

Rapport annuel **2014**





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

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://publications.cern.ch/annual_report/

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://publications.cern.ch/2014_list.html

Soixantième rapport annuel de l'Organisation européenne pour la Recherche nucléaire

Graphisme et production : groupe Communication du CERN

ISSN 0304-2901

© Copyright 2015, CERN

Le CERN, l'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 depuis janvier 2014 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 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	9
Informatique	12
Accélérateurs	15
Physique et expériences	21
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 CERN est parvenu à faire travailler les pays européens ensemble dans la paix. »

Le 60^e anniversaire du CERN, qui a célébré six décennies de science au service de la paix, a été l'un des événements majeurs de 2014 pour l'Organisation, ainsi que pour ses États membres, représentés au sein du Conseil du CERN. L'année a démarré par un moment fort, avec la cérémonie de lever du drapeau d'Israël marquant l'adhésion du pays en tant que 21^e État membre de l'Organisation.

Tout au long de l'année anniversaire, de nombreuses manifestations ont été organisées en plus de la cérémonie principale du 29 septembre. Les délégués du Conseil ont activement participé à l'événement en proposant et en organisant près de 100 manifestations dans 25 pays.

Au CERN, un événement particulier a été organisé pour commémorer un moment fondateur de l'histoire du Conseil. Le 19 septembre, pendant la semaine de réunions du Conseil, un symposium a été organisé pour célébrer le 60^e anniversaire de la première session du Conseil du CERN, qui s'était tenue en octobre 1954, une semaine après l'entrée en vigueur de la Convention instituant le CERN. Au cours de ce symposium, nous avons pu écouter des intervenants représentant différentes catégories de membres du personnel et des utilisateurs du CERN venus nous expliquer ce que le Conseil représente pour eux.

L'une des principales activités du Conseil en 2014 a été la sélection et la nomination du prochain directeur général. Le Comité de candidature, établi lors de la session de mars, a présélectionné trois excellents candidats. Au mois de novembre, le Conseil s'est accordé sur l'un des trois noms, celui de Fabiola Gianotti, et, en décembre, il a approuvé officiellement et à l'unanimité son élection. Son mandat commencera début 2016. La Caisse de pensions du CERN, dont la situation financière a donné lieu à des discussions prolongées, a été un autre sujet important traité par le Conseil en 2014. L'objectif de ces discussions était d'aider le Conseil à mieux comprendre la situation actuarielle de la Caisse et de comparer son système avec celui d'autres organisations internationales.

Enfin, le Conseil a approuvé plusieurs mesures visant à permettre à un plus grand nombre de pays de devenir État membre ou État membre associé. Nous pouvons donc nous attendre à ce que le CERN continue de s'agrandir. Au cours de ces 60 années, tout en poursuivant sa mission première, qui est de produire des résultats scientifiques de premier ordre, le CERN est parvenu à faire travailler les pays européens ensemble dans la paix. Je crois sincèrement que le modèle collaboratif du CERN restera une source d'inspiration pour tous, partout dans le monde et pour de nombreuses années encore.

Agnieszka Zalewska

Agnieszka Zalewska

Message du Directeur général



« *L'idéal des fondateurs du CERN continue d'orienter l'action de l'Organisation.* »

Le CERN a officiellement vu le jour le 29 septembre 1954, quand sa Convention a été signée. Celle-ci, rédigée de manière très formelle, synthétise les rêves des fondateurs. Elle prévoit non seulement la construction d'une infrastructure, d'accélérateurs et d'expériences, mais également une coopération internationale pour la recherche, l'encouragement des contacts entre chercheurs, la formation des scientifiques et la diffusion de la connaissance au-delà des frontières. En véritables visionnaires, les scientifiques et les diplomates qui ont collaboré pour donner naissance au CERN avaient compris que c'est en combinant ses forces par-delà les frontières que l'Europe pourrait jouer un rôle en matière d'éducation et de recherche scientifique de pointe. En tissant des liens intellectuels entre, par exemple, l'Est et l'Ouest, et ce même pendant des périodes « froides » de l'histoire, le CERN a réalisé les rêves des fondateurs. Le temps est venu de s'affranchir des frontières continentales ; les premiers pas dans cette direction ont été faits en 2014 : en janvier, le drapeau israélien a été hissé pour la première fois au CERN, et en décembre, c'était la signature d'un accord prévoyant l'octroi au Pakistan du statut d'État membre associé.

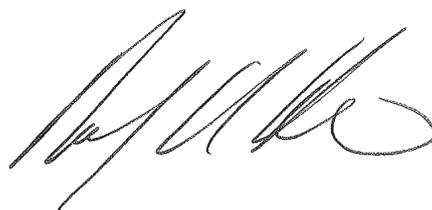
Soixante ans plus tard, l'idéal des fondateurs du CERN continue d'orienter l'action de l'Organisation. Nous tenons à ce que celles et ceux qui dessinent notre avenir comprennent pleinement le rôle essentiel que doit jouer la science. Dans ce but, nous avons créé en 2014 une fondation destinée à soutenir le programme CERN & Société, pour que les compétences et les technologies du CERN puissent servir à l'ensemble de la société. Parmi les initiatives financées par cette fondation, on peut citer le projet *Ligne de faisceaux pour les écoles*, qui s'ajoute aux nombreuses activités éducatives menées par le CERN et qui permet à des écoles de proposer des expériences au Laboratoire, exactement comme le font les équipes de physiciens. En 2014, toujours dans la lignée de la Convention, le CERN a poursuivi sa politique d'ouverture avec le lancement de l'initiative SCOAP³ pour la publication en libre accès, et la première diffusion en libre accès des données des expériences du Grand collisionneur de hadrons (LHC).

Le premier long arrêt du complexe d'accélérateurs, le LS1, a représenté une charge de travail conséquente pour de nombreuses personnes, au CERN et ailleurs. Au fil des mois, la remise en route des accélérateurs non cryogéniques s'est faite en douceur et la recherche a repris dans toutes les installations qu'ils alimentent. Dans le même temps, la préparation du LHC pour le démarrage de la deuxième période d'exploitation, en 2015, a bien avancé. Je tiens à remercier tous ceux qui, au CERN, mais également dans les laboratoires et les instituts, nous ont aidés à mener à bien le LS1 en toute sécurité et à faire de lui une réussite.

Pendant le LS1, le travail d'analyse n'a pas connu d'interruption. Il a permis d'obtenir de nouvelles mesures précises réalisées en nombre par les expériences LHC et des résultats remarquables issus d'expériences situées dans d'autres parties du complexe. Pendant la deuxième période d'exploitation, le LHC va fonctionner à une énergie de collision presque deux fois supérieure à celle de la première période, ouvrant ainsi de nouveaux horizons pour la physique et des perspectives de futures découvertes. Nous attendons tous avec impatience de voir ce que la nature nous réserve.

Je me réjouis à l'idée de travailler avec Fabiola Gianotti en 2015 pour préparer son entrée en fonctions en tant que directrice générale en 2016.

Rolf Heuer





Pour le gala officiel du 29 septembre, l'Orchestre des jeunes de l'Union européenne, composé pour l'occasion de 42 musiciens représentant l'ensemble des États membres, États membres associés et observateurs du CERN, a joué sous la direction du chef d'orchestre Vladimir Ashkenazy. (CERN-PHOTO-201409-196 – 120)

Une année au CERN

Il y a exactement 60 ans, le 29 septembre 1954, l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire (CERN) voyait le jour. Quelques années à peine après la Deuxième Guerre mondiale, 12 pays européens unissaient leurs forces pour construire ce qui est devenu le plus grand laboratoire de physique des particules du monde.

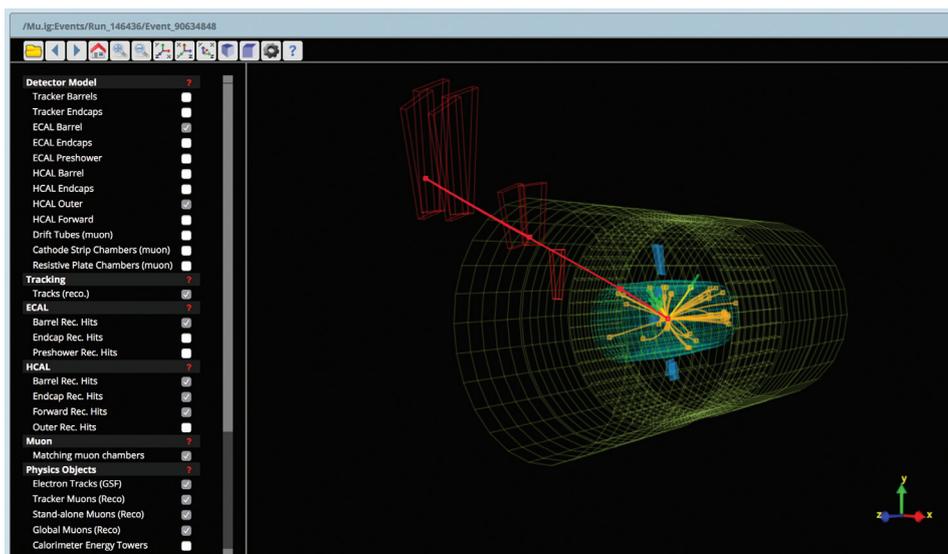
Pour célébrer 60 ans de science au service de la paix, le CERN a organisé tout au long de l'année 130 manifestations au Laboratoire et dans ses environs, ainsi que dans les États membres.

