

Rapport annuel **2015**





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

Le Rapport annuel du CERN est publié en un seul volume et vise à présenter les activités du Laboratoire.

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

La Liste des publications du CERN (un catalogue de toutes les publications connues ayant pour objet des recherches menées au CERN pendant l'année) peut être consultée à l'adresse :
<http://cern.ch/go/n9R9>

Soixante et unième rapport annuel de
l'Organisation européenne pour la Recherche
nucléaire

Graphisme et production : groupe Éducation,
communication et activités grand public
du CERN

ISSN 0304-2901
ISBN 978-92-9083-428-1 (version imprimée)
ISBN 978-92-9083-429-8 (version électronique)

© Copyright 2016, CERN

Le CERN, Organisation européenne pour la Recherche nucléaire, est le plus éminent laboratoire de recherche en physique des particules du monde. Il se consacre à la physique fondamentale, cherchant à comprendre les constituants et les lois de l'Univers. Fondé en 1954, le CERN compte 21 États membres et est devenu un exemple éclatant de collaboration internationale. Divers autres pays contribuent et participent aussi à son programme de recherche.

Le CERN est situé de part et d'autre de la frontière franco-suisse, près de Genève. Le Grand collisionneur de hadrons (LHC), le fleuron de ses instruments de recherche, est logé dans un tunnel de 27 kilomètres sous la plaine qui s'étend du Lac Léman à la chaîne du Jura. La photographie ci-dessus a été prise depuis le sommet du Reculet, dans le Jura. On y voit le Laboratoire au nord de Genève avec les Alpes et le Mont-Blanc en arrière-plan.

(Photo Thomas Kubes)

Sommaire

Messages d'introduction	4
Une année au CERN	6
Instantanés	8
Physique et expériences	12
Accélérateurs	22
Informatique	29
Un impact sur le monde	32
Un lieu de travail	35
Sécurité et environnement	37
Le Conseil et ses comités	40
Organisation interne	42
Le CERN en chiffres	44
Glossaire	45



Message de la Présidente du Conseil

Le temps fort de l'année 2015 a été le redémarrage du LHC à 13 TeV, l'énergie la plus élevée jamais atteinte par un accélérateur. Le Conseil du CERN a suivi cet événement avec grand intérêt, notant la fluidité, la rigueur et le professionnalisme avec lesquels la machine et les expériences ont été remises en service après une longue période de maintenance et d'amélioration. Lors du colloque sur la physique du LHC tenu dans le cadre de la session publique du Conseil en décembre, huit jeunes physiciens ont présenté le formidable bilan du LHC et des expériences pour la première année de la deuxième période d'exploitation.

En 2015, Rolf Heuer a accompli sa septième et dernière année en tant que directeur général du CERN, alors que Fabiola Gianotti, directrice générale désignée, se préparait à sa prise de fonctions. En mars, elle a présenté au Conseil son projet de structure de direction pour les années 2016-2020. En septembre, le Conseil a approuvé les nominations proposées pour les postes de directeur et de chef de département. Parmi les changements concernant la nouvelle Direction figure la création du poste de directeur des relations internationales, reflétant l'importance croissante des relations avec les États membres et du processus d'élargissement géographique du CERN.

En 2015, le processus d'élargissement géographique a bien progressé. En juin, le Conseil a adopté une résolution pour l'admission de la Roumanie comme État membre. La Turquie et le Pakistan sont devenus États membres associés du CERN, respectivement en mai et en juillet. Le Conseil a en outre approuvé des accords de collaboration internationaux avec le Liban et la Palestine. J'espère sincèrement que ceux-ci auront un impact qui ira au-delà des retombées directes pour les communautés scientifiques concernées.

Pour atténuer l'impact de l'appréciation du franc suisse en janvier 2015 sur les contributions des États membres, la Direction du CERN a proposé un plan de mesures, qui a été examiné par le Conseil en mars et en juin, puis approuvé en septembre. La préparation du plan à moyen terme pour la période 2016-2020 et du budget de l'Organisation pour l'année 2016 a donc pris plus de temps. Ledit plan à moyen terme inclut le début de la phase de construction du LHC haute luminosité (HL-LHC), projet phare pour la période allant de 2025 à 2035 environ.

L'examen quinquennal des conditions financières et sociales des membres du personnel du CERN était en 2014 et 2015 à l'ordre du jour des réunions du Forum tripartite sur les conditions d'emploi (TREF). En décembre, sur la recommandation du

Comité des finances, le Conseil a approuvé les propositions faites par la Direction dans le cadre de cet examen.

L'année 2015 était ma troisième et dernière année en qualité de présidente du Conseil. En septembre, le Conseil a élu mon successeur, Sijbrand de Jong, à qui j'ai passé le relais en décembre. Sijbrand de Jong entretient une relation de longue date avec le CERN, en tant qu'utilisateur scientifique mais aussi en tant que délégué au Conseil. Travailler avec lui a été un réel plaisir et je lui souhaite plein succès dans ses nouvelles fonctions.

Je suis fière d'avoir été présidente du Conseil de cette formidable organisation de recherche au cours d'une période où tant de progrès ont été accomplis grâce au LHC, où la mise à jour de la stratégie européenne pour la physique des particules a été achevée, où l'Organisation a célébré ses 60 ans et où Israël est devenu son 21^e État membre. Je voudrais remercier les membres du Conseil et de ses organes consultatifs, Rolf Heuer, la Direction du CERN, les services d'appui au Conseil et de nombreux autres membres du personnel du CERN pour leur agréable et précieuse coopération tout au long de mon mandat. Je souhaite au CERN d'obtenir encore de belles réussites et je suis impatiente de voir les fabuleuses découvertes qu'il nous réserve pour les prochaines années.

Agnieszka Zalewska

Agnieszka Zalewska



Message du Directeur général

Il peut se passer beaucoup de choses en sept ans, et mon mandat de directeur général du CERN en a été la preuve. Bien que le but d'un rapport annuel soit de dresser le bilan de l'année écoulée, je voudrais profiter de ce dernier message pour faire brièvement le point sur les changements intervenus depuis 2009.

Fin 2009, les premiers faisceaux de haute énergie circulaient dans le LHC et, en 2010, le programme de recherche était lancé. En 2012, les expériences LHC annonçaient la découverte du boson de Higgs, vecteur du mécanisme de Brout-Englert-Higgs, et, l'année suivante, le prix Nobel de physique était décerné à François Englert et Peter Higgs. L'année 2010 a par ailleurs été marquée par le début du processus d'élargissement géographique du CERN, qui s'est traduit par l'arrivée de nouveaux membres et l'adoption officielle du statut d'État membre associé.

Faisons à présent un bond dans le temps jusqu'en 2015, qui a vu le redémarrage du LHC après son premier long arrêt. Cet arrêt a permis de réaliser d'importants travaux sur le LHC, de même que sur l'ensemble de la chaîne d'accélérateurs et les expériences du CERN. Ce redémarrage s'apparentait davantage à la mise en service d'une nouvelle installation qu'à une simple remise en route. L'opération a été menée avec grand soin et toutes les installations d'expérimentation du CERN ont repris normalement, ce qui est de bon augure pour la suite de la deuxième période d'exploitation.

L'année 2015 a permis d'expérimenter la nouvelle configuration du LHC et de s'habituer, en ce qui concerne les expériences et l'informatique, à une exploitation à un niveau d'énergie plus élevé. Grâce à une très bonne préparation, les expériences ont pu obtenir d'importants résultats de physique dès fin 2015. Par ailleurs, un nouveau projet a vu le jour à ISOLDE : HIE-ISOLDE va étendre la portée de l'installation dans des domaines tels que la structure nucléaire ou l'astrophysique. D'importants progrès ont aussi été réalisés à ELENA, une installation qui augmentera de façon considérable l'efficacité du Décélérateur d'antiprotons.

Parmi les faits scientifiques marquants détaillés dans le présent rapport, il en est un que je tiens à mentionner. Dans les années 1960, parallèlement à l'élaboration du mécanisme de Brout-Englert-Higgs, le modèle des quarks, sur lequel se fonde notre compréhension de particules telles que les protons et les neutrons, voyait le jour. Ce modèle a été largement validé expérimentalement, à l'exception d'un élément : jusqu'en 2015, aucune expérience n'avait observé de « pentaquarks », ces configurations de quatre quarks et un antiquark dont le modèle

supposait l'existence. En 2015 donc, grâce aux performances du LHC, à la précision du détecteur LHCb et à l'ingéniosité de ses chercheurs, cette prédiction vieille de plus de 50 ans a été confirmée.

S'il est un des plus grands laboratoires du monde, le CERN n'en est pas moins une organisation très complexe, avec tous les défis que cela implique. Parmi ceux-ci, on peut noter l'abandon en 2015 du taux plancher de conversion du franc suisse en euro, qui a mis plusieurs de nos États membres en difficulté. La Direction et le Conseil ont anticipé les contraintes et travaillé de concert afin de limiter les conséquences pour le programme du CERN et pour nos États membres. Cette coopération est représentative de la relation entre la Direction et le Conseil du CERN, et l'une des grandes forces de l'Organisation.

Je ne saurais conclure sans évoquer le processus d'élargissement. Mes dernières responsabilités en tant que directeur général ont été, entre autres, de signer deux nouveaux accords lors des réunions du Conseil de décembre. Le premier, conclu avec les États-Unis au titre de l'accord-cadre de mars, ouvre une nouvelle ère de collaboration transatlantique en physique des particules. Il encadre la participation des États-Unis à l'exploitation du LHC, et celle du CERN aux ambitieux projets neutrino qui se préparent au Fermilab. Le second illustre l'esprit d'ouverture du CERN. Il s'agit d'un accord de collaboration internationale avec la Palestine qui va permettre aux universités et aux scientifiques palestiniens de renforcer leurs liens avec le Laboratoire. Cet accord a été approuvé à l'unanimité par le Conseil.

Je voudrais enfin remercier toutes les personnes avec qui j'ai eu le plaisir de travailler pendant ces sept années : les membres du Conseil et de la Direction, et aussi l'ensemble du personnel du CERN : les titulaires, les boursiers, les associés, les utilisateurs et les prestataires extérieurs. Cela a été pour moi un privilège. Je souhaite à la nouvelle Direction et au Conseil un mandat rempli de réussites et de nombreuses grandes découvertes.

Rolf Heuer

Rolf Heuer



Le 3 juin 2015, les opérateurs du LHC annonçaient les premiers faisceaux stables pour la physique de la deuxième période d'exploitation du LHC. Un nouveau record était établi avec une énergie de collision de 13 TeV. (CERN-PHOTO-201506-125-36)

Une année au CERN

Le 12 janvier 2015, après deux ans de travail sur les accélérateurs du CERN, l'équipe en charge du long arrêt (LS1) a symboliquement remis la clé du LHC aux opérateurs. Pendant les deux années du LS1, un travail considérable a été réalisé pour préparer l'exploitation du LHC à une énergie de 13 TeV. Dix-huit des 1 232 aimants dipôles de la machine, qui guident les faisceaux le long de leur parcours de 27 km, ont dû être remplacés du fait de leur usure. Plus de 10 000 jonctions électriques entre les aimants ont été équipées de shunts par lesquels une partie du courant (11 000 ampères) peut transiter en cas de défaillance d'une interconnexion. De nombreux composants électroniques ont été remplacés, le système de vide, qui maintient le tube de faisceaux exempt de molécules égarées, a été amélioré, et les systèmes cryogéniques rénovés. Les expériences LHC ont aussi eu leur part de travail pendant le LS1, la machine devant redémarrer à une plus haute énergie mais aussi à une plus haute luminosité (la mesure du taux de collisions de particules fournies aux expériences). Pour se préparer à cette hausse du nombre de collisions, les expériences ont exécuté des programmes de consolidation et de maintenance complets, comprenant une amélioration de leurs sous-détecteurs et de leurs systèmes d'acquisition de données, tandis que les installations de calcul ont été dotées de près de 60 000 nouveaux cœurs de

processeurs et de plus de 100 pétaoctets de mémoire disque supplémentaire afin de pouvoir prendre en charge la quantité accrue de données attendue lors de la deuxième période d'exploitation du LHC. Le LHC, ses expériences et ses installations informatiques n'ont toutefois pas été les seuls à faire peau neuve pendant le LS1. Les accélérateurs du CERN en amont du LHC accueillent un programme de recherche dynamique et servent de chaîne d'injecteurs pour le collisionneur. Le Synchrotron à protons, en particulier, est en service depuis 1959. Le LS1 était donc l'occasion idéale d'effectuer des travaux de maintenance essentiels pour assurer une performance et une fiabilité optimales. À la remise de la clé le 12 janvier, le complexe était rénové. Le 5 avril, les efforts fournis pendant le LS1 ont été récompensés lorsque les faisceaux de protons ont recommencé à circuler dans le LHC, une étape importante en vue de la prise de données à 13 TeV le 3 juin. Au menu de la deuxième campagne du LHC, le mécanisme de Brout-Englert-Higgs, la matière noire, l'antimatière et le plasma quark-gluon. Après la découverte en 2012 du boson de Higgs, les physiciens vont pouvoir mettre à l'épreuve comme jamais le Modèle standard de la physique des particules en continuant leurs recherches d'une nouvelle physique.



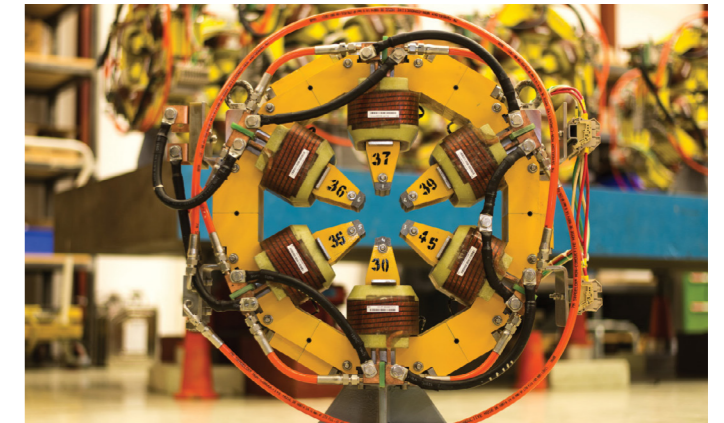
En décembre, Pamela Hamamoto, représentante permanente des États-Unis auprès de l'Office des Nations Unies à Genève, et Rolf Heuer, directeur général du CERN, ont signé des protocoles ouvrant la voie à un programme de recherche transatlantique intégré en physique des particules. (CERN-PHOTO-201512-258-18).

La famille s'agrandit

Le CERN a poursuivi sa politique d'élargissement. Le statut d'État membre associé a été octroyé le 6 mai à la Turquie et le 31 juillet au Pakistan. Les deux pays ont ratifié les accords signés en 2014, ce qui permettra de renforcer durablement les partenariats entre le CERN et les communautés scientifiques turque et pakistanaise. Ces pays auront le droit d'assister aux réunions du Conseil du CERN, et les scientifiques turcs et pakistanais pourront devenir membres du personnel du CERN et participer à ses programmes de formation et de développement professionnel. Enfin, les entreprises turques et pakistanaises pourront répondre aux appels d'offres du CERN.

Le 7 mai, le CERN a conclu un accord-cadre avec les États-Unis, posant les jalons d'un nouveau type de collaboration en physique des particules. L'accord a été signé lors d'une cérémonie à la Maison-Blanche par le ministre de l'Énergie des États-Unis, la *National Science Foundation* des États-Unis et le CERN. En décembre, la conclusion de protocoles a confirmé l'engagement des États-Unis dans le projet LHC et, pour la première fois, officialisé noir sur blanc la participation de l'Europe aux recherches de pointe sur les neutrinos menées aux États-Unis. Anticipant ces accords, le CERN a cessé d'utiliser ses propres faisceaux de neutrinos. Il est ainsi devenu une plateforme pour les scientifiques européens participant aux travaux de R&D sur les détecteurs de neutrinos, qui vont travailler sur des expériences neutrino aux États-Unis et ailleurs. Sur le long terme, les protocoles signés formalisent la collaboration entre le CERN et les États-Unis sur les futures installations qui pourraient succéder au LHC aux alentours de 2040. Ces protocoles sont une avancée majeure sur la voie d'un programme véritablement intégré de recherche transatlantique en physique des particules.

En fin d'année, la collaboration scientifique du CERN s'est également élargie au Moyen-Orient. Le 3 décembre, le CERN a signé avec le Conseil national de la recherche scientifique du Liban un accord de coopération internationale ouvrant la voie à de futures collaborations avec des universités libanaises. Le 18 décembre, il en a signé un deuxième avec la Palestine, qui lui



Aimants sextupolaires produits dans le cadre du projet CESSAMag sur le point d'être expédiés vers le laboratoire SESAME suite aux tests réalisés au CERN. (CERN-PHOTO-201503-041-7)

permet de renforcer ses liens avec les universités palestiniennes. Le CERN était déjà très actif au Moyen-Orient et en Afrique du Nord. Ces deux accords complètent ceux signés avec l'Arabie saoudite, les Émirats arabes unis, l'Iran et la Jordanie, ainsi que les relations déjà bien établies avec Oman et le Qatar. En 2014, Israël est devenu le 21^e État membre du CERN, renforçant ainsi un partenariat ancien. Par ailleurs, le CERN joue un rôle important dans la première organisation intergouvernementale de recherche de la région, SESAME, une source de lumière de troisième génération dont la mise en service est prévue en 2016.

SESAME, ouvre-toi

SESAME, Centre international de rayonnement synchrotron pour les sciences expérimentales et appliquées au Moyen-Orient, est une installation pionnière pour le Moyen-Orient et les pays voisins. Il permettra aux chercheurs de la région d'étudier les propriétés de matériaux de pointe, de processus biologiques et d'objets culturels. Basé en Jordanie, le centre réunit des scientifiques issus de ses membres (Autorité palestinienne, Bahreïn, Chypre, Égypte, Iran, Israël, Jordanie, Pakistan et Turquie) et est ouvert à la collaboration de scientifiques du monde entier. Outre ses objectifs de recherche, SESAME poursuit celui de promouvoir la paix dans la région à travers la coopération scientifique. En sa qualité de gestionnaire du projet CESSAMag, financé par la Commission européenne, le CERN coordonne la production des aimants et des alimentations électriques destinés à SESAME. Des étapes importantes ont été franchies avec l'achèvement du projet et la livraison des composants à SESAME, fin prêt pour sa mise en service en 2016.

Passages de flambeau

À la 178^e session du Conseil, le 18 décembre, Fabiola Gianotti est devenue directrice générale du CERN, succédant à Rolf Heuer, et Sijbrand de Jong président du Conseil, succédant à Agnieszka Zalewska.

Instantanés



30/01

Carlos Moedas, commissaire européen à la Recherche, la Science et l'Innovation, visite la caverne de l'expérience CMS avec Sergio Bertolucci, directeur de la recherche et de l'informatique au CERN. (CERN-PHOTO-201501-019-2)



04/02

À l'occasion de l'Année internationale de la lumière et des techniques utilisant la lumière, le CERN communique sur son lumineux projet, le LHC haute luminosité, notamment par des conférences dans le Globe de la science et de l'innovation. (CERN-PHOTO-201502-026-8)



16/02

La collaboration CMS invite les élèves des établissements scolaires voisins du CERN à visiter son expérience souterraine. En deux jours, 600 élèves descendent à 100 mètres sous terre pour admirer le gigantesque détecteur. (CERN-PHOTO-201502-034-48)



02/03

Le CERN fait un don de matériel informatique, dont 224 serveurs à l'Institut CIIT d'Islamabad au Pakistan. En août, ce sont des instituts mexicains qui bénéficient d'un autre don de matériel informatique (voir p. 31). (CERN-PHOTO-201503-042-2)



23/03

L'un des plus grands maîtres bouddhistes, Sa Sainteté le XII^e Gyalwang Drukpa, rencontre le Directeur général du CERN à l'occasion de l'événement « La Science rencontre le bouddhisme : grands esprits, grandes questions ». (CERN-PHOTO-201503-054-20)



01/04

Huit mois avant le retour de *Star Wars* sur les écrans, le CERN confirme l'existence de la Force... le temps d'un poisson d'avril. La plaisanterie fait le tour de la Toile. (CERN-PHOTO-201504-062-1)



07/07

Matteo Renzi, premier ministre de la République italienne, découvre l'accélérateur LHC en compagnie de Rolf Heuer, directeur général du CERN, Fabiola Gianotti, future directrice générale du CERN, et Lucio Rossi, chef du projet LHC haute luminosité. Il visite aussi la salle de contrôle et la caverne de l'expérience ATLAS. (CERN-PHOTO-201507-150-36)



25/09



19/07

En juillet, les rockers ont la fibre scientifique. Les infatigables membres du groupe allemand Scorpions (photo) et le groupe irlandais The Script font une halte au CERN. (OPEN-PHO-HIST-2016-001-1)



18/09

Les jeunes lauréats du concours *Ligne de faisceau pour les écoles* présentent leur expérience aux membres du Conseil du CERN et à des ambassadeurs. Les deux équipes d'élèves du secondaire ont passé dix jours dans le Laboratoire (voir p. 33). (CERN-PHOTO-201509-183-109)



9/10

Six-cent personnes assistent à la troisième édition de la conférence TEDxCERN, dans le hall d'assemblage de l'expérience CMS sur le thème « Repousser les limites ». Des scientifiques de plusieurs domaines présentent des idées et innovations qui pourraient transformer nos vies. (CERN-PHOTO-201510-198-347)



25/09

Dix-neuf photographes amateurs et professionnels explorent les coulisses du CERN dans le cadre du concours photographique *CERN Photowalk 2015*. L'auteur de la photographie ci-dessus, Robert Hradil, remporte le troisième prix du concours *Global Physics Photowalk 2015*. (CERN-PHOTO-201509-191-2) et (CERN-PHOTO-201511-221-8)



29/09

La Vice-présidente du gouvernement d'Espagne, Soraya Sáenz de Santamaría, se rend dans le hall d'assemblage des aimants supraconducteurs en compagnie de José Miguel Jiménez, chef du département Technologie. (CERN-PHOTO-201509-194-55)



2/11

Au siège des Nations Unies à Genève, des représentants du CERN et des délégués de l'ONU évoquent le modèle de coopération internationale que représente le Laboratoire lors du colloque « Le modèle du CERN, les Nations Unies et les biens publics mondiaux ». (OPEN-PHO-HIST-2016-002-1)



17/11

La princesse Maha Chakri Sirindhorn de Thaïlande découvre les technologies du CERN en visitant le laboratoire de cristaux, l'installation ISOLDE et l'accélérateur LEIR. À l'occasion de cette visite, un accord de collaboration est signé entre le CERN et l'Institut de recherche sur la lumière synchrotron de Thaïlande. (CERN-PHOTO-201511-237-39)



Le 3 juin 2015, applaudissements dans la salle de contrôle d'ATLAS pour saluer les premières collisions de protons à une énergie inédite de 13 TeV. (CERN-PHOTO-201506-128-7)

Physique et expériences

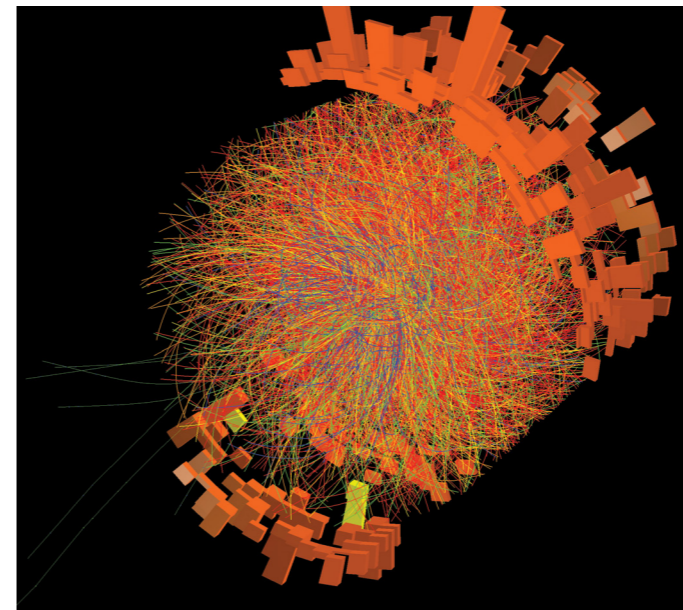
Après deux ans de travaux de maintenance et de consolidation et des mois de préparation, le LHC a repris du service en 2015. Le 3 juin, il a commencé à produire des données pour la physique à 13 TeV, soit près du double de l'énergie de collision de la première période d'exploitation. La saison 2 du LHC pouvait commencer.

