPHA, ramènent les limites concernant les différences de masse et de charge entre protons et antiprotons, et entre électrons et positons, à moins d'un milliardième. Les expériences AEGIS et GBAR vont tester l'effet de la gravité sur l'antimatière et le nouvel anneau ELENA a été installé (p. 47).



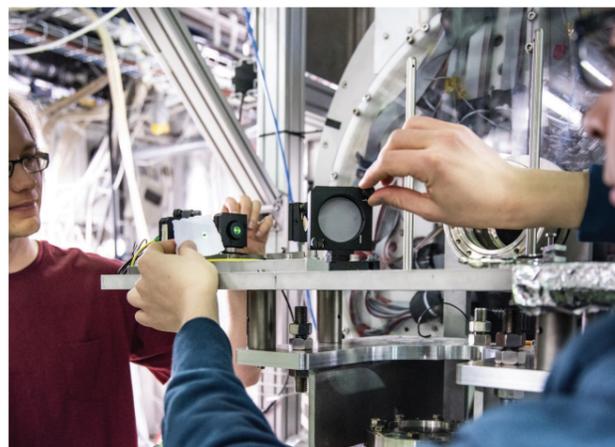
## Résultats de l'espace

Située à bord de la Station spatiale internationale et exploitée à partir d'un centre de contrôle au CERN, l'expérience AMS a publié cette année d'importants résultats sur les rayons cosmiques. AMS est une expérience de physique des particules unique, qui étudie les rayons cosmiques en dehors de l'atmosphère pour rechercher la matière noire, l'antimatière et d'autres entités exotiques. Cette année a marqué la fin d'une première collecte de données de cinq ans, avec la publication de plusieurs articles importants. Les derniers résultats portent sur la détection de 17,6 millions d'électrons et de positons et de 350 000 antiprotons. Conformément aux précédentes mesures, le flux de positons présente de grandes différences avec le flux d'électrons. Ces mesures requièrent une interprétation théorique précise pour déterminer si elles trouvent leur origine dans les collisions de matière noire ou dans de nouvelles sources astrophysiques. Les dernières données d'AMS révèlent aussi que les flux de protons, d'hélium et de lithium dévient tous de la traditionnelle dépendance, selon une loi de puissance unique, à une « rigidité » d'environ 300 GV, ce qui est complètement inattendu. La dernière mesure effectuée par AMS du rapport des abondances de bore et de carbone réserve aussi des surprises, et les attentes concernant l'élucidation de la nature des rayons cosmiques sont grandes.

Le Spectromètre magnétique alpha (AMS) est un détecteur de physique des particules de pointe arrimé à la Station spatiale internationale.

Trouver des différences, même infimes, entre l'antimatière et la matière pourrait permettre d'expliquer pourquoi on ne peut voir que la matière à l'échelle cosmologique alors que, au moment du Big Bang, matière et antimatière étaient présentes en quantité égale. Détecter une violation de CP est un prérequis pour comprendre ce déséquilibre. C'est pourquoi l'expérience LHCb recherche particulièrement de nouvelles manifestations de cette légère asymétrie. En 2016, LHCb a démontré pour la première fois la violation de CP dans les baryons et a publié la mesure la plus précise de l'angle gamma du triangle d'unitarité, qui caractérise l'ampleur de la violation de CP dans le Modèle standard.

Des recherches de haute précision de la violation de CP dans le système charmé ont également été menées, sans qu'aucun signe ait été clairement observé. L'analyse des données restantes de la deuxième période d'exploitation sera déterminante pour résoudre ces questions fondamentales.



## FAISCEAUX EXOTIQUES

Les faisceaux de particules du CERN sont utilisés pour étudier la matière, mais aussi pour alimenter des expériences de physique nucléaire fondamentale, pour la production d'isotopes médicaux et pour la science des matériaux. En 2016, l'installation de faisceaux exotiques ISOLDE a mené à bien 46 expériences pour des utilisateurs étudiant différents domaines : la structure nucléaire (23 %), les désintégrations (20 %), la diffusion/excitation coulombienne (23 %), l'astrophysique nucléaire (7 %), la science des matériaux (11 %), et la biophysique et la médecine. La principale avancée de l'année a été la réalisation de la première phase d'HIE-ISOLDE, permettant d'accélérer des faisceaux très divers à l'énergie de 5,5 MeV par nucléon.

L'année a commencé avec la production d'un échantillon de <sup>7</sup>Be à ISOLDE, qui a permis aux chercheurs de l'installation n\_TOF d'étudier une réaction intéressante dans le cadre de l'énigme du lithium cosmologique. D'après les observations astronomiques, l'Univers contient beaucoup moins de lithium-7 que ce que prédit la théorie de la nucléosynthèse, période qui a immédiatement suivi le Big Bang et au cours de laquelle les éléments les plus légers se sont formés. En étudiant une réaction particulière, liée à la production de lithium-7, n\_TOF a obtenu une mesure directe du taux de réaction, pouvant aider à comprendre l'absence de lithium cosmique. Par ailleurs, en science des matériaux, d'importants résultats sur la nature du dopage dans les semi-conducteurs au nitrure ont été obtenus, ainsi que des données sur le mouillage de surface du graphène.

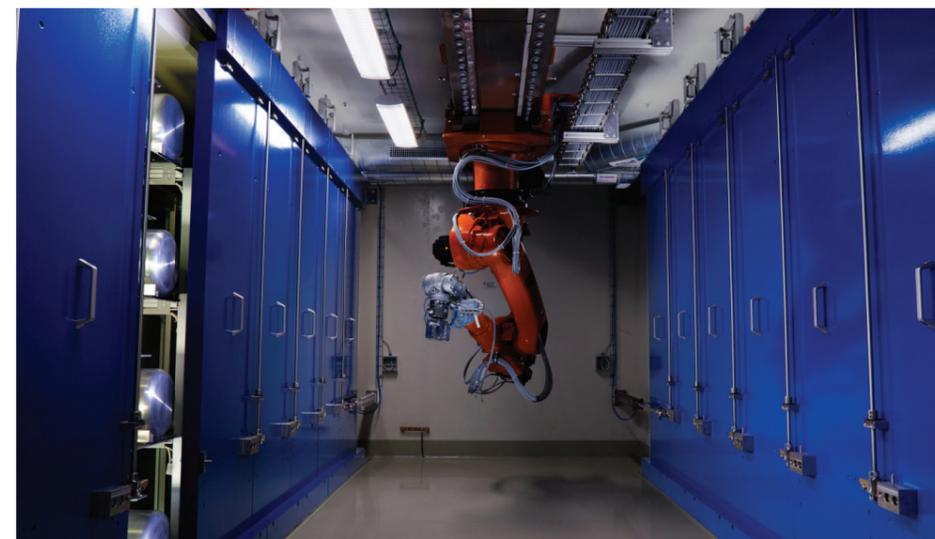
L'expérience ALPHA piège des atomes d'antihydrogène et les illumine au moyen de lasers afin de modifier leurs propriétés électroniques. (CERN-PHOTO-201603-070-11)



## L'avenir de la physique avec les insaisissables neutrinos

Les neutrinos restent l'un des sujets les plus prometteurs dans la quête d'une nouvelle physique depuis que l'on a découvert, il y a près de 20 ans, qu'ils peuvent osciller et possèdent donc une masse. La plateforme neutrino inaugurée en 2014 a été mise en place afin de servir de point d'ancrage pour la communauté du neutrino en Europe. Elle accueille des travaux de R&D sur les technologies des détecteurs dans le cadre de projets menés hors d'Europe. D'importants progrès ont été réalisés en 2016, avec l'achèvement de l'extension du hall EHN1 dans la zone Nord et la construction des cryostats pour les prototypes de chambres à projection temporelle à argon liquide (en phase simple et en phase double) de l'expérience DUNE. La rénovation des deux modules ICARUS et la construction de leurs nouveaux cryostats est achevée. L'équipement sera expédié au Fermilab aux États-Unis en 2017 pour être intégré à l'expérience d'oscillations de neutrinos à courte distance. La plate-forme neutrino accueille aussi la construction du spectromètre Baby-MIND qui sera utilisé pour une expérience neutrino au Japon. Pour appuyer ces efforts, un groupe neutrino a été mis en place dans le département Physique expérimentale, et un groupe de travail est consacré aux études sur les neutrinos dans le département Physique théorique.

Prototype de détecteur élaboré au CERN pour l'expérience DUNE aux États-Unis, qui recevra les neutrinos envoyés par le Fermilab, à 1 300 km de là. (CERN-PHOTO-201612-306-19)



Un robot manipule les échantillons permettant de produire les différents isotopes pour les installations de physique nucléaire MEDICIS et ISOLDE. (OPEN-PHO-EXP-2016-013-3)

L'installation CERN MEDICIS, située en aval d'ISOLDE, devrait commencer à produire des isotopes à partir de 2017, pour une utilisation à des fins de diagnostic et de traitement de certains cancers.

## LE CÔTÉ OBSCUR DE LA NATURE

Il existe peut-être des aspects de l'Univers que nous ne percevons pas. En complément des recherches directes de nouvelles particules par le LHC, qui pourraient permettre de résoudre le mystère de la matière noire dans l'Univers, les physiciens ont mis au point des expériences dont le but est de percer les secrets du vide.

En 2016, NA64, une nouvelle expérience auprès du SPS, a rendu compte d'une recherche directe (en-deçà du GeV)

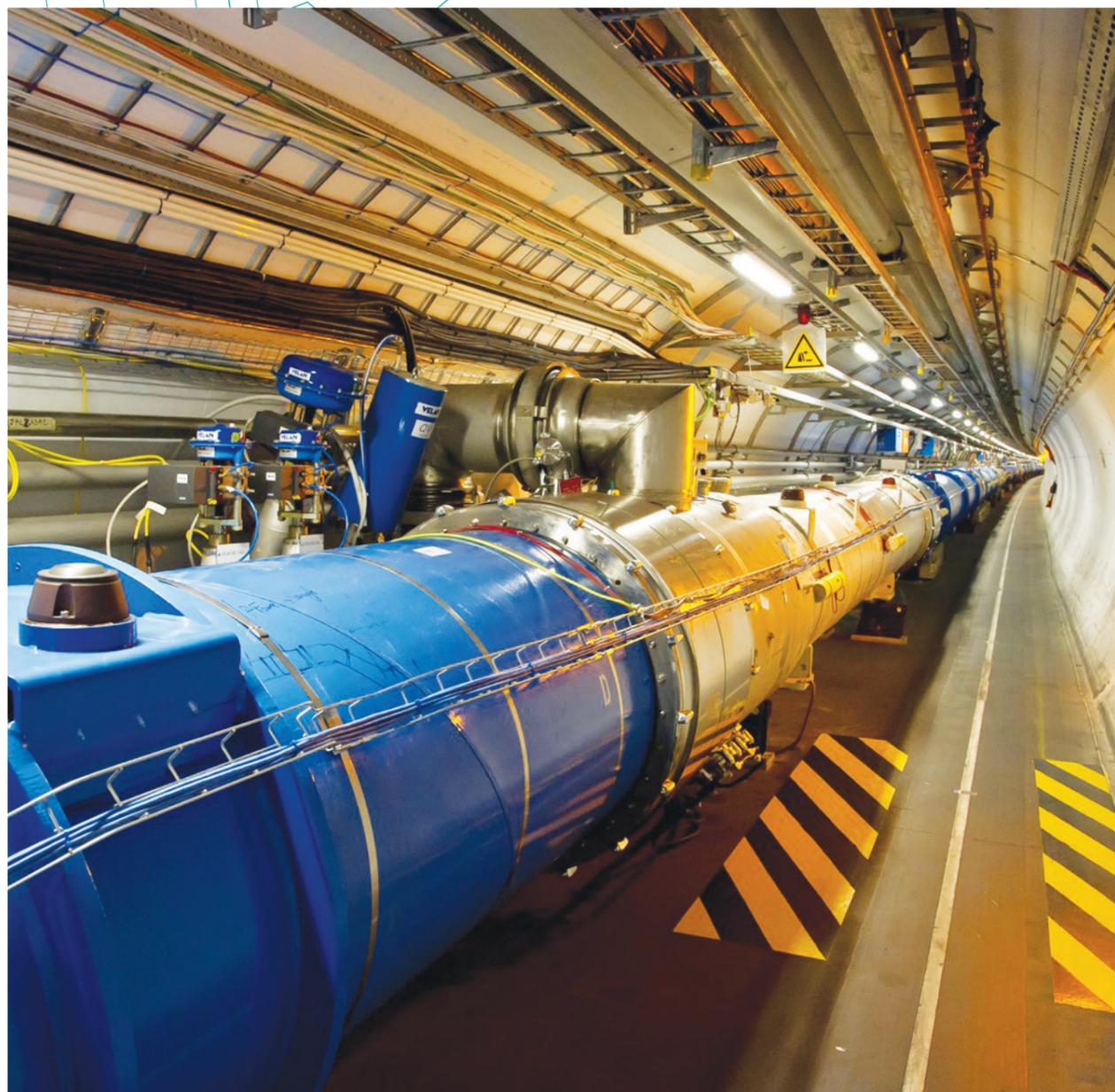
de photons noirs, particules qui se désintègreraient de manière invisible en particules de matière noire en laissant dans le détecteur une signature manifestée par une énergie manquante. Aucune trace de ce type de désintégration n'a été observée, ce qui a permis à NA64 de définir de nouvelles limites aux propriétés du photon noir, en particulier sa capacité d'expliquer l'écart, connu de longue date, qui existe entre les mesures effectuées et les prédictions du moment magnétique anomal du muon.

L'expérience CAST, qui traque les hypothétiques axions au moyen d'un puissant aimant pointé vers le Soleil, a lancé un nouveau programme de mesures de trois ans. Dans ce cadre, CAST recherche les caméléons, candidats à l'énergie sombre, en utilisant un détecteur pixellisé et un capteur de force. La recherche d'axions, quant à elle, se fait au moyen d'une cavité résonnante.

# LES MACHINES DES DÉCOUVERTES

Le CERN exploite un complexe unique au monde, constitué de huit accélérateurs et d'un décélérateur. Les accélérateurs propulsent les particules à une vitesse proche de celle de la lumière avant de les faire entrer en collision ou de les projeter sur des cibles. Des détecteurs enregistrent ce qui se passe lors des collisions. Les données sont stockées et analysées à l'aide d'un réseau d'ordinateurs planétaire. Des centaines de physiciens, d'ingénieurs et de techniciens font fonctionner ces machines sophistiquées et assurent leur maintenance.

Le LHC a fonctionné avec une efficacité remarquable en 2016, délivrant beaucoup plus de collisions que prévu. (CERN-GE-1101021-08)



Des opérateurs du LHC aux commandes de l'accélérateur en juillet 2016. (CERN-PHOTO-201607-171-3)

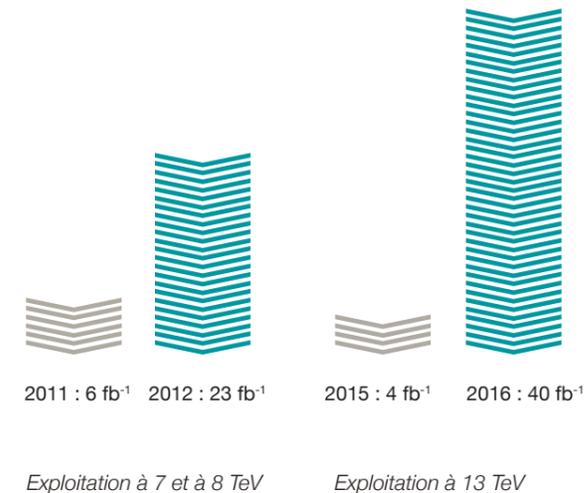
## LE GRAND COLLISIONNEUR DE HADRONS À PLEIN RÉGIME

Le Grand collisionneur de hadrons LHC a connu une année 2016 exceptionnelle. Pour sa deuxième année d'exploitation à l'énergie de collision de 13 téraélectronvolts (TeV), l'accélérateur a enregistré des performances qui ont dépassé les prévisions.

Pendant l'exploitation avec protons, entre avril et fin octobre, le LHC a produit plus de 6,5 millions de milliards de collisions, un nombre près de 60 % plus élevé que celui initialement prévu. En d'autres termes, il a délivré aux deux grandes expériences ATLAS et CMS une luminosité intégrée de presque 40 femtobarns inverses, contre 25 initialement prévus. La luminosité est un indicateur crucial pour un collisionneur ; il donne le nombre de collisions susceptibles de se produire en un temps donné et par unité de surface.

La disponibilité remarquable du LHC et de ses injecteurs est l'une des clés du succès. Pendant la période d'exploitation pour la physique, le LHC a fonctionné 75 % du temps (25 % du temps pour la mise en marche et la préparation des faisceaux, et 50 % du temps pour la production de collisions pour les expériences, contre 33 % en 2015). Cette performance est d'autant plus remarquable que le LHC est une machine très complexe, reposant sur le fonctionnement d'une chaîne de quatre accélérateurs et de milliers d'équipements.

Le démarrage de la machine a d'ailleurs été perturbé par plusieurs incidents. Fin avril, un incident sur un transformateur a stoppé l'alimentation électrique de l'accélérateur pendant une semaine. Puis, le système d'alimentation du Synchrotron à protons (PS), troisième maillon de la chaîne d'injecteurs, a connu une avarie.



Quantité de données délivrées par le LHC à chacune des expériences ATLAS et CMS au cours des périodes d'exploitation avec des protons. Cette quantité est exprimée par la luminosité intégrée, qui indique le nombre potentiel de collisions par unité de surface et sur une période donnée.

Une fuite de vide au niveau du système d'arrêt de faisceau du Supersynchrotron à protons (SPS), quatrième injecteur, a limité la quantité de particules injectées pendant toute l'exploitation. Le nombre de paquets de protons par faisceau n'a pu dépasser 2 220, contre 2 808 prévus. Enfin, une défaillance sur un aimant de déflection rapide du LHC, qui injecte les paquets de particules dans la machine, a limité le nombre de particules dans chaque paquet.

Malgré ces embûches, la performance des équipements a été excellente. De nombreux ajustements ont été effectués sur tous les systèmes depuis deux ans, améliorant leur disponibilité. Le système de cryogénie, qui refroidit l'accélérateur à -271 °C, a par exemple atteint 98 % de disponibilité.

L'ajustement des paramètres d'exploitation du LHC et de ses injecteurs a également permis d'augmenter la luminosité. Le mode d'assemblage des paquets de particules dans les injecteurs a été amélioré (voir p. 22). L'angle de croisement des faisceaux au point de collision a été réduit. Ces deux variables ont permis d'atteindre 25 collisions en moyenne par croisement de paquet, contre 14 en 2015.

Grâce à ce pilotage optimisé, les équipes d'opérateurs ont célébré le 26 juin un nouveau record : le LHC a dépassé la luminosité instantanée nominale ( $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) définie par les concepteurs de l'accélérateur, 20 ans auparavant. Ce paramètre a ensuite été régulièrement dépassé tout au long de l'année, dans une proportion allant jusqu'à 40 %. Le LHC a ainsi fourni 153 jours de physique, dont plusieurs jours consacrés à l'exploitation avec des faisceaux desserrés pour les expériences à petits angles TOTEM et ATLAS/ALFA.