Le CERN et l'UNESCO ont commémoré début juillet au siège de l'UNESCO, à Paris, la signature, le 1^{er} juillet 1953, sous les auspices de l'UNESCO, de la Convention du CERN, qui allait ouvrir la voie à l'établissement du CERN un an plus tard. Le jour du 60^e anniversaire, des délégations de 35 pays se sont rendues au CERN pour le gala officiel. D'autres événements organisés au CERN et dans les alentours ont permis d'assister à des conférences, d'écouter de la musique et de voir des démonstrations de science dans les rues (voir p. 32). Enfin, lors

d'une manifestation spéciale le 20 octobre au siège des Nations Unies, à New York, le CERN et le Conseil économique et social des Nations Unies ont célébré la science au service de la paix et du développement.

LHC : exploitation 2

Commencé début 2013, le premier long arrêt (LS1) du complexe d'accélérateurs du CERN s'est achevé avec succès. Les protons ont fait leur retour dans le Synchrotron à protons (PS) en juin. Rapidement, ils ont alimenté les expériences au PS, à ISOLDE, à la source de neutrons n_TOF et au Décélérateur d'antiprotons (AD), qui ont tous subi des travaux d'amélioration et de rénovation. Puis, en octobre, ce fut le tour du Supersynchrotron à protons (SPS) et de ses expériences. En novembre, des faisceaux de protons, amenés du SPS jusqu'à l'extrémité des lignes d'injection, sont venus frapper aux portes du LHC.



La collaboration CMS a publié sur son portail des données ouvertes des ensembles complets de données de collisions de 2010, assortis de documents détaillés, de tutoriels et d'outils de visualisation d'événements, comme celui-ci. (OPEN-PHO-EXP-2015-005 – 1)

En mai, le refroidissement du LHC a commencé et, en fin d'année, l'ensemble de la machine avait pratiquement atteint sa température de fonctionnement, 1,9 K. Les aimants d'un secteur complet, soit un huitième du LHC, ont été mis sous tension à l'intensité requise pour que les faisceaux atteignent 6,5 TeV, l'énergie visée pour l'exploitation 2. Pendant le LS1, les expériences LHC ont pu également rénover et améliorer leurs détecteurs en prévision d'une énergie et de taux de collision plus élevés. Du côté de la Grille de calcul mondiale pour le LHC, d'importants travaux d'optimisation ont été réalisés en vue de l'énorme afflux de données attendu.

Préparer l'avenir

Compte tenu de la complexité des projets d'accélérateurs modernes, le CERN doit anticiper, et pas seulement pour repousser la frontière des hautes énergies. C'est ainsi qu'a déjà commencé le projet LHC haute luminosité, inscrit dans le Plan à moyen terme pour la période 2014–2019, qui vise à augmenter d'un facteur 10 la luminosité nominale du collisionneur. Du côté des antiprotons, un nouveau bâtiment a été construit pour le projet ELENA (*Extra Low ENergy Antiproton*), qui permettra à quatre expériences d'utiliser en parallèle les antiprotons de l'AD. Par ailleurs, les travaux d'amélioration d'ISOLDE (HIE-ISOLDE) se sont poursuivis et une nouvelle zone d'expérimentation a été mise en service à n_TOF.

Les travaux de recherche et développement sur les accélérateurs et les détecteurs ont continué dans le cadre de la Collaboration pour le collisionneur linéaire et de l'étude du collisionneur linéaire du CERN (CLIC). Pour le plus long terme, après une réunion de lancement du projet en février, le premier comité de collaboration pour l'étude internationale sur un futur collisionneur circulaire a été créé en septembre. Par ailleurs, on a commencé à préparer une plateforme qui permettra de mettre au point des détecteurs et de participer à de futures expériences internationales.

Ouvert à tous

L'action du CERN pour une collaboration internationale va au-delà des accélérateurs et des expériences et englobe aussi les données et les résultats finaux. Le début de l'année a été marqué par le lancement du Groupement pour la libre diffusion des résultats de physique des particules (SCOAP³). Piloté par le CERN, ce projet repose sur une collaboration internationale de plus de 1 000 bibliothèques, groupements de bibliothèques et instituts de recherche. Avec l'appui de partenaires de 24 pays, un grand nombre d'articles scientifiques en physique des hautes énergies seront mis en libre accès gratuitement.

En novembre, le CERN a lancé son portail des données ouvertes, mettant des données issues de collisions réelles à la disposition de tous. Créé dans le cadre d'un partenariat entre les départements IT et GS, le portail a été développé avec les collaborations des expériences LHC. Il met ainsi en partage de vastes connaissances sur les processus de recherche et leurs résultats, en permettant à chacun – citoyen ou membre d'un



François de Rose (à gauche) et John Adams, lors de l'inauguration du Synchrotron à protons en 1960 (CERN-HI-6002058)

François de Rose 1910–2014

François de Rose, ambassadeur de France, président du Conseil du CERN de 1957 à 1960 et délégué au Conseil du CERN par la suite, est décédé le 23 mars à l'âge de 103 ans. Dernier des pères fondateurs du CERN, il était un fervent défenseur de l'Organisation. Au lendemain de la Deuxième Guerre mondiale, il avait embrassé la cause du CERN après sa rencontre avec de grands noms de la physique convaincus que la reconstruction de l'Europe passait par le développement de ses outils de recherche fondamentale. Il était, depuis, un soutien ardent de l'Organisation, qu'il considérait comme l'une de ses plus belles réussites. Passionné par les recherches menées au CERN, il envoyait régulièrement des messages de félicitations. En visite au Laboratoire en 2010, il avait promis qu'il reviendrait lorsque le boson dit de Higgs serait découvert. Une promesse tenue en 2013.

projet partenaire de tout pays — de les réutiliser et réinterpréter. Les collaborations ALICE, ATLAS, CMS et LHCb ont toutes publié des données sur le portail, principalement à des fins de communication et de formation.

La société dans son ensemble

Faire en sorte que les retombées des recherches fondamentales menées au CERN profitent au plus grand nombre se traduit non seulement par des activités de transfert de connaissances et de technologies, mais aussi par le programme CERN & Société, qui a continué de prendre forme en 2014. Ce programme, désormais soutenu par la Fondation CERN & Société, coordonne diverses

activités nécessitant des financements externes, comme des projets éducatifs, tels que le concours *Ligne de faisceaux pour les écoles* (voir p. 33), ou le projet OpenMed, qui vise à faire de l'anneau à ions de basse énergie une installation de recherche biomédicale. Le projet relève à présent de la responsabilité du Bureau du CERN pour les applications médicales (voir p. 34), créé début 2014 pour centraliser les différentes activités de physique médicale du CERN. Son budget est limité, mais l'objectif est qu'il soit le terreau de nouveaux développements et permette la mise en place de collaborations avec d'autres instituts et centres.

Instantanés



12/01

Viktor Orbán, premier ministre de Hongrie (deuxième en partant de la droite) a visité le LHC en compagnie de József Pálinkás, président de l'Académie des sciences de Hongrie (à gauche), de Marta Bajko, du département Technologie, et de Rolf Heuer, directeur général du CERN. (CERN-PHOTO-201401-002 – 1)



15/01

Le drapeau israélien est hissé pour la première fois à l'entrée du CERN, après l'enregistrement officiel par l'UNESCO de l'adhésion d'Israël en tant que 21^e État membre de l'Organisation. (CERN-PHOTO-201401-005 – 1)



02/04

Lors d'une visite au CERN, Joachim Gauck, président de l'Allemagne (à gauche), a découvert la zone d'expérimentation souterraine d'ATLAS en compagnie de Thorsten Wengler, porte-parole adjoint d'ATLAS. (CERN-PHOTO-201404-069 – 33)



03/05

Le Président de la Grèce, Karolos Papoulias (assis), se fait expliquer la salle de contrôle d'ATLAS par Evangelos Gazis, représentant ATLAS, avant de visiter la caverne de l'expérience et le tunnel du LHC. (CERN-PHOTO-201405-095 – 27)



19/05

La Commissaire européenne chargée de la recherche, de l'innovation et de la science, Maire Geoghegan-Quinn, a découvert la caverne de CMS dans le cadre d'une visite où elle a aussi rencontré des boursiers Marie Curie. (CERN-PHOTO-201405-103 – 29)



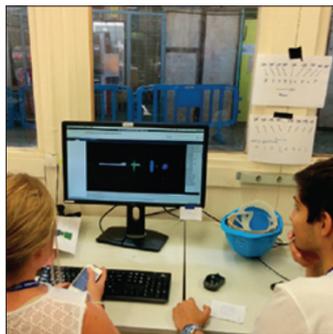
21/05

S.M. Philippe, roi des Belges (à gauche), a visité le tunnel du LHC avec Frédéric Bordry, directeur des accélérateurs et de la technologie du CERN (au centre, levant la main) et François Englert, lauréat du prix Nobel (à droite). (CERN-PHOTO-201405-109 – 23)



31/05

Le CERN a participé aux festivités du bicentenaire de l'entrée de Genève dans la Confédération suisse en faisant défiler un aimant supraconducteur sur un camion de 20 mètres de long dans les rues étroites de la ville. (CERN-PHOTO-201406-113 – 35)