ALICE rajeunie

C'est avec une expérience ALICE rajeunie que le LHC a repris du service. Pendant le premier long arrêt, ALICE a fait peau neuve afin d'améliorer sa performance globale. De nouveaux modules sont venus compléter le détecteur à rayonnement de transition, offrant une couverture azimutale totale. L'étendue du spectromètre à photons a été élargie grâce à un quatrième module. Un nouveau calorimètre électromagnétique a été positionné dos à dos avec le calorimètre existant et un détecteur a été ajouté au système de déclenchement. En prévision d'un flux de particules plus important, le mélange de gaz dans la chambre à projection

temporelle a été modifié, de même que l'électronique de lecture de plusieurs systèmes de détection. ALICE a ainsi pu collecter une vaste quantité de données avec les collisions proton-proton à 13 TeV et à 5,02 TeV, et les collisions plomb-plomb à 5,02 TeV. Le volume de données collectées représente 7 pétaoctets, l'équivalent du volume recueilli pendant toute la première période d'exploitation. Ce chiffre traduit la spectaculaire performance du LHC, car, la luminosité nominale initiale, en mode « ions », a été largement dépassée, augurant d'un programme scientifique prometteur.

En parallèle, l'analyse des données de la première période d'exploitation avance à grands pas. Sur la base d'analyses complètes et détaillées, un modèle standard des collisions d'ions lourds prend forme. Les mesures prises révèlent que la matière nucléaire portée aux températures atteintes lors des collisions plomb-plomb au LHC possède toutes les caractéristiques dynamiques et thermodynamiques du liquide le plus parfait,



Une des premières collisions de faisceaux stables d'ions lourds enregistrées par ALICE le 25 novembre 2015. (OPEN-PHO-EXP-2015-013-2)

et nous donnent un aperçu du potentiel de la poursuite de ces mesures sur un échantillon plus volumineux pour préciser les propriétés fondamentales du plasma quark-gluon.

Par ailleurs, il a été observé que de nombreuses signatures attribuées à la dynamique collective d'un milieu dans les collisions plomb-plomb étaient aussi présentes dans des systèmes plus légers, comme dans des collisions proton-plomb ou proton-proton. Suite à cette observation, les recherches ont été réorientées vers la compréhension globale des collisions hadroniques dans les petits et grands systèmes. Bien que l'atténuation des jets de particules par le milieu chaud et dense, une des caractéristiques des collisions plomb-plomb, ne semble pas se produire dans les collisions proton-plomb, on peut se demander si le mécanisme fondamental qui donne lieu à la dynamique collective dans les collisions plomb-plomb est présent dans les collisions de hadrons plus légers, ou si des gouttelettes de plasma quark-gluon se forment lors de ces collisions. Pendant la deuxième période d'exploitation du LHC, ALICE collectera et analysera des données pour répondre à ces questions et comprendre le mécanisme fondamental.

ALICE a prouvé sa polyvalence par des mesures qui ont conduit à de nouveaux résultats inédits. Par exemple, une mesure de haute précision a été réalisée sur la différence de masse entre matière et antimatière pour le deuton et le ^3He , améliorant la précédente mesure de plus d'un ordre de grandeur. Elle a permis de tester l'une des symétries les plus fondamentales de la nature. Autre exemple : une analyse détaillée du spectre des particules J/ψ offre de nouvelles perspectives pour l'étude du plasma quark-gluon.

En 2015, la phase de R&D pour le programme d'amélioration d'ALICE, qui doit être mis en place à la fin de la deuxième période d'exploitation, touchait à sa fin. La création des prototypes a démarré et la production en série devrait débuter en 2016.

ATLAS – cinq axes de travail

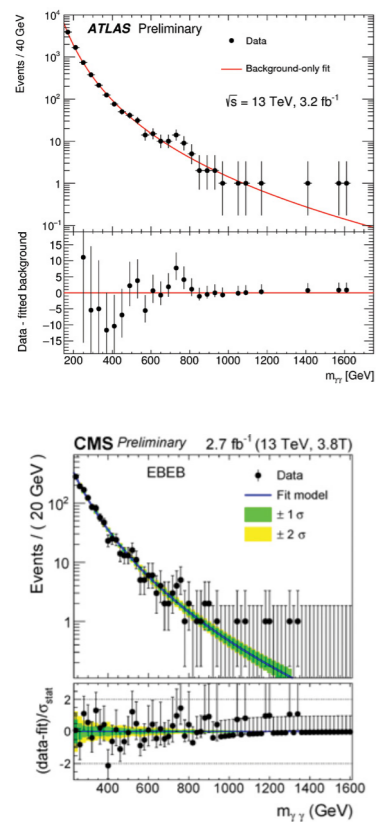
Le programme d'ATLAS pour 2015 s'articulait autour de cinq axes : remettre en marche le détecteur et mettre en service le

logiciel et le modèle d'analyse développés pendant la période d'arrêt ; accumuler des données de bonne qualité à une énergie de collision proton-proton (pp) de 13 TeV ; analyser les nouvelles données pour les mesures du Modèle standard et la recherche d'une nouvelle physique ; poursuivre l'analyse des données de la première période d'exploitation, et préparer le document de cadrage pour la phase 2 du programme d'amélioration du détecteur. Ce document a été accueilli favorablement par le Comité d'examen des ressources du LHC, qui a validé la première étape du processus d'approbation de la phase 2 du programme d'amélioration, permettant le passage à la phase des rapports techniques de conception.

L'année a commencé par la mise en service du système de déclenchement et du détecteur à l'aide de rayons cosmiques et de données de collisions pp. Les premières données obtenues avec un faisceau stable ont été enregistrées le 3 juin. Les données de plus de 200 millions de collisions pp avec des faisceaux de faible intensité ont été collectées à des fins d'alignement et d'études sur les trajectographes, notamment sur le nouveau sous-détecteur à pixels d'ATLAS : la couche b insérable (IBL). Ces données ont été utilisées pour une nouvelle observation par ATLAS de l'effet de crête (« ridge effect ») à 13 TeV, une configuration particulière de corrélations à grande portée entre particules qu'ATLAS a pu attribuer à des modulations d'impulsions de particules isolées, similaires à celles déjà observées dans des collisions proton-plomb.

Pendant l'été, ATLAS a présenté ses premières mesures à 13 TeV de processus mous de QCD et de production de particules W et Z et de quarks top. La recherche de nouveaux phénomènes de masse élevée soumis à l'interaction forte parmi les premiers 100 pb⁻¹ de données n'a pas permis d'observer de signal. ATLAS a aussi préparé un large éventail de résultats de performance du détecteur montrant une bonne compréhension des premières données.

Lors de son séminaire de fin d'année et des conférences qui ont suivi, la collaboration a présenté un grand nombre d'analyses sur la base d'un échantillon de 3,6 fb⁻¹ de données de collisions pp



La chasse aux bosses

En physique des particules, une découverte peut parfois prendre la forme d'une « bosse » sur une courbe représentant une distribution de phénomènes connus. Par exemple, la physique connue peut expliquer une distribution d'événements à deux photons dont la courbe s'abaisse régulièrement en fonction d'une grandeur que les physiciens appellent la masse invariante et qui est reliée à l'énergie et l'impulsion totales de la particule initiale. Si une nouvelle particule est produite à une certaine masse, et qu'elle produit aussi des photons, cette nouvelle source de paires de photons formera une bosse dans la distribution : un excédent de paires de photons par rapport aux modèles de physique connue. C'est un signal comme celui-là qui a contribué à la découverte du boson de Higgs en 2012.

Fin 2015, une petite bosse observée aux alentours de 750 GeV par ATLAS et CMS a donné lieu à de nombreuses spéculations. Il pourrait s'agir simplement d'une fluctuation statistique, mais tous les yeux seront rivés sur les deux expériences lorsque la deuxième période d'exploitation reprendra en 2016.

Graphiques produits par ATLAS et CMS montrant une petite bosse dans les données à environ 750 GeV.

à 13 TeV. Ces analyses comprenaient notamment les premières mesures de toutes les productions du boson de Higgs se désintégrant en paires de photons et de bosons Z, d'autres mesures de production du quark top, incluant aussi des processus plus rares comme le top seul (processus électrofaible) et la paire top-antitop associée à un boson W ou Z.

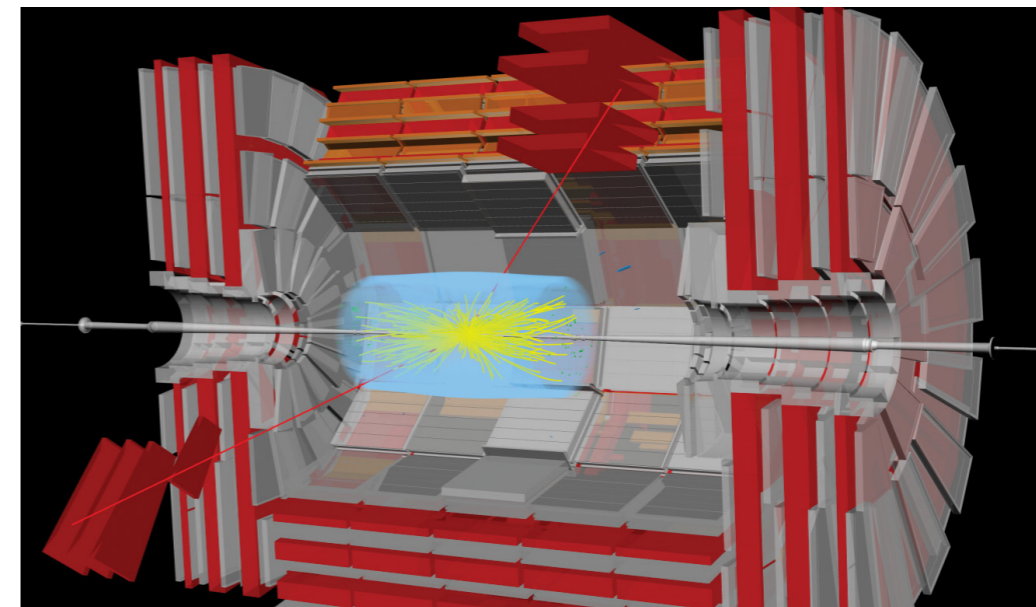
L'accent a été mis sur la recherche de nouveaux phénomènes comprenant des événements avec des jets de haute énergie, des leptons, des photons, des bosons W, Z ou de Higgs, des impulsions transversales manquantes et des combinaisons de ces différents éléments. La majorité des recherches n'ont pas montré d'écart par rapport au Modèle standard. La seule exception notable a été la « bosse » observée à environ 750 GeV dans le spectre de masse des paires de photons. La probabilité qu'un tel effet se produise en l'absence de signal est équivalente à environ deux écarts-type, et un signal potentiel n'est pas totalement exclu par les résultats de la première période d'exploitation. Aucun signal résonnant n'a par ailleurs été observé par ATLAS dans le spectre de masse photon+Z dans les données obtenues à 13 TeV. Le redémarrage du LHC devrait permettre de clarifier l'interprétation de ces faits.

ATLAS a continué de publier des analyses fondées sur les données de la première période d'exploitation ; en avril 2016, la collaboration aura publié 525 articles au total, dont 122 en 2015. Les sujets traités comprennent la violation de CP et les désintégrations rares du méson B. Des articles publiés par ATLAS traitent de la production de paires de bosons W et Z et de mesures

de la production et des propriétés de désintégration du quark top. ATLAS a publié la totalité des mesures pertinentes de la masse, de la production et des propriétés de désintégration du Higgs effectuées pendant la première période d'exploitation. ATLAS et CMS ont uni leurs forces en combinant leurs mesures de la masse et du couplage du boson de Higgs, établissant l'observation de sa désintégration en une paire de leptons tau. Le programme de recherche de la première période d'exploitation s'est achevé en 2015, avec notamment la publication de synthèses détaillées. Le programme de collisions d'ions lourds a été marqué par une nouvelle analyse des asymétries di-jets dans les collisions plomb-plomb, proton-plomb et proton-proton, révélant des propriétés similaires dans les collisions périphériques plomb-plomb et proton-proton, mais d'importantes modifications dans les collisions centrales plomb-plomb.

CMS – redémarrage en fanfare

La collaboration CMS a été bien occupée en 2015. Au premier trimestre, les travaux à réaliser pendant le LS1 ont été achevés, et la deuxième période d'exploitation a été activement préparée. Les analyses des données de la première période d'exploitation ont été finalisées et publiées, les premières améliorations de la phase I ont été effectuées et celles de la phase II ont fait l'objet d'une proposition technique. Le document de cadrage contenant des études détaillées des améliorations proposées, assorti d'une analyse coût-avantage, a été accueilli favorablement par les comités d'examen, ouvrant la voie aux étapes suivantes.



Un événement produisant deux muons observé par CMS lors de l'exploitation proton-proton du LHC en 2015. La masse du système de deux muons atteint 2,4 TeV, c'est la plus importante jamais mesurée par le détecteur CMS pour un système muon-muon. (CMS-PHO-EVENTS-2015-005-5)

Avec le retour des faisceaux au LHC, CMS a pu attaquer la collecte de données à 13 TeV. Les premiers résultats et une première publication ont été présentés lors de plusieurs conférences en juillet. La publication portait sur la quantité de hadrons chargés produits dans des collisions de protons en fonction de l'énergie. Il s'agit de l'une des premières mesures réalisées au début de l'exploration d'un nouveau régime d'énergie car elle permet aux chercheurs de vérifier que les modèles théoriques utilisés pour les simulations sont corrects ; ces modèles ont ainsi pu être confirmés.

Une autre mesure importante lors de l'exploration d'un nouveau régime d'énergie est celle des particules connues. CMS a mesuré des paires de muons issues des collisions ; le spectre de masse montre clairement des pics correspondant à diverses particules allant du méson oméga au boson Z. Ces particules ont été initialement découvertes sur plusieurs décennies, mais il n'a fallu à CMS que quelques semaines pour toutes les observer à 13 TeV, ce qui prouve que l'expérience est fin prête pour découvrir de la nouvelle physique à cette énergie.

Au fil des mois, CMS a poursuivi les analyses des données collectées à 13 TeV, pour présenter en décembre plusieurs résultats de recherche d'une nouvelle physique, notamment un léger excédent, à proximité d'une masse de 750 GeV, dans le mode de désintégration en deux photons. Cet effet a également été observé par ATLAS. Dans les deux cas, la signification statistique était faible, mais le fait que les deux expériences aient remarqué le même phénomène pose question. Il faudra plus de données pour déterminer s'il s'agit d'une fluctuation statistique ou d'un indice révélateur d'une nouvelle physique.

Par ailleurs, la recherche relative à la matière noire s'est poursuivie, avec de nouvelles limites à la production directe de particules supersymétriques. Des recherches ont été menées pour trouver des événements contenant des quarks b qui signaleraient de la matière noire produite en association avec des paires de quarks t ou b, ou encore des bosons de Higgs exotiques et des désintégrations non standard de bosons de Higgs. Jusqu'à présent, ces recherches n'ont pas abouti à un résultat positif, même si les limites de la supersymétrie ont été améliorées.

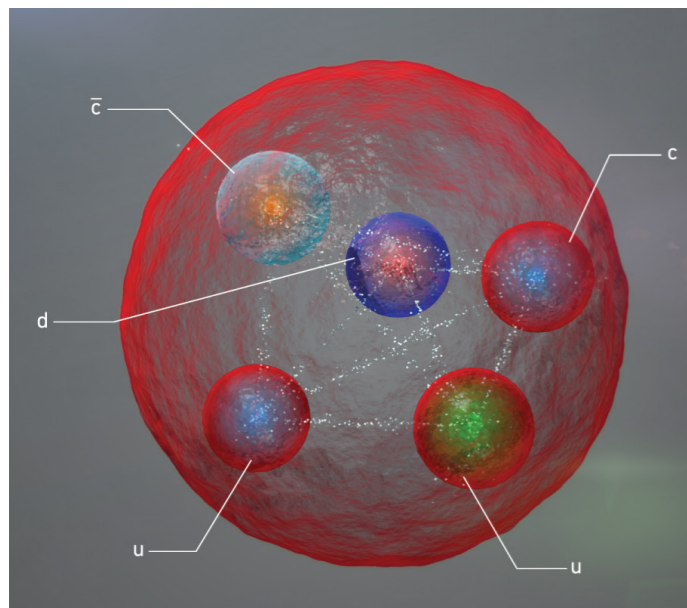
Alors que la deuxième période d'exploitation focalisait l'attention en 2015, CMS a également terminé les analyses des données de la première période, avec plus de 120 nouveaux résultats publiés et présentés lors de conférences. Bon nombre d'entre eux portaient sur les propriétés du boson de Higgs. D'autres concernaient des mesures de haute précision visant à tester le Modèle standard. Elles portaient notamment sur la production de paires de bosons W dans des interactions photon-photon, les taux de production de jets de particules à 2,76 TeV comparés aux taux observés à 8 TeV, la production de paires de photons associées à des jets et la production électrofaible d'un boson W associé à deux jets. Découvert il y a plus de vingt ans, le quark top continue de jouer un rôle essentiel dans les analyses de physique. Les nouveaux résultats de CMS comprenaient des mesures de taux de production top-antitop dans les canaux « tout hadronique » et une mesure du processus top-antitop+bottom-antibottom dans le canal lepton+jets. La recherche de signes d'une nouvelle physique se poursuit aussi, notamment dans le processus $t \rightarrow cH$, où le boson de Higgs se transforme en deux photons.

Pour ce qui est des ions lourds, les résultats de la première période d'exploitation portent sur la polarisation de l'upsilon en fonction de la multiplicité chargée dans les collisions proton-proton, sur la production de bosons Z, sur les fonctions de fragmentation des jets dans les collisions proton-plomb et sur la modification nucléaire des états de l'upsilon dans les collisions plomb-plomb.

LHCb – le club des cinq

L'événement le plus marquant de l'activité de LHCb en 2015 a été la découverte des pentaquarks, particules composées de quarks assemblés selon une configuration qui n'avait encore jamais été observée. Étudier leurs propriétés pourrait permettre de mieux comprendre la composition de la matière ordinaire, c'est-à-dire les protons et les neutrons dont nous sommes faits.

Notre compréhension de la structure de la matière a été bouleversée en 1964, lorsque le physicien des États-Unis Murray Gell-Mann a proposé une distinction entre deux catégories de particules : d'une part, les baryons, comme les protons et



LHCb a annoncé la découverte de pentaquarks en 2015. Cette représentation montre une configuration possible des quarks dans un pentaquark, dans laquelle les cinq quarks sont étroitement liés. Ils peuvent aussi être assemblés en un méson (un quark et un antiquark) et un baryon (trois quarks). (OPEN-PHO-EXP-2015-009-3)

les neutrons, qui sont composés de trois objets possédant des charges fractionnaires appelés quarks et, d'autre part, les mésons, qui sont composés de paires quark-antiquark. Gell-Mann a reçu en 1969 le prix Nobel de physique pour ces travaux. Cette théorie prévoit aussi l'existence d'autres états composites de quarks, notamment des pentaquarks, composés de quatre quarks et d'un antiquark.

Les précédentes expériences qui cherchaient des pentaquarks n'avaient pas obtenu de résultats probants. S'il en va autrement pour LHCb, c'est parce qu'elle a été en mesure de chercher des pentaquarks à partir de nombreux angles différents, et que toutes les observations ont mené à la même conclusion. C'est un peu comme si les études précédentes avaient cherché des silhouettes dans l'obscurité, tandis que LHCb menait ses recherches avec de la lumière, et sous tous les angles.