Le porte-parole de TOTEM devant l'un des détecteurs de l'expérience dans le tunnel du LHC. Le LHC a consacré une exploitation spéciale à TOTEM et ATLAS/ALFA, en desserrant au maximum les faisceaux. TOTEM a amélioré ses détecteurs en 2016. (CERN-PHO-201609-210-1)

Le 5 décembre, les dernières particules circulaient dans la machine, avant l'arrêt technique. Les premiers jours de l'arrêt ont été consacrés à l'entraînement des aimants de deux des huit secteurs pour atteindre une énergie de collision de 14 TeV. Les résultats permettront d'étudier la possibilité de relever l'énergie du LHC lors de la troisième période d'exploitation, à partir de 2021.

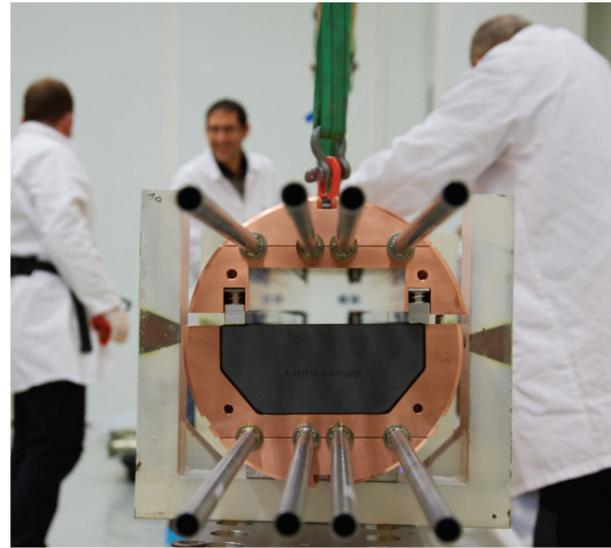
## RENCONTRE DU TROISIÈME TYPE

Le 10 novembre, le LHC démarrait les collisions entre des protons et des noyaux d'atomes de plomb, deuxième exploitation de ce type depuis 2013. Cette fois, les collisions ont atteint l'énergie inédite de 8,16 TeV. Les expériences ont récolté plus de 380 milliards de collisions à cette énergie, ce qui a dépassé de loin les prévisions.



## De brillants paquets

Cette image montre comment les paquets de particules sont regroupés et découpés dans le Synchrotron à protons (PS) avec la méthode dite de compression, regroupement et division des lots (BCMS - *Batch Compression Merging and Splitting*). Adopté en 2016, le procédé utilise les cavités radiofréquence pour former des paquets de particules plus denses. La probabilité de collisions dans le LHC est alors plus élevée. Ces paquets plus « brillants », selon le vocabulaire des accélérateurs, ont permis d'augmenter de 20 % la luminosité en 2016. (OPEN-PHO-ACCEL-2017-008-1)



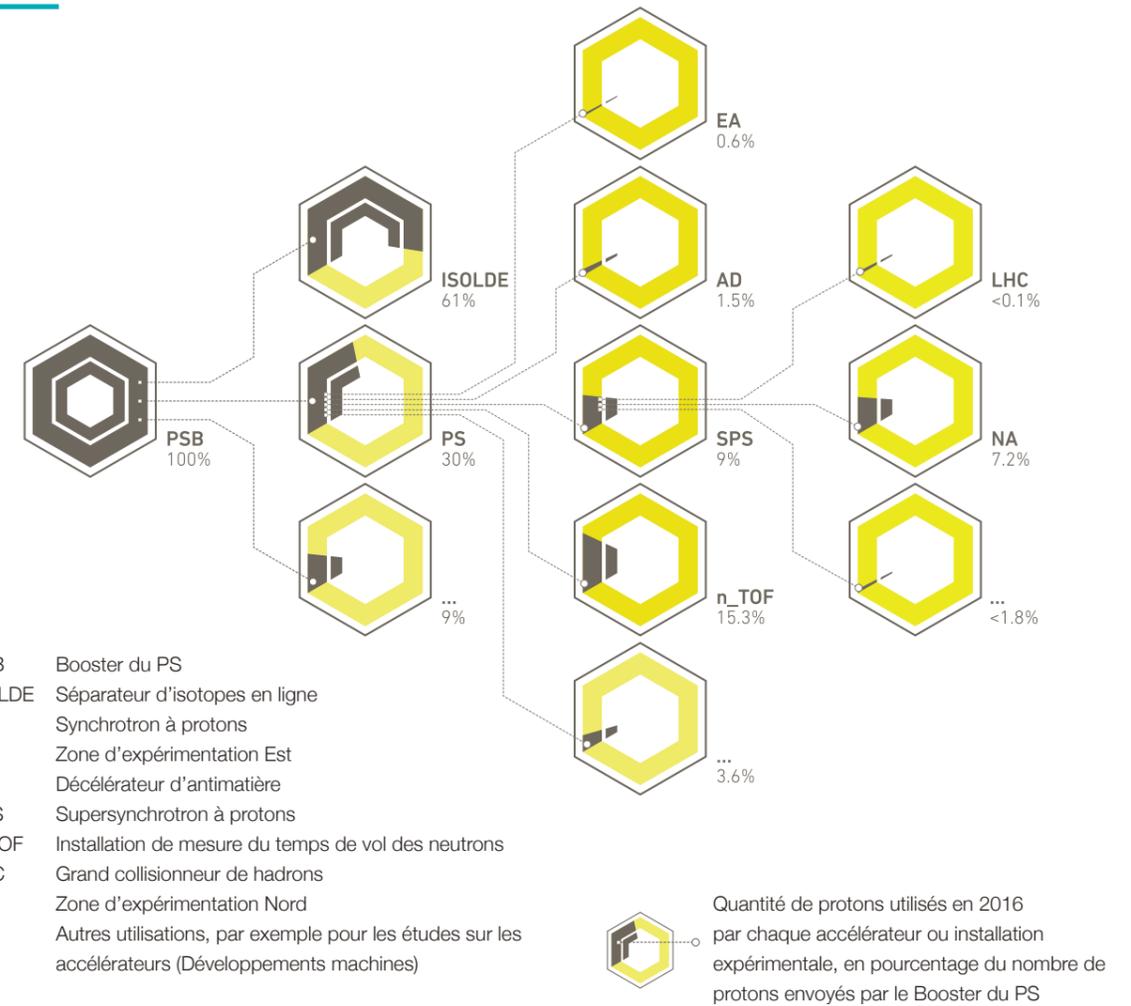
Un nouveau système d'arrêt de faisceau pour le SPS a été conçu et fabriqué en quelques mois seulement pour être installé dans l'accélérateur durant l'arrêt technique hivernal. (CERN-PHO-201704-084-15)

Pour répondre aux demandes des expériences, le LHC et ses injecteurs ont effectué une gymnastique compliquée. Deux niveaux d'énergie et trois configurations de la machine ont ainsi été proposés en quatre semaines d'exploitation. Une exploitation spéciale a été menée pour l'expérience LHCf.

La luminosité instantanée a dépassé sept fois la valeur nominale établie quelques années plus tôt pour ce type d'exploitation. Les périodes de collisions ont été exceptionnellement longues.

La performance est notable : pour que se percutent des protons et des ions plomb, environ 206 fois plus massifs et avec une charge 82 fois supérieure, de nombreux réglages minutieux de la machine sont effectués. Le LHC a pu compter sur des injecteurs très performants.

## DISTRIBUTION DES PROTONS PAR LE COMPLEXE D'ACCÉLÉRATEURS AUX DIFFÉRENTES INSTALLATIONS



PSB	Booster du PS
ISOLDE	Séparateur d'isotopes en ligne
PS	Synchrotron à protons
EA	Zone d'expérimentation Est
AD	Décélérateur d'antimatière
SPS	Supersynchrotron à protons
n_TOF	Installation de mesure du temps de vol des neutrons
LHC	Grand collisionneur de hadrons
NA	Zone d'expérimentation Nord
...	Autres utilisations, par exemple pour les études sur les accélérateurs (Développements machines)

**1,34 x 10<sup>20</sup> protons** ont été accélérés en 2016 dans le complexe d'accélérateurs. Ce nombre paraît énorme, mais il correspond en réalité à une toute petite quantité de matière, équivalant à peu près au nombre de protons dans un grain de sable. Les protons sont tellement minuscules que cette quantité suffit pour alimenter toutes les expériences. Le LHC n'utilise qu'une infime partie de ces protons, moins de 0,1%, comme le montre le schéma.

## ACCÉLÉRATION EN CHAÎNE

Le CERN exploite un complexe comprenant huit accélérateurs et un décélérateur, lesquels alimentent des dizaines d'expériences (voir p. 13). Ces accélérateurs servent aussi à propulser les particules pour le LHC. Les protons pour le LHC sont mis en paquets et accélérés par quatre accélérateurs successifs : le Linac 2, l'injecteur du PS (Booster du PS), le Synchrotron à protons (PS) et enfin le Supersynchrotron à protons (SPS). Les ions lourds sont préparés dans le Linac 3 et l'Anneau d'ions de basse énergie (LEIR) avant d'être envoyés vers le PS et le SPS.

La chaîne d'injecteurs a enregistré de belles performances, avec une disponibilité supérieure à 90 % pour tous les accélérateurs. Le Booster du PS, qui groupe les particules en paquets, a par exemple affiché une disponibilité de

96 %, alimentant le PS et l'installation de physique nucléaire ISOLDE. Un maillon plus loin, le PS redistribue les paquets de particules et les accélère avant de les envoyer vers diverses installations. La moitié des protons issus du PS sont destinés à l'installation de physique nucléaire n\_TOF. Une cavité de réserve a été mise en service dans le PS afin d'améliorer la transmission des particules vers le SPS.

Le SPS a alimenté le LHC et fourni 80 % des protons requis par la zone d'expérimentation Nord. La performance est notable car une fuite de vide détectée au niveau de l'arrêt de faisceau limitait le nombre de particules dans l'accélérateur. Un programme d'urgence a été lancé pour fabriquer en quelques mois un nouveau système d'arrêt de faisceau. En fin d'année, l'accélérateur a prouvé sa flexibilité, fournissant des noyaux de plomb de trois énergies différentes à neuf expériences de la zone d'expérimentation Nord, tout en alimentant le LHC avec des protons et des noyaux de



### L'espion en mission dans le tunnel

TIM, le train monorail d'inspection, est un mini-véhicule autonome utilisé pour l'inspection et la surveillance en temps réel des 27 km de tunnel du LHC. Il en contrôle la structure, le taux d'oxygène, la température et la bande passante. Suspendu au plafond, il peut se déplacer jusqu'à 6 km/h. En 2016, plusieurs missions ont été confiées à TIM, qui a notamment mesuré le niveau de rayonnement. Le robot a déjà séduit le monde de l'industrie, en particulier pour le contrôle autonome d'infrastructures telles que des canalisations souterraines. (OPEN-PHO-TECH-2017-004-1)



Le Supersynchrotron à protons (SPS), deuxième plus grand accélérateur du CERN, a fêté ses 40 ans en 2016.

Maillon essentiel du complexe d'accélérateurs du CERN, le SPS fournit différents types de particules à une myriade d'expériences.

Il accélère des protons et des ions plomb pour le LHC, tout en alimentant les expériences de la zone d'expérimentation Nord. (CERN-GE-1311288-04)

plomb. Le Linac 3 et le LEIR, les deux accélérateurs qui préparent les ions lourds en amont, ont affiché d'excellentes performances, prouvant la réussite du programme d'amélioration mené depuis 2015. Ils ont délivré des paquets d'intensités supérieures aux caractéristiques requises dans le cadre du programme d'amélioration des injecteurs pour le LHC à haute luminosité. Le Décélérateur d'antimatière AD, qui envoie des antiprotons à cinq expériences, a fourni 5 400 heures de physique en 2016, un nouveau record.

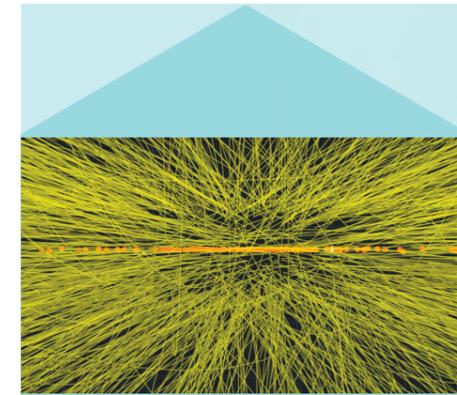
Tandis que les machines tournaient, les équipes s'activaient en coulisses pour préparer les maintenances et les améliorations. Plusieurs sous-stations électriques, notamment celles du SPS, sont par exemple progressivement rénovées. Des études ont été lancées pour moderniser la zone d'expérimentation Est durant le deuxième long arrêt technique. Une fois les machines arrêtées, début décembre, les travaux de maintenance et d'amélioration ont débuté. La pause hivernale 2016-2017 a été prolongée de sept semaines, afin de réaliser des travaux plus importants.

## LA PHYSIQUE NUCLÉAIRE À PLUS HAUTE ÉNERGIE

L'installation de physique nucléaire ISOLDE fait le plein d'énergie. Depuis septembre 2016, le nouvel accélérateur supraconducteur HIE-ISOLDE (ISOLDE à haute intensité et haute énergie) dope l'énergie des faisceaux d'ions radioactifs.

Dotée de deux cryomodules comprenant chacun cinq cavités supraconductrices, la nouvelle machine a accéléré six espèces d'ions radioactifs à des énergies allant de 4,3 à 6,8 MeV par nucléon (contre 3 MeV par nucléon au maximum auparavant). HIE-ISOLDE a fourni 837 heures de temps de faisceau, alimentant deux zones d'expérimentation.

Cette amélioration fait d'ISOLDE la seule installation au monde à pouvoir étudier des noyaux moyens à lourds dans cette gamme d'énergies. La seconde phase du projet prévoit l'installation de deux cryomodules et une troisième zone d'expérimentation pour atteindre en 2018 jusqu'à 10 MeV par nucléon pour les noyaux moyens et lourds.



Un empilement de plusieurs dizaines d'interactions enregistrées simultanément lors d'un seul croisement de faisceau par l'expérience CMS en 2016. Chaque collision est représentée par un point orange. (CMS-PHO-EVENTS-2016-008-5)

### Les expériences face à l'avalanche de données

Les grands détecteurs du LHC sont des machines très complexes, formées chacune de millions de composants qui doivent fonctionner de concert pour identifier les particules créées lors des collisions au LHC. En fonctionnant avec une luminosité inédite, le LHC a mis à rude épreuve les systèmes de déclenchement qui sélectionnent les collisions. Ces systèmes « décident » de conserver les données d'une collision en fonction d'informations transmises par des sous-systèmes spécifiques.

En 2016, le LHC a généré en moyenne 25 collisions simultanées, à une fréquence de 25 millions de fois par seconde, soit près de deux fois plus qu'en 2015. Les expériences ont adapté leur système de déclenchement à cet empilement d'interactions. ATLAS a optimisé les algorithmes de son système de déclenchement et adapté le traitement par la grille de calcul. CMS a enregistré les données avec un système de déclenchement entièrement amélioré. ATLAS et CMS ont ainsi utilisé plus de 90 % des données délivrées pour leurs analyses.

L'expérience LHCb a également fonctionné avec un système de déclenchement amélioré, ainsi qu'avec un système de reconstruction des événements en temps réel. L'expérience a enregistré 1,7 femtobarn inverse de données avec les collisions proton-proton, cinq fois plus qu'en 2015, et pris pour la première fois des données avec des ions lourds.

ALICE, spécialisé dans la physique des ions lourds, a enregistré près de dix fois plus d'événements proton-plomb à l'énergie de 5,02 TeV que lors de la précédente campagne en 2013. ALICE a utilisé deux modes de sélection : un déclenchement dit de « biais minimum » pour enregistrer indistinctement tous les types de collisions et un déclenchement permettant de sélectionner des événements rares pour des études spécifiques. ALICE a également accumulé des données avec des protons selon les objectifs fixés.

La machine pourra alors accélérer des noyaux moyens et lourds jusqu'à 10 MeV par nucléon, dépassant cette énergie pour les noyaux plus légers. Le troisième cryomodule a été assemblé en 2016 et sera installé en 2017.

ISOLDE offre à ses utilisateurs un large éventail de faisceaux. L'installation peut produire jusqu'à 1 000 isotopes différents de 75 éléments chimiques. En 2016, ISOLDE a alimenté 46 expériences allant de l'étude des propriétés des noyaux atomiques aux recherches biomédicales, en passant par l'astrophysique (voir p. 18).

Un troisième cryomodule a été assemblé en 2016 pour préparer la deuxième phase du projet HIE-ISOLDE, l'accélérateur linéaire supraconducteur qui augmente l'énergie des ions radioactifs destinés à ISOLDE. (CERN-PHO-201603-057-20)





Le centre de calcul du CERN abrite les serveurs et les systèmes de stockage de données de la Grille de calcul mondiale pour le LHC (WLCG), mais aussi ceux dédiés aux systèmes critiques du Laboratoire, essentiels à son fonctionnement quotidien. (OPEN-PHO-CCC-2017-001-1)

## INFORMATIQUE : REPOUSSER LES LIMITES

Une quantité de données sans précédent a été produite cette année grâce à la disponibilité et aux performances exceptionnelles du Grand collisionneur de hadrons (LHC). Le LHC a produit des faisceaux stables pendant 7,5 millions de secondes, soit une augmentation significative de 50 % par rapport aux prévisions. À plus haute énergie, les collisions sont plus complexes et, avec une plus haute intensité, un grand nombre de collisions se produisent simultanément. Cela accroît grandement la complexité de la reconstruction et de l'analyse, et impacte fortement les besoins en capacité de calcul. L'année 2016 a ainsi été riche en records tant pour l'acquisition des données, leur flux et volume, que pour l'utilisation des ressources informatiques et de stockage, qui s'est avérée exceptionnelle.