07-17/09



07-17/09

Des élèves de Grèce et des Pays-Bas, membres des équipes gagnantes du premier concours *Ligne de faisceaux pour les écoles* (voir p. 33), sont venus au CERN pour mener leur expérience sur un faisceau d'essai. (OPEN-PHOTO-LIFE-2015-007-1)



10-11/10

Le CERN a accueilli Tom Kibble, contributeur de la partie du Modèle standard qui attribue la masse des particules aux interactions avec le boson dit de Higgs. Il a pu voir pour la première fois des expériences LHC, CMS (ici) et ATLAS. (CMS-PHO-PUBLIC-2014-009 – 8)



14/10

Rosen Plevneliev, président de la Bulgarie (assis), signe le livre d'or de CMS lors de sa visite dans la caverne de l'expérience, en compagnie de Tiziano Camporesi, porte-parole de la collaboration. (CERN-PHOTO-201410-205 – 34)



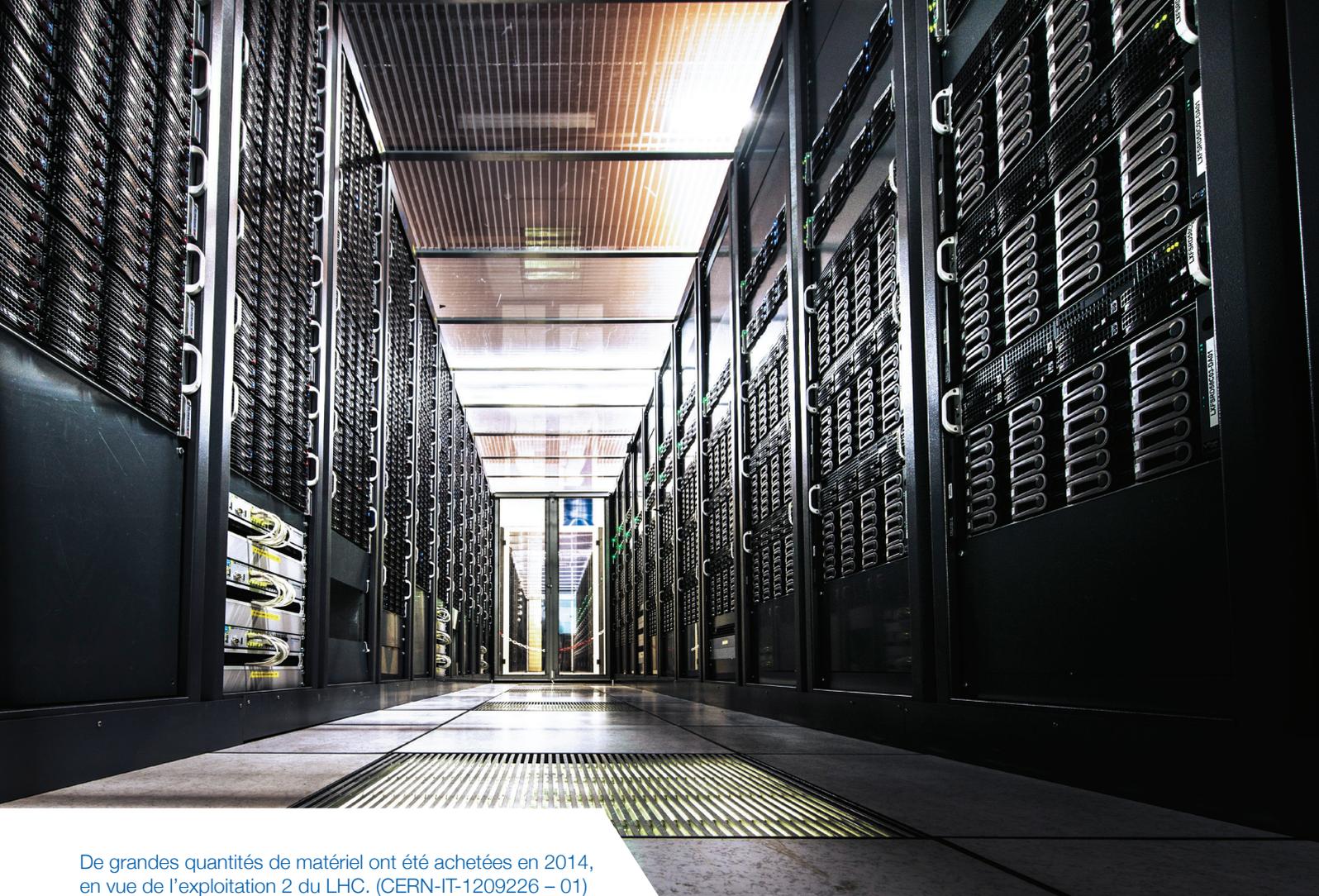
24/10

Rafael Correa Delgado, président de l'Équateur (à gauche), visite la caverne de l'expérience ATLAS en compagnie de Dave Charlton, porte-parole de la collaboration. (CERN-PHOTO-201410-216 – 12)



04/11

À sa 173^e session, le Conseil du CERN a élu Fabiola Gianotti (à gauche) pour succéder à Rolf Heuer à la tête de l'Organisation en qualité de directrice générale. Son mandat de cinq ans débutera le 1^{er} janvier 2016. (CERN-PHOTO-201411-224 – 4)



De grandes quantités de matériel ont été achetées en 2014, en vue de l'exploitation 2 du LHC. (CERN-IT-1209226 – 01)

Informatique

Nouveau LHC, nouveaux modèles

En vue de l'exploitation 2 du LHC, les expériences et la collaboration Grille de calcul mondiale pour le LHC (WLCG) ont, durant le LS1, amélioré leurs infrastructures et services informatiques associés. Ces changements ont été validés par des essais à grande échelle. Les expériences se sont également attachées à améliorer la performance et l'efficacité de leurs logiciels, et ont travaillé d'arrache-pied à leur validation en préparation de l'exploitation 2.

Pour optimiser les ressources de calcul et de stockage lors de l'exploitation 2, les expériences ont adopté de nouveaux modèles informatiques n'exigeant plus les rôles hiérarchiques stricts des centres de niveaux 1, 2 et 3 prévus par les premiers modèles WLCG, leur permettant ainsi d'exploiter au mieux les capacités de tous les sites. Les stratégies de gestion des données ont en outre été revues : la distribution explicite au niveau mondial des données a laissé place à un système plus souple ne les répliquant qu'en cas de besoin. De plus, un accès distant aux données est désormais possible dans certaines conditions.

Ces « fédérations de données », optimisant l'utilisation d'un espace-disque onéreux, ont été possibles grâce à l'excellente performance des réseaux mis en œuvre par le WLCG ces dernières années.

En ce qui concerne l'efficacité des logiciels, une nouvelle initiative importante sur le long terme a été lancée : la Fondation HSF (*HEP Software Foundation*), qui vise à exploiter de manière optimale les architectures de processeurs modernes ainsi que le partage de plus d'éléments communs entre les principales bibliothèques logicielles. L'initiative fournira un soutien pour la réingénierie des logiciels de base des expériences qui seront nécessaires dans les années à venir.

Une meilleure capacité de calcul

Le département IT renouvelle régulièrement ses serveurs de calcul et de stockage afin de remplacer le matériel vieillissant et d'augmenter la capacité pour les expériences LHC. L'année 2014 a toutefois été exceptionnelle, les expériences ayant

L'équipe du CERN reçoit le prix du « *Superuser* » lors du sommet OpenStack à Paris. (Fondation OpenStack)



demandé le double de capacité pour l'exploitation 2, soit environ 100 pétaoctets supplémentaires de mémoire disque et près de 60 000 nouveaux cœurs de processeurs.

Défi de taille pour les équipes chargées des achats et des opérations au CERN comme au Centre de données Wigner, en Hongrie, où environ la moitié de la capacité de calcul et deux tiers de la capacité de stockage ont été installés. Quatre appels d'offres ont été lancés, qui ont donné lieu à huit contrats : trois pour des serveurs informatiques et trois pour des serveurs de stockage sur disque, un pour des unités intelligentes de distribution d'énergie et un pour un contrat-cadre concernant l'achat de configurations plus spécialisées. En outre, le groupe Systèmes de communication a lancé un appel d'offres pour l'achat des commutateurs réseau nécessaires à l'interconnexion de l'ensemble de ces équipements.

Machines virtuelles et stockage

OpenStack est un projet logiciel *open source* offrant des ressources d'informatique en nuage à la demande. Au CERN, le service OpenStack du département IT permet de faire des demandes de machines virtuelles ou de stockage en quelques minutes à partir d'un portail web ou d'applications. Il fournit en outre l'infrastructure informatique utilisée par la plupart des services de grilles et assure une gestion efficace de la capacité accrue de calcul installée pour l'exploitation 2.

Avec environ 10 000 machines virtuelles, plus d'un millier de personnes utilisent le nuage OpenStack pour de nombreuses applications différentes : services IT de production, applications de calcul ou d'analyse, serveurs de test ou de développement personnels, etc. En outre, les expériences LHC ont déployé OpenStack sur leurs serveurs filtrant les événements pour une utilisation plus classique lorsque l'accélérateur est à l'arrêt.