Les données de la première période d'exploitation ont aussi permis de mesurer l'un des paramètres essentiels pour décrire la différence entre matière et antimatière. Ces paramètres sont contenus dans ce qu'on appelle le « triangle d'unitarité », caractérisé par les angles alpha, bêta et gamma. LHCb a réalisé la meilleure mesure de l'angle le moins connu, gamma, permettant de faire progresser la compréhension de l'asymétrie matière-antimatière. L'expérience a également publié une analyse conjointe avec CMS d'un processus extrêmement rare, la désintégration de la particule B^0_s en deux muons. D'après le Modèle standard, ce phénomène devrait se produire environ quatre fois sur un milliard de désintégrations, mais il n'avait jamais été observé auparavant. Étudier ces désintégrations pourrait permettre de tester des théories au-delà du Modèle standard, comme la supersymétrie.

La deuxième période d'exploitation commence très bien pour LHCb, qui a collecté des données avec une grande efficacité. Une approche révolutionnaire en matière d'acquisition de données a permis de produire très rapidement de premiers résultats. Les résultats de physique connue, notamment sur les particules J/ψ , sont essentiels pour débiter une exploitation à une nouvelle énergie. Ils ont été présentés lors d'une conférence quelques semaines après le début de la prise de données. LHCb

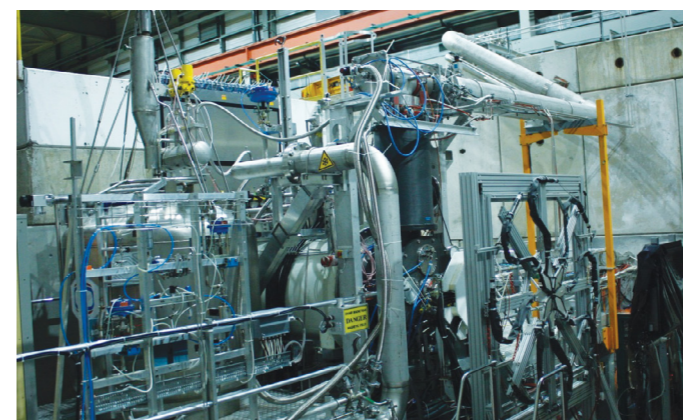
a également collecté pour la première fois des données sur des collisions d'ions plomb.

Les équipes de LHCb préparent aussi l'amélioration de l'expérience qui aura lieu pendant le deuxième long arrêt à partir de 2019. Il s'agit d'un ambitieux projet consistant à retirer entièrement le système de déclenchement matériel et de faire prendre toutes les décisions de déclenchement par des logiciels situés dans une ferme de processeurs. L'objectif est de lire les données du détecteur à la fréquence de croisement des paquets dans le LHC. Toute l'électronique de lecture sera renouvelée, ainsi qu'un grand nombre de systèmes de sous-détecteurs.

La collaboration LHCb a célébré ses 20 ans en 2015. Pour l'occasion, elle a organisé une fête et une rétrospective des étapes marquantes de son histoire. LHCb a officiellement vu le jour en août 1995, lorsqu'une lettre d'intention a été présentée pour la mise en place de la toute première expérience consacrée à la physique des b sur un collisionneur de hadrons.

LHCf – zoom sur les petits angles

L'année 2015 a été particulièrement chargée pour l'expérience LHCf, qui étudie les particules neutres émises à très petits angles dans les collisions du LHC. Ces recherches aident les scientifiques à comprendre ce qui se passe lorsque des rayons cosmiques de haute énergie entrent en collision avec l'atmosphère. En 2015, LHCf a collecté ses premières données à 13 TeV, enregistrant quelque 40 millions d'événements en 30 heures de prise de données. Pendant que ces données étaient en cours d'analyse, LHCf a publié des articles sur les données obtenues à 7 TeV. Les résultats ont révélé des écarts par rapport aux modèles utilisés pour interpréter les données sur les rayons cosmiques, qui ont pu ainsi être améliorés. Par ailleurs, LHCf a entamé avec ATLAS une analyse conjointe des données issues de collisions proton-plomb : une démarche très prometteuse.



L'expérience COMPASS dans sa configuration de 2015. (OPEN-PHO-EXP-2016-005-1)



Dans la salle de contrôle de NA62, pendant la mise en service de l'expérience. (OPEN-PHO-EXP-2016-004-1)

MoEDAL – à la frontière de la découverte

L'expérience MoEDAL est conçue pour la recherche de particules hautement ionisantes révélatrices d'une nouvelle physique. Son détecteur innovant, déployé près de LHCb, est doublement apte à la recherche d'une nouvelle physique ; d'une part, il agit comme un appareil photo géant, composé de détecteurs de traces nucléaires, qui ne serait sensible qu'à la nouvelle physique ; d'autre part, il est capable de piéger des particules hautement ionisantes (par exemple, le monopôle magnétique). L'installation du détecteur complet s'est achevée début 2015, et les premières données ont été collectées au printemps. Le premier article de physique de MoEDAL sera publié au printemps 2016.

TOTEM – au plus près du faisceau

Pendant le long arrêt technique, la collaboration TOTEM a apporté à ses équipements d'importantes améliorations, parmi lesquelles l'ajout de détecteurs dits « pots romains » effectuant des mesures très près du faisceau. TOTEM, qui mesure la section efficace totale des collisions pp avec une précision inégalée, est un outil exceptionnel d'exploration de la structure du proton. En 2015, l'expérience a publié des résultats montrant comment la section efficace des collisions pp varie en fonction de l'énergie, et présentant des éléments inédits. Ces mesures constituent des points de référence essentiels pour les grandes expériences LHC et serviront à interpréter les gerbes de rayons cosmiques. Pendant la deuxième période d'exploitation, TOTEM traquera les particules exotiques telles que les « boules de glu », ces particules hypothétiques formées de gluons. Grâce à un accord conclu avec CMS, qui lui permet de combiner ses données avec celles de sa grande voisine, TOTEM aborde la deuxième période d'exploitation avec une meilleure sensibilité à la nouvelle physique.

Expériences au SPS

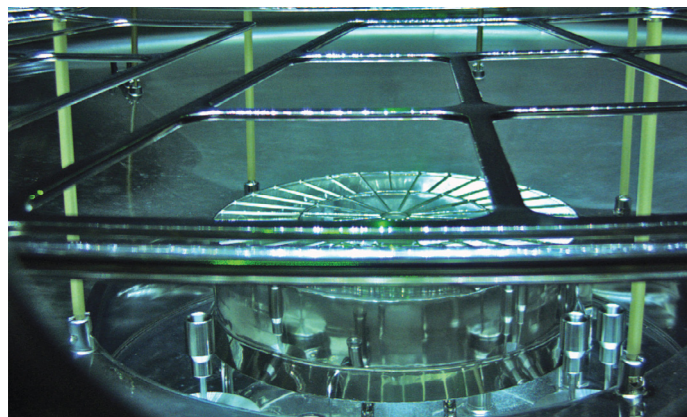
En amont du LHC se trouve le Supersynchrotron à protons (SPS) qui, en plus de fournir des faisceaux au LHC, accueille quatre

expériences actives : NA58, NA61, NA62 et NA63. NA signifie « North Area » (zone Nord), et le numéro indique simplement leur rang dans la série d'expériences menées dans cette zone depuis la première, NA1, dans les années 1970.

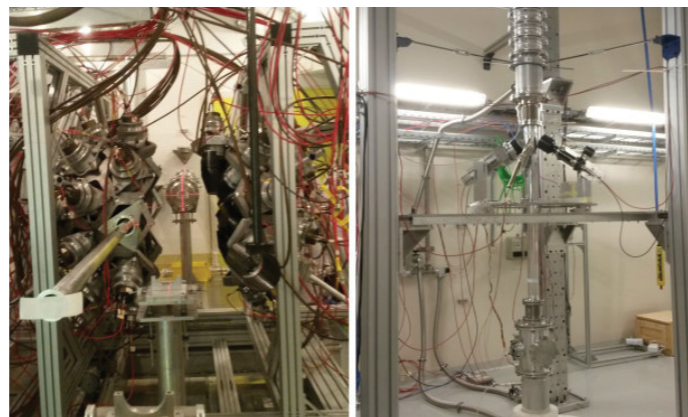
Après une exploitation pilote réussie en 2014, l'expérience COMPASS (NA58) s'est lancée en 2015 dans l'étude des interactions entre un faisceau de pions de 190 GeV et une cible d'ammoniac polarisée transversalement. En examinant comment la polarisation des protons dans la cible influe sur la production de paires de muons, les chercheurs de COMPASS disposent d'un moyen complémentaire de comprendre la structure du proton. Ils pourront notamment mesurer le moment cinétique orbital du proton, un résultat attendu avec impatience. Plusieurs éléments du spectromètre de COMPASS ont été améliorés en vue de cette mesure : l'aimant supraconducteur de la cible polarisée a été entièrement reconstruit, le trajectographe a été consolidé et un nouveau système d'acquisition de données a été mis en place.

L'expérience NA61/SHINE étudie la production de hadrons, des particules régies par l'interaction forte, la force qui empêche les noyaux atomiques de se défaire. L'un des objectifs de cette expérience est de trouver le point critique où la matière ordinaire se transforme en plasma quark-gluon, l'état de la matière juste après la naissance de l'Univers. La technique utilisée consiste à faire varier les particules du faisceau pour étudier les collisions avec des températures et des densités différentes, ces paramètres étant essentiels pour la recherche du point critique. Des progrès ont été accomplis en 2015, avec des faisceaux d'argon fournis pour la première fois par le SPS en février, puis avec des ions plomb en novembre.

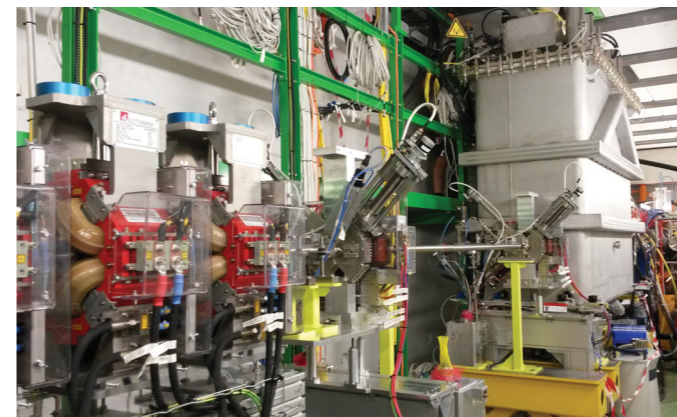
La mise en service de l'expérience NA62, qui étudie les désintégrations rares du kaon, a démarré pour de bon en 2015. Si la prédiction du Modèle standard est correcte, NA62 devrait détecter 40 candidats à la désintégration par an. Les scientifiques pourront ainsi étudier la probabilité que les quarks top se désintègrent en quarks down. Comprendre les relations entre les quarks est un moyen efficace de vérifier la cohérence du Modèle standard. En 2015, des données de qualité ont été collectées



Vue interne de la partie inférieure de la chambre à brouillard de CLOUD éclairée par lumière UV lors d'une période d'expérimentation au PS. (OPEN-PHO-EXP-2016-003-1)



La ligne de faisceau horizontale dans EAR1 (à gauche) et la ligne de faisceau verticale dans la nouvelle zone d'expérimentation EAR2. (OPEN-PHO-EXP-2016-006-3)



La ligne de faisceau d'ISOLDE qui alimente le dispositif Miniball. On distingue au second plan le premier cryomodule d'HIE-ISOLDE dans son cryostat gris clair. (OPEN-PHO-ACCEL-2016-007-1)



Vue du hall d'expérimentation du Décélérateur d'antiprotons. (CERN-PHOTO-201601-005-11)

par tous les sous-systèmes de NA62. Le détecteur a enregistré environ 20 milliards d'événements, démontrant sa performance à haute intensité. Un important sous-système, le Gigatracker, a aussi fait ses preuves, et le système de déclenchement, qui détermine les collisions à enregistrer ou à ignorer, a été mis en service.

NA63 dirige des faisceaux d'électrons et de positons sur des cristaux-cibles pour étudier des processus engendrés dans des champs électromagnétiques très intenses. Ces champs peuvent entraîner la création de nouvelles particules à partir du vide, selon des processus comparables à ceux existant au sein des étoiles à neutrons ou des trous noirs ; leur étude pourrait aider à comprendre les mécanismes de formation des rayons cosmiques de très haute énergie. En 2015, NA63 a également étudié l'émission de photons par les électrons et les positons traversant des champs élevés. Ces travaux pourraient avoir des implications pour de nouvelles techniques pour les lasers et la compréhension du rayonnement de Hawking des trous noirs, qui n'a toujours pas été observé.

Expériences au PS

Encore en amont se trouve le PS, un accélérateur en fonctionnement depuis 1959, qui reste la clé de voûte de la chaîne des accélérateurs du CERN. En 2015, le PS a fourni des faisceaux à trois expériences et installations.

L'expérience CLOUD s'intéresse à une question essentielle : la formation des aérosols dans l'atmosphère et son impact sur les nuages et le climat. Grâce à un faisceau du PS, CLOUD étudie l'influence des rayons cosmiques sur la formation des aérosols. En 2015, CLOUD a élargi son champ de recherche sur la nucléation et la croissance des particules d'aérosol pour y inclure deux des vapeurs biogènes les plus abondantes dans l'atmosphère : l'alpha-pinène et le delta-3-carène. De l'acide sulfurique, de l'ammoniac et des oxydes d'azote ont été ajoutés pour recréer les conditions complexes observées au poste de Hyytiälä (Finlande), en forêt, afin de comprendre quelles vapeurs agissent sur la

nucléation et la croissance des particules d'aérosol et comment ces processus sont influencés par la radioactivité naturelle et les rayons cosmiques. Les analyses sont en cours et les premières publications sont attendues en 2016.

L'expérience DIRAC permet aux physiciens de mieux comprendre la force forte en mesurant la durée de vie d'atomes exotiques à vie brève constitués de paires de particules de la famille des mésons. En 2015, DIRAC a observé pour la première fois des atomes π^+K^- et π^-K^+ , constitués de pions et de kaons. Ces atomes sont issus de l'interaction de protons du PS avec des cibles en nickel et en platine. Dans la cible, certains de ces atomes se dissocient rapidement, et le pion et le kaon poursuivent seuls leur trajectoire. Les mesures de la durée de vie et d'autres propriétés de ces atomes peuvent ensuite être comparées très précisément aux prédictions théoriques, dans le but de mieux comprendre l'interaction forte.

L'installation de mesure du temps de vol des neutrons (n_TOF) fournit des faisceaux pulsés de neutrons issus de l'interaction de protons du PS avec une cible en plomb. Les neutrons sont collimatés et guidés vers deux zones d'expérimentation qui fonctionnent simultanément : EAR1, placée à 185 m de la cible, horizontalement, qui collecte des données depuis 2001, et EAR2, située à environ 20 m, verticalement, qui a reçu son premier faisceau en 2014. La mesure du temps de vol permet d'étudier les réactions provoquées par les neutrons en fonction de leur énergie, ce qui a des retombées sur l'étude de la nucléosynthèse stellaire et sur la technologie nucléaire, notamment pour l'élimination des déchets nucléaires. En 2015, le programme de physique d'EAR1 incluait la mesure des rayons gamma émis lors d'une capture neutronique par certains noyaux. Une fission induite par des neutrons a en outre été mesurée sur un noyau de neptunium 237. À EAR2, la mise en service de la ligne de faisceau a été achevée. Des mesures de capture neutronique ont été réalisées sur les isotopes radioactifs thulium 171 et prométhium 147. Les sections efficaces d'émissions de rayons alpha induites par des neutrons ont été mesurées sur du soufre 33

et du béryllium 7. Ces dernières données pourraient aider à comprendre pourquoi les mesures de l'abondance de lithium contredisent les prédictions des modèles du Big Bang. Enfin, un nouveau spectromètre à fragments de fissions exotiques, STEFF, a été installé et a collecté ses premières données ; les deux zones d'expérimentation de n_TOF sont donc pleinement opérationnelles.

Les faisceaux exotiques d'ISOLDE

L'installation de production de faisceaux exotiques ISOLDE a mené 35 expériences en 2015. L'une d'elles consistait notamment à extraire des faisceaux particulièrement résistants et réfractaires d'ions bore en utilisant la molécule ionisée BF_2^+ . Un matériau comme le bore est dit réfractaire parce qu'il résiste à des conditions extrêmes et est donc difficile à ioniser. L'extraction permettra l'étude du noyau à halo 8B . Les noyaux à halo possèdent un cœur compact de protons et de neutrons, entouré d'un halo épars composé d'autres nucléons. Des systèmes faiblement liés comme ceux-ci permettent d'étudier les limites entre systèmes liés et non-liés.

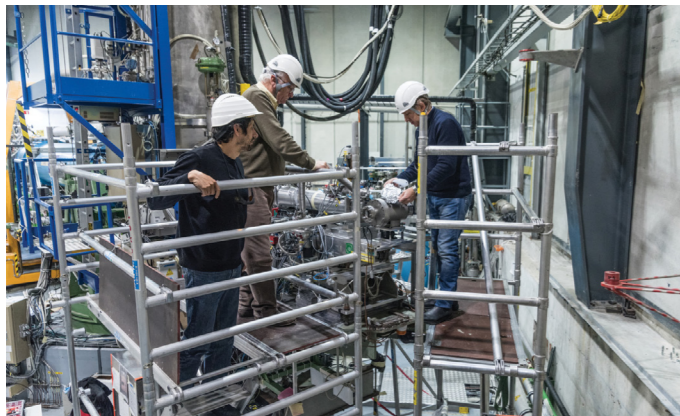
Cinq expériences concluantes ont été menées à la station de désintégration IDS. Elles portaient sur des éléments allant du ^{20}Mg , à la limite inférieure de stabilité sous laquelle les noyaux doivent perdre des protons, jusqu'au ^{132}Sn , doublement magique et très riche en neutrons. Dans les modèles nucléaires, les protons et les neutrons sont répartis en couches et, lorsqu'un noyau contient un certain nombre de protons et de neutrons, ses couches sont pleines : on dit qu'elles sont complètes. Un noyau avec une couche complète est magique. Si les couches de protons et de neutrons sont toutes les deux complètes, il est doublement magique. Les noyaux doublement magiques ont des propriétés spécifiques facilement identifiables : ils sont sphériques et difficiles à exciter. Une question importante de la physique nucléaire porte sur la validité pour les noyaux instables des nombres magiques déterminés pour les noyaux stables. Ce résultat d'ISOLDE aide à répondre à cette question, qui représente un défi pour la théorie.

En combinant les données obtenues à la station IDS avec les mesures de masse réalisées par le détecteur ISOLTRAP, la limite supérieure en masse de l'îlot des noyaux déformés contenant environ 20 neutrons, comme ^{34}Mg , sera bientôt observable. De telles mesures sont capitales pour tester les modèles nucléaires et ainsi comprendre la physique des noyaux. La détermination du rayon quadratique moyen des isotopes de mercure et d'or a également représenté une avancée importante : elle a été obtenue en repoussant les limites de la sensibilité grâce aux dernières innovations technologiques en matière de production, de séparation et de détection. Les mesures effectuées montrent des changements de déformation spectaculaires pour les isotopes contenant 104 neutrons.

En 2015, le projet HIE-ISOLDE (ISOLDE à haute intensité et haute énergie) a fourni ses premiers faisceaux (voir p. 24). Le 22 octobre, des faisceaux de zinc exotique de numéros atomiques 74 et 76 ont été accélérés jusqu'à 4 MeV par nucléon pour la première fois, marquant le début d'une nouvelle ère pour ISOLDE.

Expériences sur l'antimatière

Le Décélérateur d'antiprotons (AD) du CERN est une installation unique au monde qui fournit des faisceaux d'antiprotons de basse énergie à des expériences étudiant principalement l'antimatière. L'atome d'hydrogène faisant partie des systèmes les mieux connus en physique, l'un des objectifs du programme d'expérimentation de l'AD est de réaliser des mesures précises des atomes d'antihydrogène. L'atome d'antihydrogène est composé d'un antiproton et d'un positon (antiparticules du proton et de l'électron qui forment l'atome d'hydrogène). Mesurer les propriétés de l'antihydrogène avec la même précision que celles de l'hydrogène permettra de mieux comprendre les symétries entre la matière et l'antimatière et, peut-être, d'expliquer pourquoi nous vivons dans un Univers de matière alors que la matière et l'antimatière ont été produites en quantités égales lors du Big Bang.



Des membres de la collaboration CAST devant le nouveau détecteur KWISP de l'expérience. Installé sur l'hélioscope solaire, ce détecteur va élargir le champ de recherche de CAST pour inclure les caméléons, particules candidates pour l'énergie noire. (CERN-PHOTO-201602-049-22)

En 2015, l'expérience ASACUSA a publié les résultats d'expériences menées avec un faisceau d'hydrogène atomique qui montrent que le dispositif expérimental est capable de réaliser des mesures spectroscopiques d'atomes en vol. Il reste à présent à renouveler l'expérience avec un faisceau d'antihydrogène. De son côté, l'expérience BASE compare les particules de matière et d'antimatière avec le même objectif : déterminer les différences entre les propriétés de la matière et de l'antimatière. En 2015, BASE a comparé les rapports charge sur masse des protons et des antiprotons, et n'a relevé aucune différence au niveau du milliardième de milliardième.

ALPHA, ATRAP et AEGIS ont travaillé sur la suite de leur programme : l'étude de l'interaction de lasers avec des atomes d'antihydrogène piégés pour ALPHA et ATRAP ; la production pulsée d'atomes d'antihydrogène par la production pulsée et l'excitation par laser du positonium pour AEGIS. Enfin, la préparation de l'AD pour l'installation de GBAR s'est achevée, le premier équipement devant être placé début 2016.

Physique des astroparticules

La physique des particules va bien au-delà des recherches avec des faisceaux de haute énergie. Les basses énergies peuvent aussi nous apprendre beaucoup, tout comme les particules venant de l'espace. Au CERN, deux expériences étudiant ces aspects sont en quête d'une nouvelle physique.