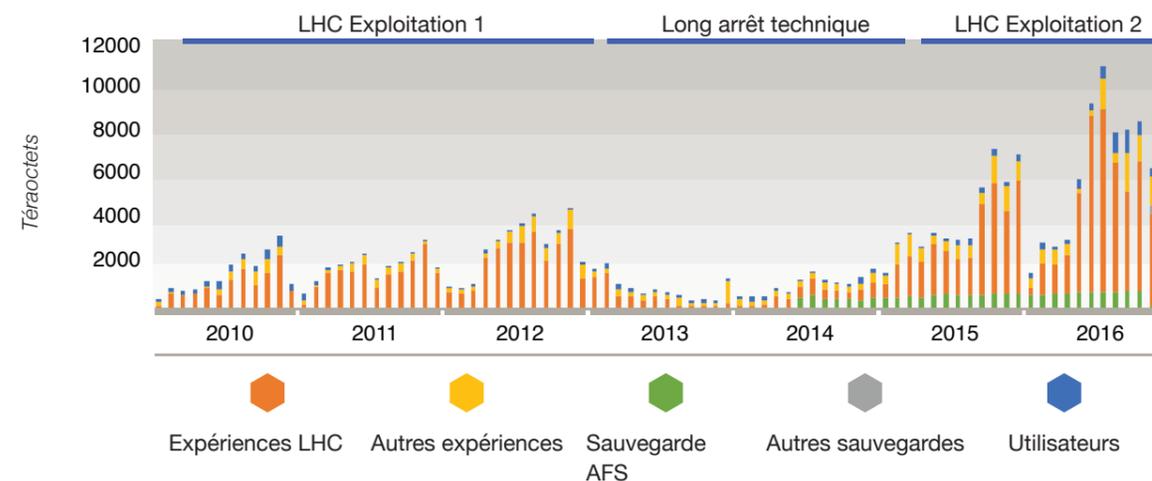
## UNE PLUIE DE RECORDS

La Grille de calcul mondiale pour le LHC (WLCG) est une collaboration globale de plus de 170 centres de calcul basés dans 42 pays. Elle a pour but de fournir les ressources nécessaires au stockage, à la distribution et à l'analyse des données générées par le LHC. La performance de l'infrastructure de la Grille a permis de faire face aux besoins

et niveaux d'utilisation accrus, et, comme les années passées, d'obtenir des résultats de physique de qualité en un temps record. À titre d'exemple, les résultats sur lesquels se sont appuyées les analyses présentées à la conférence ICHEP début août incluaient des données produites deux semaines seulement auparavant. En 2016, le centre de calcul du CERN a enregistré plus de 49 pétaoctets (Po) de données du LHC, avec, pour le seul mois de juillet, un chiffre impressionnant de 11 Po : deux records pour le moins exceptionnels. Les expériences ont utilisé de manière optimale l'importante capacité informatique des 170 sites de la Grille WLCG. Elles ont également su opportunément tirer parti de ressources informatiques additionnelles, tant sous la forme de cycles additionnels fournis par des centres équipés de supercalculateurs, que grâce à la contribution des volontaires de LHC@home ayant prêté du temps machine de leur ordinateur.

## LES DÉFIS DES RÉSEAUX

L'une des composantes les plus impressionnantes de la Grille WLCG est peut-être la connectivité et tout ce qui a trait aux réseaux. Grâce à eux, tant au CERN que plus largement au niveau mondial, la Grille est à même de lancer la distribution des données ensuite partagées avec des centaines d'instituts collaborant internationalement.



### Données enregistrées sur bandes au CERN de façon mensuelle

Ce graphique représente la quantité de données enregistrées mensuellement sur bandes magnétiques selon leur origine : expériences LHC, autres expériences, sauvegardes diverses, et utilisateurs. L'année 2016 est celle de tous les records, avec 49 pétaoctets (49 467 téraoctets exactement) de données du LHC enregistrées et, pour le seul mois de juillet, un pic à 11 pétaoctets.

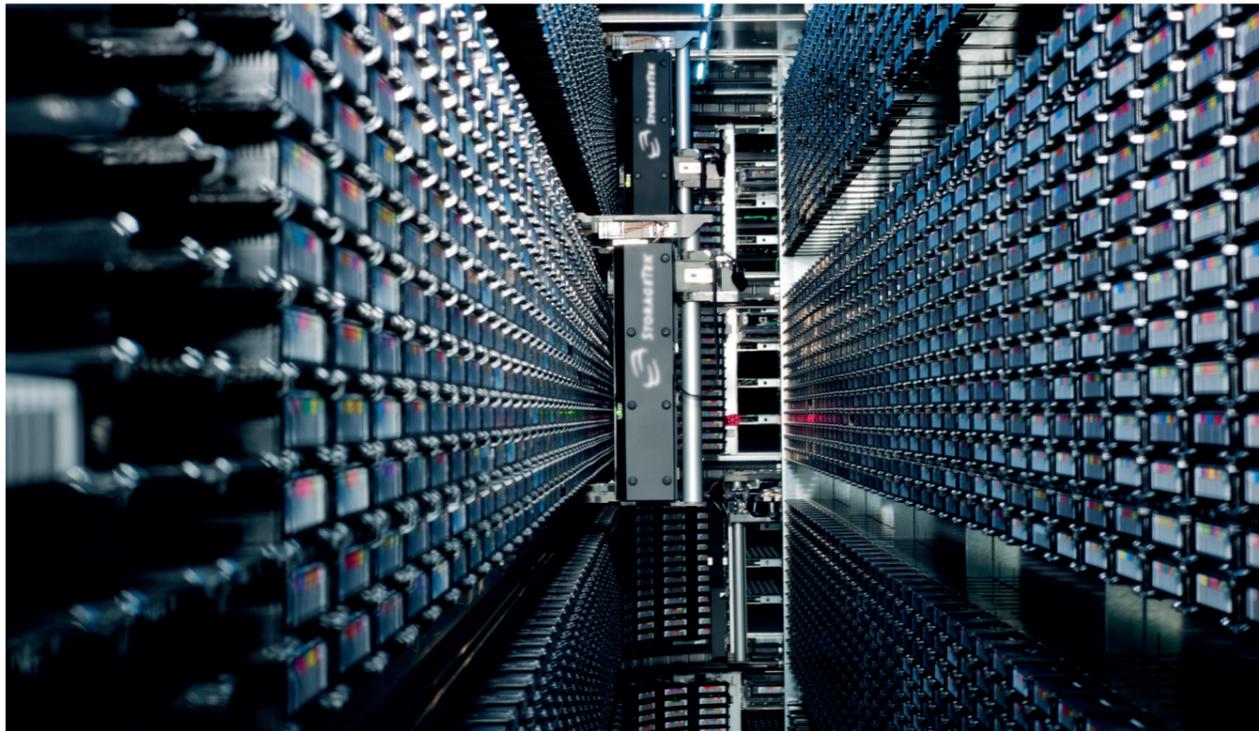
En 2016, les taux de transfert de données globaux ont eux aussi atteint des sommets. Des taux deux fois plus élevés que durant la première période d'exploitation du LHC ont été enregistrés, allant de 30 à 40 gigaoctets par seconde en continu. Si, dans la majorité des cas, la Grille a su gérer sans anicroche cette augmentation, quelques aménagements ont parfois été requis ; certains sites ont notamment dû accroître la bande passante les reliant au CERN. La bande passante transatlantique plus élevée qui avait été mise en place en vue de cette deuxième période d'exploitation du LHC s'est par ailleurs avérée essentielle.

## LA SCIENCE DANS LES NUAGES

Plus de 90 % des ressources informatiques du centre de calcul du CERN sont aujourd'hui déployées via un nuage privé basé sur OpenStack, un projet *open source* permettant d'établir un environnement en nuage extrêmement modulable. En 2016, en collaboration avec Rackspace et le projet Indigo DataCloud, le CERN a de nouveau largement contribué au développement d'OpenStack en participant à une quarantaine d'améliorations ou corrections de bugs. La communauté OpenStack a par ailleurs salué la qualité de ces contributions en conférant le statut de rélecteur principal à l'un des membres de l'équipe. Du fait de l'augmentation des besoins informatiques des différents services du CERN et de ses expériences, le nuage privé du CERN compte maintenant plus de 190 000 cœurs de processeurs répartis dans ses centres de calcul de Meyrin et Budapest. Cette année, du fait d'une campagne de remplacement de serveurs, ce ne sont pas moins de 5 000 machines virtuelles qui ont été migrées sur de nouveaux hôtes physiques.

Au cours de ces trois dernières années, des études ont été conduites afin de déterminer si des applications de physique peuvent fonctionner grâce à des ressources nuagiques publiques. Avec le développement de l'informatique en nuage, cette approche pourrait en effet s'avérer intéressante pour pallier des augmentations de besoins ponctuelles ou pour fournir de la puissance de calcul à un coût attractif. Par ailleurs, d'importants tests ont été menés à grande échelle pour évaluer l'utilisation de ressources nuagiques commerciales en complément des ressources de la Grille. Ces ressources ont été mises à disposition soit dans le cadre de projets de recherche effectués en collaboration avec certains des grands acteurs commerciaux de l'informatique en nuage, ou, dans une moindre mesure, via des appels d'offres.

Depuis le début de l'année 2016, le CERN coordonne avec succès deux projets. Le premier, PICSE, vise à constituer un réseau de passation de marchés mutualisant les organisations de recherche publiques utilisant des services en nuage commerciaux. Le second est le projet d'achat pré-commercialisation HNSciCloud. Pas moins de 10 instituts de recherche de premier plan sont également parties prenantes de ce projet européen qui s'appuie sur les développements techniques, les réglementations et les pratiques d'achats en Europe afin de lutter contre la fragmentation et d'améliorer l'exploitation des ressources en nuage. Dans ce cadre, quatre consortiums totalisant 16 sociétés et organisations ont reçu un contrat le 2 novembre à Lyon, à l'occasion d'une cérémonie organisée par le CNRS. L'architecture en nuage hybride d'Helix Nebula et son modèle de passation de marchés représentent des avancées significatives en faveur de la viabilité des « e-infrastructures » européennes et de l'établissement d'un « Nuage européen pour la science ouverte ».



Les bandes magnétiques, gérées par des bras robotisés, sont utilisées pour le stockage à long terme. (CERN-GE-0809016-01)

## Préserver les données pour les générations futures

Au fil de ses plus de 60 ans d'histoire, le CERN a produit de grands volumes de données de tous types : des données scientifiques – plus de 185 Po à ce jour provenant d'expériences de physique des hautes énergies – mais également des photographies, des vidéos, des comptes rendus, des notes, des pages web, etc. Le CERN doit donc faire face au défi de préserver sa mémoire numérique. Les formats des données et les outils pour y accéder étant en perpétuelle évolution, un effort soutenu est nécessaire pour répondre à ce problème. Cependant, il est intéressant de noter que de nombreux outils utiles à la préservation des données du LHC et d'autres expériences sont également adaptés à des données d'autre nature. Le CERN est à l'avant-garde dans ce domaine et participe en tant que membre fondateur à la collaboration DPHEP (*Data Preservation and Long-Term Analysis in High-Energy Physics*), qui œuvre pour la préservation des données en physique des hautes énergies.

La publication d'un rapport d'avancement sur les progrès réalisés durant la période 2013-2015 a été publiée en février 2016 et est accessible à tous.

Le défi principal de la préservation à long terme des données via des bibliothèques de bandes magnétiques tient à leur vulnérabilité à la contamination par les particules de poussière contenues dans l'air, ou toute autre particule, susceptibles d'interférer avec le processus de lecture et d'écriture. Le CERN a conçu et construit des capteurs environnementaux spécialement adaptés au centre de calcul, basés sur une carte Raspberry Pi et un processeur Arduino. Leur précision et leur rapidité sont comparables à celles des systèmes vendus sur le marché, toutefois, ces capteurs sont 50 fois moins chers et ne nécessitent aucune maintenance. Depuis 2016, ils sont dotés de nouvelles fonctionnalités leur permettant de faire la distinction entre petites et grosses particules, ainsi que de détecter des émissions très courtes dans de forts flux d'air. Cette nouvelle génération de capteurs a permis d'éviter un incident majeur dans le centre de calcul du CERN en 2016. D'autres possibilités d'utilisation sont actuellement à l'étude. Les données concernant ces capteurs sont disponibles gratuitement via la licence *Open Hardware* du CERN.



**Évolution du volume de données stockées sur bandes**  
Comme le montre ce graphique, les données enregistrées sur bandes au CERN ont crû de manière régulière au fil des années, avec une accélération visible en 2016 (+ 40 % de données stockées en 2016 par rapport au total de données cumulées jusqu'à fin 2015).



La journée portes ouvertes de CERN openlab en juin a marqué le 15<sup>e</sup> anniversaire de la collaboration avec l'industrie au service de la communauté de recherche du LHC. (OPEN-PHO-TECH-2016-002-4)

## CERN openlab célèbre 15 ans de collaboration

En 2016, CERN openlab a fêté 15 ans de partenariats public-privé, au travers desquels le Laboratoire collabore avec des entreprises et des instituts de recherche de premier plan dans le domaine des technologies de l'information et de la communication. Tout au long de l'année, des activités ont été menées pour relever des défis dans des domaines tels que l'acquisition de données, les plates-formes de calcul, l'architecture de stockage de données, la mise en service et la gestion d'ordinateurs, les réseaux et la communication, et l'analyse de données. CERN openlab a d'ores et déjà commencé à identifier de nouveaux défis à relever pendant sa sixième phase, qui se déroulera de 2018 à 2020.

## LOGICIELS LIBRES POUR UNE SCIENCE OUVERTE

La pierre angulaire de la philosophie *open source* est de permettre aux utilisateurs l'accès à tout ce qui constitue une technologie donnée (comme le code source par exemple ou les schémas techniques en électronique ou en mécanique) afin de pouvoir l'étudier, la modifier et ensuite partager ce qui a été développé. Depuis la sortie du logiciel du Web sous licence libre en 1994, le CERN n'a eu de cesse d'innover dans ce domaine, soutenant le matériel libre (avec la licence *CERN Open Hardware*), l'accès ouvert (avec SCOAP 3 – Groupement pour la libre diffusion des résultats de physique des particules, voir p. 35), et les données ouvertes (avec le portail de données ouvertes pour les expériences du LHC).

Plusieurs technologies du CERN sont développées dans cette logique d'accès ouvert. Invenio est par exemple un

logiciel *open source* de gestion de bibliothèque numérique bénéficiant des contributions internationales de nombreux instituts. Invenio 3, lancé en 2016, s'appuie sur un tout nouveau concept et a bénéficié d'une réécriture complète de son code source.

Le CERN investit également depuis longtemps, avec le cofinancement de la Commission européenne, dans un système d'archivage de données ouvertes au service de la communauté scientifique au sens large : Zenodo. Ce service s'inscrit dans une tradition établie de longue date au CERN, qui consiste à partager et préserver le savoir scientifique pour le bien commun et s'appuie sur les technologies développées dans ce but. Zenodo donne à la communauté scientifique la possibilité de choisir de stocker ses données dans un environnement non commercial et de les rendre ainsi librement et gratuitement accessibles à la société.

En septembre 2016, Zenodo a bénéficié d'améliorations basées sur Invenio 3 : les recherches sont depuis dix fois plus rapides, les enregistrements de fichiers jusqu'à 100 Go améliorés, et deux fois plus de visiteurs pour trois fois plus d'enregistrements ont été comptabilisés. Le portail de données ouvertes qui donne accès à tous aux données des expériences est également basé sur la technologie d'Invenio. En collaboration avec le Service d'information scientifique, 300 To de données de CMS produites en 2011 ont pu être mises à disposition grâce au portail en 2016, donnant lieu à une forte couverture médiatique et 210 000 visites uniques du site.

## TECHNOLOGIES DE PLATE-FORME POUR UNE COLLABORATION OUVERTE

Le système de stockage du CERN EOS a été conçu pour répondre aux besoins informatiques très poussés du LHC. Il comptabilisait près d'un milliard de fichiers en 2016, un chiffre à la mesure des performances exceptionnelles du LHC et de ses expériences. EOS (via le projet CERNBox) est pleinement compatible avec les opérations hors ligne et permet un accès aux fichiers et leur partage à partir d'un simple navigateur web. De ce fait, son adoption au CERN pour de nouvelles applications est en expansion, avec déjà près de 7 000 utilisateurs individuels. L'intérêt qui lui est porté dépasse également les frontières de la physique des hautes énergies : AARNET (*Australian Academic and Research Network*) et le *Joint Research Centre for Digital Earth and Reference Data* l'ont tous deux adopté pour l'intégrer à leurs systèmes traitant de grands volumes de données.

Enfin, Indico, un logiciel de gestion de conférences et d'événements, est également un exemple d'outil *open source* développé par le CERN. Il est utilisé par plus de 200 sites dans le monde entier, y compris l'ONU. En 2016, trois mises à jour ont été publiées, améliorant la gestion des horaires et des catégories, ainsi que le processus de révision des résumés.

# UN LABORATOIRE POUR LE MONDE

Le CERN repose sur une véritable coopération entre pays, universités et scientifiques. En 2016, plus de 16 000 personnes du monde entier ont collaboré pour repousser les limites des connaissances. Les membres du personnel titulaires du CERN, plus de 2 500 personnes, participent à la conception, à la construction et au fonctionnement de l'infrastructure de recherche. Ils contribuent également à préparer et à exploiter les expériences, ainsi qu'à analyser les données recueillies pour une communauté d'utilisateurs qui ne cesse de s'accroître : environ 12 000 scientifiques de 105 nationalités, provenant d'instituts dans plus de 70 pays.

Cette année, le CERN a accueilli la Roumanie, son 22<sup>e</sup> État membre, ainsi que Chypre et l'Ukraine, qui sont devenus États membres associés. La Slovénie et l'Inde ont signé des accords pour devenir États membres associés, tandis que d'autres candidatures sont à l'étude. Des accords de coopération internationaux ont également été signés avec la Lettonie et le Qatar. Le Laboratoire poursuit sa politique d'ouverture sur le monde pour défendre la recherche, l'innovation et la diversité.