Lors du Sommet de la communauté OpenStack tenu à Paris en novembre, le CERN s'est vu décerner par la Fondation OpenStack le premier prix du « *Superuser* » en reconnaissance de sa contribution à la communauté OpenStack.

Stockage défini par logiciel

Le CERN, dont les besoins en matière de stockage de données sont importants, occupe depuis longtemps une place de leader dans le domaine du stockage défini par logiciel, technologie offrant des alternatives *open source* aux solutions traditionnelles de stockage réseau haute performance. En 2014, le groupe Services de données et de stockage du département IT a noué une collaboration étroite avec la société Inktank, Inc. (acquise par la suite par Red Hat, Inc.) afin d'évaluer sa solution de stockage, Ceph. Initialement, l'objectif était de concevoir un service de stockage par bloc pour le nuage OpenStack du CERN, mais le champ d'action a été élargi par la suite pour y inclure la recherche et le développement de solutions Ceph en vue des futurs défis du LHC en matière de stockage de données. Le département IT a déployé un service Ceph de 3 Po, l'un des plus volumineux du monde. Les développeurs du CERN ont travaillé sur de nouvelles fonctions importantes de ce projet *open source*, notamment des bibliothèques de suréchantillonnage pour une meilleure utilisation de l'espace et une bibliothèque d'agrégation d'objets pour applications d'analyse de données demandant de la performance.

Préservation des données

Étant donné la durée de vie des expériences LHC – plusieurs décennies – et les gros volumes de données en jeu, le coût du stockage des données et leur préservation doit être optimisé. Le CERN, grâce à ses compétences et son expérience inégalées en matière de préservation des données à grande échelle, apporte une précieuse contribution aux efforts globaux dans ce domaine. Au CERN et dans les sites de niveau 1 de la Grille WLCG, les données ont continué à être migrées régulièrement de façon proactive vers de nouvelles générations de supports de stockage, tout en étant vérifiées. En janvier, le CERN a présenté un modèle de coût de curation de contenu établi à partir de tendances connues d'évolution des technologies et d'une estimation simplifiée de l'augmentation des données du

LHC. Ce modèle, qui a suscité une grande attention au-delà de la physique des hautes énergies, peut être téléchargé comme tableau Excel, permettant à d'autres utilisateurs d'adapter à leurs besoins les paramètres et hypothèses de base.

Ciel dégagé pour l'informatique en nuage

En mai 2014, l'initiative « *Helix Nebula – the Science Cloud* » a lancé son marché pionnier d'informatique en nuage, qui offre un service de production inédit répondant aux besoins des chercheurs et stimulant l'innovation scientifique. Ce marché, s'appuyant sur une technologie de courtage novatrice, offre un accès aisé, à grande échelle, à un large éventail de services « infonuagiques ».

Le 7^e Programme-cadre de la Commission européenne, qui soutenait le projet Helix Nebula, s'est terminé fin 2013. Le projet a montré que le processus d'achat de services commerciaux d'informatique en nuage diffère des processus d'achat de matériel informatique appliqués par beaucoup d'organisations de recherche publiques. Un nouveau projet au titre du programme Horizon 2020 – PICSE (*Procurement Innovation for Cloud Services in Europe*) – a été lancé en octobre 2014, dans le but de créer un réseau d'achat pour les organisations de recherche publiques. Il étudiera la faisabilité pour celles-ci de procéder conjointement à des achats internationaux de services innovants avant leur commercialisation et lors de la passation de marchés publics.

Nouvelle ère pour CERN openlab

CERN openlab, partenariat public-privé entre le CERN et des entreprises leaders du secteur informatique, a pour mission d'accélérer le développement de solutions de pointe utiles à la communauté mondiale du LHC ainsi qu'aux instituts de recherche partenaires. Sa quatrième phase de trois ans s'est achevée fin 2014. Durant cette phase, les partenaires de CERN openlab ont abordé des questions cruciales pour le programme scientifique du CERN, comme l'informatique et le stockage en nuage, l'analyse des données, la prochaine génération de processeurs et le contrôle de systèmes d'ingénierie complexes. En mai, CERN openlab a publié, conjointement avec plusieurs laboratoires et entreprises informatiques leaders d'Europe, un livre blanc sur les futurs défis informatiques pour la recherche scientifique. Celui-ci expose les besoins potentiels des infrastructures informatiques utilisées par divers domaines scientifiques, et constitue une base pour la cinquième phase (openlab V).

Souhaitant diversifier les domaines de recherche auxquels il veut apporter un appui, CERN openlab a accueilli un atelier majeur sur les technologies de l'information dans le secteur de la santé. Par ailleurs, le programme des étudiants d'été s'est encore renforcé, le CERN ayant accueilli 23 étudiants de 17 nationalités différentes.

Rester connecté

Afin d'offrir une couverture réseau fiable aux équipes travaillant pendant le LS1, quelque 300 bornes Wi-Fi ont été installées début 2013 dans le tunnel du LHC. Près de deux ans plus tard, le LS1 touchant à sa fin, celles-ci ont toutes été retirées ; l'opération a dû être coordonnée précisément avec le refroidissement des aimants.

L'installation et le retrait des bornes Wi-Fi ont marqué le début et la fin d'une rénovation complète de l'infrastructure des réseaux pour le LHC et les expériences : les commutateurs vieillissants ont été remplacés et près de 7 500 interconnexions refaites dans plus de 300 nœuds de répartition. Cela devrait, avec l'installation de 28 nouveaux chemins de fibres et de nouveaux onduleurs, améliorer la fiabilité et la redondance du réseau pour l'exploitation 2 du LHC. Par ailleurs, en raison du déplacement d'équipements pendant le LS1, il a fallu installer plus de 340 km de câbles réseau et remanier complètement les installations associées dans cinq des huit points du LHC.

En 2014 a eu lieu aussi une vérification rigoureuse du « câble rayonnant », qui assure la transmission des signaux de téléphonie mobile dans le tunnel du LHC, notamment ceux utilisés par les radios numériques TETRA du Service de Secours et du Feu. Durant le LS1, plus de 1 300 balises fonctionnant avec le système TETRA ont été installées pour la localisation des personnes dans les zones souterraines. Ce système innovant a valu au CERN deux prix internationaux, décernés par un jury composé d'acteurs de la communauté TETRA (*International TETRA Awards*).



Le gigantesque chantier de consolidation et de rénovation du LHC et de ses injecteurs a pris fin en 2014. Ci-dessus, l'une des dernières soudures pour refermer les lignes abritant les interconnexions entre les aimants supraconducteurs. (CERN-PHOTO-201404-084 – 7)

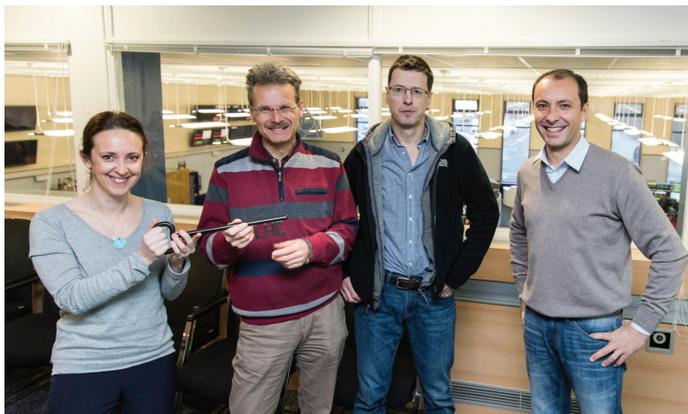
Accélérateurs

Après 18 mois d'arrêt, le cœur du CERN s'est remis à battre à la fin du printemps. Les accélérateurs se sont tour à tour mis en marche, pulsant à nouveau les particules vers les expériences. Le 2 juin, le faisceau était de retour dans le Linac 2 et dans l'injecteur du Synchrotron à protons, le Booster du PS, les deux premiers maillons de la chaîne des accélérateurs. Deux semaines plus tard, la troisième boucle, le Synchrotron à protons (PS), était alimentée en faisceau. Fin juillet, l'accélérateur livrait ses premières particules à la zone d'expérimentation Est et à l'installation n_TOF. Le Booster du PS réalimentait l'installation de physique nucléaire ISOLDE. Début août, c'était au tour du Décélérateur d'antiprotons (AD) de reprendre vie. Après plusieurs semaines de mise au point, les expériences sur l'antimatière recevaient leurs premiers antiprotons, et notamment la nouvelle expérience BASE, alimentée par une toute nouvelle ligne de transfert. Mi-septembre, le Supersynchrotron à protons (SPS) entraînait à son tour dans la ronde. À la fin de l'automne, tout était prêt pour la future exploitation du Grand collisionneur de hadrons (LHC) en 2015 et les premiers faisceaux étaient envoyés dans les lignes de transfert jusqu'au LHC.

Le redémarrage des accélérateurs a permis de procéder à des tests d'exploitation. Durant l'été, des ions d'argon ont circulé pour la première fois dans le complexe jusqu'au SPS. Ce nouveau mode d'exploitation est destiné à alimenter l'expérience NA61/SHINE en 2015. L'une des difficultés réside dans la variété des énergies demandées par l'expérience.