L'expérience OSQAR explore la frontière des basses énergies à la recherche de particules hypothétiques qui pourraient constituer les mystérieuses matière et énergie noires. Selon certaines théories, ces particules pourraient être produites à partir d'un faisceau de lumière exposé à un champ magnétique élevé ; OSQAR utilise ainsi un faisceau laser qu'elle envoie dans un dipôle du LHC. En 2015, l'expérience a élargi son champ de recherche pour y inclure les caméléons, des particules candidates pour l'énergie noire dont la masse varie en fonction de la densité de leur environnement. Si les caméléons existent, ils devraient apparaître via la conversion de photons dans un champ magnétique transverse. Aucune signature n'a encore été observée ; l'analyse en cours devrait permettre de fixer de nouvelles limites d'exclusion dans la

recherche de caméléons. L'énergie noire reste à ce jour toujours aussi insaisissable.

L'expérience CAST a passé 14 ans à observer le Soleil dans le but de détecter des axions, ces particules qui constitueraient la matière noire de l'Univers et seraient produites en abondance au centre du Soleil. Les axions solaires qui pénétreraient le détecteur de CAST seraient convertis en rayons X, facilement mesurables. Jusqu'à présent, les chercheurs de CAST n'ont pas observé ces axions solaires ; ils ont donc élargi leurs recherches pour englober les axions fossiles produits lors du Big Bang. L'expérience installe deux capteurs qui permettront au détecteur d'être plus sensible aux caméléons solaires, ces candidats pour l'énergie noire dont les mécanismes de production et de détection sont comparables à ceux des axions. L'une des techniques de détection de CAST utilise un capteur opto-mécanique ultrasensible (KWISP), inédit dans le domaine de la physique des astroparticules.

La plateforme neutrino du CERN

Inaugurée fin 2014, la plateforme neutrino est au centre de la participation de l'Europe à la recherche mondiale sur les neutrinos. Elle comprend une installation de R&D au CERN qui permettra à la communauté des spécialistes des neutrinos de concevoir et de produire les prototypes de la prochaine génération de détecteurs de neutrinos.

Comprendre l'insaisissable neutrino est une priorité pour la physique des particules. La recherche sur les neutrinos auprès des accélérateurs de particules et les études menées en cosmologie se complètent : de futures mesures pourraient permettre d'élucider des mystères comme la nature de la matière noire et le déséquilibre entre matière et antimatière dans l'Univers. Les expériences menées permettront d'observer les neutrinos issus des supernovas.

Avec cette plateforme, le CERN donne une nouvelle direction à son programme sur les neutrinos. Dans les années 1970, des faisceaux de neutrinos produits au CERN ont permis de découvrir les courants neutres avec la chambre à bulles Gargamelle. Les derniers faisceaux de neutrinos produits au CERN ont traversé l'écorce terrestre pour rejoindre le Laboratoire national du Gran Sasso de l'INFN, en Italie, entre juillet 2006 et décembre 2012.

En décembre 2014, la plateforme neutrino a réceptionné le détecteur ICARUS, expédié du Gran Sasso, où il a servi jusqu'en 2012 à étudier le faisceau de neutrinos envoyé par le CERN. ICARUS est en cours de rénovation au CERN. En 2017, il sera acheminé au Fermilab, aux États-Unis, pour un programme de recherche consacré aux neutrinos.

Détecteurs pour un collisionneur linéaire

Le projet Détecteurs pour un collisionneur linéaire (LCD) réunit des instituts du monde entier pour étudier des questions liées à la physique et aux détecteurs en vue d'un potentiel collisionneur linéaire électron-positon comme le CLIC (voir p. 27). Il compte trois collaborations : CLICdp (détecteurs et physique), CALICE (calorimètres) et FCAL (détecteurs placés dans la partie avant, près du faisceau).

En 2015, les recherches ont porté sur la physique du Higgs et du quark top, ainsi que sur des simulations de physique au-delà du Modèle standard aux énergies du CLIC. Des recherches sur

l'optimisation des détecteurs ont permis de créer un modèle de détecteur pour le CLIC assurant une meilleure couverture des données de physique dans les bouchons. Les outils logiciels pour la simulation et la reconstruction des événements ont été améliorés, intégrant désormais une description ajustable du détecteur et un logiciel de reconstruction des traces avec un trajectographe au silicium complet. Des tests avec faisceaux concluants ont été menés avec différentes configurations de détecteurs de vertex pour le CLIC, ainsi qu'avec les détecteurs de CALICE et de FCAL. En parallèle, la collaboration CALICE a mené des essais en laboratoire avec un système de photomultiplicateurs au silicium, et publié les résultats d'une campagne de tests avec faisceaux menée avec un prototype de calorimètre tungstène-scintillateur. Bien qu'axés sur un potentiel détecteur pour le CLIC, ces travaux présentent d'importantes synergies avec d'autres projets, tels que le Collisionneur linéaire international et l'étude FCC sur un Futur collisionneur circulaire (voir p. 28).

R&D : un futur prometteur

Les accélérateurs du CERN accueillent plusieurs projets de R&D visant à préparer les technologies de détection de particules de demain. Le projet RD18, de la collaboration Crystal Clear, mène depuis 1991 des recherches sur des détecteurs à cristaux innovants utilisés en calorimétrie électromagnétique pour la physique des particules et pour des applications médicales et industrielles. RD39 et RD50 mettent au point des trajectographes au silicium capables de supporter les conditions extrêmes d'un collisionneur de hadrons. RD42 étudie des détecteurs industriels en diamant pour des applications similaires. RD53 développe de l'électronique de lecture pour ces détecteurs. RD51 repousse les limites des détecteurs à gaz. RD52 travaille sur la calorimétrie pour des mesures d'énergie de haute qualité. Ensemble, ces collaborations couvrent les aspects des futurs détecteurs de collisionneur.

Deux autres programmes, véritables expériences, sont dans une phase de R&D. UA9 étudie la manière dont des cristaux courbés pourraient être utilisés dans les futurs collisionneurs pour éloigner des équipements sensibles le halo diffus de particules entourant les faisceaux, afin que ces derniers soient bien resserrés aux points de collision. Au LHC, ce procédé de collimation est réalisé au moyen de mâchoires en tungstène absorbant le halo. L'expérience SHiP est un projet de cible fixe au SPS visant à rechercher des particules dont l'existence a été prédite par des modèles de physique au-delà du Modèle standard. SHiP a été invitée à réaliser pendant les trois prochaines années une étude de conception approfondie démontrant la faisabilité de l'expérience.

En théorie

En 2015, la moitié des travaux de recherche du groupe Théorie du CERN ont été consacrés au Modèle standard ou à la physique au-delà du Modèle standard. La physique du Modèle standard englobe les recherches directement liées au LHC, en particulier la chronodynamique quantique et la physique du Higgs. La physique au-delà du Modèle standard s'intéresse notamment aux extensions du Modèle standard, à la matière noire et à de possibles signatures d'une nouvelle physique au LHC.

L'annonce, le 15 décembre, de la possible observation d'une

« bosse » dans la distribution des paires de photons dans les données du LHC à 13 TeV a semé l'émoi chez les théoriciens. Le groupe Théorie du CERN a activement participé aux discussions et aux études sur l'interprétation de ces données (voir p. 14).

En dehors de la phénoménologie, d'importants travaux de recherche ont également été réalisés en astrophysique des particules et en cosmologie, mais aussi en physique des ions lourds, ainsi que sur les théories des champs sur réseau, de la gravitation et des cordes et sur la théorie formelle des champs. Les projets recouvraient souvent plusieurs domaines, la matière noire entrant dans le champ de la cosmologie et de la physique des collisionneurs, et la physique des trous noirs étant liée de façon holographique aux collisions d'ions lourds.

La théorie des champs conformes, qui relie la physique des particules, les trous noirs et la physique de la matière condensée, constitue un autre exemple. Par ailleurs, des techniques innovantes de calcul des amplitudes de diffusion, dérivées de concepts de physique mathématique, ont été employées pour effectuer des calculs complexes, utiles pour la physique des collisionneurs. Au final, les membres du groupe ont publié un article par jour en moyenne.

Le groupe Théorie du CERN compte 18 titulaires et 40 boursiers. Il gère aussi un vaste programme de visiteurs, avec une douzaine d'attachés scientifiques et environ 800 visiteurs de courte durée. Cet important flux de visiteurs témoigne de l'importance de ce groupe en tant que centre de premier plan pour les échanges scientifiques.

Les instituts de théorie, des ateliers informels durant jusqu'à quelques semaines, représentent une part importante du programme des visiteurs. Ils permettent de réunir des scientifiques visiteurs ayant des intérêts communs pour optimiser les ressources au bénéfice de la communauté internationale. En 2015, trois instituts ont été organisés : « Comprendre l'Univers primordial », « La naturalité neutre » et « Les symétries de dualité dans la théorie des cordes et la théorie M ».

Des membres du groupe Théorie ont assisté à beaucoup de conférences et d'ateliers dans le monde. Ils ont également participé aux travaux du groupe Données (*Data Particle Group*) et à des activités d'enseignement menées au CERN : formation académique, programmes des étudiants d'été et des enseignants du secondaire, ainsi qu'écoles européenne et latino-américaine de physique des hautes énergies. Comme chaque année, le groupe a accueilli l'École d'hiver sur la supergravité, les cordes et la théorie de jauge, ainsi qu'une école doctorale sur la théorie des cordes. Activité particulièrement importante, le Centre de physique du LHC du CERN (LPCC) organise des ateliers et conférences et compte plusieurs groupes de travail. En novembre, le groupe a tenu son séminaire annuel, permettant à ses membres d'avoir un aperçu exhaustif des recherches en cours. L'objectif était de faciliter l'intégration des nouveaux arrivants et d'échanger des idées dans un environnement stimulant. Le programme du séminaire donne une vue d'ensemble des travaux du groupe en 2015. (Voir <https://indico.cern.ch/event/433779/other-view?view=standard>)

En 2016, un important changement attend le groupe puisqu'il regagnera son statut de département, en reconnaissance de son rôle essentiel comme centre de référence pour la physique des particules théorique.



Derniers préparatifs dans le tunnel du LHC avant le retour des faisceaux. Le 5 avril, des particules circulaient pour la première fois dans l'accélérateur, après le long arrêt technique. (CERN-PHOTO-201503-058-1)

Accélérateurs

Après deux ans de travaux de consolidation, le grand défi de l'année 2015 était d'exploiter le Grand collisionneur de hadrons (LHC) à l'énergie de collision inédite de 13 TeV, contre 8 TeV à la fin de la première période d'exploitation en 2013. L'année 2015 a débuté par la remise en route de l'accélérateur, refroidi à 1,9 kelvin (-271 °C) fin 2014, et la qualification de sept des huit secteurs à la nouvelle énergie. Au cours de cette phase, l'intensité du courant a progressivement été augmentée jusqu'à 11 080 ampères dans les circuits des 1 232 aimants dipôles supraconducteurs. Chaque secteur est entraîné en plusieurs étapes, certains aimants subissant une transition résistive (passage de l'état supraconducteur à l'état résistif), stoppant la montée du courant. L'opération est alors reproduite plusieurs fois jusqu'à atteindre l'intensité nominale. Fin mars, sept des huit secteurs étaient en service pour des faisceaux à 6,5 TeV d'énergie. Mais un grain de sable, ou plutôt un fragment de métal, empêchait le dernier secteur d'égaliser les sept autres. Un court-circuit à la terre, causé par un débris métallique, est apparu sur l'un des aimants. Pour éviter d'ouvrir la machine, opération qui aurait nécessité de réchauffer le secteur et entraîné plusieurs

semaines de retard, les équipes ont procédé à une intervention astucieuse : un fort courant a été injecté pendant quelques millisecondes afin de désagréger le fragment métallique. Opération réussie ! Les tests de remise en service de l'ensemble de la chaîne des accélérateurs ont eu lieu en parallèle.

Le printemps des particules

Le 5 avril, les faisceaux étaient de retour dans le LHC. Cinq jours plus tard, l'énergie de 6,5 TeV par faisceau était atteinte : un nouveau record. Après deux mois de réglages minutieux, les opérateurs du LHC annonçaient les faisceaux stables pour la physique et les premières collisions le 3 juin. La collecte de données pouvait alors recommencer dans les expériences du LHC (voir p. 12) Au cours de l'année, les opérateurs ont accru l'intensité des faisceaux en augmentant le nombre de paquets et en réduisant l'espace entre les paquets de 50 à 25 nanosecondes. À la fin de l'exploitation avec des protons, en novembre, jusqu'à 2 244 paquets de protons espacés de 25 nanosecondes circulaient dans chaque sens de l'anneau. Les



Préparation de l'un des deux nouveaux absorbeurs de faisceaux à l'injection installés pendant l'arrêt technique hivernal des accélérateurs. (CERN-PHOTO-201601-004-8)



Assemblage des cavités de l'accélérateur HIE-ISOLDE en salle blanche. (CERN-PHOTO-201603-057-16)

expériences ATLAS et CMS ont enregistré quelque 400 millions de millions de collisions de protons, soit une luminosité intégrée de 4 femtobarns inverses. La luminosité est le principal indicateur de performance d'un accélérateur, correspondant au nombre de collisions potentielles par seconde et unité de surface. La luminosité intégrée équivaut à la luminosité cumulée sur une période donnée, dans le cas présent la période d'exploitation de 2015. Les expériences LHCb et ALICE ont, elles, engrangé un grand nombre de données à des taux de collision plus faibles. Deux exploitations spéciales ont été menées pour les expériences LHCf, ALFA et TOTEM, situées de part et d'autre des expériences ATLAS et CMS, avec des faisceaux desserrés.

Chasse aux nuages

Pour parvenir à cette intensité de faisceau, les opérateurs ont dû chasser les nuages d'électrons. La montée en intensité induit en effet un phénomène d'avalanches d'électrons, qui déstabilise le faisceau et chauffe les écrans de faisceau, placés à l'intérieur des tubes de faisceau. La formation de nuages d'électrons est d'autant plus importante que les paquets de protons sont nombreux et rapprochés. Plusieurs semaines d'exploitation ont été consacrées au conditionnement des tubes de faisceau. L'opération consiste à faire circuler des faisceaux intenses, mais à des énergies faibles, pour libérer le plus possible d'électrons libres sur la surface des tubes et réduire le taux de production d'électrons.

Avec un nouveau record d'intensité de faisceau, la cryogénie a été poussée dans ses retranchements. D'autant que le temps de réponse du système de refroidissement, qui dépend de la circulation de fluides sur des kilomètres de tubes, est bien plus lent que celui du contrôle des faisceaux. Les paquets de particules sont injectés et éjectés en un clin d'œil. Pour mieux adapter la cryogénie aux phases d'injection et, surtout, d'éjection des faisceaux, un nouveau système de contrôle avancé a été développé. Il repose sur l'utilisation de 500 chaufferettes situées sur les écrans de faisceau qui sont mises sous tension

pour anticiper la montée en puissance de la cryogénie avant l'injection et pour amortir la chute brutale de la charge thermique au moment de l'éjection des faisceaux.

Le système de protection des aimants a démontré d'excellentes performances grâce à un outil de diagnostic qui avait été perfectionné avant le redémarrage. Il permet de détecter des signes précurseurs de dysfonctionnements et de localiser très précisément les défauts de fonctionnement. Les équipes ont profité de l'un des trois courts arrêts techniques de 2015 pour remplacer 1 000 cartes électroniques trop sensibles aux rayonnements.

L'exploitation du LHC s'est terminée en décembre avec trois semaines de collisions avec des ions plomb. Cette dernière exploitation a été précédée d'une semaine de collisions de protons à 2,51 TeV par faisceau pour fournir des données de référence pour les collisions d'ions plomb. Un nouveau record d'énergie a été établi avec des ions plomb accélérés à 6,37 TeV, donnant une énergie de collision de 5,02 TeV pour chaque paire de nucléons se percutant. Jusqu'à 518 paquets d'ions plomb ont circulé dans la machine.

L'électrocardiogramme du LHC

Pour optimiser l'exploitation, les opérateurs ont utilisé un nouveau système de diagnostic, le système de suivi des anomalies de l'accélérateur (« *Accelerator fault tracking system* »-AFT). Véritable électrocardiogramme du LHC, l'outil suit 24 systèmes, de l'infrastructure technique aux sous-systèmes du LHC, comme la radiofréquence, le vide, la cryogénie ou la collimation. Il fournit en continu des données sur la disponibilité du LHC, c'est à dire le temps de fonctionnement consacré à la fourniture de particules, en indiquant l'origine des arrêts. L'outil permet d'identifier les améliorations à apporter pour réduire les périodes d'indisponibilité.

Pour améliorer la disponibilité du LHC au moment de l'injection, deux nouveaux absorbeurs de faisceaux à l'injection ont été développés en 2015. Ces gros équipements de six mètres



Prototype pour le développement du traitement de surface au CERN des chambres à vide du synchrotron suédois MAX IV. (OPEN-PHO-ACCEL-2016-006-1)

Les équipes du vide font le plein de projets

Deux accélérateurs en développement en Europe ont fait appel à l'expertise du CERN en matière de technologies de vide et de traitements de surface. Une partie des chambres à vide du nouveau synchrotron suédois MAX IV, qui devrait être inauguré en juin 2016, a été développée grâce à la contribution du CERN. Le plus grand des deux anneaux du synchrotron est doté d'une chambre à vide qui laisse un passage très étroit au faisceau. Certains tronçons de la chambre présentent par ailleurs des géométries complexes. 95 % des chambres sont recouvertes d'un dépôt de matériau NEG (« *Non Evaporable Getter* ») qui assure un vide poussé en piégeant les molécules de gaz résiduelles. Ce matériau, développé à la fin des années 1990 au CERN, est largement utilisé dans les chambres à vide à température ambiante du LHC. L'équipe du CERN spécialisée dans ce domaine a développé la technique de traitement de surface de toutes les chambres à vide du grand anneau de MAX IV. Elle a transféré la technologie afin que les chambres à vide les plus « simples » soient réalisées par une entreprise européenne et effectué le dépôt des chambres à vide complexes qu'elle a livrées en 2014 et 2015. Le CERN a aussi apporté son expertise pour le cuivrage de pièces en acier inoxydable dans le cadre du projet de laser à électrons libres XFEL en Allemagne.

..... à n_TOF, soit 10 % de plus que prévu. Un nouveau système d'extraction des particules du PS, l'extraction multi-tours, a été utilisé en fin d'année pour les expériences avec cibles fixes du SPS, grandes consommatrices de particules. Développée depuis 2002, mise en service une première fois en 2010, cette nouvelle méthode a été améliorée et remise en service en 2015. Elle permet de porter le taux de particules extraites de 95 à 98 % par rapport à ce que l'on peut obtenir avec le système de transfert continu utilisé jusqu'à présent. Le procédé permet aussi de réduire les dépôts de rayonnements dans les équipements du PS.

Outre des protons et des ions plomb, le SPS a pour la toute première fois accéléré des ions argon pour l'expérience NA61/SHINE. Préparée depuis deux ans, cette exploitation a permis de délivrer des ions argon à six niveaux d'énergie différents. Enfin le Décélérateur d'antiprotons (AD), qui alimente les expériences sur l'antimatière, a démarré en juillet et comptabilisé 3 200 heures de physique avec une disponibilité de 90 %.

Nouveaux faisceaux

Deux autres installations ont fêté l'arrivée des particules en 2015. Le 22 octobre, un faisceau était accéléré par le premier cryomodule du nouvel accélérateur HIE-ISOLDE (ISOLDE à haute intensité et haute énergie). L'énergie des ions radioactifs pour l'installation de physique nucléaire ISOLDE était portée de 3 à 4,3 MeV par nucléon. Ce cryomodule supraconducteur,

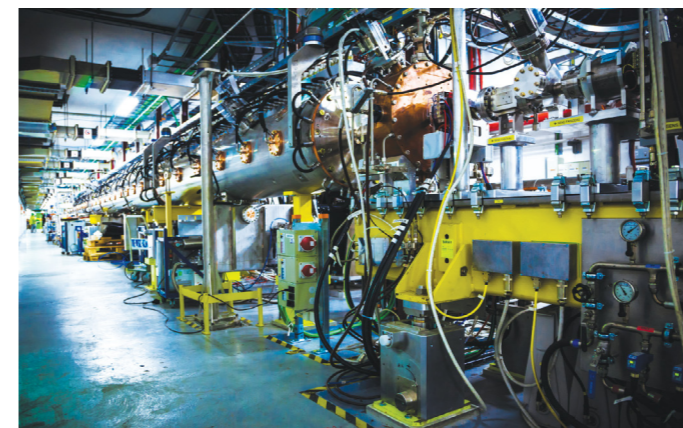
de long sont utilisés lorsque les faisceaux sont éjectés du Supersynchrotron à protons (SPS) vers le LHC. Protection indispensable du LHC, ils absorbent le faisceau du SPS en cas de dysfonctionnement au moment de l'injection dans le LHC. Ceux en place ont montré des signes de défaillance, perturbant parfois l'injection. Une fois les machines arrêtées en fin d'année, l'installation des nouveaux absorbeurs, formés d'un autre matériau, a pu commencer.

Dans les coulisses du LHC, un aimant dipôle supraconducteur a pour la première fois entièrement été construit dans les ateliers du CERN. Les 1 232 aimants dipôles du LHC actuellement en service ont été fabriqués au début des années 2000 dans l'industrie européenne. Pour conserver le savoir-faire, le CERN a réintégré la production. Le dipôle « maison » affiche des performances exceptionnelles. Un travail similaire est effectué sur les cavités supraconductrices du LHC : la production d'une cavité a débuté fin 2015 dans l'objectif de conserver l'expertise au CERN.

Des injecteurs performants

Le LHC ne pourrait fonctionner sans ses injecteurs. Avant d'entrer dans la grande boucle de 27 kilomètres, les protons sont en effet 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 quant à eux 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 démontré de belles performances en 2015, avec une disponibilité moyenne approchant les 90 %.

Le LHC ne consomme toutefois qu'une infime partie des particules préparées par le complexe d'accélérateurs, qui alimente également l'installation de physique nucléaire ISOLDE, le Décélérateur d'antiprotons (AD), l'installation de mesure du temps de vol des neutrons (n_TOF) et plusieurs expériences à cible fixe. En 2015, le PS a par exemple fourni $1,9 \times 10^{19}$ protons



Le Linac 4 en 2015, vu par l'une des photographes qui a participé au concours Photowalk (Photo Federica Piccinni) (CERN-PHOTO-201511-220-1)

complexe à produire et à assembler, a été achevé en début d'année, avant un transport extrêmement délicat au cours duquel un système de suspension et de mesure a été utilisé pour que le module ne puisse s'incliner de plus d'un degré ! HIE-ISOLDE sera formé à terme de quatre cryomodules, contenant chacun cinq cavités supraconductrices, afin de porter les faisceaux à 10 MeV par nucléon. Fin 2015, le deuxième cryomodule était fin prêt en vue d'une installation en 2016.