## RÉPARTITION DES UTILISATEURS DU CERN SELON LE PAYS DE L'INSTITUT DONT ILS DÉPENDENT, AU 31 DÉCEMBRE 2016.



### 6971 ÉTATS MEMBRES

Allemagne 1 284 - Autriche 96 - Belgique 148 - Bulgarie 37 - Danemark 69  
 Espagne 320 - Finlande 119 - France 866 - Grèce 128 - Hongrie 62  
 Israël 68 - Italie 1 440 - Norvège 86 - Pays-Bas 163 - Pologne 252 - Portugal 103  
 Roumanie 100 - Royaume-Uni 845 - Slovaquie 82 - Suède 102 - Suisse 368  
 Tchéquie 233

### 48 ÉTATS MEMBRES ASSOCIÉS EN PHASE PRÉALABLE À L'ADHÉSION

Chypre 15 - Serbie 33

### 182 ÉTATS MEMBRES ASSOCIÉS

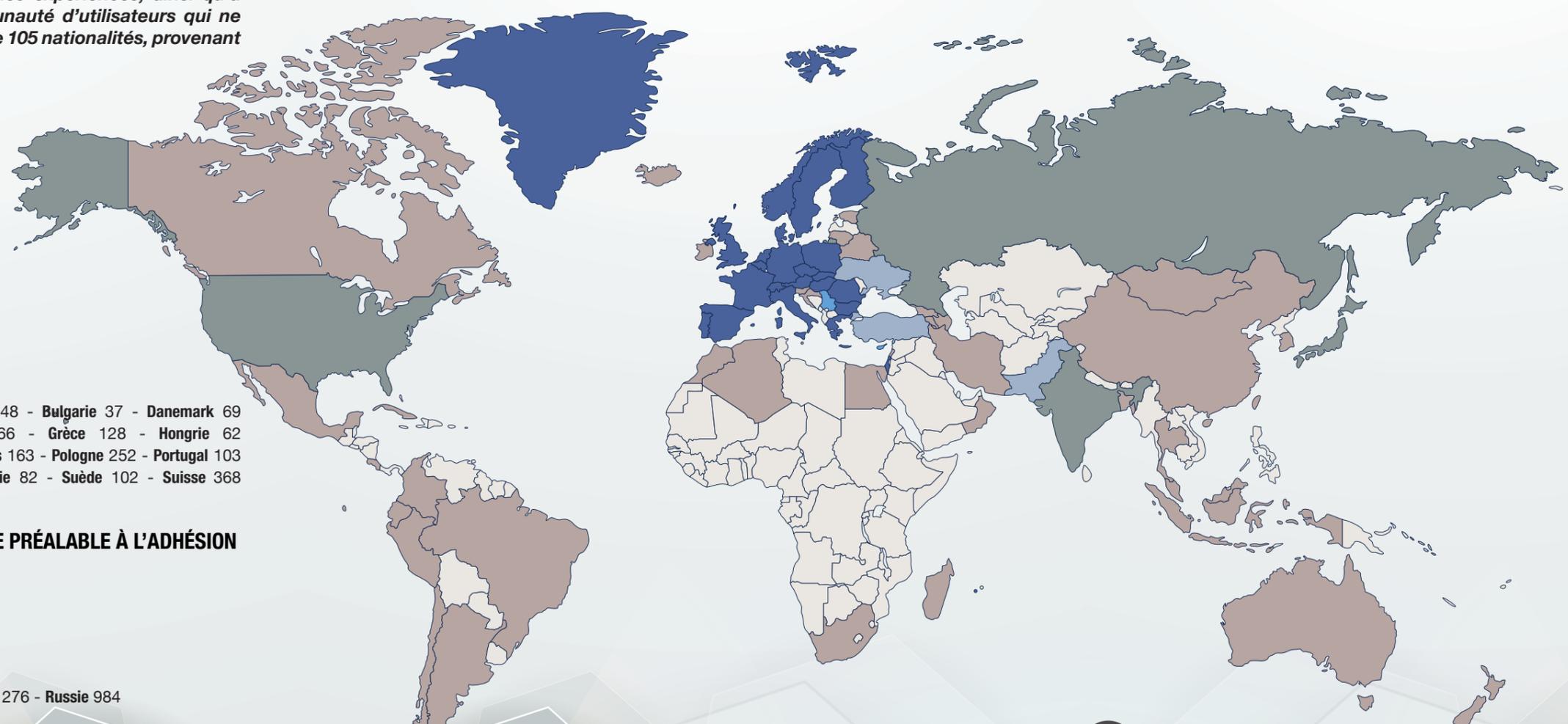
Pakistan 33 - Turquie 121 - Ukraine 28

### 3381 OBSERVATEURS

États-Unis d'Amérique 1 927 - Inde 194 - Japon 276 - Russie 984

### 1239 AUTRES PAYS

Afrique du Sud 50 - Algérie 1 - Argentine 18 - Arménie 15 - Australie 36 - Azerbaïdjan 3  
 Bangladesh 4 - Bélarus 21 - Brésil 132 - Canada 165 - Chili 19 - Chine 209 - Colombie 21  
 Costa Rica 1 - Croatie 27 - Cuba 3 - Égypte 27 - Équateur 2 - Estonie 17  
 Géorgie 26 - Hong Kong 19 - Indonésie 9 - Iran 20  
 Irlande 4 - Islande 3 - Liban 3 - Lituanie 17 - Madagascar 2  
 Malaisie 8 - Malte 6 - Maroc 10 - Mexique 61 - Mongolie 2 - Nouvelle-Zélande 9  
 Oman 3 - Pérou 2 - République de Corée 155 - Singapour 3 - Slovénie 21  
 Taiwan 69 - Thaïlande 16



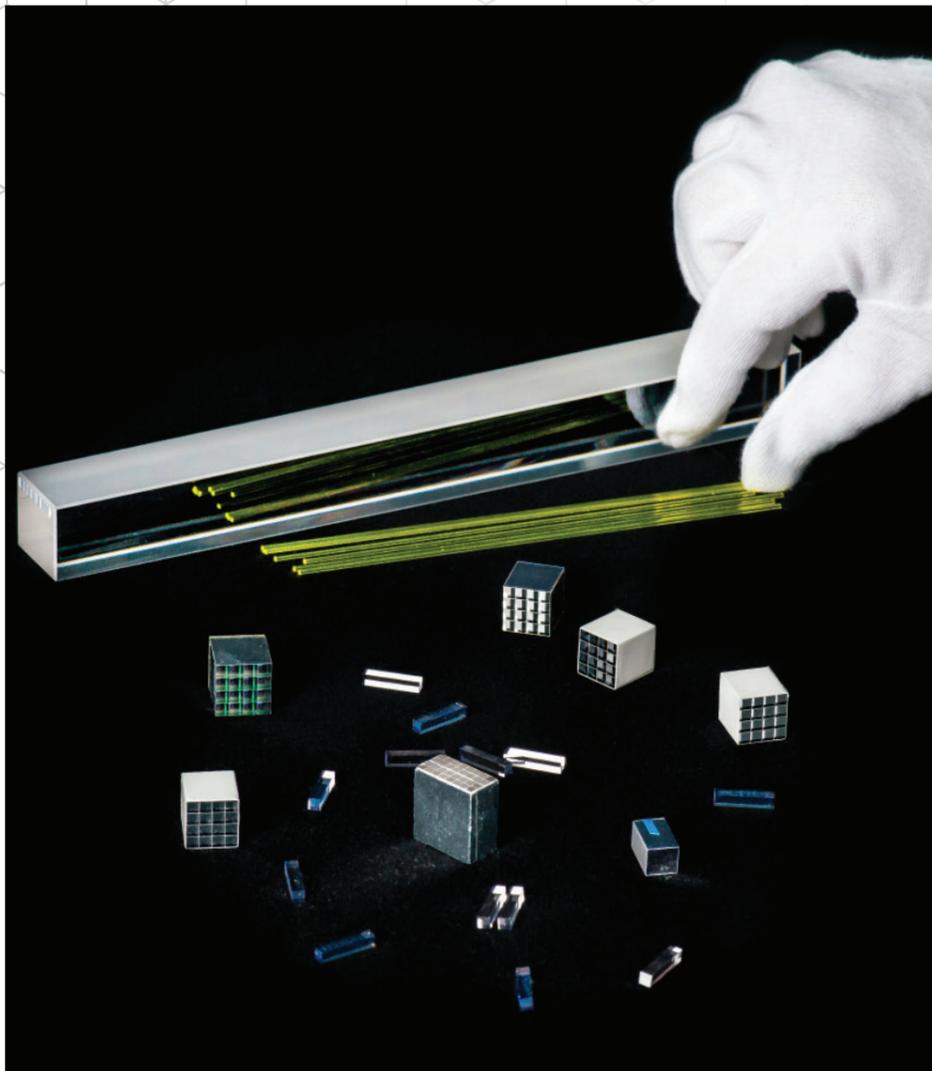
LE NOMBRE D'UTILISATEURS DU CERN A AUGMENTÉ DE PLUS DE 50 % EN 10 ANS.



# REPOUSSER LES FRONTIÈRES DES TECHNOLOGIES

Pour mener des recherches aux frontières de la connaissance, les scientifiques du CERN imaginent et développent des technologies et des processus de pointe, qui peuvent être réutilisés dans d'autres domaines. Le CERN entretient des liens étroits avec l'industrie pour que celle-ci bénéficie de ses dernières innovations. Le transfert de connaissances - transfert de technologies et de savoir-faire vers la société - est une mission importante du Laboratoire.

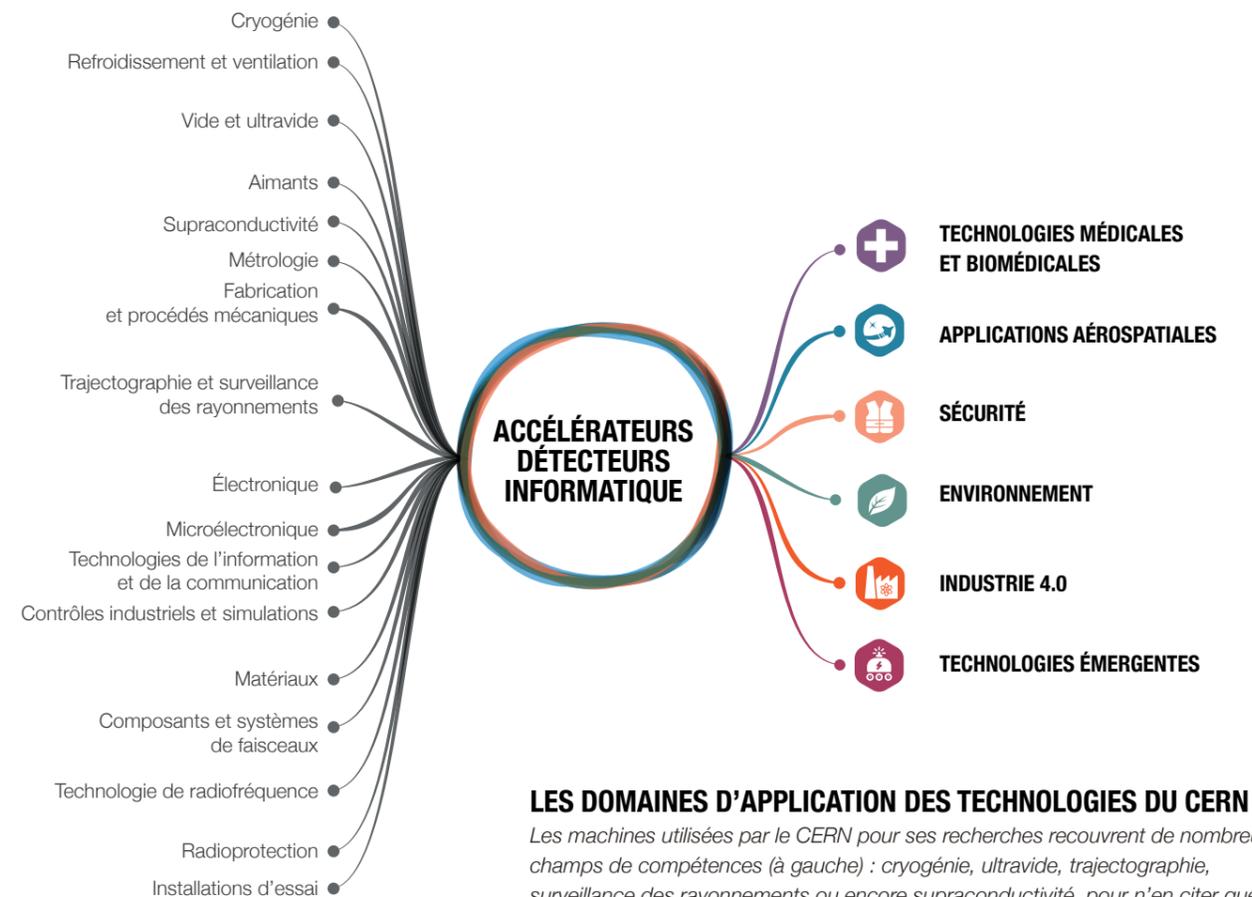
Cette image montre des cristaux scintillants développés pour la physique des hautes énergies (à l'arrière-plan) et pour l'imagerie médicale (petits cristaux et matrices au premier plan) dans le cadre de la collaboration Crystal Clear et du projet européen FP7 EndoTOFPET-US. Crystal Clear, qui a célébré son 25<sup>e</sup> anniversaire en 2016, a été créée pour développer de nouveaux cristaux scintillants pour les expériences LHC. Ses travaux ont bénéficié non seulement à la physique des particules, mais aussi à l'imagerie médicale et à d'autres applications industrielles. Aujourd'hui, Crystal Clear développe de nouveaux prototypes de détecteurs à base de cristaux scintillants à la fois pour la physique des hautes énergies et pour l'imagerie médicale, en particulier la tomographie par émission de positons (TEP). (OPEN-PHO-TECH-2017-005-4)



## DES CHAMPS D'APPLICATION MULTIPLES : DU MÉDICAL À L'AÉROSPATIALE

Le savoir-faire du CERN porte essentiellement sur trois domaines techniques (accélérateurs, détecteurs et informatique), qui recouvrent de nombreux champs de compétences : cryogénie, ultravide, trajectographie, surveillance des rayonnements ou encore supraconductivité, pour n'en citer que quelques-uns. Ces technologies, et les compétences humaines associées, ont des retombées positives sur la société dans de nombreux domaines : technologies médicales et biomédicales, aérospatiale, sécurité, environnement, industrie 4.0 (y compris la robotique et l'Internet industriel des objets). En 2016, la contribution du CERN aux **technologies médicales et biomédicales** a été considérablement renforcée par la définition d'axes stratégiques et la mise en place d'une nouvelle structure organisationnelle. En collaborant étroitement avec la communauté médicale et les États membres et États membres associés, le CERN fait en sorte de fournir des solutions adaptées aux besoins des utilisateurs. L'année 2016 a été trépidante pour MedAustron, une installation située en Autriche, qui utilise un accélérateur pour générer des faisceaux d'ions destinés à la cancérologie et à la recherche. L'accélérateur a fonctionné nuit et jour depuis janvier et, en septembre, a reçu l'agrément pour la

clinique ambulatoire. Le premier traitement médical a eu lieu le 14 décembre. La clinique devrait être entièrement opérationnelle d'ici à 2020, avec un millier de traitements environ prévus par an. Le CERN a largement contribué à l'élaboration et à la construction du système d'accélération de MedAustron. En 2016, le CERN et l'Université de Bath ont lancé un nouveau logiciel *open source* pour l'imagerie médicale. Ce logiciel, qui permet la reconstruction rapide et précise de radiographies 3D, pourra être utilisé pour le diagnostic et le traitement du cancer. Il offre un moyen très simple et abordable d'améliorer la qualité des images tout en réduisant potentiellement l'exposition du patient aux rayonnements. Il utilise la tomographie volumique à faisceau conique, une technique de balayage qui permet d'obtenir des radiographies 2D, puis de les assembler pour former une image en 3D. Baptisé TIGRE (*Tomographic Iterative GPU-based Reconstruction*), il est disponible sur GitHub. La collaboration espère que le code source libre du logiciel permettra aux chercheurs et aux cliniciens de travailler ensemble. Pour soutenir les **applications aérospatiales**, le CERN développe un réseau de partenariats avec des agences spatiales, l'industrie, des universités et des organisations internationales. En juin, le Laboratoire a notamment signé un accord avec le *Swiss Space Center* (SSC). Il peut ainsi bénéficier du savoir-faire du SSC dans le domaine des activités spatiales, ainsi que d'un vaste réseau en



### LES DOMAINES D'APPLICATION DES TECHNOLOGIES DU CERN

Les machines utilisées par le CERN pour ses recherches recouvrent de nombreux champs de compétences (à gauche) : cryogénie, ultravide, trajectographie, surveillance des rayonnements ou encore supraconductivité, pour n'en citer que quelques-uns. Ces technologies ont des retombées positives sur la société dans de nombreux domaines (à droite).



Le nouveau centre de thérapie hadronique MedAustron en Autriche est devenu opérationnel en 2016. Son synchrotron a été développé en collaboration avec le CERN.

Suisse, ce qui facilite le transfert de ses technologies et de ses compétences vers l'aérospatiale. En septembre, un mémorandum d'accord a été signé entre le CERN et le consortium Euclid, conférant à la mission spatiale Euclid le statut d'expérience reconnue par le Laboratoire. Cette mission spatiale européenne, dont le but est d'étudier la nature de la matière noire et l'énergie noire, a officiellement choisi le système de partage de fichiers par machine virtuelle du CERN pour ses neuf centres de données. Appelé CernVM-FS, ce système a été conçu par des chercheurs du CERN pour partager efficacement des logiciels et des codes représentant de grands volumes de données. Actuellement, des expériences de physique des hautes énergies l'utilisent aussi pour distribuer 350 millions de fichiers.

Depuis 2016, le CERN participe au projet de recherche FOSS4I (*Fiber Optic Sensor Systems for Irrigation*), source d'applications environnementales. Ce projet vise à concevoir un système d'irrigation optimisé à partir de technologies mises au point pour la physique des hautes énergies. Des capteurs à fibres optiques destinés à mesurer des paramètres tels que la température, l'humidité ou la présence d'engrais dans le sol de champs cultivés permettront d'imaginer une agriculture plus durable, grâce à des économies d'eau, un rendement des cultures accru et une utilisation moindre de pesticides et d'engrais. Les capteurs d'humidité à fibres optiques sont inspirés de ceux de l'expérience CMS. L'une des particularités de ce projet est sa démarche ouverte : le matériel sera mis à disposition sous licence de matériel libre (*Open Hardware License*), et les logiciels seront publiés sous licence *open source*. Le programme de recherche a été lancé par l'UKLTH (*UK Lebanon Tech hub*). Dans le cadre de son engagement en faveur du transfert de connaissances, le CERN dirigera le projet et fournira un appui continu après son lancement.

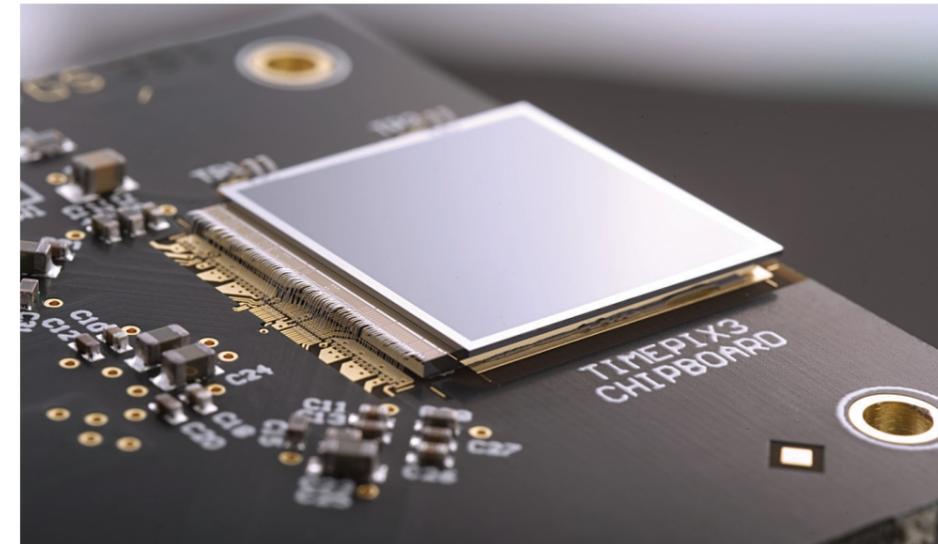
L'industrie 4.0 est la nouvelle tendance de « super-automatisation » de l'industrie, souvent associée à des capteurs connectés, des robots autonomes et des technologies de gestion de données massives. La jeune entreprise Terabee, qui utilise la technologie des capteurs

du CERN, a commencé à fournir des services d'inspection et d'imagerie aériennes à l'aide de drones. Après une collaboration fructueuse avec le CERN, où les capteurs étaient utilisés afin de garantir la sûreté des opérations dans les environnements complexes du LHC, l'entreprise développe désormais ses capteurs. En 2016, elle a remporté, entre autres, la première place dans la catégorie « Automatisation » du prestigieux concours *Startup World* au salon *Automatica*.