Chasse aux nuages

Plusieurs jours de l'exploitation du SPS ont été consacrés au conditionnement des tubes à vide avec du faisceau (« *beam induced scrubbing* »). Ce procédé vise à atténuer le phénomène des nuages d'électrons qui déstabilise le faisceau. Il consiste à faire circuler suffisamment de protons dans les tubes à vide pour créer une avalanche d'électrons intense qui inhibe la production de nouveaux électrons. Les équipes ont testé des faisceaux à « doublets », formés de paires de paquets espacés de 5 nanosecondes. Au terme d'une semaine à ce régime, les chambres à vide du SPS présentaient de bonnes performances, validant la technique pour l'exploitation du LHC en 2015. Les



Katy Foraz, responsable de la coordination du premier long arrêt technique, remet une clé symbolique du LHC aux équipes d'exploitation de la machine représentées par Jorg Wenninger, Mike Lamont et Mirko Pojet (de gauche à droite). (CERN-PHOTO-201501-002 – 3)



Le 18 juin, la dernière interconnexion entre les aimants supraconducteurs du LHC était refermée, après 14 mois de travaux pour renforcer les jonctions électriques. (CERN-PHOTO-201406-127 – 3)

injecteurs se sont par ailleurs entraînés à produire la nouvelle structure de faisceau pour le LHC, des paquets de protons espacés de 25 nanosecondes, contre 50 auparavant.

Fin de chantier

La remise en marche des accélérateurs a été précédée d'une course contre la montre pour terminer le colossal chantier du premier long arrêt technique. Durant 22 mois, le CERN et ses partenaires se sont mobilisés pour entretenir, consolider et améliorer le complexe d'accélérateurs et les infrastructures. Quelque 1600 personnes ont été mobilisées et 3,4 millions d'heures de travail ont été enregistrées, avec un excellent niveau de sécurité. La coordination des dizaines de travaux menés en parallèle, avec une logistique souvent complexe a été minutieusement orchestrée. Malgré des travaux supplémentaires, le long arrêt technique a été terminé dans les temps.

La vague de rénovation a touché tous les injecteurs. Dans le PS, le contrôle d'accès a été changé. Le nouveau système sépare l'accélérateur de la ligne de transfert reliant le Linac 2 au Booster du PS, permettant des interventions dans le PS sans arrêter le Booster. La zone Est, qui accueille des lignes de faisceaux pour des tests sur des détecteurs ou pour des installations d'essai, a été partiellement rénovée. Une partie de l'infrastructure, le contrôle des faisceaux secondaires et certains équipements ont été remplacés ou améliorés. L'expérience DIRAC a été démantelée et l'espace aménagé pour accueillir deux nouvelles installations de tests de radiorésistance, IRRAD et CHARM. Ces installations étudieront l'effet des rayonnements sur des composants de détecteurs et du matériel électronique dans le cadre notamment du projet R2E (*Radiation to Electronics*). IRRAD permet d'exposer directement des équipements aux faisceaux de protons. CHARM peut produire une large gamme de rayonnements et tester des équipements massifs. Son installation a nécessité la mise en place de 16 000 tonnes de matériaux de blindage, ainsi qu'une nouvelle salle de contrôle. Un système de manutention robotisé a été développé pour acheminer les équipements lourds dans la zone de test.

D'importants travaux de génie civil se sont achevés pour réparer le tunnel entre le PS et le SPS, tandis qu'en surface de grands travaux électriques se poursuivaient pour l'alimentation des aimants du SPS. Soixante-huit nouveaux transformateurs de 2,5 mégawatts et de 12 tonnes chacun sont venus remplacer l'ancien parc.

Lors d'une série de vérifications, des défauts ont été décelés sur trois aimants et sur l'absorbeur de faisceau. Ces éléments lourds et encombrants ont été remplacés en l'espace de seulement trois jours, au terme d'une complexe opération de logistique.

En aval de l'accélérateur, les lignes de transfert des faisceaux et leur tunnel vers la zone Nord ont été entièrement rénovés avec le remplacement de composants des lignes de faisceaux, des circuits d'eau pour la ventilation et de l'éclairage, le tout accompagné d'une grande campagne de câblage.

Le Décélérateur d'antimatière était lui aussi en chantier, avec un grand nombre de ses composants rénovés, consolidés ou remplacés. Une réparation d'urgence a été réalisée sur un élément essentiel, la corne magnétique, qui focalise les antiprotons produits par la cible. Le système de transmission de courant, qui transmet à la corne des impulsions électriques de 400 000 ampères, a été remplacé en un temps record après une période de tests sur un banc d'essai spécialement conçu.

Un cerveau dopé

Les travaux n'ont épargné aucun accélérateur, ni leur cerveau. Dans l'ensemble des injecteurs, 90 % des ordinateurs frontaux pour le contrôle ont été rénovés, dans le cadre d'un programme de cinq ans. Plus de 450 systèmes de contrôle en temps réels ont été changés et l'architecture logicielle et matérielle a été redéfinie. La remise en service des injecteurs, avec ces nouveaux systèmes, a été menée avec succès grâce à de nombreux essais menés entre janvier et août.

Les données des accélérateurs sont traitées par le centre informatique du Centre de contrôle du CERN (CCC), qui, avec 350 serveurs, est le deuxième centre de calcul du Laboratoire. Pour accroître sa puissance électrique et la capacité de

De nouveaux faisceaux pour la médecine

Depuis près de 25 ans, les équipes des accélérateurs du CERN contribuent au développement d'accélérateurs médicaux. Le projet MedAustron, qui a accéléré ses premiers faisceaux en 2014, est exemplaire des transferts de technologies de la physique fondamentale vers la médecine. MedAustron est un centre de recherche et de thérapie basé sur l'utilisation de faisceaux de hadrons, près de Vienne (Autriche). Il devrait accueillir ses premiers patients pour le traitement de tumeurs début 2016. Le CERN a beaucoup contribué au développement et à la construction du système d'accélération du centre équipé de trois sources d'ions, d'un pré-accélérateur linéaire et d'un synchrotron envoyant des faisceaux dans des chambres d'irradiation. Pendant cinq ans, des spécialistes du CERN ont aidé à mettre en place et formé l'équipe de scientifiques de MedAustron. Ensemble, ils ont conçu l'accélérateur et suivi la fabrication des composants. Les 300 aimants de 30 types différents ont été conçus, puis testés au CERN après leur production dans des sites européens. En 2014, les tout derniers aimants quittaient le CERN pour l'Autriche. Le contrôle des convertisseurs est également issu des technologies du CERN et le système de radiofréquence du synchrotron est le fruit d'un développement conjoint pour MedAustron et l'accélérateur PS Booster. L'ensemble du système d'accélération a été mis en service en 2014. Le 6 novembre, un faisceau de protons de 250 MeV parvenait à l'une des chambres d'irradiation. Un grand succès pour les équipes de MedAustron et du CERN qui poursuivront leur collaboration pour finaliser la mise en service de l'accélérateur médical en 2015.

Le synchrotron du centre de recherche médical et de thérapie MedAustron en Autriche a été développé dans le cadre d'une collaboration avec le CERN. (Thomas Kaestenbauer)



refroidissement, et pour assurer la redondance d'un système qui doit fonctionner sans arrêt, l'électricité et le refroidissement ont été repensés. Le nouveau système de refroidissement est redondant, tout comme la nouvelle sous-station électrique, dédiée à l'alimentation du CCC et de son centre informatique. Elle est dotée d'alimentations sans interruption et de génératrices diesel pour permettre des interventions sans interruption.

Le bout du tunnel

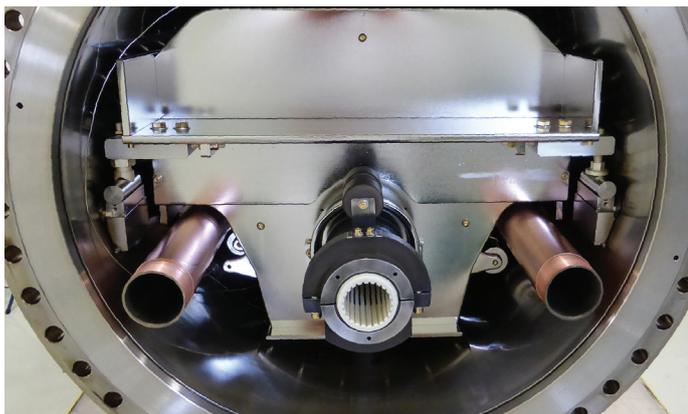
Tandis que les injecteurs se remettaient en marche, un travail de titan s'achevait dans le LHC. Pour faire circuler des faisceaux de 6,5 TeV d'énergie dans l'accélérateur, les 10 170 jonctions électriques entre les aimants doivent être équipées de dérivateurs de courant en cuivre (ou « *shunts* »), qui donnent un chemin de basse résistance au courant en cas de transition résistive. Pas moins de 27 000 *shunts* étaient à installer ! Il fallait en plus reconstruire 3 000 jonctions et installer 5 000 boîtiers isolants renforcés autour de chaque paire de jonctions. Les équipes ont achevé ce vaste chantier le 18 juin, refermant la dernière interconnexion. Près de 300 ingénieurs et techniciens du CERN, des entreprises contractantes et des instituts ont travaillé en deux rotations pendant 14 mois pour parvenir à cet impressionnant résultat. Entre autres statistiques, l'équivalent de 3,3 kilomètres de soudures ont été effectués pour refermer les interconnexions et aucun défaut n'a été relevé. Les travaux ont

été suivis de tests de pression et de tests d'assurance qualité électrique. Fin 2014, cinq des huit secteurs avaient subi ces premiers tests électriques, avant leur mise sous tension et leur qualification à l'énergie de 6,5 TeV.