Un mois plus tard, le Linac 4 accélérera des faisceaux à 50 MeV. Le Linac 4, en cours de construction, remplacera après 2020 le Linac 2, le premier rouage de la chaîne des accélérateurs du CERN. Le Linac 4 accélérera des ions hydrogène négatifs à 160 MeV d'énergie avant de les injecter dans le Booster du PS. Il est formé de quatre types de structures accélératrices ; les deux premières ont été mises en service pour atteindre l'énergie de 50 MeV. Les deux dernières étaient en cours d'installation en 2015, tandis que les convertisseurs de puissance étaient entièrement mis en place. À la fin de l'année, 80 % des composants de l'accélérateur étaient installés. Tous les équipements de transfert des particules vers le Booster du PS ont par ailleurs été fabriqués, ce qui pourrait permettre au Linac 4 de remplacer son prédécesseur en cas de problème.

Le Linac 4 est un rouage essentiel du projet d'amélioration des injecteurs du LHC (*LHC injectors upgrade - LIU*). Pour faire fonctionner le LHC à haute luminosité après 2025 (voir p. 26), les injecteurs doivent être remis à niveau. En dehors du Linac 4, qui remplacera le Linac 2, les trois autres injecteurs font également l'objet d'améliorations.

Feu vert pour de nouvelles cavités

L'énergie d'extraction du Booster du PS sera augmentée de 1,4 à 2 GeV. Pour y parvenir, l'accélérateur sera équipé de nouvelles cavités accélératrices radiofréquence, plus performantes aux hautes intensités. À base d'un matériau composite magnétique à la place des ferrites utilisées traditionnellement, la technologie FineMet offre une large bande



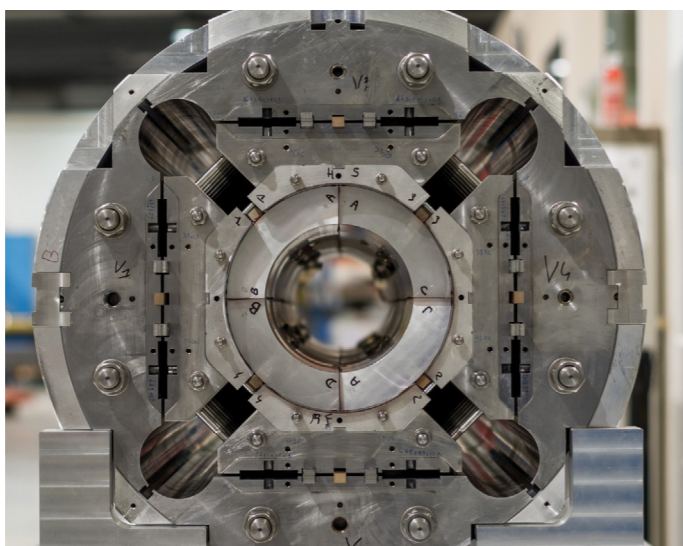
Installation d'une cavité FineMet dans l'accélérateur PS pour la stabilisation des faisceaux à haute intensité. (OPEN-PHO-ACCEL-2016-003-5)

passante. Les nouvelles cavités, installées sur l'un des quatre anneaux de l'accélérateur, ont été intensivement testées en 2015. Une cavité a également été expérimentée avec succès dans le PS. Suite à ces tests et au rapport rendu par un groupe d'experts indépendants, les trois systèmes de radiofréquence qui équipent aujourd'hui le Booster du PS seront entièrement remplacés par les nouvelles cavités. Les cavités FineMet seront également utilisées pour la stabilisation des faisceaux à haute intensité dans le PS.

Une campagne d'identification des câbles obsolètes a été menée dans le Booster du PS, permettant de repérer 2 400 câbles non utilisés. L'objectif est de retirer ces câbles lors du prochain arrêt technique fin 2016 pour laisser la place aux 1 800 câbles nécessaires au projet LIU. Une campagne similaire a débuté en fin d'année dans le SPS. De plus, les équipements de protection ou d'arrêt des faisceaux du SPS devront être remplacés ou améliorés pour faire face à la hausse d'intensité des faisceaux nécessaire pour le LHC haute luminosité. Ainsi, les équipes ont continué la conception de collimateurs et d'arrêts de faisceau pour les lignes d'extraction vers le LHC. En parallèle, la conception et les spécifications d'un nouvel arrêt de faisceau destiné au 5^e sextant du SPS ont été finalisées tandis que les premiers travaux démarraient en vue de son installation.

Nouveau revêtement pour les aimants

Deux semaines d'exploitation du SPS ont été consacrées au conditionnement des tubes de faisceau, afin d'atténuer le phénomène de nuages d'électrons (voir p. 23). L'un des objectifs était d'acquiescer une expertise avec des faisceaux similaires à ceux qui seront fournis par le complexe d'injecteurs après son amélioration. Suite à ces essais, un groupe d'experts a recommandé d'utiliser à la fois la méthode de conditionnement des tubes de faisceau pour les exploitations futures du SPS, en faisant circuler des faisceaux de haute intensité, et de doter un sextant entier de l'accélérateur d'un revêtement de carbone amorphe. Ce revêtement, dont le coefficient d'émission



Structure pour un aimant quadripôle « triplet » pour le projet LHC haute luminosité. (OPEN-PHO-ACCEL-2015-014-2)

C'est parti pour la haute luminosité !

Après quatre ans d'études de conception, le projet LHC haute luminosité est entré dans sa phase de construction fin octobre 2015. Le coup d'envoi a été donné à l'occasion de la clôture de l'étude FP7-HiLumi LHC, cofinancée par l'Union européenne, qui a mené les premiers travaux sur le projet. Prévu pour entrer en service après 2025, le LHC haute luminosité augmentera le nombre de collisions d'un facteur 5 à 10 pour atteindre une luminosité intégrée de 250 femtobarns inverses par an. L'augmentation de la luminosité permettra aux physiciens d'étudier plus en détail les nouveaux phénomènes découverts par le LHC.

Pour cela, de nouveaux équipements seront installés sur 1,2 kilomètre de l'actuel accélérateur, parmi lesquels des aimants quadripôles (« triplets ») plus puissants pour concentrer les faisceaux avant les collisions et des cavités radiofréquence dites « en crabe » pour les orienter, des aimants dipôles plus courts et plus puissants (11 teslas contre 8,3 teslas pour ceux du LHC), un système de collimation amélioré et de nouvelles liaisons électriques à base de supraconducteurs haute température.

Les nouveaux aimants supraconducteurs, formés d'un alliage niobium-étain, sont développés dans le cadre d'une collaboration entre l'étude LARP (*LHC Accelerator Research Program*), qui rassemble différents laboratoires des États-Unis, et le CERN.

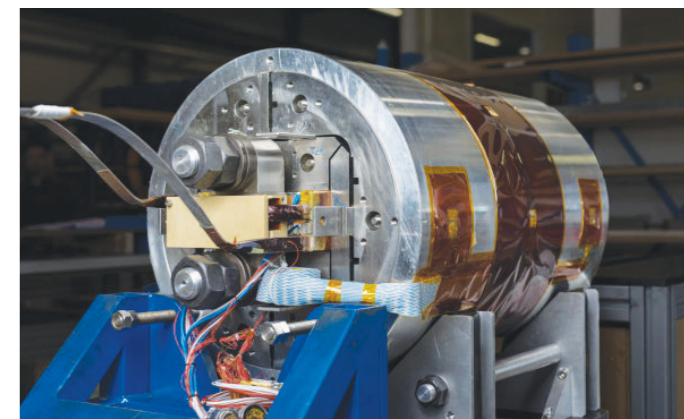
En mai, des bobines courtes pour les aimants triplets étaient testées avec succès. En juin, un modèle court d'aimant dipôle supraconducteur fabriqué au CERN a démontré des performances inédites. Le modèle a dépassé les 12 teslas d'intensité de champ magnétique.

La conception de tous les collimateurs a été définie. Leurs mâchoires seront formées de nouveaux matériaux plus performants, testés avec succès dans l'installation HiRadMat du CERN. La fabrication des prototypes de cavités en crabe et de leur cryostat a démarré au CERN en vue de les tester avec un faisceau de l'accélérateur SPS en 2018.

La coopération avec l'industrie s'est intensifiée. La production du câble supraconducteur haute température (diborure de magnésium) pour relier les convertisseurs de puissance aux aimants dans l'accélérateur a été lancée. Fin juin, une journée de rencontres était organisée pour l'industrie : plus de 140 représentants d'entreprises basées dans 19 pays ont participé à l'événement.



La ligne de faisceau qui dirigera les protons du SPS vers la nouvelle installation AWAKE a été installée. (OPEN-PHO-ACCEL-2016-008-1)



Un champ magnétique record de 16,2 teslas a été atteint avec une bobine plate dans le cadre d'un programme pour développer des aimants plus puissants pour les accélérateurs du futur. (OPEN-PHO-ACCEL-2016-005-1)

d'électrons secondaires est très faible, atténué le phénomène d'avalanches d'électrons. Vingt aimants du SPS, déjà traités, ont été testés en 2015. Les aimants restants seront progressivement dotés du nouveau revêtement lors des prochains arrêts techniques.

Toujours dans le cadre du projet LIU, un programme d'étude a été mené sur l'exploitation avec des ions plomb. Les études précises, ainsi que les réglages qui ont suivi, ont permis d'atteindre des paramètres de faisceau d'ions plomb inégalés dans le LHC et d'accroître la luminosité instantanée jusqu'à plus de trois fois sa valeur nominale. Ces études ont notamment porté sur l'Anneau d'ions de basse énergie (LEIR). D'autres améliorations des composants de l'anneau ont été apportées en fin d'année afin d'améliorer les injections et d'accroître l'intensité des faisceaux durant l'exploitation 2016.

ELENA et AWAKE s'installent

Outre les injecteurs du LHC, les autres projets d'accélérateur ont progressé en 2015. ELENA (*Extra Low ENergy Antiproton*) se prépare pour démarrer sa mise en service fin 2016. Cet anneau de décélération, un petit synchrotron de 30 mètres de circonférence, sera couplé au Décélérateur d'antiprotons (AD) pour ralentir davantage les antiprotons destinés aux expériences sur l'antimatière. L'énergie sera ainsi abaissée de 5,3 MeV à seulement 0,1 MeV et la densité de faisceau sera accrue grâce à un système de refroidissement par électrons. ELENA améliorera ainsi l'efficacité des expériences existantes et ouvrira la voie à de nouvelles expériences.

L'infrastructure pour accueillir le futur décélérateur a été quasiment entièrement mise en place et les tout premiers éléments de l'anneau et de la ligne de transfert ont été installés. De nombreux composants étaient en cours de construction dans les ateliers du CERN et dans l'industrie.

AWAKE (*Advanced Proton Driven Plasma Wakefield Experiment*) a également débuté son installation. Le projet, qui devrait recevoir ses premiers faisceaux du SPS fin 2016, a pour objectif

d'étudier le principe d'accélération à l'aide de champs de sillage dans des cellules plasma. Ce principe, déjà établi avec des électrons, sera testé avec un faisceau de protons. L'objectif est d'atteindre des gradients accélérateurs des centaines de fois plus élevés que ceux des cavités radiofréquence actuelles.

Les travaux de génie civil ont été terminés et l'infrastructure pour accueillir les équipements a été mise en place. Cette infrastructure comprend une salle blanche qui abritera un laser. La ligne de faisceau de protons reliant le SPS à AWAKE a été installée. Les premiers tests de la cellule plasma de 10 mètres de long, composant clé du projet, ont été menés avec succès.

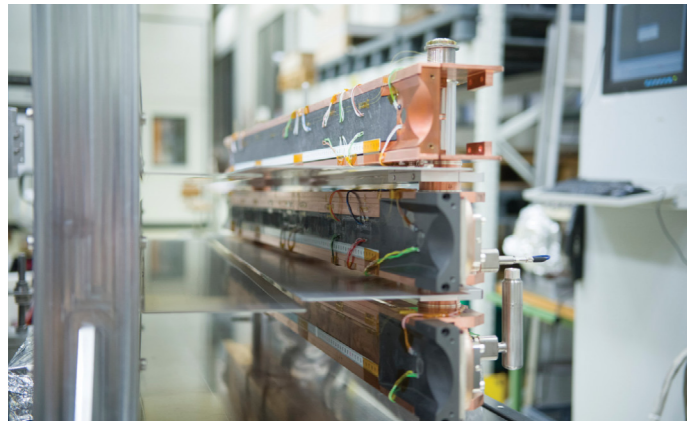
Les accélérateurs du futur s'esquissent

Au-delà du LHC haute luminosité, les scientifiques du CERN planchent sur les accélérateurs du futur à l'horizon 2035. Deux études sont en cours, celle du CLIC (*Collisionneur linéaire compact*) et celle sur le FCC (*Futur collisionneur circulaire*).

Le projet d'accélérateur linéaire CLIC est basé sur un concept novateur d'accélération à deux faisceaux, qui permet d'atteindre des champs accélérateurs très élevés. La collaboration CLIC compte plus de 50 instituts dans 25 pays. En 2015, les études pour redéfinir les paramètres du projet afin d'optimiser les coûts et les performances se sont achevées.

Côté technique, un troisième banc de test du système radiofréquence a été installé, doublant la capacité d'essai. Un module complet de deux mètres de CLIC a été mis en service dans l'installation d'essai CTF3. Trois modules mécaniques ont été testés pour évaluer leurs performances thermomécaniques.

Le programme de développement pour les équipements radiofréquence de haute efficacité s'est poursuivi. D'autres développements ont porté sur l'instrumentation de faisceau, les prototypes d'aimants, le vide, les systèmes de contrôle, l'alignement et la stabilité, avec une participation active de la collaboration. L'intérêt pour les technologies du CLIC s'élargit, notamment en ce qui concerne leur utilisation sur les accélérateurs linéaires pour lasers à électrons libres (FEL).



Des tests sur de nouveaux collimateurs réalisés dans l'installation HiRadMat. (CERN-PHOTO-201507-161-37)



Dans le hall d'essai SM18, un nouveau cryostat destiné à tester des aimants du futur est en cours d'installation. (CERN-PHOTO-201603-062-1)

Premiers résultats pour l'étude FCC

Après son lancement en 2014, l'étude sur un futur collisionneur circulaire FCC a livré ses premiers travaux en 2015. La collaboration FCC, qui réunit 72 instituts de 26 pays et qui est soutenue par l'Union européenne, étudie la possibilité d'un collisionneur de hadrons d'une énergie de collision de 100 TeV qui serait installé dans un nouveau tunnel de 80 à 100 kilomètres de circonférence. La collaboration explore la possibilité d'un collisionneur de leptons comme étape intermédiaire, ainsi qu'une option de collisionneur lepton-hadron. L'étude porte également sur un LHC à plus haute énergie dans le tunnel actuel du collisionneur. Le premier grand objectif de l'étude FCC est de publier une étude de conception avant 2019, à temps pour la prochaine mise à jour de la stratégie européenne pour la physique des particules.

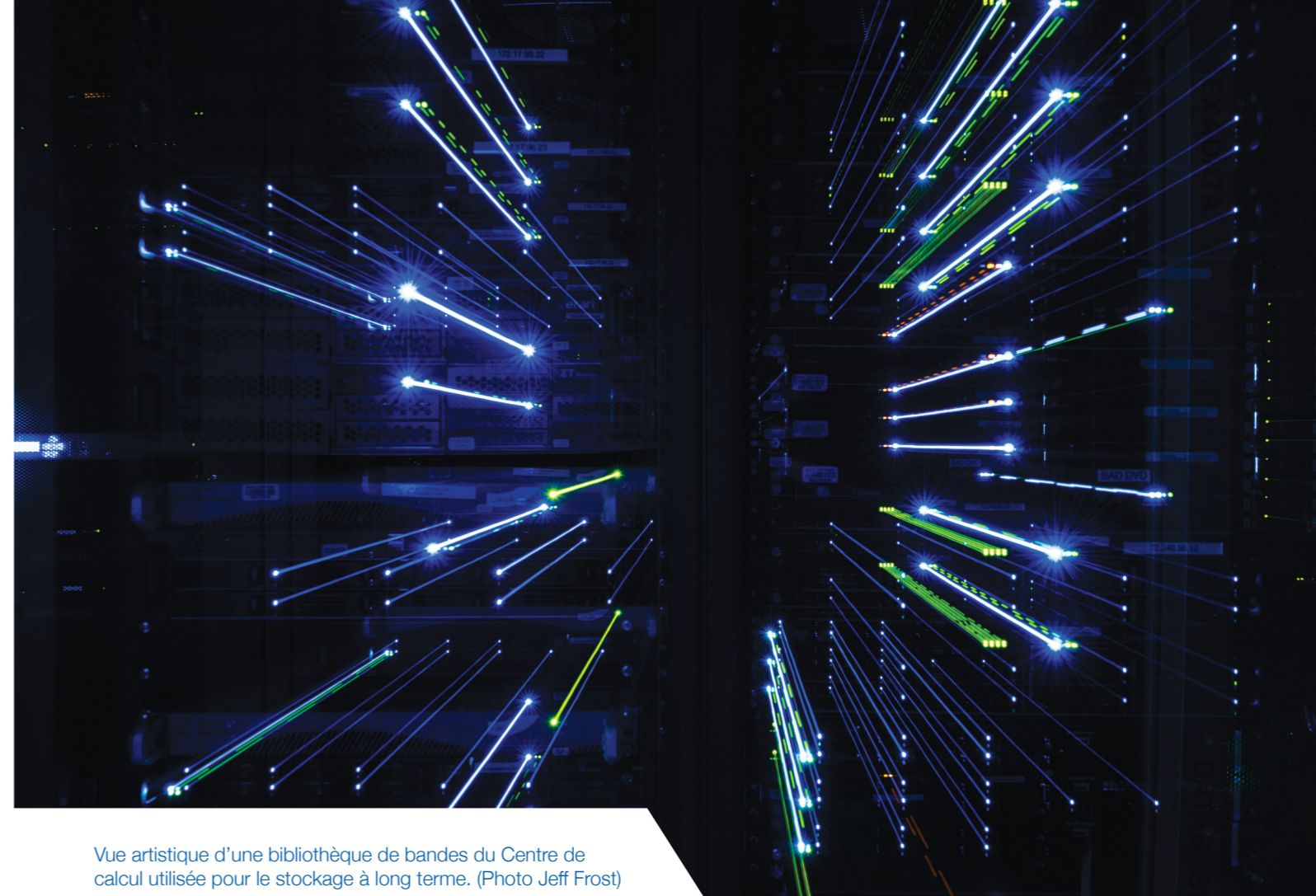
La première réunion annuelle du projet s'est tenue en mars à Washington (États-Unis), réunissant 340 participants d'instituts scientifiques et de l'industrie, et enregistrant quelque 290 contributions scientifiques. Plusieurs ateliers ont été organisés tout au long de l'année pour étudier les possibilités des recherches en physique avec des collisions à 100 TeV dans le centre de masse. Un rapport sur la physique à 100 TeV a été préparé pour la deuxième réunion annuelle de l'étude en 2016. Dans le cadre de l'étude FCC, le projet EuroCirCol cofinancé par l'Union européenne a débuté en juin. Les technologies clés ont été identifiées : elles comprennent des supraconducteurs capables de porter des courants plus intenses, des aimants générant des champs de 16 teslas, de nouvelles cavités radiofréquence supraconductrices et des systèmes de vide innovants. Fin septembre, une équipe d'experts réalisait le premier schéma de la configuration du collisionneur de hadrons, avec les principaux paramètres, utilisant le complexe des accélérateurs du CERN, dont le LHC, comme chaîne d'injecteurs. Ce schéma servira de base à l'étude préliminaire de conception. Les études géologiques pour définir l'emplacement de l'anneau ont commencé avec l'aide d'un tout nouveau logiciel capable d'intégrer de nombreux paramètres.

Au CERN, un programme pour développer des aimants plus puissants a débuté. Les équipes ont obtenu un premier succès en établissant un record mondial de 16,2 teslas avec une bobine plate, soit près de deux fois l'intensité magnétique des aimants dipôles fonctionnant actuellement dans le LHC. Cette performance, obtenue avec une bobine supraconductrice courte formée de niobium-étain, est une avancée importante pour démontrer la faisabilité d'aimants plus puissants.

Des installations d'essai améliorées

Les installations d'essai jouent un rôle crucial pour développer des composants innovants. Pour sa deuxième année d'exploitation, l'installation HiRadMat, qui teste des matériaux et composants sous des faisceaux de haute intensité du SPS, a réalisé huit expériences, dont d'importants essais pour les collimateurs du futur. Deux matériaux ont été ainsi testés pour les collimateurs du LHC haute luminosité, le molybdène-graphite et le cuivre-diamant. Une autre expérience portait sur l'amélioration de la cible qui produit les antiprotons dans le Décélérateur d'antiprotons (AD).

Un vaste programme a été lancé pour améliorer les installations de tests électriques à froid des aimants supraconducteurs du hall SM18. Les travaux pour une nouvelle installation cryogénique ont commencé afin de tester des aimants de large diamètre à 1,9 kelvin et jusqu'à des intensités de courant de 20 000 ampères. Ce cryostat servira à la qualification de l'aimant FReSca2, en construction au CERN et au CEA Saclay (France), pour le programme d'aimants à forts champs. Dans le cadre du projet de LHC haute luminosité, un nouveau banc de test vertical des aimants est en construction, offrant des intensités jusqu'à 30 000 ampères. Des bancs de tests horizontaux sont par ailleurs modifiés pour qualifier les aimants du futur accélérateur avec des intensités pouvant atteindre 20 000 ampères, contre 15 000 jusqu'à présent. En parallèle, les études ont commencé pour une chaîne de test des aimants triplets et une station d'essai des liaisons supraconductrices reliant les convertisseurs de puissance aux aimants.