## ACCÉLÉRATEUR D'INNOVATION

L'innovation peut être un processus naturel, dans le sens où une nouvelle idée ou technologie finit par se transformer en nouveau besoin ou produit. Ce processus peut aussi être accéléré grâce à des recherches actives. Dans cette optique, le CERN investit dans de nombreuses activités via son groupe Transfert de connaissances, qui propose des conseils, un appui, des formations, des réseaux, des séminaires et des infrastructures afin de faciliter le transfert du savoir-faire du CERN vers l'industrie, puis la société. En 2016, le CERN a été cité comme exemple d'initiative régionale réussie dans le rapport de l'Indice mondial de l'innovation (IMI), publié par l'Organisation mondiale de la propriété intellectuelle (OMPI), l'Université de Cornell et l'INSEAD. Plusieurs séminaires sur le transfert de connaissances, mettant en avant les retombées du CERN pour la société, peuvent également être visionnés gratuitement sur le web.

Le **Fonds pour le transfert de connaissances du CERN** sélectionne des projets innovants pouvant avoir un impact positif sur la société. Au cours des six dernières années, il est devenu un outil incontournable pour créer des liens entre la recherche et l'industrie. À ce jour, 38 projets ont été financés et 21 ont été menés à bien dans de nombreux domaines. En tout, 17 accords de transfert de connaissances ont été conclus avec l'industrie et des instituts de recherche. Au-delà de son rôle de soutien à l'innovation, le Fonds pour le transfert



La puce Timepix3 est un détecteur à pixels hybride polyvalent, élaboré dans le cadre des collaborations Medipix, qui trouve des applications dans l'imagerie médicale, l'enseignement, la dosimétrie spatiale et l'analyse de matériaux. Développés à l'origine pour les expériences LHC, les détecteurs Medipix sont un bel exemple de technologie inventée au CERN ayant des retombées pour la société. (CERN-PHOTO-201702-048-4)

de connaissances a aussi contribué au développement du capital humain. Des étudiants et jeunes professionnels ont acquis une expérience orientée vers l'industrie. Aujourd'hui, ils poursuivent leur carrière dans la recherche fondamentale ou appliquée, ou dans l'industrie. Une autre étape importante a été franchie en 2016 : deux projets cofinancés par la Commission européenne, AIDA-2020 et ARIES, ont intégré un « fonds de validation de principe » inspiré du Fonds pour le transfert de connaissances du CERN.

En 2016, le CERN a financé six nouveaux projets mettant ses technologies au service de nombreux domaines : diagnostics de cancers, aérospatiale, informatique en nuage nouvelle génération, radioprotection et préservation numérique.

Après avoir conclu avec succès sa première phase, l'initiative **SCOAP3** sur le libre accès en physique des particules a été reconduite pour une nouvelle période de trois ans. L'initiative, menée par le CERN, met à la disposition de tous des articles scientifiques, sans coût direct pour les auteurs et les lecteurs. Depuis son lancement en 2014, elle a permis de mettre à la disposition de tous 13 500 articles rédigés par environ 20 000 scientifiques de 100 pays. Cette réussite a été rendue possible grâce à 3 000 bibliothèques réparties dans 43 pays, qui ont alloué au projet les fonds auparavant alloués à leur abonnement aux revues. Huit organismes de financement apportent également leur appui. D'après les éditeurs participants, les téléchargements d'articles ont doublé depuis le début de l'initiative.

Voilà déjà deux ans qu'**IdeaSquare** encourage des équipes pluridisciplinaires d'étudiants de niveau master à présenter de nouvelles idées utiles à la société inspirées par des projets de R&D sur les détecteurs. Cette année, IdeaSquare a organisé ou accueilli plus de 80 manifestations, parmi lesquelles des ateliers de transfert de connaissances, des cours sur l'innovation et des hackatons. Un journal en ligne a été créé, dans lequel sont répertoriés les projets liés à l'éducation et l'innovation afin d'évaluer leur impact sociétal à long terme.

## BÂTIR UNE CULTURE DE L'ENTREPRENEURIAT

Le CERN a continué à développer une culture d'entrepreneuriat. Parmi les nombreuses idées, on retiendra le réseau de centres d'incubation d'entreprises et l'organisation de rencontres et séminaires sur l'entrepreneuriat, où les nouveaux chefs d'entreprises partagent leurs idées et expériences avec des spécialistes. Le CERN a mis en place un réseau de centres d'incubation d'entreprises dans ses États membres afin d'aider les entrepreneurs et petites entreprises technologiques à commercialiser les technologies et le savoir-faire du CERN. En juin, l'Organisation a signé son neuvième accord pour la création d'un centre d'incubation avec l'Institut national italien de physique nucléaire (INFN). Actuellement, 18 jeunes entreprises et entreprises dérivées utilisent des technologies du CERN. En 2016, 23 jeunes entreprises se sont dites intéressées à intégrer six des centres d'incubation existants.

## COLLABORATIONS

Le CERN s'engage auprès d'organisations internationales, établit un réseau de partenariats et participe aux activités de transfert de connaissances pour plusieurs projets cofinancés par la Commission européenne. Le Laboratoire fait partie de plusieurs réseaux de transfert de connaissances, tels que l'EIROforum, qui chapeaute huit organisations internationales de recherche.

Le CERN poursuit ses activités collaboratives dans le cadre de projets cofinancés par la Commission européenne. Sur les 12 nouveaux projets sélectionnés pour des financements en 2016, deux sont coordonnés par le CERN : ARIES, vaste activité d'intégration axée sur la science et la technologie des accélérateurs et centrée sur les applications industrielles et sociétales, et RADSAGA, un réseau de formation Marie Skłodowska-Curie axé sur l'électronique utilisée dans l'espace, l'aviation, au sol et dans les accélérateurs.

# FORMER LES NOUVELLES GÉNÉRATIONS

**Le CERN s'engage auprès de la société par de nombreuses activités d'éducation et de communication, afin de favoriser la compréhension de la science, de mieux faire connaître ses activités, d'inspirer les jeunes, d'améliorer l'enseignement des sciences dans le secondaire et de former une nouvelle génération de scientifiques et d'ingénieurs.**

En 2016, le laboratoire pour les écoles S'Cool LAB du CERN a permis à 5 800 élèves de mener des expériences de physique. Sur cette photo, des étudiants viennent de construire une chambre à brouillard et observent les traces laissées par les particules qui la traverse. (OPEN-PHO-LIFE-2017-008-3)



## FORMER LES SCIENTIFIQUES DE DEMAIN

L'action pédagogique du CERN s'adresse principalement aux enseignants et élèves du secondaire. Seul un enseignant instruit et passionné peut transmettre sa passion à ses élèves et devenir pour eux une source d'inspiration. L'objectif du CERN est d'agir aux côtés des enseignants en les tenant informés des dernières avancées de la recherche en physique des particules.

En 2016, 953 enseignants de sciences de 46 pays ont participé à l'un des 35 programmes de formation d'une semaine organisés dans une langue nationale ou au programme international de trois semaines en anglais, pour en savoir plus sur les découvertes fondamentales de la physique des particules et de la cosmologie, partager leur expérience avec des collègues et, plus important, alimenter leur passion pour la transmettre aux jeunes générations. En visitant le CERN et en dialoguant avec des scientifiques, les enseignants peuvent se familiariser avec la méthode scientifique et découvrir les interactions existant entre hypothèses, théories, données expérimentales, évaluation par les pairs, pensée critique et discussion.

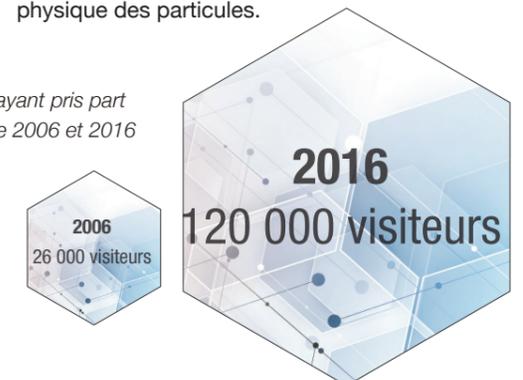
En 2016, le CERN a accueilli 70 000 élèves, soit 60 % de ses visiteurs. Ces visites permettent aux jeunes de mieux comprendre comment la science avance, et peuvent susciter des vocations pour une carrière scientifique ou technologique.

Outre les visites guidées, le CERN propose des programmes d'enseignement aux élèves les plus motivés. Grâce au S'Cool LAB, le laboratoire d'apprentissage du CERN, plus de 5 800 élèves ont participé à des ateliers d'une demi-journée au cours desquels ils ont pu mener leurs propres expériences de physique par petits groupes : construire

des chambres à brouillard, visualiser des rayons X à l'aide de détecteurs à pixels, piéger des particules élémentaires, apprendre les bases de l'accélération des particules ou encore comprendre le fonctionnement d'un scanner TEP. Le concours *Ligne de faisceau pour les écoles* est ouvert aux élèves de 16 ans et plus. Il offre à ces scientifiques en herbe la possibilité de proposer une expérience de physique des particules et de la réaliser auprès d'une ligne de faisceau entièrement équipée, en utilisant le détecteur de leur choix parmi un ensemble prédéfini. Pour la troisième édition du concours, 151 équipes de 37 pays ont envoyé leur candidature. Deux équipes ont été retenues : *Pyramid Hunters* (Pologne), qui s'est penchée sur la tomographie des Pyramides d'Égypte et a étudié l'absorption des muons par le calcaire, et *Relatively Special* (Royaume-Uni), qui a testé la validité de la théorie de la relativité restreinte en utilisant le taux de désintégration des pions.

Les « Masterclasses internationales » permettent à des élèves de « vivre », le temps d'une journée, la recherche en physique des particules. Ce programme annuel, organisé par le réseau IPPOG (Groupe international de communication grand public sur la physique des particules) et soutenu par le CERN, a pour objectif d'encourager les jeunes à travailler comme de vrais scientifiques, en s'appuyant sur des données récentes des expériences LHC. En 2016, plus de 13 000 élèves du secondaire de 52 pays ont visité les universités ou centres de recherches partenaires. Ils ont ainsi pu découvrir comment la recherche en physique des particules est menée, quelles sont les grandes énigmes de la discipline et quelles étapes précèdent une découverte scientifique. En 2016, cinq nouveaux pays ont rejoint le programme (Bangladesh, Géorgie, Monténégro, Russie et Rwanda), reflétant ainsi la dimension internationale de la physique des particules.

Évolution du nombre de visiteurs ayant pris part aux visites guidées du CERN entre 2006 et 2016



Les activités d'éducation et de communication du CERN ont rencontré un grand succès en 2016. Le CERN offre une large palette d'activités de sensibilisation aux élèves afin d'éveiller leur intérêt pour la science fondamentale.

- ◆ **Formation des enseignants** : 953 enseignants de 46 pays, 10 000<sup>e</sup> enseignant
- ◆ **Programmes scolaires** : *Ligne de faisceaux pour les écoles* : 191 équipes candidates • S'Cool LAB : 5 800 élèves  
Masterclasses internationales : 13 000 élèves dans 52 pays
- ◆ **Expositions du CERN** : Expositions permanentes : 70 000 visiteurs • Expositions itinérantes : 100 000 visiteurs
- ◆ **Visites du CERN** : 142 visites protocolaires, 120 000 visiteurs dont 70 000 élèves





La quatrième édition de TEDxCERN s'est intéressée à la curiosité et à la connaissance scientifiques comme moteurs de l'innovation. (OPEN-PHO-LIFE-2017-005-2)

## UN INTÉRÊT INTERNATIONAL

L'intérêt suscité par le CERN auprès des médias internationaux est remarquable : 145 000 articles ont été publiés en 2016 et 628 journalistes du monde entier ont été accueillis lors de 242 visites organisées par le Bureau de presse. Le Laboratoire séduit également le grand public : ses principaux sites web ont reçu 4 millions de visites uniques, et il a été mentionné 1,7 million de fois sur les réseaux sociaux.

Les ressources visuelles et multimédia jouent un rôle essentiel dans les activités d'éducation et de communication du CERN. En 2016, des animations et plus d'une centaine de clips vidéo ont ainsi été produits et mis en ligne ou diffusés aux points de visite et dans les expositions du CERN. Dans le cadre de sa politique d'ouverture, l'Organisation met gratuitement à disposition l'intégralité de ses ressources sur le web. Celles-ci sont régulièrement utilisées à des fins pédagogiques et non lucratives, et permettent de mieux faire connaître les processus et les résultats de la recherche fondamentale et des activités menées par le CERN.

## VISITER LE LABORATOIRE

Les visites du Laboratoire rencontrent un vif succès même auprès des dirigeants internationaux : en 2016, cinq chefs d'État ou de gouvernement ont été accueillis et 142 visites protocolaires ont été organisées. Le CERN attire également le grand public, notamment les enseignants et leurs élèves, qui découvrent comment les travaux du plus grand laboratoire du monde contribuent à résoudre certaines énigmes de l'Univers. Les visiteurs sont de plus en plus nombreux : 120 000 en 2016 contre 26 000 en 2006. Néanmoins, la demande pour les visites de groupe est environ trois fois plus importante, et les créneaux de visites individuelles sont généralement complets cinq minutes après l'ouverture des inscriptions. Par ailleurs, plus de 70 000 personnes ont visité les deux expositions permanentes du CERN (*Microcosm* et *Univers de particules*).

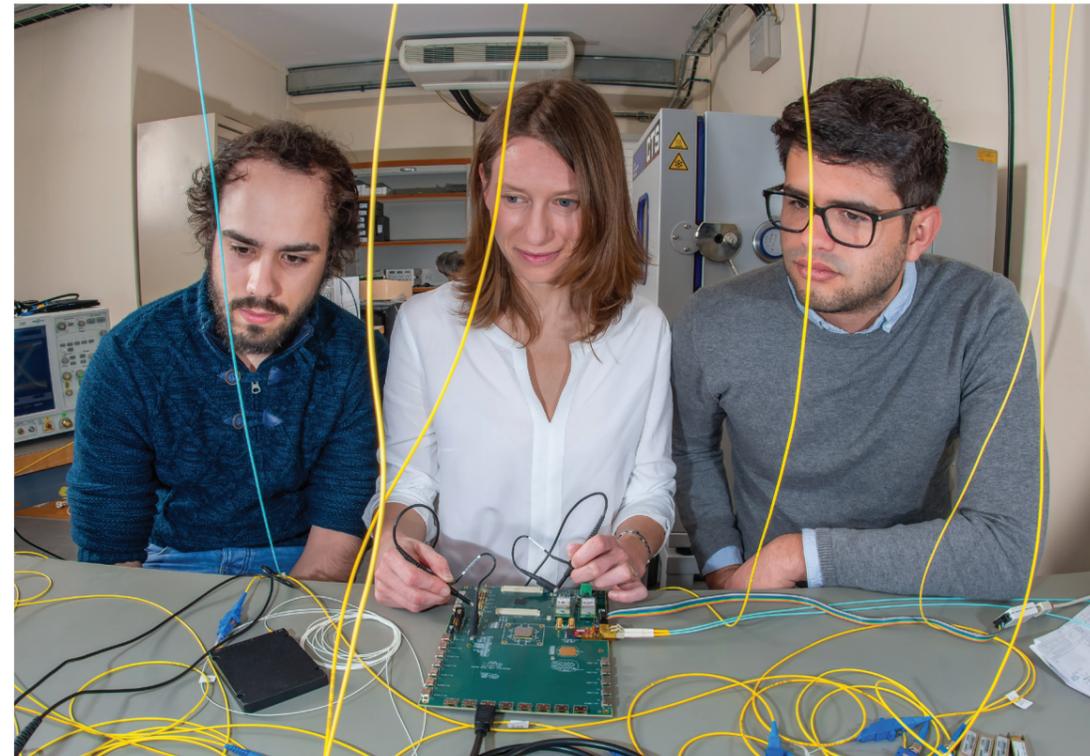


Après 11 mois de travaux de rénovation du Globe de la science et de l'innovation, l'exposition *Univers de particules* a rouvert ses portes et s'est à nouveau placée en tête du classement TripAdvisor des visites et musées dans la région de Genève. (BUL-PHO-VIEW-2015-002-7)

## RETOMBÉES POUR LA CULTURE ET LA POPULATION

En 2016, le CERN a organisé diverses activités pour la population locale, dont 12 conférences publiques, et la quatrième édition de TEDxCERN, sur le thème de la curiosité et de la connaissance scientifiques comme moteurs de l'innovation. Douze intervenants de renom se sont exprimés sur des questions allant des nouveaux tests non invasifs de dépistage prénatal à la recherche de matière noire dans les profondeurs de la Terre. TEDxCERN a attiré 400 personnes, et plus de 3 800 autres ont suivi le webcast ou la retransmission en direct de l'événement depuis 75 lieux dans 33 pays. Le succès de la *Nuit européenne des chercheurs* s'est encore vérifié, avec la venue de plus de 400 personnes au CERN pour des visites et des conférences.

Le programme Arts@CERN adopte une approche interdisciplinaire en rapprochant les mondes de la science et de l'art afin de toucher de nouveaux publics. Le dialogue entre artistes et scientifiques se noue dans le cadre de résidences de un à trois mois, intégralement financées par des institutions artistiques renommées, telles que la FACT (Royaume-Uni), Ars Electronica (Autriche) et Pro Helvetia (Suisse). Ces résidences rencontrent un franc succès : 904 candidatures ont été reçues pour la résidence en 2017 en collaboration avec la FACT.



Les programmes de formation du CERN sont l'occasion d'acquérir de l'expérience en tout début de carrière. Ici, un étudiant de master et un ingénieur boursier travaillent aux côtés de leur superviseuse sur des systèmes électroniques destinés à des expériences. (OPEN-PHO-TECH-2017-003-1)

## LES PREMIERS PAS D'UNE CARRIÈRE

La formation des jeunes scientifiques fait aussi partie intégrante des activités d'éducation du CERN. Le Laboratoire offre à un flux continu de jeunes diplômés et de doctorants hautement qualifiés un environnement de travail enrichissant, l'excellence technique, ainsi qu'une expérience internationale précieuse pour travailler ensuite dans les États membres.

Le programme des étudiants d'été permet de passer deux à trois mois au sein d'un groupe de recherche, d'assister à des conférences de spécialistes, de visiter les installations du CERN et de participer à des ateliers et à des discussions. En 2016, plus de 2 000 candidatures ont été reçues, et 278 étudiants de 87 pays ont été sélectionnés.

Parmi eux, 38 étudiants de 22 pays ont eu la possibilité de travailler pendant deux mois sur des projets informatiques de pointe dans le cadre du programme des étudiants d'été CERN openlab, conçu spécifiquement pour les étudiants ayant de solides compétences en informatique.

Le programme des boursiers du CERN s'adresse aux nouveaux diplômés d'universités ou d'instituts techniques. Cette année, 412 boursiers ont été retenus parmi 2 170 candidatures. Ils passeront deux à trois ans au sein

d'une expérience de recherche en physique des particules ou d'un projet de développement en ingénierie ou dans d'autres domaines techniques.