Outre ces travaux, vingt nouveaux collimateurs, intégrant des moniteurs de position de faisceau, ont été installés. Les collimateurs nettoient le faisceau des particules qui s'éloignent de la trajectoire. Les boîtiers de distribution électrique assurant la transition du courant des câbles résistifs vers les câbles supraconducteurs ont été rénovés. Les huit aimants de déflexion rapide, qui aiguillent le faisceau des lignes de transfert du SPS vers le LHC, ont tous été améliorés et remis en service.

Hors du cœur des accélérateurs, les infrastructures ont aussi connu de grandes transformations, à l'instar du système de refroidissement et de ventilation. De nouvelles tours de refroidissement ont été installées sur trois points du LHC pour prendre le relais des tours principales en cas de maintenance.

Au terme de trois années de développement, le réseau de distribution électrique a été doté d'un tout nouveau système de supervision électrique. Son déploiement s'est apparenté à un travail de fourmi, car il gère 20 000 dispositifs électriques et de supervision, enregistre 250 000 mesures et compte 200 synoptiques. Le nouveau système, redondant, va inclure de nouveaux outils pour la simulation ou l'aide à la gestion des coupures électriques. Une panne inopinée du réseau électrique



Les aimants de déflexion rapide qui transfèrent les faisceaux du SPS vers le LHC ont été améliorés.
(OPEN-PHO-ACCEL-2014 – 007)

L'une des enceintes DTL (Linac à tubes de glissement) pour le Linac 4 en préparation au CERN, avant son installation.
(CERN-PHOTO-201404-087 – 1)

en octobre a permis de tester son efficacité. Le système a aidé les opérateurs à comprendre l'origine de la panne et à remettre rapidement le réseau en service, validant du même coup les outils et l'architecture.

Tous ces travaux ont nécessité un important effort de logistique et de manutention. En 2014, plus de 25 000 opérations ont été effectuées pour transporter et déplacer environ 200 000 tonnes de matériel, alors que les équipements de manutention étaient eux-mêmes rénovés. Le CERN compte, entre autres, 350 ponts roulants. Dix-huit d'entre eux ont été remplacés ou rénovés, et quatre nouveaux ponts roulants sont venus compléter le parc.

Alors que les faisceaux tournaient dans les injecteurs, la remise en service du LHC démarrait avec le refroidissement de l'accélérateur. Il faut 10 000 tonnes d'azote et 135 tonnes d'hélium pour refroidir à 1,9 kelvins (-271°C) les 36 000 tonnes de métal de l'accélérateur. C'est comme si on refroidissait cinq Tours Eiffel ! Au cours d'une impressionnante opération de logistique, 520 camions se sont relayés pour livrer l'azote et l'hélium. Les secteurs ont été d'abord refroidis à la température de 20 kelvins, puis maintenus à cette température quatre semaines pour permettre les nouveaux tests sur les circuits des aimants (voir encadré p. 20), avant d'entamer la plongée vers les 1,9 kelvins. Fin 2014, les huit secteurs étaient refroidis.

Qualifiés pour la haute énergie

Une fois les secteurs froids, la qualification pour une exploitation du LHC à 6,5 TeV pouvait débuter. Pour que l'accélérateur fonctionne à cette énergie, les courants circulant dans les aimants dipôles atteindront 11 080 ampères (contre 6 800 ampères lors de la première période d'exploitation). Comme des athlètes, les aimants dipôles sont « entraînés » à ces intensités : on augmente progressivement le courant dans les bobines des aimants. Les forces générées peuvent causer d'infimes déplacements, qui parfois provoquent des transitions résistives : les aimants passent alors subitement à l'état conducteur. Cette opération est répétée plusieurs fois dans chaque secteur jusqu'à ce qu'on ait atteint le courant nominal. Fin 2014, un

premier secteur était qualifié à 6,5 TeV, après 20 transitions résistives d'entraînement, l'estimation étant de 150 transitions résistives pour les huit secteurs du LHC. Pour tous les autres circuits alimentant à différents niveaux de courant les aimants de focalisation et de correction, ou l'instrumentation, la remise en service a commencé. Ce sont 1 600 circuits qu'il faut vérifier et réalimenter.

Un autre accélérateur fêtait le retour du faisceau en 2014. Le 5 août, le nouvel accélérateur linéaire Linac 4 portait un faisceau à une énergie de 12 MeV, qualifiant ainsi le troisième élément de sa chaîne d'accélération. Le Linac 4, qui prendra le relais de l'actuel Linac 2 en 2020, compte quatre types de structures accélératrices. Il délivrera des faisceaux à une énergie de 160 MeV, contre 50 MeV actuellement. Après avoir mis en place les deux premiers éléments de la ligne d'accélération en 2013, les équipes ont installé une enceinte DTL (*Drift tube Linac*, Linac à tubes de glissement) et la plupart des structures CCDTL (*Cell-Coupled Drift Tube Linac*, Linac à tubes de glissement à cavités couplées). La qualification, dès les premiers essais, de la première enceinte DTL, le 5 août, a été accueillie avec enthousiasme car ces structures reposent sur une conception novatrice. Par ailleurs, la nouvelle source d'ions a été testée au courant requis. Des composants de la ligne qui transférera les ions vers le Booster du PS ont été installés. La difficulté de mise au point de ces équipements tient au fait que le Linac 4 accélérera des ions hydrogène négatifs (un proton entouré de deux électrons) à la place des protons. Les dernières structures accélératrices (PIMS, structures Pi-Mode) sont en construction. L'objectif est de mettre en service le Linac 4 avec du faisceau en 2016, avant de le connecter à la chaîne d'accélération en 2018. Pour que le PS Booster puisse recevoir les nouveaux faisceaux, de nouveaux équipements d'injection sont en préparation.

Les projets se matérialisent

À quelques mètres de là, ELENA (*Extra Low ENergy Antiproton ring*), sort de terre. Cet anneau de décélération de 30 mètres de circonférence sera mis en service en 2016 et exploité pour



L'assemblage des premières cavités supraconductrices de HIE-ISOLDE a commencé dans une toute nouvelle salle blanche. (OPEN-PHO-ACCEL-2015 – 004)



Un bobinage niobium-étain pour un prototype d'aimant dipôle à 11 teslas pour le projet de LHC à haute luminosité. (CERN-GE-1310248 – 02)

la physique en 2017. Il améliorera l'efficacité du Décélérateur d'antiprotons (AD) en ralentissant encore davantage les antiprotons pour les expériences sur l'antimatière. Le nouveau bâtiment a été achevé. Les générateurs des « kickers » de l'AD y ont été déplacés de manière à libérer de l'espace dans le hall qui abritera le futur décélérateur. Le rapport de conception technique a été publié au printemps. De nombreuses améliorations techniques ont été apportées pour optimiser la machine et les performances. Les travaux sur les lignes d'extraction de l'AD ont démarré, avec le remplacement des quadripôles. La construction des équipements d'ELENA a été lancée.

L'installation de physique nucléaire ISOLDE du CERN produira bientôt des ions radioactifs à de plus hautes énergies. Le nouvel accélérateur HIE-ISOLDE (ISOLDE à haute énergie et haute luminosité) portera à terme l'énergie des faisceaux de 3 MeV par nucléon à 10 à 15 MeV par nucléon et quadruplera leur intensité. Les travaux d'installation de cet accélérateur linéaire supraconducteur de 16 mètres de long ont progressé. La station de cryogénie, en partie héritée d'une ancienne expérience, a été rénovée puis installée. L'accélérateur sera formé à terme de six cryomodules contenant chacun cinq cavités supraconductrices. Douze cavités ont été produites et sont en cours d'assemblage dans une nouvelle salle blanche. Le premier tronçon de la ligne de transfert vers les expériences a été testé. HIE-ISOLDE sera mis en service en plusieurs phases. Au cours de la première, prévue fin 2015, un cryomodule accélérera les faisceaux jusqu'à une énergie de 4,3 MeV par nucléon.

Les travaux de génie civil ont débuté pour le projet AWAKE (*Advanced Wakefield Experiment*), qui doit recevoir ses premiers faisceaux du SPS en 2016. AWAKE étudiera le principe d'accélération à l'aide de champs de sillage dans des cellules de plasma. Ce principe, déjà établi avec des électrons, sera testé avec des protons, le but étant de parvenir à des gradients accélérateurs des centaines de fois plus élevés que ceux des cavités radiofréquence actuelles. AWAKE sera installé dans le tunnel qui abritait l'installation pour les neutrinos CNGS. Les derniers 100 mètres de la ligne de faisceau de CNGS ont été enlevés et un mur de blindage a été construit. Deux tunnels

ont été excavés, l'un pour contenir le faisceau laser (qui ionise le plasma), et l'autre pour accueillir la source et le faisceau d'électrons (le « faisceau témoin » qui sera accéléré par le plasma). Les études sur les lignes d'électrons, de protons et du laser ont bien avancé. Un prototype de cellule plasma de 3 mètres est à l'étude à l'Institut Max Planck de Munich.