Vue artistique d'une bibliothèque de bandes du Centre de calcul utilisée pour le stockage à long terme. (Photo Jeff Frost)

Informatique

Amélioration et migration

En vue de sa deuxième période d'exploitation, les équipes des expériences du LHC et de la Grille de calcul mondiale pour le LHC (WLCG) ont modernisé leurs infrastructures et services informatiques. Pendant le LS1, le département IT a doublé la capacité pour les expériences du LHC grâce à l'installation de quelque 100 pétaoctets (Po) supplémentaires de mémoire disque et près de 60 000 nouveaux cœurs de processeurs. La capacité de calcul de l'infrastructure en nuage privée du CERN a ainsi presque doublé l'an dernier, avec plus de 150 000 cœurs. Le LS1 était l'occasion idéale de migrer les données archivées sur bandes magnétiques vers des supports de plus haute densité. Environ 85 Po de données ont ainsi été copiés en 2014 et 2015. Au total, cela a permis de libérer 30 000 emplacements pour cartouches afin d'y stocker plus de données.

Nouvelle exploitation, nouveaux records

Avec le début de la deuxième période d'exploitation du LHC, la collecte des données a atteint des records. Environ 40 Po de

données ont été enregistrés au CERN en 2015. Sur les 30 Po produits par les expériences du LHC, 7,3 Po ont été collectés en octobre, un record, et jusqu'à 0,5 Po ont été enregistrés sur bandes chaque jour durant l'exploitation avec ions lourds. À titre de comparaison, le système d'archivage sur bandes du CERN s'était enrichi d'environ 70 Po de données durant la totalité de première période d'exploitation du LHC. La Grille WLCG a également battu un nouveau record avec 51,1 millions de calculs effectués en octobre.

Préservation des données

Le CERN gère le plus important volume d'archives de données scientifiques de la physique des hautes énergies. Fin 2015, le système d'archivage sur bandes contenait 132 Po de données, soit 410 millions de fichiers répartis sur environ 20 000 cartouches de bandes, entreposées dans sept bibliothèques équipées de 86 lecteurs. La plupart de ces données, qui proviennent des expériences passées et présentes de physique des hautes énergies, doivent être préservées *ad vitam aeternam*.



Les participants à la 39^e École d'informatique du CERN en septembre 2015. (OPEN-PHO-CCC-2016-001-1)

Les bits sur une bande magnétique sont plus petits que des bactéries ; la moindre éraflure sur une bande peut donc détruire un nombre important de données. Par conséquent, il est important de protéger l'environnement matériel contre tout risque de contamination pour assurer la préservation des données. En 2015, le CERN a mis en place un système de surveillance des flux d'air basé sur des capteurs d'ambiance. Ces capteurs ont été conçus au CERN et placés dans les emplacements destinés à accueillir les bandes, dans les bibliothèques de sauvegarde. La précision et la rapidité de ces capteurs sont comparables aux systèmes vendus sur le marché, mais sont cinquante fois moins chers et ne nécessitent aucune maintenance. La conception matérielle, les logiciels et les micrologiciels sont accessibles gratuitement sous licence *open source*.

En juin a eu lieu au CERN le premier atelier de la collaboration DPHEP (*Data-Preservation and Long-Term Analysis in High-Energy Physics*), dont le but est de répondre aux problèmes de la préservation des données dans la physique des hautes énergies. Une nouvelle étape a été franchie avec la publication du rapport de situation sur les progrès réalisés depuis la publication en mai 2012 du plan d'action de la collaboration DPHEP.

Logiciels libres pour une science ouverte

Les efforts du CERN pour développer des logiciels *open source* ont été fructueux. Zenodo, un système d'archivage de données ouvertes ayant bénéficié d'un cofinancement de la Commission européenne, permettant aux chercheurs de partager des articles, des données et des logiciels, a pris son essor en 2015. Il est devenu la plateforme de référence pour publier des logiciels scientifiques en lien avec Github, site de partage de logiciels, assurant ainsi la distribution de plus de 3 000 contributions scientifiques.

Le logiciel *open source* Invenio, initialement développé au CERN, a été modifié pour améliorer les possibilités de réemploi de chaque module, permettant ainsi à de nouveaux projets de logiciels de voir le jour dans différents pays. L'intérêt pour TIND, une *spin-off* du CERN, a également été croissant. Sa clientèle,

qui inclut CALTECH et les Nations Unies, fait appel à ses services pour effectuer l'installation d'Invenio.

En 2015, plus de 200 sites utilisaient le logiciel de gestion de conférences et d'événements Indico, ce qui témoigne de l'engagement du CERN pour favoriser la collaboration. Le CERN a aussi publié un logiciel *open source* qui enrichit d'un tableau de bord son infrastructure de visioconférence basée sur Vidy. Ce dernier a été adopté par des universités, hôpitaux et entreprises. Via de multiples collaborations, EOS, le système de stockage sur disques pour l'informatique du LHC, a également été mis à la disposition d'entreprises et de communautés d'utilisateurs pour qu'ils l'intègrent à leurs systèmes traitant de grands volumes de données ou l'utilisent pour construire des systèmes de stockage distribués.

Participation à des projets *open source*

Le CERN a aussi contribué au développement de logiciels *open source* extérieurs pour les adapter aux besoins de l'Organisation. La contribution à ownCloud compte parmi les plus importantes. Ce dernier est utilisé pour fournir le service CERNBox, un équivalent de Dropbox sécurisé et évolutif. Le CERN contribue également à OpenStack et Ceph. OpenStack est essentiel au développement des services en nuage du Centre de calcul du site de Meyrin et de celui de Wigner à Budapest, géré à distance. Ceph est par ailleurs le système de stockage en réseau le plus utilisé pour OpenStack.

Le CERN a apporté plus de 90 contributions à la dernière version d'Openstack et a travaillé sur de nouvelles fonctionnalités importantes de Ceph. L'objectif initial avec Ceph était de fournir un service de stockage pour le nuage OpenStack du CERN, mais il a été étendu afin de s'attaquer aux défis à venir liés au stockage des données du LHC. En 2015, l'équipe de développement a réalisé des essais à grande échelle en collaboration étroite avec les concepteurs de Ceph afin d'explorer les limites de ce système. Les résultats pourront potentiellement servir à d'autres partenaires du CERN.

Données ouvertes

En novembre 2014, le CERN avait inauguré son portail de données ouvertes, permettant aux expériences du LHC de partager leurs données avec deux cibles principales : d'une part, la communauté scientifique, y compris les chercheurs ne faisant pas partie des expériences du CERN et les citoyens volontaires ; d'autre part, les élèves, étudiants et personnes en formation par le biais de ressources sélectionnées. Toutes les données sont mises dans le domaine public sous licence Creative Commons zéro, une initiative inédite au CERN. Les scientifiques peuvent les citer grâce à un identificateur d'objet numérique unique.

En 2015, ce portail de données ouvertes a été enrichi de nouveaux codes et données. Son utilisation a augmenté et, dans un esprit de libre accès à la science, un certain nombre d'applications inattendues sont nées, telles que l'entraînement de systèmes d'analyses de données à grande échelle. L'équipe chargée des données ouvertes a transmis son expérience et inspiré de nombreuses équipes du monde entier en participant à des conférences et à des forums en ligne.

La science dans les nuages

Le CERN contribue à l'établissement d'un « Nuage européen pour la science ouverte » en s'appuyant sur l'expérience tirée de différents projets, dont Helix Nebula, un partenariat public-privé. Les travaux de Helix Nebula ont conduit le CERN à diriger un programme Horizon 2020 nommé PICSE. Son objectif est de constituer un réseau de passation de marchés mutualisant les organisations de recherche publiques souhaitant utiliser des services en nuage commerciaux pour leurs programmes de recherche. En 2015, PICSE a étudié la faisabilité d'un système international de pré-commercialisation mutualisant différentes organisations publiques. La Commission européenne a décidé de cofinancer le projet d'achat pré-commercialisation HNSciCloud dirigé par le CERN, qui a débuté en janvier 2016.

Éducation et partage

Depuis le début des années 1970, l'École d'informatique du CERN vise à offrir un enseignement de haut niveau et promeut l'échange de connaissances dans le domaine de l'informatique scientifique auprès de jeunes chercheurs et ingénieurs impliqués dans la physique des particules ou autres sciences. Elle se compose de trois écoles distinctes, dont chacune a sa spécialité. En 2015, l'École principale, qui dure deux semaines et tient lieu d'université d'été dispensant des cours magistraux et pratiques, a eu lieu à Kavala, en Grèce. Parmi les 76 participants venus de 47 instituts, 68 ont réussi l'examen et reçu 6 crédits ECTS.

Les Centres de calcul de Meyrin et de Wigner hébergent environ 15 000 serveurs, renouvelés tous les 4 à 5 ans, quand ils ne permettent plus d'atteindre les objectifs des programmes de recherche du CERN. Cependant, ils sont toujours utiles pour d'autres applications moins exigeantes. En mars, 224 serveurs et 30 commutateurs réseau ont ainsi été donnés au COMSATS Institute of Information Technology d'Islamabad, Pakistan, afin de servir aux scientifiques travaillant sur l'expérience ALICE du LHC. En août, le CERN a donné 384 serveurs, 24 commutateurs et 26 racks à des instituts mexicains, qui les

utilisent pour divers projets scientifiques et pédagogiques dans le domaine de la physique, des mathématiques de l'énergie et de l'environnement. À ce jour, neuf pays ont bénéficié de tels dons : la Bulgarie, l'Égypte, le Ghana, le Maroc, le Mexique, le Pakistan, les Philippines, le Sénégal et la Serbie.

Nouvelle phase pour CERN openlab

En janvier, CERN openlab a entamé sa cinquième phase triennale. Par le biais de ce partenariat public-privé unique, le CERN travaille avec des entreprises informatiques et des instituts de recherche afin d'accélérer le développement de technologies de pointe pour la communauté mondiale du LHC. Huawei, Intel, Oracle et Siemens sont des entreprises partenaires ; Brocade, Cisco, IDT, Rackspace et Seagate sont des contributeurs, et Comtrade et Yandex sont des membres associés. Pour la première fois, d'autres organisations de recherche publiques ont rejoint le CERN openlab. Il s'agit du *European Bioinformatics Institute* (Royaume-Uni), du *GSI Helmholtz Centre for Heavy Ion Research* (Allemagne) et de l'Université de Newcastle (Royaume-Uni). Les thèmes retenus pour cette nouvelle phase sont, entre autres, les systèmes d'acquisition des données nouvelle génération, les plateformes de calcul matérielles et logicielles optimisées pour la simulation et l'analyse, la gestion et le stockage de données à grande échelle, les opérations et la fourniture de l'informatique en nuage, et les plateformes et applications d'analyse de données.

CERN openlab a tenu deux nouveaux événements : une journée portes ouvertes en juin, première du genre, et un événement intitulé « Innovation et entrepreneuriat » en octobre, en collaboration avec le groupe Transfert de connaissances du CERN et Ideasquare. Le programme des étudiants d'été, organisé par CERN openlab, a également continué à s'affirmer, avec 40 étudiants de 27 nationalités.



Lors de la conférence TEDxCERN, Edda Gschwendtner a présenté l'expérience AWAKE et évoqué la passion pour les sciences qu'elle a depuis l'enfance. (CERN-PHOTO-201510-198-13)

Un impact sur le monde

Bienvenue au CERN

En 2015, le CERN a accueilli près de 107 000 visiteurs de plus de 70 pays, dont 46 % d'élèves. Dès le mois de juillet, ils ont pu découvrir l'exposition *Microcosm* revisitée, avant son ouverture officielle au public en janvier 2016. La nouvelle exposition présente de vrais objets, des enregistrements audiovisuels montrant des personnes grandeur nature, et des photos haute définition, pour un voyage à travers les principales installations du CERN, son réseau d'accélérateurs jusqu'aux collisions de particules au cœur de gigantesques expériences. L'exposition itinérante *Accélérateur de science* s'est installée au musée des sciences CosmoCaixa de Barcelone en octobre. Le « tunnel LHC interactif », installation audiovisuelle qui permet de jouer avec des collisions de protons ou de visualiser le champ de Brout-Englert-Higgs, rencontre un franc succès dans les musées des sciences et les foires. Il a été présenté, avec l'exposition d'affiches *Le CERN en images*, dans dix lieux d'accueil différents, dans sept pays.

La troisième édition de TEDxCERN a eu lieu en octobre. Pour l'occasion, 600 personnes avaient fait le déplacement et plus de 10 000 autres ont suivi l'événement en ligne, notamment via des projections organisées dans 23 instituts. Deux vidéos de TEDxCERN 2015 ont été publiées sur le site TED.com, qui totalise en moyenne un million de vues par présentation. Le CERN a en outre organisé une nouvelle édition de son concours *Famelab*, ainsi que la master classe conjointe pour le CERN, la France et la Suisse, et la finale suisse. Les participants ont poursuivi l'aventure jusqu'à la finale internationale de *Famelab*, tenue dans le cadre du Festival de la science de Cheltenham (Royaume-Uni), où ils ont particulièrement brillé : le gagnant avait en effet remporté la finale suisse et le deuxième était arrivé en tête du concours du CERN. Le CERN a aussi organisé une manifestation *PopScience* dans un grand centre commercial local et son cinéma multiplexe à l'occasion de la *Nuit européenne des chercheurs*. Le but était d'aller à la rencontre de ceux qui ne font pas la démarche de visiter un laboratoire. Cinq cents spectateurs ont assisté aux projections pour les scolaires et 700 aux projections pour le grand public.



Pour sa première année d'existence complète, le nouveau S'Cool Lab du CERN a accueilli plus de 4 000 élèves et enseignants. Parmi les expériences proposées, la construction de chambres à brouillard et la visualisation de rayons X à l'aide de détecteurs à pixels. (OPEN-PHO-LIFE-2016-003-17)



La nouvelle exposition *Microcosm* emmène les visiteurs dans un voyage interactif avec les particules, depuis la bouteille d'hydrogène jusqu'aux expériences et aux découvertes. (CERN-PHOTO-201603-050-1)

En collaboration avec l'Université de Genève, le ministère français de l'Éducation nationale et le Département de l'Instruction publique de Genève, le CERN a renouvelé l'opération *Dans la peau d'un chercheur*, à laquelle ont participé plus de 750 écoliers venus découvrir le processus de recherche scientifique. Par ailleurs, en février, plus de 600 élèves d'établissements scolaires voisins ont visité le détecteur CMS. Des projections du documentaire *Particle Fever* ont été organisées, dont l'une à Saint-Genis-Pouilly, en collaboration avec la Mission de la France auprès de l'ONU à Genève. Le CERN était également présent à l'exposition *La Cité des métiers*, en novembre. Des milliers de visiteurs ont pu y découvrir la diversité des professions que regroupent le CERN et la Genève internationale.

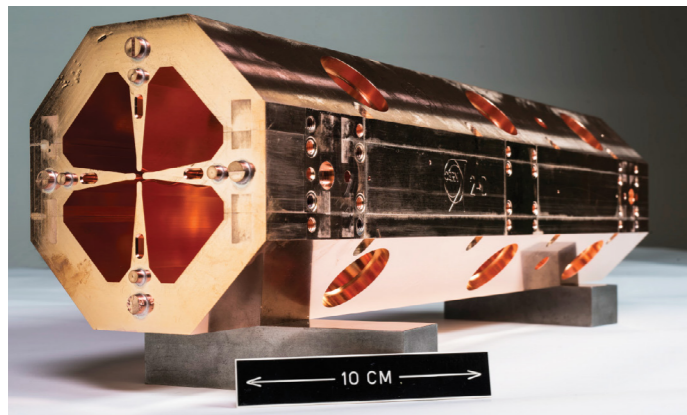
Une soif de savoir

Les programmes pour enseignants du secondaire se sont poursuivis, avec 36 sessions d'une semaine tenues dans une langue nationale pour 1 067 enseignants venus de 41 pays. Le programme des enseignants du secondaire, dispensé sur trois semaines, en anglais, a attiré des participants de 40 nationalités différentes, et un cours spécial pour les enseignants de sciences de l'ingénieur a été donné à des participants bulgares. Une session d'une semaine s'est tenue en septembre pour les élèves et enseignants du primaire et du secondaire des membres de la collaboration SESAME (Autorité palestinienne, Bahreïn, Chypre, Égypte, Iran, Israël, Jordanie, Pakistan et Turquie). Ce cours a rassemblé 28 enseignants et élèves du Moyen-Orient, venus découvrir le CERN comme modèle de collaboration scientifique et humaine, au-delà des différences politiques et culturelles. Ce programme a ouvert la voie à une future collaboration entre des établissements scolaires des membres de SESAME. Suite au succès de la première édition en 2014, le CERN a renouvelé le concours *Ligne de faisceau pour les écoles* qui bénéficie du soutien de la Fondation CERN & Société. Des équipes d'élèves du secondaire ont proposé des expériences

et les vainqueurs ont été invités au Laboratoire pour réaliser leur expérience sur une ligne de faisceau, en collaboration avec des chercheurs du CERN. Sur les 119 propositions reçues, deux équipes de Florence (Italie) et de Johannesburg (Afrique du Sud) ont retenu l'attention du CERN et ont passé 10 jours au Laboratoire en septembre (voir aussi p. 11).

Tout vu, tout lu

L'initiative SCOAP³, lancée par le CERN, est une collaboration internationale regroupant plus de 3 000 bibliothèques, organismes de financement et instituts de recherche dans 47 pays. En 2015, SCOAP³ avait déjà permis de publier en libre accès plus de 8 000 articles dans des publications de qualité à comité de lecture du domaine de la physique des hautes énergies. Avec SCOAP³, les auteurs conservent la propriété intellectuelle de leurs travaux, et les licences Creative Commons appliquées autorisent la redistribution et la réutilisation immédiates et gratuites du contenu des publications, quel qu'en soit l'usage, à condition que l'auteur soit cité. À ce jour, environ 20 000 auteurs de 90 pays ont profité de ces avantages. Par ailleurs, en 2015, le CERN a mis en œuvre sa politique de libre accès. Grâce à SCOAP³ et à des accords bilatéraux signés avec des éditeurs, plus de 96 % des résultats de physique des particules du CERN ont été publiés en libre accès cette année, contre 10 % en moyenne pour des instituts de taille comparable. Dans un esprit de libre accès à la science, les expériences LHC ont commencé à rendre leurs données publiques en 2014 sur le Portail des données ouvertes du CERN. En 2015, de nouvelles données et de nouveaux codes y ont été ajoutés. Ces données ont notamment été utilisées pour des formations sur l'analyse de gros volumes de données et l'exploration de données. En 2015, le CERN a numérisé et ajouté 120 000 photos en noir et blanc à ses albums publics d'images d'archives (14 000 au total) qui retracent l'histoire de l'Organisation de sa naissance jusqu'en 1986. À ces images s'ajoutent les clichés de photographes invités au Laboratoire dans le cadre du concours *Global Particle*



Mini-accélérateur à usage médical

Forts de l'expérience acquise avec le Linac 4, un accélérateur linéaire en cours de conception (voir p. 25), les ingénieurs du CERN ont mis au point une version miniature d'un de ses éléments, le quadripôle à radiofréquence. Cet accélérateur linéaire miniature pourra notamment être utilisé à l'hôpital pour la production d'isotopes médicaux et pour le traitement de certains cancers.

Avec ses deux mètres de long, il offrira une alternative intéressante aux machines circulaires beaucoup plus grandes qui sont traditionnellement utilisées à cet effet. Les essais devraient commencer en 2016 et la première licence d'utilisation de cette technologie a déjà été délivrée. Le tout nouveau mini-accélérateur linéaire du CERN pourrait faire prochainement son apparition dans les hôpitaux et apporter une formidable contribution à la santé.

Le premier des quatre modules qui constitueront l'accélérateur miniature destiné à traiter certains cancers. (CERN-PHOTO-201506-138-3)

Physics Photowalk. Pour Arts@CERN, des partenariats ont été établis avec des organisations culturelles internationales parmi lesquelles l'ADMAF (Émirats arabes unis), Ars Electronica (Autriche), et le Rupert Centre for Art and Education (Lituanie), ainsi que des entités publiques telles que la Fondation suisse Pro Helvetia, le canton et la ville de Genève, le ministère de la Culture de Taïwan et la chancellerie fédérale autrichienne. Le CERN a reçu pendant trois mois les membres du collectif suisse Fragment.In, lauréats de la résidence *Collide@CERN Pro Helvetia*, et ceux du collectif britannique Semiconductor, lauréats de *Collide@CERN Ars Electronica 2015*, ainsi que des visites ponctuelles de huit autres artistes, soit 15 artistes au total en 2015.

Le Bureau de presse du CERN a accueilli environ 400 journalistes et enregistré plus de 180 000 parutions dans la presse pendant l'année. En 2015, sept millions d'internautes ont visité le site web du CERN et, en octobre, l'Organisation a adopté son propre nom de domaine et une nouvelle adresse web : <http://home.cern>. Sur les réseaux sociaux, on a dénombré 1,2 million de mentions du CERN et du LHC, avec des pics lors du redémarrage du LHC en avril, au moment des collisions à 13 TeV en juin et pour le poisson d'avril sur le thème de *Star Wars* (voir p. 9). En mars, le CERN a reçu le prix du meilleur compte Twitter suisse 2015 lors de la conférence *worldwebforum* à Zürich, devançant les comptes Twitter de Suisse Tourisme, des marques de luxe et du champion de tennis Roger Federer.

Transfert de connaissances

L'année 2015 a vu le lancement du réseau de transfert de connaissances et de technologies pour les PME. Le réseau de centres d'incubation d'entreprises, projet créé en 2012, s'est étoffé, comptant aujourd'hui huit centres (Autriche, Espagne, Finlande, France, Grèce, Norvège, Pays-Bas et Royaume-Uni).

Le centre d'incubation français a été ouvert dans le cadre d'un partenariat quadripartite mis en place en 2014 entre le CERN, la France, le département de l'Ain et la Communauté de communes du Pays de Gex.

En 2015, ces centres ont accompagné neuf jeunes entreprises dans des domaines allant de la production de capteurs pour la robotique et l'automatisation aux nano-revêtements utilisables dans la production d'électricité et le refroidissement.