Le programme TTE (*Technician Training Experience*) fait partie du programme des boursiers du CERN et permet à des techniciens hautement qualifiés de travailler au Laboratoire pendant deux ans pour donner de l'élan à leur carrière ou les préparer à poursuivre des études plus poussées. Sur 167 candidatures, 46 jeunes techniciens de neuf pays ont été sélectionnés.

Quant aux programmes destinés aux étudiants techniques et administratifs, ils ont permis à 287 étudiants sur 1 486 candidats de suivre une formation pratique de quatre à 14 mois dans les domaines de la physique appliquée, de l'ingénierie, de l'informatique ou de l'administration.

Le programme des doctorants permet enfin à des étudiants diplômés de filières techniques de travailler sur leur thèse au CERN pendant une durée pouvant aller jusqu'à trois ans. Sur 205 candidats, 85 doctorants ont été sélectionnés.

# AGIR POUR UNE RECHERCHE RESPONSABLE

**Le CERN s'engage à protéger la santé et la sécurité de tous ceux qui prennent part à ses activités, travaillent sur son domaine ou vivent à proximité de ses installations. Le Laboratoire s'efforce de limiter l'impact de ses activités sur l'environnement et met en œuvre les meilleures pratiques en matière de sécurité.**

Vue du site principal du CERN avec, au premier plan, le Globe de la science et de l'innovation. Le Globe, conçu comme un symbole de développement durable, a été rouvert au public en 2016 après avoir été entièrement rénové. (OPEN-PHO-LIFE-2017-009-2)



Depuis le lancement en 2012 d'une campagne de mise en conformité des machines-outils, environ 900 machines comme celle-ci ont été testées et déclarées conformes aux règles de sécurité du CERN. (CERN-PHOTO-201704-108-5)



Utilisation du nouveau logiciel Kryolize pour tester une soupape de surpression. (OPEN-PHO-SAFETY-2017-001-2)

## DES BASES SOLIDES POUR LA RECHERCHE

En matière de santé, sécurité et protection de l'environnement, les mesures nécessaires pour le deuxième long arrêt du LHC ont bien progressé. Des recherches de premier plan ont été menées sur la sécurité cryogénique et la détection des rayonnements ionisants. Deux nouveaux organes ont été créés : un comité directeur pour la protection de l'environnement surveillera les activités du CERN afin de limiter leur impact sur l'environnement, et un groupe de travail sera chargé d'élaborer un plan relatif à la mobilité au CERN. Ils commenceront tous deux leurs travaux en 2017.

## SANTÉ ET SÉCURITÉ AU TRAVAIL

Le programme de recherche du CERN, riche et varié, compte plusieurs nouveaux projets en phase de démarrage. Il est essentiel que chacun de ces projets puisse atteindre ses objectifs dans des conditions sanitaires, environnementales et de sécurité optimales. C'est dans ce but que les équipes chargées de la sécurité collaborent étroitement avec le personnel des projets. En 2016, des autorisations de sécurité ont été délivrées aux expériences NA61/SHINE et AWAKE. S'assurer que l'infrastructure en place reste conforme aux dernières normes de sécurité est tout aussi important ; en 2016, la Direction du CERN a ainsi donné son feu vert au projet de renforcement de la sécurité incendie du SPS.

Le deuxième long arrêt du LHC débutera fin 2018. Pendant 24 mois, de nombreux travaux seront effectués en surface comme en souterrain. Les préparatifs pour la sécurité des personnes et de l'équipement progressent : les installations de sécurité requises sont passées en revue, et deux formations de sécurité ciblées seront mises en place pendant la période précédant l'arrêt.

## À LA POINTE DE LA SÉCURITÉ CRYOGÉNIQUE

Le CERN a tenu en septembre son premier séminaire de sécurité cryogénique. Rassemblant 120 participants d'instituts de recherche et d'entreprises du monde entier, ce séminaire portait sur les connaissances du Laboratoire en matière de cryogénie, liées en particulier aux températures extrêmement basses nécessaires au fonctionnement du LHC. Parmi les sujets abordés : la recherche-développement, les normes internationales de sécurité cryogénique, l'évaluation des risques et l'élaboration d'une réglementation pour les systèmes de sécurité cryogénique. Le séminaire a été marqué par la présentation du projet Kryolize, soutenu par le Fonds pour le transfert de connaissances du CERN (voir p. 34), qui crée des logiciels pour les systèmes de sécurité cryogénique utilisés tant à la température de l'hélium liquide qu'à celle de l'azote liquide. Les possibilités d'application de Kryolize dans les laboratoires de recherche et l'industrie sont nombreuses ; sept licences universitaires et une licence commerciale d'utilisation ont déjà été octroyées.



### Des chevaux pour entretenir les forêts du CERN

Le domaine du CERN couvre 625 hectares, dont 200 hectares environ sont des sites clôturés sur lesquels se déroulent les activités de recherche. Les terrains restants sont des champs loués à des agriculteurs et des zones forestières (environ 90 hectares), situées principalement en France et gérées par l'Office national des forêts (ONF). En 2016, l'ONF a fait appel à des chevaux pour l'évacuation des arbres abattus dans certains bois du CERN. Le débardage avec chevaux minimise l'impact sur l'environnement. (CERN- PHOTO-201703-074-12)

### MÉDECINE DU TRAVAIL ET PRÉPARATION AUX SITUATIONS D'URGENCE

La collaboration établie en 2015 entre le CERN et les Hôpitaux Universitaires de Genève (HUG) a conduit à la création d'une unité d'intervention d'urgence sur le site de Meyrin. Celle-ci intervient sur les sites suisse et français du CERN, mais aussi aux alentours. Cette unité a permis de réduire considérablement le délai d'arrivée des secours sur la zone couverte. En 2016, l'équipe a effectué une soixantaine d'interventions sur le domaine du CERN.

La signature, en décembre, d'un accord tripartite entre le CERN et ses États hôtes a renforcé la coopération transfrontalière pour les situations d'urgence sur les sites du CERN et aux alentours. Les interventions des services de secours des deux États hôtes étaient auparavant régies par deux accords conclus, pour l'un, entre le CERN et les autorités locales de Genève et, pour l'autre, entre le CERN et le département de l'Ain. Les procédures et les exercices d'entraînement sont désormais élaborés conjointement, le Service de secours et du feu du CERN bénéficiant de l'expérience des services de la France et de la Suisse.

### RADIOPROTECTION

En 2016, les résultats du CERN en matière de radioprotection sont restés excellents. Sur les 8 909 personnes contrôlées, seules huit ont reçu une dose individuelle supérieure à 1 millisievert (mSv), toutes les doses étant en deçà de 2 mSv. À titre de comparaison, la dose moyenne reçue dans la nature et lors de procédures médicales par les citoyens des États membres du CERN se situe entre 3 et 4 mSv par an.

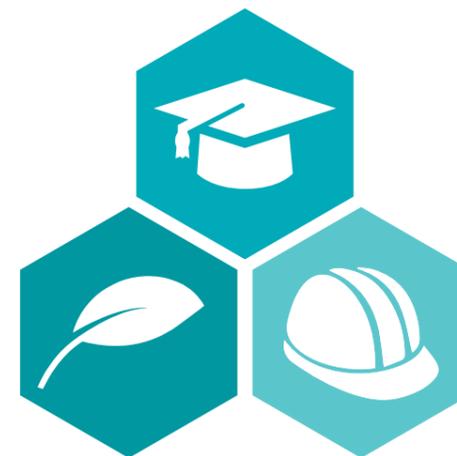
Cette bonne performance du CERN est le fruit d'efforts constants pour rester à l'avant-garde de la radioprotection. En 2016, la surveillance assurée en permanence par le système RAMSES sur le domaine du CERN et aux alentours a été étendue au hall Est de l'accélérateur PS et à d'autres

installations situées dans la zone d'expérimentation Nord de l'accélérateur SPS. Les nouvelles installations AWAKE et MEDICIS, ainsi que l'expérience GBAR, en sont maintenant équipées.

Dix prototypes de détecteurs attendent d'être testés pour former la prochaine génération d'instruments électroniques du système RAMSES. Conçus pour être hautement performants, peu onéreux et ne nécessiter qu'une maintenance réduite, ils seront installés pendant le deuxième long arrêt et déployés lors de la troisième période d'exploitation du LHC, qui débutera en 2021.

Conformément aux accords conclus avec les États hôtes, le centre de traitement des déchets radioactifs du CERN a intensifié ses opérations en 2016, éliminant quelque 1 200 m<sup>3</sup> de déchets radioactifs de faible activité, soit beaucoup plus que les 310 m<sup>3</sup> produits pendant l'année. L'élimination sûre des déchets radioactifs devrait franchir une nouvelle étape en 2017, suite à la réalisation d'une étude préparatoire sur l'élimination des modules d'accélération supraconducteurs du LEP, l'ancien grand accélérateur du CERN, qui a cessé d'être exploité en 2000. La méthode d'élimination proposée par le CERN a été approuvée par les autorités suisses.

L'optimisation de l'empreinte écologique de la recherche en physique des particules a franchi un cap avec l'édition du programme informatique ActiWiz3. Ce programme aide les chercheurs à déterminer les matériels exposant le personnel à une dose minimale, ainsi que le niveau le plus bas de déchets radioactifs dans l'environnement d'un accélérateur ou d'une expérience. Il est devenu l'un des outils standard de caractérisation et d'autorisation pour les déchets et les équipements radioactifs au CERN. En outre, son utilisation a contribué à la publication, en 2016, par le Département de l'Énergie des États-Unis, d'une nouvelle norme d'autorisation des matériels. Dix licences d'ActiWiz ont été octroyées.



### FORMATION À LA SÉCURITÉ

La restructuration des cours de sécurité en ligne du CERN s'est poursuivie en 2016. La nouvelle approche modulaire entamée en 2015 permet de proposer des cours personnalisés tout en facilitant leur mise à jour. Cette année, six modules (nouveaux ou remaniés) ont été mis en ligne, 43 866 cours en ligne ont été suivis et 6 320 personnes ont pris part aux 789 cours en salle.

### PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT

Le réseau de surveillance environnementale a été renforcé grâce à l'installation de trois nouvelles stations de surveillance. Au total, 136 stations contrôlent en permanence les rayonnements et la qualité de l'air et de l'eau, tout en collectant des données météorologiques grâce à 539 canaux de mesure. En outre, 13 détecteurs d'hydrocarbures ont été ajoutés au système de surveillance des eaux usées du CERN, permettant la détection précoce de polluants et l'intervention rapide des services d'urgence du Laboratoire si nécessaire. L'évaluation détaillée des mesures de prévention de la pollution de l'eau et du sol dans les zones où des agents liquides chimiques sont utilisés a touché à sa fin. La méthodologie et les outils nécessaires à une inspection et à une évaluation des risques ont été mis en place.

### GÉRER LA MOBILITÉ

La mobilité au CERN est une question importante : elle couvre les déplacements quotidiens travail-domicile ainsi que ceux effectués sur les sites du Laboratoire. Le CERN a toujours favorisé des solutions écologiques : si des voitures peuvent être louées, des vélos sont disponibles gratuitement. Afin de faciliter le déplacement et d'améliorer la sécurité des cyclistes, une nouvelle piste cyclable a été inaugurée en octobre. Longue de 2,4 kilomètres, elle relie

### Formation à la sécurité

43 866 cours de sécurité en ligne suivis  
789 cours de sécurité en salle dispensés à 6 320 personnes  
6 cours de sécurité en ligne (nouveaux ou remaniés) produits

### Protection de l'environnement

136 stations de surveillance de l'environnement contrôlent les rayonnements et la qualité de l'air et de l'eau  
13 nouveaux détecteurs d'hydrocarbures surveillent le réseau de traitement des eaux usées du CERN

### Radioprotection et sécurité générale

1 200 m<sup>3</sup> de déchets radioactifs de faible activité éliminés en toute sécurité  
18 licences d'utilisation de progiciels de sécurité développés par le CERN  
Plus de 500 vélos à la disposition du personnel du CERN pour se déplacer sur le domaine

les deux sites principaux du CERN et a été financée par le CERN et les collectivités territoriales françaises.

En vue d'améliorer la sécurité et de promouvoir la mobilité verte au CERN, la fonction de coordinateur de la mobilité a été créée en 2016. En collaboration avec un groupe de travail sur la mobilité à l'échelle du Laboratoire, cette personne élaborera un plan relatif à la mobilité au CERN et travaillera avec des acteurs locaux pour promouvoir des initiatives vertes, telles que la campagne Bike2Work en Suisse ou le Challenge Mobilité en France, tout en améliorant la sécurité pour tous les usagers de la route.

### BÂTIR UN AVENIR PLUS VERT

Après une période de rénovation, le Globe de la science et de l'innovation du CERN a rouvert ses portes au public. Conçu comme un symbole de développement durable, le Globe n'a pas été le seul bâtiment à capter l'attention en 2016. De nombreux autres ont fait l'objet d'une rénovation sur les sites du CERN.

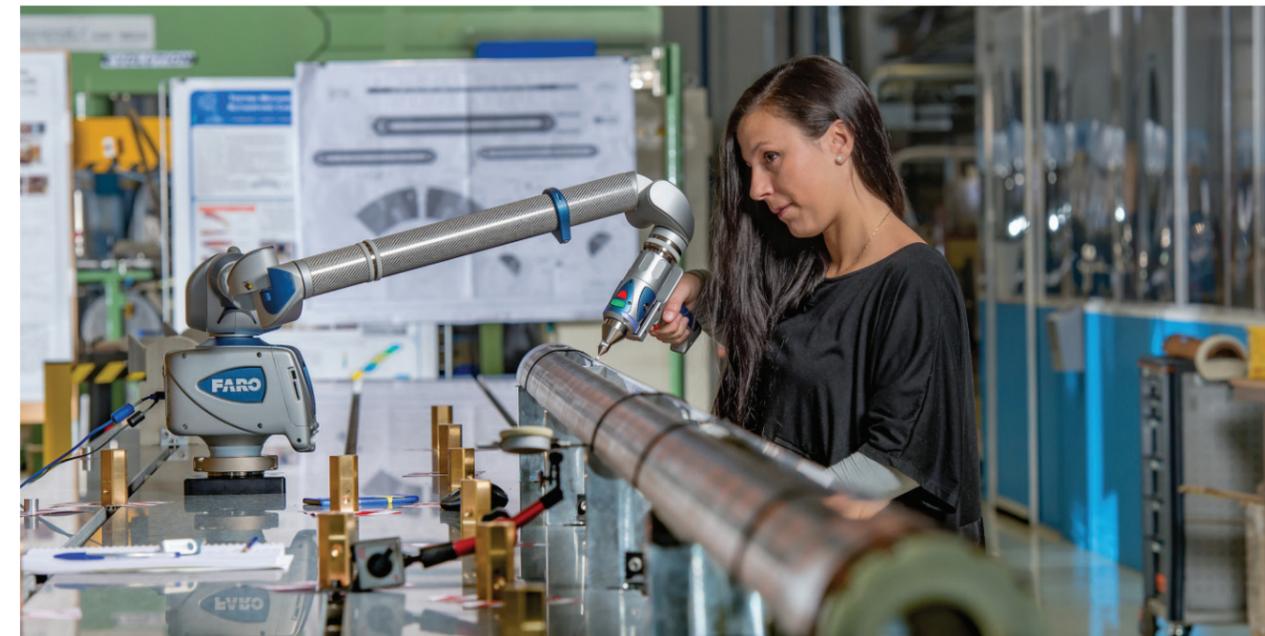
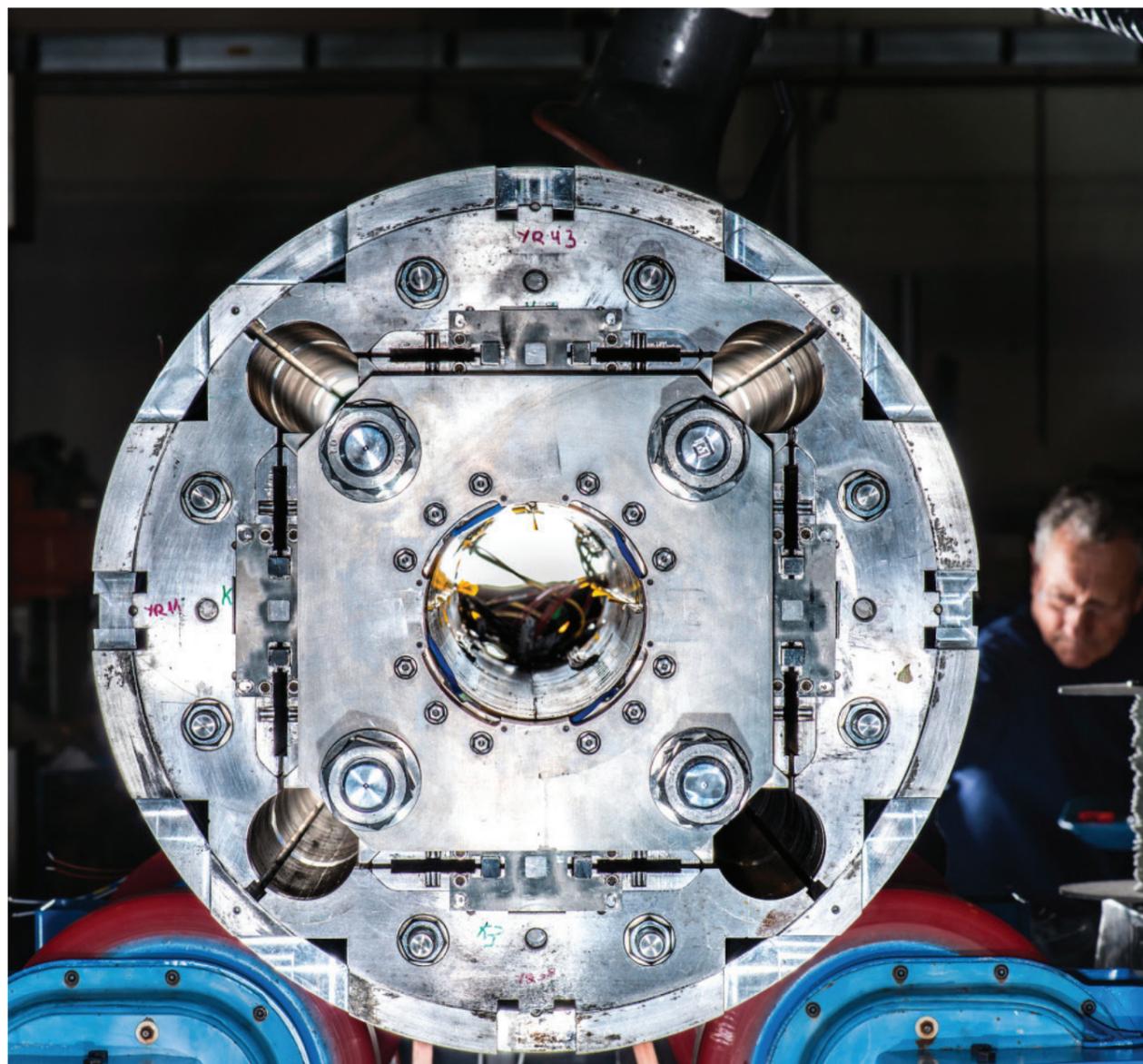
Au travail dans l'une des stations de surveillance environnementale du CERN. (CERN-PHOTO-201603-064-1)



# CONSTRUIRE L'AVENIR

Au CERN, physiciens, ingénieurs et techniciens imaginent, conçoivent et construisent les installations qui permettront à la communauté scientifique d'enrichir les connaissances fondamentales. Du LHC à haute luminosité aux accélérateurs des générations futures, en passant par une nouvelle machine pour percer les mystères de l'antimatière, les projets ont bien avancé en 2016.