Haute luminosité assurée

Le CERN donne un coup d'accélérateur à son grand projet pour les 20 ans à venir, le LHC à haute luminosité (HL-LHC). Déclaré projet prioritaire en 2013 dans la stratégie européenne pour la physique des particules, il a été inscrit dans le plan à moyen terme du Laboratoire. Cette nouvelle machine, qui devrait entrer en service après 2025, augmentera le nombre de collisions d'un facteur 5 à 10 pour atteindre une luminosité de 250 femtobarns inverses (fb^{-1}) par an. Pour cela, de nouveaux équipements seront installés dans l'accélérateur. Le projet, lancé en 2011 dans le cadre d'un programme financé entre autres par l'Union européenne et des instituts d'Europe, des États-Unis, de la Fédération de Russie et du Japon, repose sur le développement d'aimants quadripôles plus puissants pour concentrer les faisceaux avant les collisions et de cavités radiofréquence dites « en crabe » pour les orienter, d'aimants dipôles plus courts et puissants, d'un système de collimation amélioré et de liaisons électriques supraconductrices.

Les nouveaux aimants supraconducteurs, formés d'un composé niobium-étain, sont développés dans le cadre d'une collaboration entre le CERN et l'étude *US LHC Accelerator Research Program* (LARP), rassemblant quatre laboratoires des États-Unis. Une étape importante a été franchie par le partenariat LARP avec un aimant quadripôle à large ouverture qui a démontré un champ magnétique supérieur à 12 teslas. Deux prototypes courts d'aimant supraconducteur dipôle ont atteint 11 teslas à Fermilab et au CERN. Un groupe d'experts internationaux a porté son choix sur deux prototypes de cavités en crabe. L'architecture des systèmes de collimation a été finalisée. Avec l'augmentation de la luminosité, certains

convertisseurs de puissance seront repositionnés en surface et reliés par des câbles supraconducteurs de plusieurs dizaines de mètres de long. Un nouveau record de courant a été battu grâce à un câble supraconducteur formé de diborure de magnésium et fonctionnant à 24 kelvins. Un courant supérieur à 20 000 ampères a été transporté sur 20 mètres.

Le succès du LHC à haute luminosité dépend aussi de la chaîne d'injecteurs. Le projet LIU (Amélioration des injecteurs du LHC) a pour objectif de préparer les injecteurs à l'exploitation du LHC à haute luminosité. Le projet LIU et le projet HL-LHC ont défini de concert les paramètres des faisceaux de tous les accélérateurs. Cinq cavités accélératrices radiofréquence supplémentaires utilisant la technologie FineMet®, plus performante aux hautes intensités, ont été installées dans le Booster du PS et sont testées depuis le retour du faisceau. La technologie FineMet® fait appel à un matériau composite magnétique à la place des ferrites utilisées traditionnellement et présente l'avantage d'offrir une large bande passante. Ces essais permettront de décider du remplacement complet du système RF du Booster du PS par cette technologie. Une cavité FineMet® a également été installée dans le PS pour évaluer sa capacité à stabiliser les faisceaux. L'accélérateur a par ailleurs fait l'objet d'études sur les effets de « charge d'espace » : à basse énergie les particules de même charge électrique ont tendance à se repousser, limitant la densité du faisceau et donc la luminosité. Des études ont été menées dans le SPS sur le phénomène de nuages d'électrons (voir p. 15) mais également sur les composants des tubes à vide susceptibles de rendre le faisceau instable. Un groupe de travail a été mis en place pour étudier une amélioration de leur conception. La construction de nouveaux équipements a commencé, notamment de nouveaux outils d'instrumentation de faisceau pour le PS et de nouveaux amplificateurs de puissance pour le système radiofréquence du SPS, qui seront installés dans le tout nouveau bâtiment situé sur le site de Prévessin.

L'avenir s'esquisse

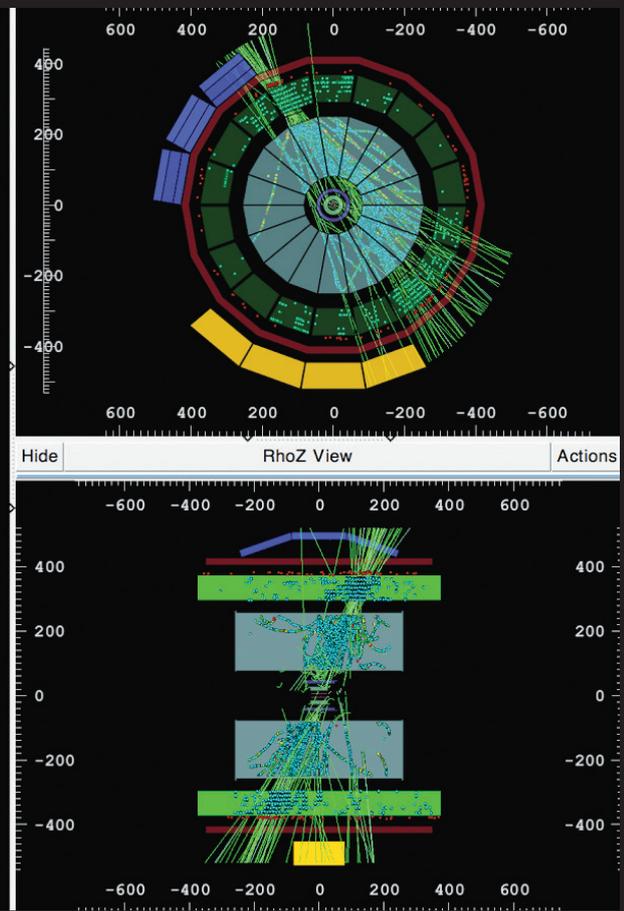
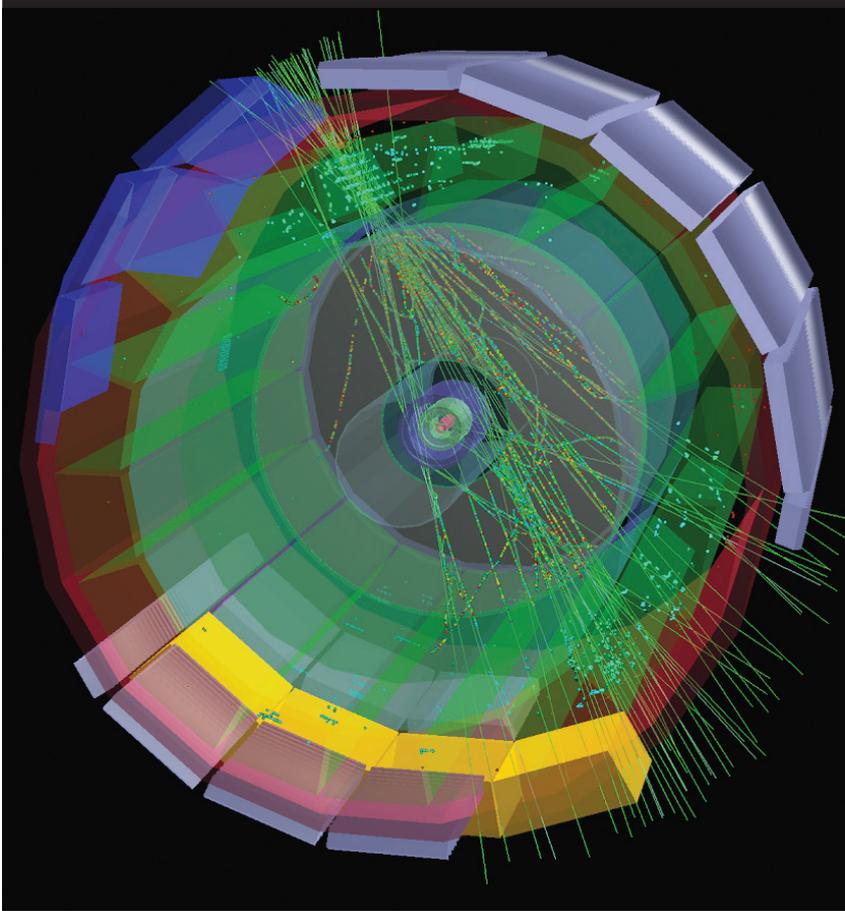
Au-delà du LHC à haute luminosité, le CERN ouvre les pistes pour l'avenir à très long terme de la physique des particules. L'étude sur un futur collisionneur circulaire (étude FCC) a été officiellement lancée en 2014. Elle concerne un collisionneur

de hadrons d'une énergie de collision de 100 TeV qui serait installé dans un nouveau tunnel de 80 à 100 kilomètres de circonférence. L'étude inclurait la possibilité d'un collisionneur de leptons comme étape intermédiaire, ainsi qu'une option de collisionneur lepton-hadron. Elle porterait également sur un LHC à haute énergie nécessitant l'installation d'aimants générant des champs magnétiques de 16 à 20 teslas dans le tunnel actuel. En février, la conférence de lancement de l'étude FCC a attiré environ 350 participants de 127 instituts, universités et entreprises de 23 pays. La gouvernance du projet a été mise en place avec la création d'un groupe de coordination d'experts internationaux et la constitution d'un comité international de collaboration. Fin 2014, la collaboration FCC comptait 43 instituts dans 19 pays, d'autres accords étant en préparation. Les premières études sur le potentiel de physique et les paramètres techniques ont démarré et les technologies-clés ont été identifiées. Une étude de la géologie de la région lémanique a démarré, utilisant notamment un nouveau logiciel qui permet de définir l'emplacement optimal d'un tunnel. Un programme de recherche et développement est en cours de préparation. L'objectif est de publier une étude de conception en 2018.