Pour sa première année d'exploitation, le bâtiment IdeaSquare a hébergé ou organisé une quarantaine d'événements. Cette installation met en lien la recherche et développement (R&D) sur les détecteurs et des équipes pluridisciplinaires qui relèvent des défis de société. IdeaSquare a accueilli plusieurs cours sur l'innovation par le défi (CBI) pour des étudiants de niveau master, des ateliers sur la R&D pour l'industrie et les investisseurs privés, et des hackathons tels que celui de l'association THE Port. IdeaSquare héberge actuellement deux grands projets cofinancés par l'Union européenne, TALENT et EDUSAFE.

Le CERN nourrit toujours un grand intérêt pour le programme Horizon 2020 (H2020) de l'Union européenne : de nombreux projets préparés en collaboration avec le Laboratoire ont été soumis. Sur les 12 projets H2020 sélectionnés pour recevoir des subventions en 2015, cinq sont coordonnés par le CERN. Parmi les activités concernées : la spectroscopie laser pour les radionucléides (EIBTLS), les capteurs d'imagerie ultrarapide destinés à des applications médicales (ULTIMA), le développement de quadripôles innovants pour le LHC haute luminosité (QUACO), le partenariat public-privé pour l'informatique en nuage (HNSciCloud), et les technologies de capteurs intelligents pour des applications et des mesures avec des rayonnements (STREAM). Enfin, les bourses Marie Skłodowska-Curie de la Commission européenne ont permis à plus de 190 jeunes chercheurs de travailler au CERN en 2015.



Le nouveau bâtiment 774 a été inauguré le 12 juin 2015 sur le site de Prévessin. En plus d'abriter des bureaux pour les équipes des accélérateurs, il peut accueillir les visiteurs et les personnalités dans son amphithéâtre et sa salle de réception. (Photo Jordi Bernardó)

Un lieu de travail

Le CERN s'étend sur 200 hectares de sites clôturés, situés de part et d'autre de la frontière franco-suisse, avec des dizaines de bâtiments et d'espaces verts à entretenir et rénover. De nombreux travaux de construction et de maintenance ont été effectués en 2015 afin d'améliorer la qualité des infrastructures.

Côté français, un atelier ainsi qu'une salle de contrôle ont été ouverts sur le site de l'expérience LHCb, tandis que le bâtiment 774, à l'architecture innovante, a été inauguré sur le site de Prévessin. Nouveau point névralgique du grand site français, ce bâtiment abrite des bureaux pour les équipes des accélérateurs, une cafétéria, un amphithéâtre et une salle de réception afin d'accueillir des visiteurs et des personnalités. Côté suisse, le site principal de Meyrin a été doté d'un Centre d'intervention d'urgence des Hôpitaux universitaires de Genève (voir p. 39), ainsi que d'un bâtiment pour les systèmes de radiofréquence du Booster du PS. De nombreux bâtiments ont également été rénovés, comme celui de l'exposition *Microcosm* qui a été entièrement transformé (voir p. 32). Dans le souci d'améliorer le confort des hôtes du CERN, l'un des foyers-hôtels a bénéficié d'une remise à neuf de deux de ses étages, à temps pour accueillir les étudiants d'été.

Les points d'accès ont été améliorés afin d'accroître la sûreté des sites et d'optimiser les ressources. Ainsi, un nouveau système automatique a été installé à l'une des entrées à Meyrin.

La rénovation du château d'eau est l'un des travaux phare de 2015. Le revêtement intérieur a été entièrement remplacé par du matériel plastique spécifique pour les réservoirs d'eau potable et la tuyauterie interne a été modernisée. Le château d'eau peut garantir la qualité de l'eau potable.

Travailler au CERN

Le CERN a poursuivi les efforts pour accroître sa visibilité dans ses 21 États membres par une campagne proactive de communication et de recherche de candidats. En 2015, plus de 23 000 candidatures ont été reçues pour des postes de titulaires et 164 comités de sélection pour des contrats de durée limitée ont été tenus.

Depuis que la Turquie et le Pakistan sont devenus États membres associés de l'Organisation (voir p. 7), les ressortissants de ces pays peuvent postuler au CERN.



L'emblématique programme des étudiants d'été du CERN a rassemblé 276 étudiants de 83 pays en 2015, un beau symbole de la collaboration internationale et de la formation des jeunes générations au CERN. (CERN-PHOTO-201507-153-2)

Le programme des boursiers, toujours aussi populaire, a enregistré plus de 2 000 candidatures en 2015. Au total, 350 boursiers ont été sélectionnés, dont 33 dans le cadre du nouveau programme TTE (*Technicians Training Experience*) pour les techniciens hautement qualifiés. Des fonds supplémentaires ont été obtenus grâce au programme des actions Marie Skłodowska-Curie de la Commission européenne, qui fait partie du nouveau programme-cadre Horizon 2020. Soixante boursiers CERN seront en partie financés par le mécanisme COFUND pendant les cinq prochaines années.

Par ailleurs, 293 étudiants techniques et doctorants ont été sélectionnés, et 276 étudiants ont participé au fameux programme des étudiants d'été. Une nouvelle offre de stage a été mise en place pour offrir chaque année la possibilité à 20 stagiaires espagnols de travailler au CERN pendant deux ans. Le programme d'apprentissage du CERN s'est une nouvelle fois distingué, l'un de ses bénéficiaires ayant obtenu le prix de « meilleur apprenti » décerné par l'Union Industrielle Genevoise.

La mise en œuvre de la politique de formation et de développement s'est poursuivie, avec l'élaboration de cinq programmes de formation (Technique, Gestion technique, Langues, Développement personnel et communication, et Leadership) fondés sur le Modèle de compétences du CERN. Un programme supplémentaire « Votre carrière au CERN » a été créé pour enrichir l'éventail des formations proposées. Au total, plus de 5 000 participants ont participé à 497 sessions de formation.

En 2015, le Bureau de la diversité était chargé d'élaborer des propositions de mesures liées à la diversité dans le cadre de l'examen quinquennal. Il a également fêté les 20 ans du groupe de travail qui l'a précédé et qui avait été constitué pour remédier au déséquilibre hommes-femmes au CERN. Par ailleurs, le Bureau de la diversité a continué de mener des actions au regard des sept objectifs stratégiques fixés par l'Organisation dans les domaines du recrutement, de l'évolution de carrière et de l'environnement

Examen quinquennal

Tous les cinq ans, le CERN examine les conditions financières et sociales des membres de son personnel. L'année 2015 s'est terminée sur une note très positive puisque le Conseil a approuvé les mesures proposées dans le cadre du dernier examen quinquennal. Les principaux points qui ressortent de l'examen 2015 sont la rationalisation de la structure de carrière et l'amélioration de la situation au regard de la diversité. Compte tenu du climat économique actuel, les États membres ont salué la décision d'adopter une approche mesurée et rationnelle. L'approbation des propositions par le Conseil a signé l'achèvement d'un long processus entamé en 2014. Au vu des résultats positifs de l'examen quinquennal, les conditions modifiées devraient permettre à l'Organisation de rester attractive pour le personnel hautement qualifié et de se développer durablement.

de travail. En outre, le Bureau a étoffé son réseau d'échange de bonnes pratiques en matière de gestion de la diversité. Une nouvelle politique des contrats a été mise en œuvre pour assouplir les conditions d'emploi au Laboratoire, retenir les compétences-clés et améliorer la mobilité interne.

Offrir ses services au CERN

En ce qui concerne les achats, l'année 2015 a été marquée par plusieurs événements et projets, dont une campagne d'information destinée aux entreprises des États membres souhaitant fournir des produits et des services au CERN, et la création d'une formation bilingue en ligne pour les employés du CERN concernés par le processus d'achat.

Les dépenses en fournitures et en services se sont élevées respectivement à 298 MCHF et 126 MCHF, et environ 54 500 commandes ont été passées.

Responsabilité

En avril, le CERN a mis en place une politique de prévention et de gestion des conflits d'intérêts. En parallèle, une campagne a été menée pour sensibiliser le personnel aux risques liés à ce type de conflits pour l'Organisation.

En novembre, le Service d'audit interne a également organisé une formation sur l'évaluation conjointement avec des homologues d'autres organisations internationales basées à Genève. L'objectif était de donner aux participants des outils pour évaluer systématiquement et objectivement l'impact des programmes et des politiques du CERN sur des publics cibles.



L'une des nouvelles stations de mesure de la qualité de l'eau installées en 2015, avec un détecteur d'hydrocarbures pour déceler immédiatement toute pollution. (CERN-PHOTO-201603-064-6)

Sécurité et environnement

Pour surveiller l'impact de ses activités sur l'environnement, le CERN mesure en continu la qualité de l'eau et de l'air en provenance de ses installations. Plus d'une centaine de stations de mesure surveillent de nombreux paramètres, dont ceux relatifs aux rayonnements ionisants et à certains aspects physico-chimiques. Ces données sont complétées par l'analyse d'échantillons prélevés sur les sites et à leurs abords.

Les sentinelles de l'eau

Ce programme de surveillance est régulièrement amélioré. En 2015, cinq nouvelles stations de mesure des émissions atmosphériques des expériences et des tunnels des accélérateurs ont été installées. Six nouveaux sites ont été équipés de détecteurs d'hydrocarbures pour déceler immédiatement une pollution dans les eaux déversées par le CERN dans les cours d'eau avoisinant les sites. Avant l'été 2016,

un total de douze sites auront été équipés de ces détecteurs. Un nouvel outil de supervision des stations de mesure de l'eau a été développé. L'installation des détecteurs d'hydrocarbures est l'une des premières actions d'un plan visant à limiter l'impact de l'utilisation de produits chimiques. Pour mener à bien ses recherches, le CERN exploite en effet de nombreuses installations techniques, qui contiennent des produits chimiques, comme des hydrocarbures pour les équipements électriques. Un groupe de travail a rendu un rapport complet sur la question en 2015, avec une mise à jour de l'inventaire des zones à risques de pollution, une évaluation des risques et des recommandations sur les actions prioritaires.

Radiations sous contrôle

Une attention particulière est portée aux zones de travail réglementées pour les radiations. Sur les quelque



Une nouvelle installation de vérification des appareils de mesure des radiations a été mise en service. (CERN-PHOTO-201411-230-2)



Le nouveau véhicule 100 % électrique de collecte des ordures ménagères, mis en service dans le cadre du contrat entre le CERN et l'entreprise Transvoirie. (BUL-NA-2015-148)



Quelques-uns des 504 participants du CERN à l'initiative *Bike2Work*, qui vise à promouvoir l'utilisation de la bicyclette pour les trajets entre le domicile et le lieu de travail. (CERN-PHOTO-201506-142-11)



Le service mobile d'intervention d'urgence basé au CERN a été inauguré par le Directeur général du CERN Rolf Heuer et le Directeur général des Hôpitaux universitaires de Genève Bertrand Levrat. Ce service assure une meilleure prise en charge des urgences médicales sur les sites du CERN. (CERN-PHOTO-201505-083-7)

9 800 personnes détentrices d'un dosimètre, seulement deux personnes ont reçu une dose comprise entre 1 et 2 millisieverts (mSv). Toutes les autres ont reçu une dose inférieure à 1 mSv, et parmi elles, 87% n'ont reçu aucune dose. À titre indicatif, la dose moyenne annuelle à laquelle sont exposées les personnes en France en raison du rayonnement naturel et des pratiques médicales est de 3,7 mSv. L'adoption systématique de l'approche ALARA (*As Low As Reasonably Achievable*) contribue grandement à ce résultat. Cette approche est désormais ancrée dans la culture du CERN. Une nouvelle installation de vérification des appareils de mesure des radiations a été mise en service. Elle permet de calibrer et de vérifier tous les instruments utilisés au CERN pour la mesure des rayonnements bêta, gamma, X ou neutrons.

Toutes les données sur les radiations sont transmises aux deux États hôtes du CERN, la France et la Suisse. Depuis 2011, en effet, un accord tripartite entre le CERN et ses États hôtes a remplacé les accords bilatéraux en vigueur auparavant pour encadrer la radioprotection et la sûreté des installations du Laboratoire. Dans ce cadre, le CERN fournit aux deux autorités de sûreté toutes les mesures sur les rayonnements ionisants. Les autorités de sûreté effectuent des visites régulières. En 2015, une visite importante portait sur le Linac 4, le futur accélérateur linéaire en construction (voir p. 25), pour lequel le CERN a soumis un dossier de sûreté.

Des déchets mieux recyclés

Le CERN optimise constamment la valorisation de ses déchets. En 2015, le CERN a produit environ 5 000 tonnes de déchets conventionnels, en totalité pris en charge par des entreprises spécialisées. Une grande partie a été valorisée via de nombreuses filières de recyclage, comme les 1 590 tonnes de métaux vendues à des entreprises de recyclage. L'entreprise qui collecte les ordures ménagères a mis en service un camion de collecte 100 % électrique dans le cadre de son contrat avec le CERN – une première en Suisse romande.

Efficacité énergétique

La fourniture d'électricité est une préoccupation importante au CERN, les accélérateurs ayant besoin d'une grande puissance électrique pour fonctionner. Le CERN a passé un nouveau contrat de fourniture d'électricité au terme d'un appel d'offres et dans le cadre de l'ouverture du marché à la concurrence. Ce contrat garantit la fourniture d'électricité pour toute la deuxième période d'exploitation du LHC et prévoit une aide pour optimiser la consommation de la partie conventionnelle des sites. Le CERN est engagé dans une démarche d'amélioration de son efficacité énergétique sous la houlette d'un « coordinateur énergie ». Un groupe de travail s'est réuni pour définir des pistes de progrès. Le CERN a par ailleurs participé à la troisième édition des ateliers sur l'énergie pour une science durable dans les infrastructures de recherche, dont il est l'un des initiateurs.

Au labo à vélo

Toujours dans le but de réduire son impact sur l'environnement, le CERN promeut les transports en commun (services de navettes sur les sites), le partage des véhicules, mais également l'utilisation de la bicyclette. Avec environ 600 vélos en libre accès, le CERN possède l'un des plus grands parcs de vélos en Suisse. En 2015, les membres et utilisateurs du CERN se sont illustrés à deux roues en participant pour la troisième fois à l'initiative *Bike2Work*, qui encourage l'utilisation de la bicyclette entre le domicile et le travail. Le CERN comptait 504 participants, représentant le plus grand bataillon de Suisse romande. Les équipes du CERN ont cumulé 97 500 kilomètres à vélo, l'équivalent de 15 tonnes environ de dioxyde de carbone épargnées pour l'atmosphère.

La formation en ligne renouvelée

La sécurité au CERN repose en grande partie sur une bonne formation des utilisateurs des infrastructures. En 2015, plus de 5 000 personnes ont participé aux 580 sessions de formation

en classe, tandis qu'environ 40 000 participations aux cours en ligne ont été enregistrées. Une refonte des 26 formations en ligne a débuté. Les nouveaux cours sont plus interactifs et modulaires, et sont développés en suivant une structure et une ligne graphique cohérentes.

Des exercices de sécurité sont régulièrement organisés dans le Laboratoire. Un exercice de grande envergure s'est ainsi déroulé

en octobre dans l'installation de physique nucléaire ISOLDE. La simulation a mobilisé une vingtaine de personnes d'ISOLDE, de la radioprotection, des pompiers et du Service médical du CERN mais également du service mobile d'urgence et de réanimation (voir encadré). L'exercice visait à entraîner les équipes aux techniques et procédures dans le cas d'un accident faisant intervenir des rayonnements ionisants.

Secours gagnants-gagnants

Début mai, un service mobile d'urgence et de réanimation (SMUR) entrait en opération sur le site de Meyrin. Cette nouvelle antenne de secours est le fruit d'une coopération entre le CERN et les Hôpitaux universitaires de Genève (HUG). Le CERN a mis à disposition l'infrastructure tandis que les HUG gèrent l'antenne avec un véhicule, un médecin et un ambulancier prêts à intervenir sur les sites du CERN, en Suisse et en France, et dans l'ouest du canton de Genève. Une triangulation des appels d'urgence, associant le centre des appels d'urgence du canton de Genève et celui du CERN, permet de répondre aux urgences médicales sur les sites du CERN. Le dispositif assure une meilleure prise en charge des urgences médicales au CERN et une intervention plus rapide dans l'ouest du canton de Genève. Après huit mois de fonctionnement, le véhicule SMUR est intervenu dans 47 % des interventions sur les sites du CERN. La collaboration a fait une démonstration éclatante de son efficacité en fin d'année, lorsqu'une personne, victime d'un arrêt cardiaque, a été secourue très rapidement grâce à la proximité du SMUR. Les pompiers du CERN ont par ailleurs été sollicités en soutien d'une intervention dans un cas d'intoxication dans le voisinage. La formation du personnel médical et des pompiers du CERN par les spécialistes des HUG a par ailleurs commencé, avec notamment une session sur les protocoles d'urgence.

Conseil du CERN

Présidente du Conseil : M^{me} A. Zalewska (Pologne)

Vice-présidents : M^{me} C. Cesarsky (France); M. W. Van Doninck (Belgique)

États membres

Allemagne

M. S. Bethke
M^{me} B. Vierkorn-Rudolph

Autriche

S.E. M. T. Hajnoczi
M. D. Weselka

Belgique

M^{me} 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^{me} A. M. Menéndez Pérez

Finlande

M. J. Äystö
M. P. Pulkkinen

France

M^{me} C. Cesarsky
S.E. M^{me} E. Laurin

Grèce

S.E. M. A. Alexandris
M. D. Nanopoulos

Hongrie

M. P. Lévai
M. J. Pálincás

Israël

S.E. M. E. Manor
M. E. Rabinovici

Italie

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

Norvège

M. B. Jacobsen
M. E. Osnes

Pays-Bas

M. S. de Jong
M. J.T.M. Rokx

Pologne

M. D. Drewniak
M. J. Królikowski

Portugal

M. G. Barreira
S.E. M. P. Nuno Bártolo

République tchèque

S.E. M. J. Kára
M. R. Leitner

Royaume-Uni

M^{me} S. Ellis
M. J. Womersley

Slovaquie

S.E. M. F. Rosocha
M. B. Sitár

Suède

M^{me} B. Åsman
M. M. Johnsson

Suisse

M. B. Moor
M. O. Schneider

État candidat à l'adhésion

Roumanie

M^{me} B. Păduroiu
M. N. Zamfir

État membre associé en phase préalable à l'adhésion

Serbie

M. P. Adzić
S.E. M.V. Mladenović

États membres associés

Pakistan

S.E. M^{me} T. Janjua
M. M. Naeem

Turquie

M. Z. Alper
M. U. Güneş

Observateurs

États-Unis d'Amérique, Fédération de Russie, Inde, Japon, JINR (Institut unifié de recherche nucléaire), UNESCO, Union européenne

Comités du Conseil

Comité des directives scientifiques

Président

M. T. Nakada (Suisse)

Membres

M^{me} B. Gavela
M. M. Harrison
M. M. Huyse
M. K. Jakobs
M. F. Le Diberder
M. G. Martinelli
M. H. Murayama
M. K. Redlich
M. L. Rivkin
M^{me} T. Rodrigo
M^{me} N. Roe
M. V. Rubakov
M^{me} H. Schellman
M. Y. Suzuki
M. D. Wark
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^{me} H. Abramowicz

Également présents

Présidente du Conseil

M^{me} A. Zalewska

Présidente du Comité des finances

M^{me} C. Jamieson

Directeur général

M. R.-D. Heuer

Comité des finances

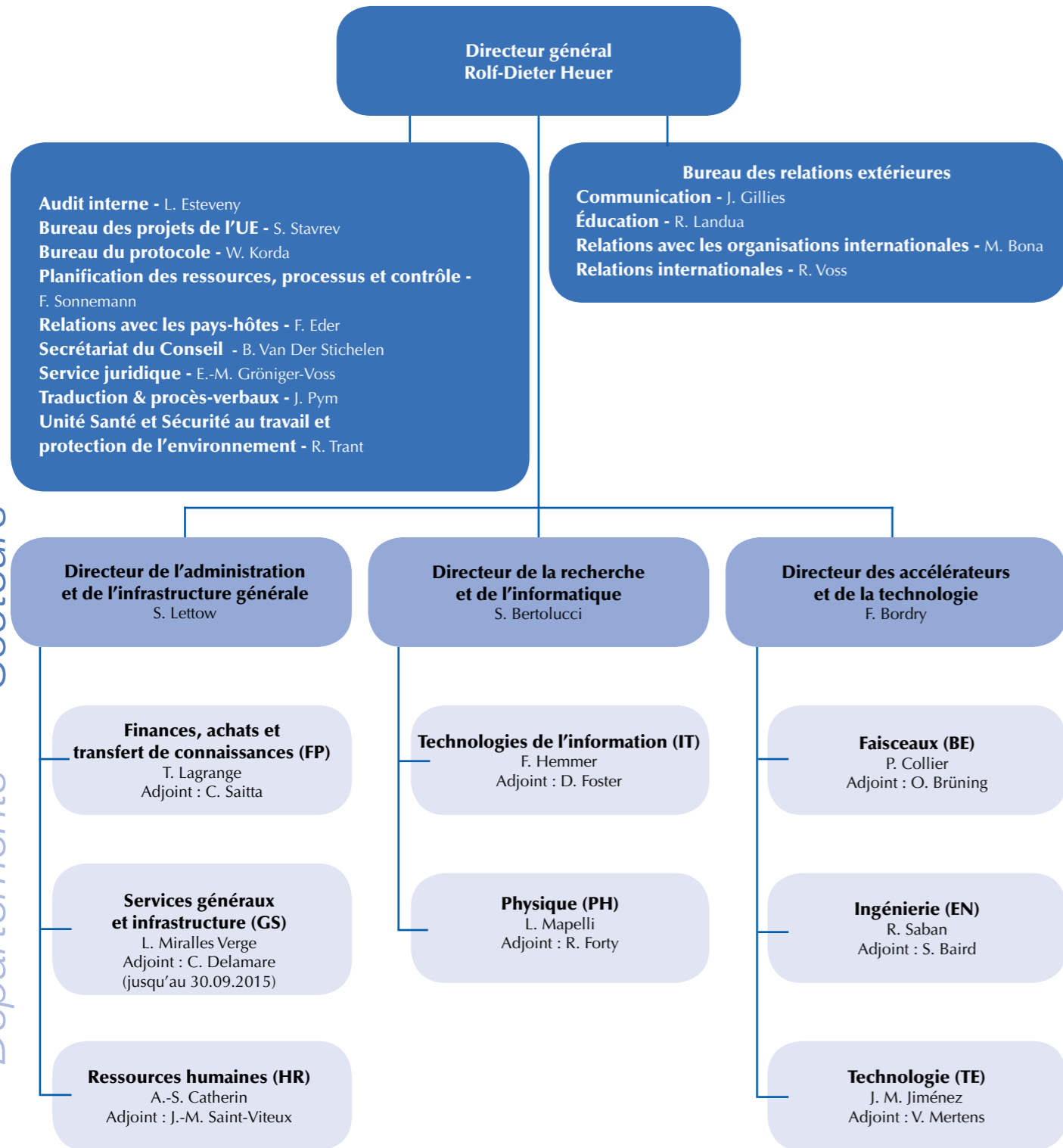
Présidente

M^{me} C. Jamieson (Royaume-Uni)