Vue d'un prototype court d'un aimant quadripôle pour le LHC à haute luminosité. (OPEN-PHO-ACCEL-2017-010-2)



Une scientifique contrôle très précisément la géométrie de la bobine d'un aimant dipôle pour le LHC à haute luminosité. (OPEN-PHO-ACCEL-2017-010-1)

## PLEINE VITESSE POUR LA HAUTE LUMINOSITÉ

La cadence s'accélère pour le Grand collisionneur de hadrons à haute luminosité. Dans les ateliers, en Europe, aux États-Unis ou au Japon, les équipes s'affairent pour développer le LHC de deuxième génération, qui doit entrer en service en 2026. Le LHC à haute luminosité augmentera d'un facteur 5 à 10 le nombre de collisions pour atteindre une luminosité intégrée de 250 femtobarns inverses par an. Avec un nombre de collisions accru, les physiciens pourront étudier en détail les phénomènes découverts par le LHC. Pour réaliser cette amélioration majeure, il faut installer des équipements sur 1,2 kilomètre de l'accélérateur actuel.

Deux fois plus de particules circuleront dans la machine ; elles seront réparties dans des paquets plus denses. De nouveaux aimants de focalisation, plus puissants, seront chargés de resserrer les paquets de particules avant leur croisement au centre des expériences ATLAS et CMS. Vingt-quatre aimants quadripôles de deux longueurs différentes sont ainsi en cours de fabrication.

Ces aimants font appel au niobium-étain pour générer des champs magnétiques de 11,4 teslas, contre 8,3 teslas pour ceux du LHC. La mise en œuvre de ce composé est complexe. Au CERN, la production de câbles de niobium-étain a commencé depuis 3 ans : plus de 21 kilomètres ont été produits. Les procédés délicats utilisés pour former des bobines d'aimants à partir de ces câbles ont été validés.

La mise au point des aimants s'est poursuivie dans le cadre de la collaboration entre le CERN et l'étude LARP (LHC Accelerator Research Program), qui réunit plusieurs laboratoires des États-Unis. Alors que des prototypes courts étaient testés avec succès, la production des prototypes à taille réelle était lancée. La première bobine, longue de

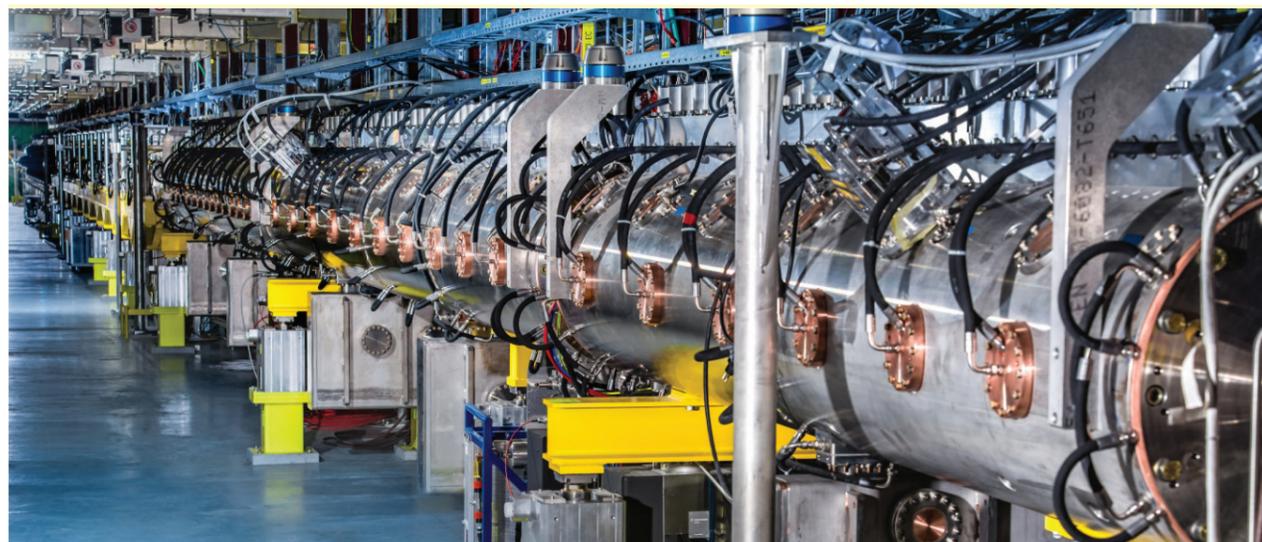
7,5 mètres, a été fabriquée au CERN, et quatre autres, de 4,5 mètres, étaient en cours d'assemblage aux États-Unis. Par ailleurs, des aimants de courbures (dipôles), plus courts et plus puissants que ceux du LHC, également à base de niobium-étain, sont en développement. Au CERN, la fabrication du prototype à taille réelle a été lancée. Par ailleurs, en janvier, le premier aimant correcteur était prêt, ouvrant la voie à la fabrication de 35 autres aimants correcteurs du même type.

Pour tester et qualifier les aimants, le hall de test des aimants a été entièrement rénové. De nouveaux bancs d'essai ont été mis en service, permettant d'accueillir des aimants de plus grands diamètres et délivrant des intensités de courant allant jusqu'à 20 000 et 30 000 ampères.

Les cavités dites « crabes » figurent parmi les innovations majeures du futur collisionneur. Elles donneront une impulsion transversale aux paquets pour les orienter avant la collision : leur utilisation permettra de tripler la luminosité instantanée. Deux prototypes ont été construits, au CERN et aux États-Unis, et un prototype de cryostat en titane pour ces cavités a été testé avec succès.

Avec plus de particules en circulation, la protection de la machine doit être renforcée. Cette protection repose sur des collimateurs chargés d'absorber les particules qui s'éloignent de la trajectoire. Le choix de nouveaux collimateurs a été validé après des tests concluants.

Les options retenues pour le projet LHC à haute luminosité – notamment les grands ouvrages souterrains autour des expériences ATLAS et CMS, et une configuration nouvelle des équipements – ont été validées par un groupe d'experts internationaux. L'étude sur les coûts et le calendrier réalisée par ce groupe a été publiée en 2016.



Vue de l'accélérateur Linac 4 de 86 mètres de long. En 2016, le Linac 4 a atteint son énergie nominale de 160 MeV. Il deviendra le premier maillon de la chaîne d'accélération du LHC après 2020. (OPEN-PHO-ACCEL-2017-011-3)

## LE NOUVEL ACCÉLÉRATEUR LINÉAIRE ATTEINT SON OBJECTIF D'ÉNERGIE

Le nouvel accélérateur linéaire du CERN est désormais opérationnel. Le 25 octobre, le Linac 4 a accéléré un faisceau jusqu'à son énergie nominale, soit 160 MeV. Après neuf ans de développement, cette performance marque une étape importante.

Après le long arrêt prévu en 2019-2020, le Linac 4 remplacera le Linac 2. Il deviendra ainsi le premier maillon de la chaîne des accélérateurs et portera l'énergie de 50 MeV à 160 MeV. Sa mise en service est une étape cruciale du projet d'amélioration des injecteurs, qui vise à préparer les injecteurs du LHC à l'exploitation à haute luminosité.

Le Linac 4 enverra des ions hydrogène négatifs (soit un atome d'hydrogène et un électron supplémentaire) vers le Booster du PS, deuxième accélérateur de la chaîne d'injection. L'utilisation d'ions hydrogène, une première au CERN, contribuera à augmenter la luminosité du LHC en vue du projet LHC à haute luminosité, en permettant la production de faisceaux haute brillance.

Le Linac 4, long de 86 mètres, comprend quatre types de structures qui accélèrent les particules en les faisant passer par différents seuils. Les cavités accélératrices des deux derniers seuils, mises en service en 2016, ont porté le faisceau d'essai à 100 MeV en juillet, puis à 160 MeV quelques mois plus tard.

Une fois les paramètres des faisceaux optimisés, un moyen innovant de transférer les particules du Linac 4 vers le Booster du PS a été testé : le faisceau d'ions hydrogène de 160 MeV est envoyé sur une feuille de carbone très mince, qui dépouille les ions de leurs deux électrons. En 2017, le Linac 4 entrera dans une phase de tests, qui durera un an.

## LES EXPÉRIENCES SUR LA VOIE DU PERFECTIONNEMENT

Lorsque le LHC fonctionnera à haute luminosité, les expériences devront être capables d'enregistrer cinq à dix fois plus de données : 140 à 200 collisions de protons se produiront à chaque croisement. Les collaborations LHC travaillent à des améliorations majeures de leur détecteur, qui entreront progressivement en fonction d'ici à 2025. L'objectif est d'augmenter l'efficacité des systèmes de déclenchement et d'acquisition, d'améliorer la granularité des trajectographes et de renforcer la résistance des parties les plus exposées aux radiations.

LHCb prépare une métamorphose complète pour la troisième période d'exploitation, en 2021. Quasiment tous les trajectographes seront remplacés et l'électronique de lecture de tous les sous-détecteurs sera renouvelée. L'expérience passera ainsi d'une fréquence de lecture de 1 à 40 MHz. Les études de conception ont été finalisées en 2016 et les prototypes sont en cours de développement. LHCb va également remplacer son système de déclenchement matériel par un système uniquement formé de logiciels fonctionnant dans une nouvelle ferme de processeurs.

ALICE se prépare aussi à une grande transformation. La construction d'un nouveau trajectographe interne a démarré : d'une surface de 10 m<sup>2</sup>, il est composé de nouveaux capteurs à pixels offrant une excellente résolution pour un coût modique. La chambre à projection temporelle, le grand trajectographe entourant le détecteur interne, sera dotée de détecteurs à gaz GEM (*Gas Electron Multiplier*) pour augmenter sa vitesse de prise de données. La construction de l'électronique de lecture a commencé. ALICE développe également un système de lecture et de reconstruction des événements en ligne, sans déclenchement préalable, sur une ferme de processeurs.



En 2016, CMS a terminé l'assemblage de son nouveau détecteur à pixels. Il améliorera la reconstruction des traces des particules chargées au plus près des collisions. (CERN-PHOTO-201609-239-6)

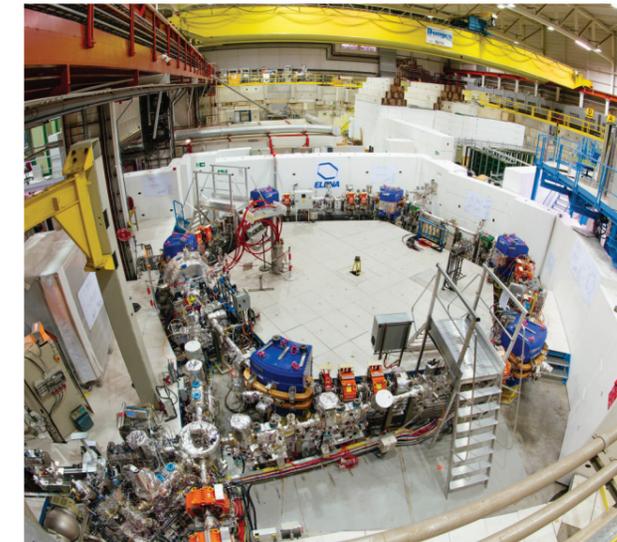
CMS a terminé l'assemblage de son nouveau détecteur à pixels qui entrera en service en 2017 : il est doté de 124 millions de pixels contre 66 pour son prédécesseur. La couche interne est plus proche du point de collision et la quantité de matière est réduite pour une meilleure précision des mesures.

Pour le LHC à haute luminosité, CMS va ajouter des détecteurs à gaz GEM sur le système de détection des muons, dans les régions à petits angles, pour améliorer la reconstruction des trajectoires. Quelques prototypes de chambres GEM ont été installés sur le détecteur et seront testés en 2017.

Durant le troisième long arrêt technique, après 2023, CMS va également remplacer le trajectographe et les bouchons du calorimètre électromagnétique. Les capteurs au silicium, qui composeront le futur détecteur, sont en cours de développement.

Le détecteur ATLAS sera équipé de deux nouveaux détecteurs à muons en forme de roue pour les particules émises à angles modérés par rapport à la ligne de faisceau. Les modules de ces roues sont formés d'un assemblage de détecteurs à gaz Micromegas et TGC (*Thin Gap Chambers*), contribuant à la mesure de la trajectoire des muons ainsi qu'au déclenchement. Un module de Micromegas a été assemblé et testé au CERN. Les premières cartes électroniques ont été produites et la fabrication de la structure mécanique des roues a débuté.

Les équipes d'ATLAS conçoivent également un nouveau trajectographe interne. Un nouveau système de déclenchement, combinant les informations des chambres à muons et des calorimètres pour une sélection des événements plus élaborée, a été développé pour être installé et mis en service en 2017.



Vue de l'anneau ELENA de 30 mètres de circonférence. Le nouveau décélérateur d'antimatière a démarré les tests avec faisceau en novembre 2016. (CERN-PHOTO-201611-300-2)

## UN NOUVEL ANNEAU POUR RALENTIR L'ANTIMATIÈRE

Avec ses 30 mètres de circonférence, on dirait un accélérateur miniature. Contrairement à la plupart des accélérateurs du CERN, ELENA se laisse embrasser du regard. Mais la grande différence est que cette machine n'accélère pas, mais décélère les particules. Après cinq ans de développement, l'anneau de décélération ELENA (*Extra Low Energy Antiproton*) a effectué en novembre ses premiers tests avec faisceau.

La mission d'ELENA est de ralentir encore davantage les antiprotons déjà décélérés par le Décélérateur d'antiprotons (AD), installation qui envoie des antiprotons aux expériences étudiant l'antimatière. ELENA réduira leur énergie d'un facteur 50, de 5,3 MeV à seulement 0,1 MeV. Plus les antiprotons sont lents, plus il est facile pour les expériences de les piéger. ELENA recevra ses premiers antiprotons de l'AD en 2017. En attendant, les premiers essais ont été menés au moyen d'une source d'ions indépendante.

Décélérer des faisceaux est aussi compliqué que les accélérer. À basse énergie, les faisceaux sont plus sensibles aux perturbations extérieures, ce qui les rend plus difficiles à contrôler. C'est pourquoi ELENA est doté d'aimants optimisés pour fonctionner à des niveaux de champ très faibles. La construction d'ELENA prendra fin en 2017, avec l'installation du système de refroidissement par électrons. Ce dispositif permettra d'augmenter la densité des faisceaux ; avec des faisceaux plus lents et plus denses, les expériences pourront piéger de 10 à 100 fois plus d'antiprotons, ce qui contribuera au progrès des études sur les propriétés de l'antimatière. Six expériences ont été retenues pour recevoir les antiprotons d'ELENA, dont la première, GBAR, démarrera son installation en 2017.

## QUEL ACCÉLÉRATEUR POUR LE FUTUR ?

Les physiciens esquissent l'avenir de la physique des hautes énergies au-delà de 2035. Deux options de collisionneur, circulaire ou linéaire, sont envisagées. L'objectif est de présenter une étude préliminaire en 2018, pour la mise à jour de la stratégie européenne pour la physique des particules en 2019, qui définira les grandes orientations.

La collaboration **FCC (Future Circular Collider)**, qui réunit plus d'une centaine d'instituts et une dizaine d'entreprises de 32 pays, étudie la possibilité d'un collisionneur circulaire d'environ 100 kilomètres de circonférence. Il ferait entrer en collision des hadrons (comme le LHC, mais à une énergie sept fois plus élevée, soit 100 TeV) ou des leptons. L'étude porte également sur un LHC à plus haute énergie dans le tunnel existant.

En 2016, l'intérêt pour la physique des deux scénarios, électron-positon et proton-proton, a été démontré. L'étude de l'optique (manière dont les faisceaux sont orientés et concentrés) s'est achevée. L'emplacement du tunnel dans le bassin genevois a été étudié et la configuration des tunnels, cavernes d'expérimentation et constructions de surface, ébauchée. Ces études montrent la faisabilité de l'infrastructure, mais aussi la compatibilité d'un tunnel de 100 km de long avec la géologie du bassin genevois.

Côté matériel, le premier prototype a vu le jour ; il s'agit d'un écran de faisceau. Placé à l'intérieur du tube de faisceau, il contribue à maintenir l'ultra-vide sans lequel les particules ne pourraient pas circuler. La machine repose sur une technologie clé : des aimants à champs très élevés de 16 teslas - le double de celui des aimants du LHC. Ces aimants du futur, utilisant des matériaux supraconducteurs novateurs, sont développés dans le cadre du projet européen EuroCirCol, avec l'institut suisse Paul Scherrer, et en collaboration avec le programme américain de développement des aimants US-MDP. Quatre géométries de bobines sont à l'étude et une nouvelle bobine de démonstration a été définie pour une fabrication en 2017. Le développement de brins supraconducteurs en niobium-étain a été lancé, en collaboration avec plusieurs partenaires. La fabrication de l'aimant FRESA2, qui permettra de tester les câbles, a été terminée. Des aimants utilisant des supraconducteurs haute température sont également à l'étude pour des utilisations très spécifiques.

Un outil de modélisation et de simulation pour l'exploitation d'un système large comme le FCC est en cours de développement dans le cadre d'un projet de R&D avec un partenaire industriel. Cet outil pourra aider des entreprises à améliorer leur efficacité énergétique.

Le projet **CLIC (Compact Linear Collider)** étudie la faisabilité d'un collisionneur linéaire électron-positon basé sur un concept novateur d'accélération à deux faisceaux, permettant d'atteindre des gradients d'accélération très élevés. Le projet a été redéfini avec une construction et une exploitation en trois étapes, à une énergie de collision



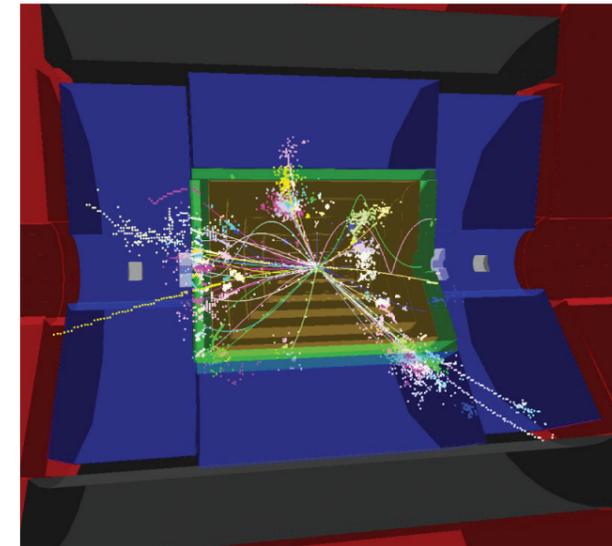
Le premier prototype du FCC, un écran de faisceau plus efficace pour dissiper la chaleur et maintenir l'ultra-vide. (CERN-PHOTO-201604-074-2)

de 380 GeV au démarrage, puis 1,5 TeV et enfin 3 TeV. Une nouvelle installation d'essai a été conçue, CLEAR (CERN Linear Electron Accelerator for Research), pour succéder à l'installation CTF3 qui a conclu ses travaux en 2016.

La réussite de CLIC suppose le développement de structures accélératrices très performantes pour atteindre des champs accélératrices d'une centaine de mégavolts par mètre. Le développement de ces structures de très hautes fréquences s'est poursuivi, en intégrant notamment la mise en service en trois étapes. Les capacités de test ont été triplées. Le développement des klystrons utilisés pour fournir la puissance radiofréquence avec une grande efficacité s'est également poursuivi.

Les cavités accélératrices novatrices du CLIC peuvent intéresser d'autres domaines, notamment les lasers à électrons libres pilotés par un accélérateur. Ces installations fournissent une lumière laser particulière pour l'étude de matériaux, d'échantillons biologiques ou de processus moléculaires. Le CERN participe à une initiative européenne sur le sujet, qui soumettra une étude de conception en 2017. La collaboration CLIC, qui compte 75 instituts dans 28 pays, travaille de concert avec le projet cousin ILC (International Linear Collider) dans de nombreux domaines.

Qui dit nouveau collisionneur, dit **nouveaux détecteurs**. Une équipe au CERN planche sur les objectifs de physique et les expériences du futur. Un document présentant les études de physique possibles sur le boson de Higgs aux trois énergies du CLIC a été publié. Un trajectographe au silicium, servant à reconstituer la trajectoire des particules chargées, est à l'étude : une nouvelle architecture a été définie et des composants de silicium ont été testés avec un faisceau du SPS. Les travaux sur les détecteurs adaptés à un collisionneur circulaire définis par l'étude FCC ont également démarré.



Simulation d'une collision dans un concept de détecteur pour CLIC, projet de futur collisionneur linéaire électron-positon à l'étude. (OPEN-PHO-ACCEL-2017-009-3)

## LA PHYSIQUE AU-DELÀ DES COLLISIONNEURS

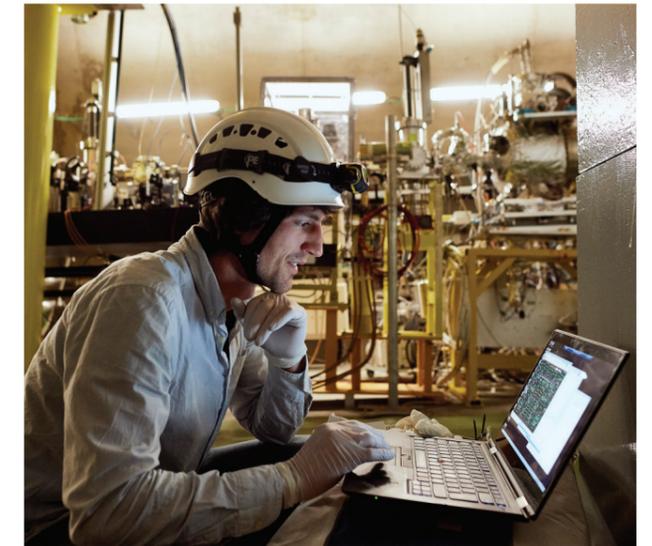
La kyrielle d'expériences utilisant les accélérateurs du CERN illustre la diversité du programme de physique du Laboratoire (voir p. 13). Un groupe d'étude sur la physique au-delà des collisionneurs a été créé en 2016 pour explorer les possibilités de nouvelles expériences qui pourraient être menées auprès du complexe d'accélérateurs et des installations du CERN, et qui complèteraient l'actuel programme de physique avec collisionneur.

L'étude a été lancée en septembre 2016 lors d'un atelier qui a réuni plus de 300 physiciens de divers domaines. Elle a pour objectif de déterminer quelles expériences hors collisionneur pourraient être menées jusqu'en 2040 environ, c'est-à-dire pendant la durée d'exploitation prévue du LHC à haute luminosité, soit au CERN, soit éventuellement ailleurs, pour autant que le CERN puisse contribuer utilement. Le groupe d'étude devra communiquer des éléments lors de la prochaine mise à jour de la stratégie européenne pour la physique des particules, en 2019.

## LA TECHNIQUE D'ACCÉLÉRATION QUI FAIT DES VAGUES

Une nouvelle technologie, qui permettrait aux accélérateurs d'atteindre des énergies plus élevées, est actuellement étudiée au CERN par l'expérience AWAKE (Advanced Proton Driven Plasma Wakefield Acceleration Experiment). Trois ans après l'approbation du projet, AWAKE a recueilli en décembre ses premières données.

AWAKE, une expérience de démonstration de principe, utilise des champs de sillage plasma pour accélérer des particules



Un membre de la collaboration AWAKE effectue des tests dans le tunnel souterrain de l'expérience. AWAKE étudie l'utilisation du plasma pour accélérer les particules. (CERN-PHOTO-201612-314-9)

chargées. L'accélération par champ de sillage plasma avec un faisceau laser et des électrons est une technologie éprouvée ; AWAKE va cependant tester cette technique avec des protons. Bien plus massifs, les protons pourraient créer une accélération plus puissante, sur une distance plus longue. AWAKE injecte un « paquet de protons pilote » provenant du Supersynchrotron à protons (SPS) dans une chambre à plasma, le plasma étant créé par ionisation d'un gaz avec un laser. Lorsque ce paquet de protons interagit avec le plasma, il se divise en plusieurs petits paquets (processus appelé automodulation). En traversant le plasma, ces paquets plus courts produisent un fort champ de sillage électrique. Un « faisceau témoin » d'électrons est injecté juste après le faisceau de protons. Il est alors accéléré par le champ de sillage des protons, à la manière d'un surfeur glissant sur une vague.

En 2016, la plupart des pièces de l'expérience ont été installées dont la chambre à plasma de dix mètres de long. Un premier faisceau d'essai l'a traversée en juin. Après plusieurs mois de mise en service et d'essais, la collaboration a pu observer pour la première fois l'automodulation de paquets de protons de haute énergie dans le plasma, signe de la création de forts champs électriques. Ce premier succès, étape majeure pour AWAKE, prouve que des champs de sillage peuvent être créés à partir de protons.

Le prochain défi de la collaboration est d'étudier l'accélération des électrons dans le sillage des paquets de protons. Si elle est validée, la technologie testée par AWAKE permettrait de produire des accélérations plusieurs centaines de fois plus puissantes que celles obtenues avec les cavités radiofréquence actuelles.

Avec la technologie des champs de sillage plasma, il pourrait être possible d'atteindre des énergies plus élevées et de produire des accélérateurs compacts, voire miniatures.

# CONSEIL DU CERN

Composition au 31 décembre 2016

**Président du Conseil :** M. S. de Jong (Pays-Bas)

**Vice-présidents :** M. E. Rabinovici (Israël), M. J. J. Gaardhøje (Danemark)

## ÉTATS MEMBRES

### Allemagne

M. S. Bethke  
M<sup>me</sup> B. Vierkorn-Rudolph

### Autriche

S.E. M. T. Hajnoczi  
M. J. Schieck

### Belgique

M<sup>me</sup> V. Halloin  
M. W. Van Doninck

### Bulgarie

M. L. Litov  
M. D. Tonev

### Danemark

M. J. J. Gaardhøje  
M. R. Michelsen

### Espagne

M. F. Ballestro  
S.E. M<sup>me</sup> A. M. Menéndez Pérez

### Finlande

M<sup>me</sup> P. Eerola  
M. P. Pulkkinen

### France

M<sup>me</sup> U. Bassler  
S.E. M<sup>me</sup> E. Laurin

### Grèce

S.E. M<sup>me</sup> A. Korka  
M. K. Fountas

### Hongrie

M. P. Lévai  
M. J. Pálkás

### Israël

S.E. M<sup>me</sup> A. Raz Schechter  
M. E. Rabinovici

### Italie

M. F. Ferroni  
S.E. M. M.E. Serra

### Norvège

M. B. Jacobsen  
M. E. Osnes

### Pays-Bas

M. E. Laenen  
M. J.T.M. Rokx

### Pologne

M. D. Drewniak  
M. J. Królikowski

### Portugal

M. G. Barreira  
M. P.A. Pardal

### Tchéquie

S.E. M. J. Kára  
M. R. Leitner

### Roumanie

M. F. Buzatu  
M<sup>me</sup> B. Păduroiu

### Royaume-Uni

M. S. Axford  
M. B. Bowsher

### Slovaquie

S.E. M. F. Rosocha  
M. B. Sitár

### Suède

M<sup>me</sup> B. Åsman  
M. M. Johnsson

### Suisse

S.E. M. l'Ambassadeur B. Moor  
M. O. Schneider

## ÉTATS MEMBRES ASSOCIÉS EN PHASE PRÉALABLE À L'ADHÉSION

### Chypre

S.E. M. A. Ignatiou  
M. P. Razis

### Serbie

M. P. Adzić  
S.E. M. V. Mladenović

## ÉTATS MEMBRES ASSOCIÉS

### Pakistan

S.E. M<sup>me</sup> T. Janjua  
M. M. Naeem

### Turquie

M. Z. Alper  
M. U. Güneş

### Ukraine

M. B. Grinyov

## OBSERVATEURS

États-Unis d'Amérique,  
Fédération de Russie, Inde,  
Japon, JINR, UNESCO,  
Union européenne

## COMITÉ DES DIRECTIVES SCIENTIFIQUES

### Président

M. T. Nakada (Suisse)

### Membres

M<sup>me</sup> L. Baudis  
M. R. Brinkmann  
M<sup>me</sup> B. Gavela  
M. M. Huyse  
M. K. Jakobs  
M. F. Le Diberder  
M. G. Martinelli  
M. Y. Nir  
M. K. Redlich  
M. L. Rivkin  
M<sup>me</sup> T. Rodrigo  
M<sup>me</sup> N. Roe  
M. V. Rubakov  
M<sup>me</sup> H. Schellman  
M. Y. Suzuki  
M. T. Wyatt

### Membres ès qualités

**Président du Comité des expériences LHC**  
M. F. Forti

**Président du Comité des expériences SPS et PS**  
M. C. Vallée

**Président du Comité des expériences ISOLDE et n\_TOF**  
M. K. Blaum

**Présidente du Comité européen sur les futurs accélérateurs**  
M<sup>me</sup> H. Abramowicz

### Également présents

**Président du Conseil**  
M. S. de Jong

**Présidente du Comité des finances**  
M<sup>me</sup> C. Jamieson

**Directrice générale**  
M<sup>me</sup> F. Gianotti

## COMITÉ DES FINANCES

### Présidente

M<sup>me</sup> C. Jamieson (Royaume-Uni)

### Membres

Un ou plusieurs délégués par État membre et État membre associé

# ORGANISATION INTERNE

## Directrice générale

Unités de la Direction générale (DG) : Traduction, procès-verbaux et appui au Conseil, Audit interne, Service juridique  
Unité Santé et sécurité au travail et protection de l'environnement (HSE)

**Fabiola Gianotti**

Simon Baird

## Directeur des accélérateurs et de la technologie

Faisceaux (BE)  
Ingénierie (EN)  
Technologie (TE)

**Frédéric Bordry**

Paul Collier  
Roberto Losito  
José Miguel Jiménez

## Directeur des finances et des ressources humaines

Finances et processus administratifs (FAP)  
Ressources humaines (HR)  
Industrie, achats et transfert de connaissances (IPT)  
Gestion des sites et bâtiments (SMB)

**Martin Steinacher**

Florian Sonnemann  
James Purvis  
Thierry Lagrange  
Lluis Miralles

## Directrice des relations internationales

Relations extérieures (IR-REL) : États hôtes, États membres, États associés et États non-membres  
Organisations internationales, partenariats et collecte de fonds  
Planification et évaluation stratégiques, Protocole  
Éducation, communication et activités grand public (IR-ECO)

**Charlotte Warakaulle**

Ana Godinho

## Directeur de la recherche et de l'informatique

Services d'information scientifique (RCS-SIS)  
Physique expérimentale (EP)  
Technologies de l'information (IT)  
Physique théorique (TH)

**Eckhard Elsen**

Manfred Krammer  
Frédéric Hemmer  
Gian Giudice

## Directions de projets

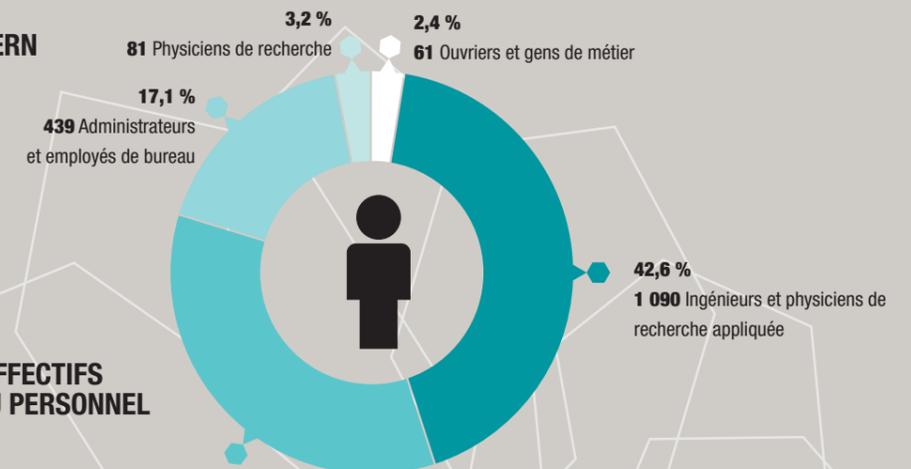
Advanced Wakefield Experiment (AWAKE)  
CERN Neutrino Platform  
Extra Low ENergy Antiproton (ELENA)  
Future Circular Collider Study (FCC)  
High Intensity and Energy ISOLDE (HIE-ISOLDE)  
High Luminosity LHC (HL-LHC)  
LHC Injectors Upgrade (LIU)  
Linear Collider Studies (CLIC and LCS)  
Worldwide LHC Computing Grid (WLCG)

Edda Gschwendtner  
Marzio Nessi  
Christian Carli  
Michael Benedikt  
Yacine Kadi  
Lucio Rossi  
Malika Meddahi  
Steinar Stapnes  
Ian Bird

# LE CERN EN CHIFFRES

## PERSONNEL DU CERN

Total  
2 560 personnes



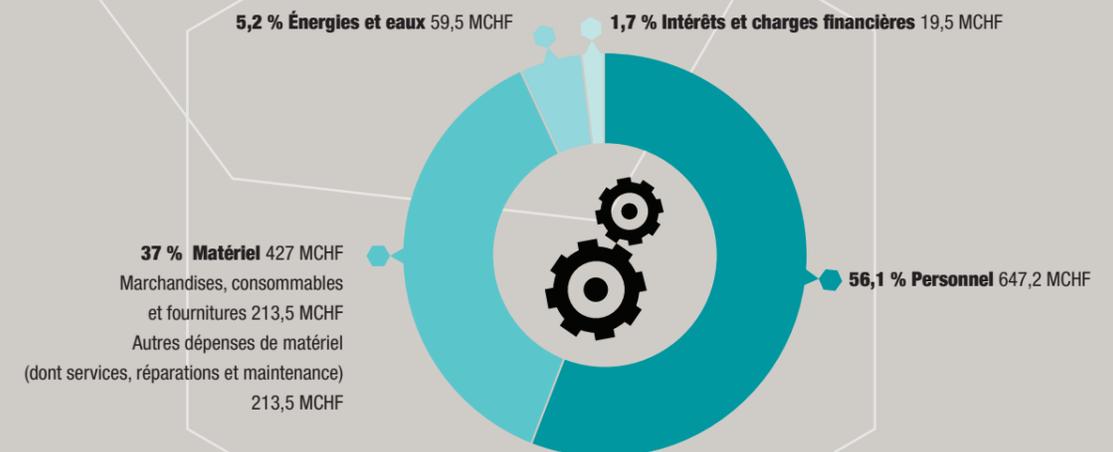
## ÉVOLUTION DES EFFECTIFS DES MEMBRES DU PERSONNEL TITULAIRES

2012	2 512
2013	2 513
2014	2 524
2015	2 531
2016	2 560

En plus des membres du personnel titulaires, le CERN a employé 750 boursiers, formé 552 étudiants et apprentis, et accueilli 1 185 attachés en 2016. L'infrastructure et les services du CERN sont utilisés par une grande communauté scientifique, représentant 11 821 utilisateurs (voir p. 30).

## DÉPENSES DU CERN

Total des dépenses 1 153,2 MCHF



En 2016, plus de 40 % du budget du CERN a été dépensé dans l'industrie au travers d'achats de matériel et de services. Le CERN s'efforce d'équilibrer le retour industriel entre ses États membres.

**CERN**  
1211 Genève 23, Suisse  
<http://home.cern>

Soixante-deuxième rapport annuel de l'Organisation européenne pour la Recherche nucléaire.

Le Rapport annuel du CERN présente les faits marquants et les principales activités du Laboratoire.

Une version électronique est disponible à l'adresse : <http://library.web.cern.ch/annual-reports>

En plus de cette publication, un bilan d'activité annuel, en anglais, détaille les avancements et les dépenses par activité par rapport aux objectifs approuvés par le Conseil du CERN. Ce rapport est disponible à l'adresse : <http://cern.ch/annual-progress-report-2016>

Le Rapport annuel 2016 du Transfert de connaissances au CERN (en anglais) est disponible à l'adresse : <http://cern.ch/go/KT2016>

Le Rapport annuel Openlab 2016 (en anglais) est disponible à l'adresse : <http://cern.ch/go/openlab2016>

Le Rapport annuel CERN & Society 2016 (en anglais) est disponible à l'adresse : <http://cern.ch/go/cernandsociety2016>

La Liste des publications du CERN (un catalogue de toutes les publications connues sur les recherches menées au CERN pendant l'année) peut être consultée à l'adresse : <http://library.cern/annual/list-cern-publications-2016>

Un glossaire des termes utiles est disponible à l'adresse : <http://cern.ch/go/glossary>

**Images:**

Robert Hradil, Monika Majer/ProStudio22.ch : p. 3 (au centre et à droite), p. 14 (en haut), p. 26, p. 32, p. 36, p. 39, p. 40, p. 41 (à droite), p. 44, p. 45, p. 46

Federica Piccinni : p. 10 (au centre, à gauche)

NASA : p. 18 (en haut)

Shutterstock : p. 30 et 31

Geoffrey Dorne : p. 33

Kästenbauer/Ettl : p. 34

Lucien Fortunati : p. 38 (à droite)

CERN : toutes les autres images

**Réalisation éditoriale et graphique :** Groupe Éducation, communication et activités grand public du CERN

ISSN 0304-291X

ISBN 978-92-9083-446-5 (version papier)

ISBN 978-92-9083-447-2 (version électronique)

© Copyright 2017, CERN