Membres

Un ou plusieurs délégués par État membre

Organisation interne

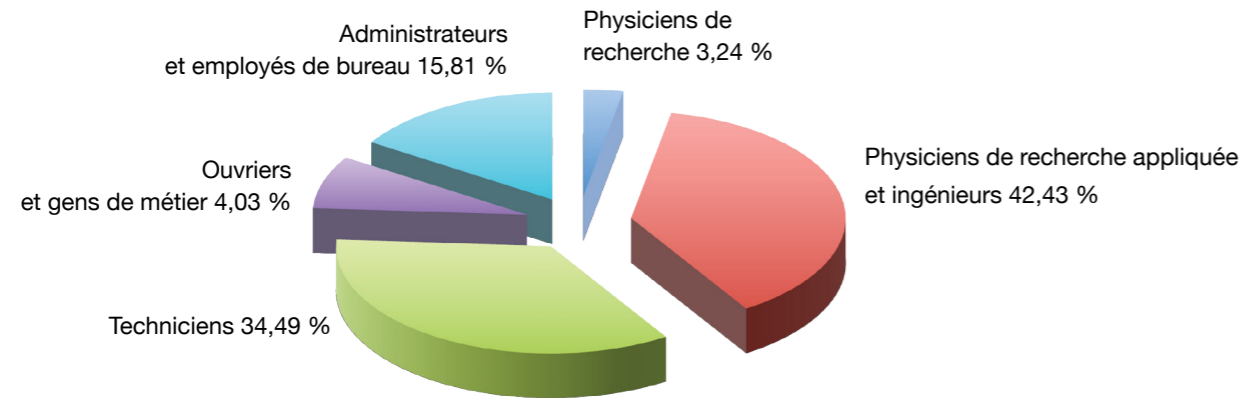


Départements et groupes

S DIR	Secteur du Bureau du Directeur général	S AT	Secteur des accélérateurs et de la technologie	PH-ADT	Acquisition de données et déclenchement d'ATLAS
DG	Directeur général	BE	Département des faisceaux	PH-AID	Détecteurs et systèmes d'ALICE
DG-AS	Support administratif	BE-ABP	Physique des accélérateurs et faisceaux	PH-AIO	Support ingénierie et gestion d'ALICE
DG-CO	Communication	BE-ASR	Administration, sécurité et ressources	PH-AIP	Informatique et physique d'ALICE
DG-CS	Secrétariat du Conseil	BE-BI	Instrumentation de faisceaux	PH-CMD	Acquisition de données et déclenchement de CMS
DG-DG	Bureau du Directeur général	BE-CO	Contrôles	PH-CMG	Physique, logiciels et matériel de calcul de CMS
DG-DI	Bureau du Directoire	BE-HDO	Bureau du chef de département	PH-CMO	Organisation de CMS
DG-EDU	Éducation	BE-OP	Opération	PH-CMX	Systèmes expérimentaux de CMS
DG-EU	Bureau des projets de l'UE	BE-RF	Radiofréquence	PH-DI	Bureau du chef de département
DG-IA	Service d'audit interne	EN	Département Ingénierie	PH-DT	Technologie des détecteurs
DG-IR	Relations internationales	EN-CV	Refroidissement et ventilation	PH-ESE	Systèmes électroniques pour les expériences
DG-LS	Service juridique	EN-EL	Ingénierie électrique	PH-LBC	Informatique de LHCb
DG-PRT	Bureau du protocole	EN-GMS	Gestion générale et secrétariats	PH-LBD	Détecteurs de LHCb
DG-RH	Relations avec les pays-hôtes	EN-HDO	Bureau du chef de département	PH-LBO	Coordination de LHCb
DG-RPC	Planification des ressources, processus et contrôle	EN-HE	Ingénierie manutention	PH-LCD	Détecteurs pour les collisionneurs linéaires
DG-TM	Traduction et procès-verbaux	EN-ICE	Contrôles industriels et ingénierie	PH-SFT	Logiciels pour les expériences
DGS	Unité Santé et Sécurité au travail et protection de l'environnement	EN-MEF	Infrastructures machines et zones expérimentales	PH-SME	Petites et moyennes expériences
DGS-DI	Bureau du chef de l'unité HSE	EN-MME	Ingénierie mécanique et matériaux	PH-TH	Physique théorique
DGS-RP	Groupe Radioprotection	EN-STI	Sources, cibles et interactions	PH-TOT	Expérience TOTEM
DGS-SEE	Groupe Ingénierie de sécurité et environnement	TE	Département Technologie	PH-UAD	Utilisateurs antiprotons
S AI	Secteur de l'administration et de l'infrastructure générale	TE-ABT	Transfert de faisceaux	PH-UAI	Utilisateurs ALICE
FP	Département Finances, achats et transfert de connaissances	TE-CRG	Cryogénie	PH-UAT	Utilisateurs ATLAS
FP-DI	Bureau du chef de département	TE-EPC	Convertisseurs de puissance électrique	PH-UC3	Utilisateurs CTF3
FP-FAS	Services financiers et comptables	TE-HDO	Bureau du chef de département	PH-UCM	Utilisateurs CMS
FP-KT	Transfert de connaissances	TE-MPE	Protection des machines et intégrité électrique	PH-UFT	Utilisateurs cibles fixes
FP-PI	Approvisionnements et services industriels	TE-MSC	Aimants, supraconducteurs et cryostats	PH-UGC	Utilisateurs collaboration générale
GS	Département des services généraux et de l'infrastructure	TE-MSV	Vide, couches et surfaces	PH-UHC	Utilisateurs LHC autres
GS-AIS	Systèmes d'information avancés	S RC	Secteur de la recherche et de l'informatique	PH-UIS	Utilisateurs ISOLDE
GS-ASE	Accès, sécurité et outils d'ingénierie	IT	Département des technologies de l'information	PH-ULB	Utilisateurs LHCb
GS-DI	Bureau du chef de département	IT-CF	Gestion des équipements informatiques	PH-ULD	Utilisateurs détecteurs des collisionneurs linéaires
GS-FB	Secours et feu	IT-CIS	Services de collaboration et d'information	PH-UNT	Utilisateurs n_TOF
GS-IS	Services intégrés	IT-CS	Systèmes de communication	PH-UOP	Utilisateurs autre physique
GS-ME	Service médical	IT-DB	Services de bases de données	PH-URD	Utilisateurs R&D
GS-SE	Ingénierie site	IT-DI	Infrastructure du département	PF	Caisse de pensions
GS-SIS	Service d'information scientifique	IT-DSS	Services de données et de stockage	PFMU	Unité de gestion de la Caisse de pensions
GS-SMS	Support et gestion des services	IT-OIS	Systèmes d'exploitation et services d'infrastructure	PF-OP	Opérations
HR	Département des ressources humaines	IT-PES	Plateformes et services d'ingénierie	PF-IN	Investissements
HR-CB	Rémunération et prestations	IT-SDC	Support à l'informatique distribuée		
HR-DHO	Bureau du chef de département	PH	Département de physique		
HR-FL	Conseillers HR	PH-ADE	Systèmes expérimentaux d'ATLAS		
HR-LD	Formation et développement	PH-ADO	Exploitation du détecteur d'ATLAS		
HR-SA	Secrétariat de l'Association du personnel (administrativement rattaché à HR)	PH-ADP	Traitement de données d'ATLAS		
HR-TA	Acquisition de talents				

Le CERN en chiffres

Personnel du CERN



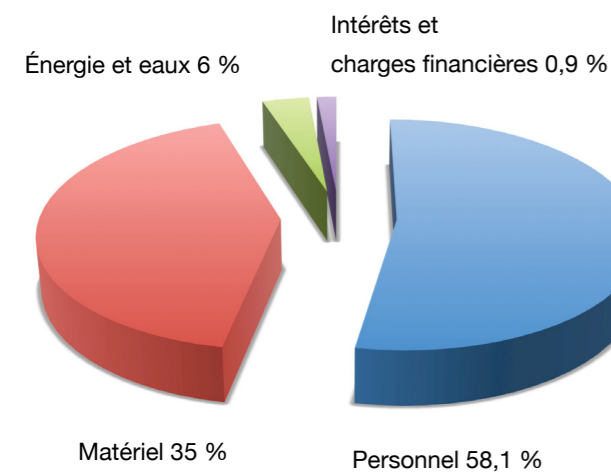
Évolution des effectifs des membres du personnel titulaires Postes à financement externe inclus

2012	2512
2013	2513
2014	2524
2015	2531

Évolution des effectifs des boursiers, attachés, étudiants, utilisateurs et apprentis

2012	12 080
2013	12 313
2014	13 142
2015	13 794

Dépenses du CERN



Total des dépenses	1082,9 MCHF
Personnel	628,9
Matériel	379,2
Marchandises, consommables et fournitures	171,3
Autres charges de matériel	207,9
Énergie et eaux	64,6
Intérêts et charges financières	10,2

Glossaire

Accélérateur

Machine qui accélère des faisceaux de particules et les porte à des énergies élevées. On utilise des champs électriques pour accélérer les particules et des aimants pour les guider et les focaliser. Les faisceaux peuvent entrer en collision entre eux ou avec une cible fixe.

- Un collisionneur est un accélérateur circulaire dans lequel deux faisceaux, accélérés en sens inverse, interagissent en des points de collision déterminés.
- Un accélérateur linéaire (linac) sert souvent de premier maillon dans la chaîne d'accélération.
- Un synchrotron est un accélérateur dans lequel le champ magnétique courbant les orbites des particules augmente avec l'énergie de ces dernières, ce qui permet d'obtenir des orbites circulaires.

AD (Décélérateur d'antiprotons)

Installation de recherche du CERN produisant des antiprotons de basse énergie pour les expériences AEGIS, ALPHA, ASACUSA, ATRAP, BASE et GBAR.

ALICE (A Large Ion Collider Experiment)

Une des quatre grandes expériences qui étudient les collisions au LHC.

Antimatière

À toute particule de matière correspond une antiparticule. Les antiparticules chargées portent une charge électrique opposée à celle de leur partenaire de matière. Bien que les antiparticules soient excessivement rares dans l'Univers aujourd'hui, on pense que matière et antimatière ont été créées en quantités égales lors du Big Bang.

ATLAS

Une des quatre grandes expériences qui étudient les collisions au LHC.

Boson

Nom générique donné aux particules qui véhiculent les forces entre les particules de matière. (Voir particules).

Boson de Higgs

La particule liée au mécanisme de Brout-Englert-Higgs qui donne aux particules élémentaires leur masse.

Calorimètre

Instrument servant à mesurer la quantité d'énergie que possède une particule. Le calorimètre électromagnétique mesure l'énergie des électrons et des photons, alors que le calorimètre hadronique détermine l'énergie des hadrons (particules telles que les protons, neutrons, pions et kaons).

Cavité accélératrice

Dispositif produisant le champ électrique qui sert à accélérer les particules dans un accélérateur. La fréquence d'oscillation du champ électrique correspondant à celle des ondes radio, ces dispositifs sont également appelés « cavités radiofréquence ».

Chambre à muons

Dispositif qui identifie les muons et qui, associé à un système magnétique, forme un spectromètre à muons pour mesurer leurs impulsions.

Chromodynamique quantique (QCD)

Théorie de l'interaction forte, similaire à l'électrodynamique quantique.

CLIC (Collisionneur linéaire compact)

Étude de faisabilité non limitée à un site ayant pour but de développer, à un prix abordable, une technologie réaliste pour construire un collisionneur linéaire électron-positon (de plusieurs TeV) pour la physique des hautes énergies.

CMS (Compact Muon Solenoid)

Une des quatre grandes expériences qui étudient les collisions au LHC.

Cryostat

Enceinte servant à maintenir des températures extrêmement basses.

Déclenchement

Dispositif électronique permettant de sélectionner les interactions susceptibles d'être intéressantes dans un détecteur de particules, puis d'activer le système de lecture du détecteur pour qu'il enregistre les données de la collision.

Détecteur

Dispositif servant à mesurer certaines propriétés des particules. Certains détecteurs mesurent les traces laissées par les particules, d'autres leur énergie. Le terme désigne aussi d'immenses installations composites formées de multiples éléments de détection plus petits. Dans les grands détecteurs du LHC, chaque couche d'instruments a une tâche propre.

Dipôle

Aimant possédant deux pôles, comme les pôles nord et sud d'un aimant en fer à cheval. Dans les accélérateurs de particules, les dipôles servent à maintenir celles-ci sur une orbite circulaire. Le LHC compte 1 232 dipôles de 15 m de longueur.

Électrodynamique quantique (QED)

Théorie de l'interaction électromagnétique.

Électronvolt (eV)

Unité d'énergie ou de masse utilisée en physique des particules. Un eV étant extrêmement petit, ses multiples, le MeV

(million d'électronvolts) et le GeV (milliard d'électronvolts), sont d'usage plus courant. Dans le LHC, l'énergie de collision atteint 13 millions de millions d'électronvolts (13 TeV). Un TeV représente à peu près l'énergie cinétique d'un moustique en vol.

Événement

Les collisions de particules produisent de nouvelles particules, observées par des détecteurs. Lorsqu'une collision est considérée comme potentiellement intéressante, les informations sur les particules qui en émergent sont enregistrées pour être étudiées. Les physiciens appellent « événement » ce type de collision.

Faisceau

Dans un accélérateur, les particules sont rassemblées en un faisceau. Les faisceaux peuvent contenir des milliards de particules et peuvent être divisés en paquets. Chaque paquet mesure ordinairement plusieurs centimètres de long, mais seulement quelques micromètres de large.

FCC (Étude sur un futur collisionneur circulaire)

L'étude FCC publiera d'ici à 2019 un rapport technique de conception pour un grand collisionneur de particules nouvelle génération à un horizon de 20 à 30 ans. L'étude examine la possibilité d'un collisionneur de hadrons de 100 TeV, avec éventuellement un collisionneur de leptons comme étape intermédiaire, ainsi qu'une option de collisionneur lepton-hadron. L'étude porte également sur un possible LHC à plus haute énergie dans le tunnel existant.

Forces

Quatre forces fondamentales agissent dans la nature. La plus connue, la gravitation, est aussi la plus faible. La force à laquelle nous devons les orages et qui véhicule l'électricité est la force électromagnétique. Les deux autres forces, la force forte et la force faible, sont confinées dans le noyau atomique. La force forte assure la cohésion du noyau, tandis que la force faible provoque la dissociation de certains noyaux. La force faible joue un rôle important dans la production d'énergie au cœur des étoiles, notamment le Soleil. Les physiciens cherchent une théorie unique pour expliquer toutes ces forces. Un grand pas a été fait dans les années 1960 avec la théorie unifiée des forces électromagnétique et faible, dite électrofaible. Celle-ci a par la suite été confirmée par une expérience au CERN récompensée par un prix Nobel.

GeV

Voir électronvolt.

Hadron

Particule subatomique contenant des quarks, des antiquarks et des gluons et qui est donc soumise à la force forte. (Voir particules).

LHC haute luminosité

Le LHC haute luminosité (HL-LHC), qui devrait entrer en service après 2025, va accroître le potentiel de découvertes du LHC en augmentant la luminosité d'un facteur 5 à 10. Pour cela, de nouveaux équipements seront installés sur 1,2 km de l'accélérateur actuel.

Injecteur

Système qui fournit des particules à un accélérateur. La chaîne d'injection du LHC est constituée de plusieurs accélérateurs successifs.

Ion

Atome auquel on a enlevé (ion positif) ou ajouté (ion négatif) un ou plusieurs électrons.

ISOLDE

Installation à faisceau d'ions radioactifs qui dirige un faisceau de protons du Booster du PS sur des cibles spéciales afin de produire plus de 1 000 isotopes différents pour un large éventail de recherches.

Isotope

Forme légèrement différente d'un même élément chimique. Les isotopes se distinguent les uns des autres par le nombre de neutrons contenus dans leur noyau, le nombre de protons étant identique.

Kelvin

Unité de température. Un kelvin est égal à un degré Celsius. L'échelle des kelvins commence au zéro absolu, la température la plus basse possible (−273,15° Celsius).

Lepton

Classe de particules élémentaires qui comprend l'électron. Particules de matière insensibles à la force forte. (Voir particules).

LHC (*Large Hadron Collider*)

Grand collisionneur de hadrons ; le plus grand accélérateur du CERN.

LHCb (*Large Hadron Collider beauty*)

Une des quatre grandes expériences qui étudient les collisions au LHC.

Ligne de transfert

Ligne transportant un faisceau de particules, par exemple de protons, d'un accélérateur à un autre en le guidant à l'aide d'aimants.

Linac

Voir accélérateur.

Luminosité

En physique des particules, la luminosité mesure combien de particules passent à travers une surface donnée en un temps donné. Plus la luminosité produite par le LHC est élevée, plus les expériences reçoivent de données. Une plus grande luminosité signifie donc des résultats plus précis et une possibilité accrue d'observer les phénomènes les plus rares.

Matière noire

Seuls 5 % environ de la matière de l'Univers

sont visibles. Le reste se trouve sous forme de matière noire (27 %) et d'énergie sombre (68 %). Découvrir la nature de la matière noire est l'un des grands objectifs de la science moderne.

Modèle standard

Ensemble de théories rassemblant les connaissances actuelles sur les propriétés des particules fondamentales.

Muon

Particule semblable à l'électron, mais de masse environ 200 fois supérieure. (Voir particules).

Neutrino

Particule neutre qui n'interagit que très faiblement. Les neutrinos, très courants, pourraient permettre de répondre à de nombreuses interrogations des physiciens. (Voir particules).

n_TOF

Installation qui utilise des protons du PS pour créer un faisceau de neutrons de haute intensité afin d'étudier les réactions induites par les neutrons sur une plage d'énergies très large.

Nucléon

Nom générique donné aux protons et aux neutrons.

Particules

Les particules élémentaires se répartissent en deux groupes : les quarks et les leptons. Les différents quarks sont les quarks u et d, les quarks c (charmés) et s (étranges), et les quarks t (top) et b (bottom). Les leptons regroupe l'électron et le neutrino électronique, le muon et le neutrino muonique, le tau et le neutrino tauique. Les quarks et les leptons, particules de matière, sont désignés sous le terme de « fermions ». Quatre forces, ou interactions, fondamentales assurent la cohésion des particules. Elles sont portées par des particules appelées bosons. La force électromagnétique est portée par le photon ; la force faible par les bosons W, chargés, et par le boson Z, neutre ; la force forte par le gluon ; la gravité est probablement portée par le graviton, qui n'a pas encore été découvert. Les hadrons sont des particules sensibles à la force forte. Ils comprennent les mésons, formés d'une paire quark-antiquark, et les baryons, formés de trois quarks. Le pion et le kaon sont deux types de mésons. Les neutrons et les protons (constituant la matière ordinaire) sont des baryons ; les neutrons contiennent un quark u et deux quarks d ; les protons deux quarks u et un quark d.

Plasma quark-gluon (QGP)

État de la matière dans lequel les protons et les neutrons se dissocient en leurs parties constitutives. Il aurait existé immédiatement après le Big Bang.

Positon

L'antiparticule de l'électron. (Voir antimatière).

PS (*Proton Synchrotron*)

Synchrotron à protons, clé de voûte du complexe d'accélérateurs du CERN.

Quark

Plus petite particule élémentaire connue sensible à l'interaction forte. (Voir particules).

Quadripôle

Aimant à quatre pôles servant à focaliser les faisceaux de particules, à l'instar d'une lentille en verre focalisant la lumière.

Rayon cosmique

Particule de haute énergie provenant de l'espace qui, lorsqu'elle frappe l'atmosphère terrestre, produit de nombreuses particules secondaires aussi appelées rayons cosmiques.

Sextupôle

Aimant à six pôles servant à corriger les faisceaux de particules. Au LHC, des aimants à huit et dix pôles sont aussi utilisés à cette fin.

Sigma

Représentation d'un écart type (marge d'erreur sur une mesure), 5 sigmas étant la probabilité que la mesure soit correcte à 99,99994 %.

Spectromètre

En physique des particules, système de détection contenant un champ magnétique et servant à mesurer l'impulsion de particules.

SPS (*Super Proton Synchrotron*)

Supersynchrotron à protons. Accélérateur fournissant les faisceaux pour les expériences du CERN, et préparant aussi ceux du LHC.

Supersymétrie

Théorie prédisant l'existence de « superpartenaires » lourds pour toutes les particules connues, dont la validité est vérifiée au LHC.

Supraconductivité

Propriété de certains matériaux, habituellement à très basse température, de conduire l'électricité sans résistance.

TeV

Voir électronvolt.

Vide

Espace qui ne contient sensiblement aucune matière et où la pression gazeuse est par conséquent très inférieure à la pression atmosphérique habituelle.

Violation de CP

Effet subtil observé lors de la désintégration de certaines particules, qui révèle la « préférence » de la nature pour la matière au détriment de l'antimatière.

WLCG (*Grille de calcul mondiale pour le LHC*)

Grille informatique dont le but est de mettre à disposition une infrastructure de stockage et d'analyse de données pour tous les chercheurs en physique des hautes énergies qui utilisent le LHC.