L'étude FCC est complémentaire de celle sur le CLIC, qui constitue une autre option pour un accélérateur du futur. Le CLIC (Collisionneur linéaire compact) est basé sur un concept novateur d'accélération à deux faisceaux. La collaboration CLIC compte 50 instituts dans 25 pays. En 2014, les études se sont poursuivies pour optimiser les coûts et les performances, en se focalisant sur une construction en trois étapes pour atteindre des énergies de collision de 380 GeV au cours de la première, puis 1,5 TeV et enfin 3 TeV. Le premier module complet d'accélération, mesurant 2 mètres, a été installé pour démarrer des essais en 2015. Fin 2014, trois installations de tests des klystrons étaient opérationnelles. Les travaux se sont poursuivis dans les instituts partenaires sur l'instrumentation, les aimants, les études de vide, les systèmes de contrôle, d'alignement et de stabilisation. CLIC commence par ailleurs à essayer en dehors de la physique des particules : les structures d'accélération à haut gradient intéressent des partenaires pour des accélérateurs compacts pour lasers à électrons libres.

La protection du LHC à l'épreuve du courant

Une machine plus puissante et sûre. Suivant cette maxime, les équipes du LHC ont réalisé de nombreux essais dès la fin des travaux. Un test innovant a été développé pour qualifier le système de protection contre les transitions résistives. Lorsqu'un aimant du LHC, qui transporte des courants d'intensités jusqu'à 11 080 ampères, perd son état supraconducteur, à cause d'une instabilité par exemple, le courant est immédiatement dévié vers un circuit parallèle, évitant un échauffement dévastateur dans l'aimant. Ce circuit est formé de diodes de puissance et de dérivateurs de courant nouvellement installés sur les jonctions électriques entre les aimants pour permettre au LHC de fonctionner à 6,5 TeV. Le nouveau test consiste à mettre à l'épreuve tous les circuits parallèles. Pour y parvenir, la température de l'hélium est maintenue à 20 kelvins afin que les câbles perdent leur état supraconducteur. Des courants d'intensités croissantes sont envoyés dans les circuits. Ils empruntent naturellement le réseau secondaire, testant la fiabilité des dérivateurs en cuivre et des diodes de protection des aimants. Si la moindre résistance est décelée dans ce circuit parallèle, le courant est immédiatement coupé. Fin 2014, tous les circuits des dipôles avaient passé les tests avec succès.



Représentation d'un événement du détecteur ALICE, doté de nouveaux éléments durant le LS1, montrant une gerbe de particules produites par un muon cosmique de haute énergie. (Collaboration ALICE)

Physique et expériences

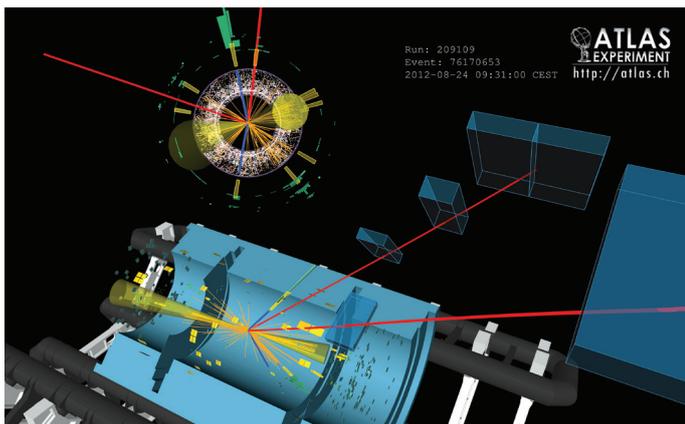
Pour la plupart des expériences, 2014 a été marquée par les dernières étapes du long arrêt technique et la préparation, à l'automne, du redémarrage progressif du complexe d'accélérateurs, avec le retour des faisceaux partout sauf dans le LHC. Certaines équipes ont mené des travaux intensifs de rénovation et d'amélioration et d'autres ont continué à analyser les données collectées auparavant. Les collaborations LHC avaient encore beaucoup de données à analyser et ont pu présenter de nombreux résultats finaux à partir des données de la première période d'exploitation.

ALICE : la matière la plus chaude

La collaboration ALICE étudie, par des mesures de précision, comment l'organisation des quarks dans la matière influe sur le comportement de celle-ci dans les conditions extrêmes de température qui prévalaient dans l'Univers primordial. ALICE avait déjà établi que la matière créée dans les collisions d'ions lourds au LHC présentait les caractéristiques d'un liquide

« parfait », résultat consolidé par les analyses effectuées en 2014 sur la totalité des données issues de la première exploitation. Le passage d'une phase où les constituants fondamentaux (les « partons ») se déplacent librement à l'état ordinaire de la matière, constituée de hadrons, est décrit de façon satisfaisante par les équations de l'hydrodynamique. L'état hadronique final mesuré concorde avec un modèle statistique dans lequel les hadrons émergent d'un « bain » chaud à 155 MeV, bien que certains éléments restent inexpliqués.

Mais comment décrire cette phase partonique, aussi appelée plasma quark-gluon ? Pour étudier l'hypothèse de hadrons produits par la coalescence de quarks dans le plasma, ALICE a comparé les spectres des protons (constitués de trois quarks) et des mésons phi (de même masse, mais constitués d'une paire quark-antiquark). Le modèle de coalescence ne prédit pas les résultats observés et ne résout pas le problème de la composition du plasma quark-gluon. Toutefois, le fait que le J/psi (état lié d'un quark c et d'un antiquark c) peut être régénéré



Représentation d'un événement candidat à la désintégration d'un boson de Higgs en deux électrons et deux muons, accompagné de deux jets de particules à petits angles. (Collaboration ATLAS)

dans le plasma quark-gluon semble indiquer la présence de quarks c non confinés. Pour explorer cette voie, ALICE étudie la production de jets de particules, qui permettent de sonder le plasma avec une meilleure résolution. D'après l'analyse des données acquises lors de la première exploitation, on peut attendre des mesures de précision futures qu'elles nous éclairent sur la nature du plasma.

L'analyse des données en 2014 était principalement axée sur la question de savoir si une gouttelette de plasma quark-gluon peut être produite dans de petits systèmes. La question est venue de l'observation inattendue d'une production de nombreuses particules dans les collisions proton-plomb. En effet, on retrouve dans ces collisions à haute multiplicité la plupart des caractéristiques de la dynamique collective du plasma quark-gluon. De même, une « structure en crête », considérée dans les collisions Pb-Pb comme une signature d'un comportement collectif, a été observée dans des collisions proton-proton à haute multiplicité, fait qui pourrait avoir plusieurs interprétations. ALICE a mesuré un ensemble d'observables qui, dans les collisions proton-plomb centrales, peuvent être décrits de façon satisfaisante par la dynamique collective d'un système en équilibre. En particulier, la composition de l'état hadronique final (étant donné le taux de production des différents hadrons) correspond aux prédictions du modèle statistique. Les valeurs mesurées du flux radial et elliptique des hadrons à faible impulsion transversale, ainsi que la dimension du système hadronique au stade où les hadrons cessent d'interagir, correspondent à un système en expansion collective. D'autres mesures ont montré que les indices d'un comportement collectif observés dans les collisions p-p et p-Pb augmentent avec la multiplicité, s'approchant des valeurs mesurées dans les collisions Pb-Pb. Toutes ces observations ont été possibles grâce au développement par ALICE d'une nouvelle méthode permettant de déterminer la centralité dans les collisions proton-noyau.

Une question demeure, toutefois : pourquoi le phénomène

d'atténuation des jets, universellement observé dans les collisions d'ions lourds, semble-t-il absent des collisions centrales proton-plomb ?

L'expérience ALICE a fait l'objet pendant le LS1 d'un programme intensif visant à améliorer les systèmes et à préparer l'accroissement de luminosité prévu lors de la deuxième exploitation.

Les cinq super-modules du détecteur à rayonnement de transition encore manquants ont été installés. Un nouveau calorimètre di-jet a été installé, dos à dos avec le calorimètre électromagnétique existant, pour accroître la zone de couverture du détecteur, et un module supplémentaire a été ajouté au spectromètre à photons. Un nouvel élément, le détecteur à diffraction d'ALICE, a également été installé. Celui-ci consiste en deux doubles couches de compteurs de gerbes placés à distance de la région d'interaction, dans la caverne d'ALICE, à 16 m du point de collision, et dans le tunnel du LHC, à 19 m dans la direction opposée. Le mélange de gaz (90 % néon – 10 % CO_2) dans la chambre à projection temporelle d'ALICE a été remplacé par un mélange argon- CO_2 dans les mêmes proportions, afin d'avoir une réponse plus stable dans des flux de particules élevés sans dégradation significative de la résolution de la mesure de l'impulsion pour des impulsions transversales faibles. L'électronique de lecture de tous les systèmes du détecteur a été adaptée pour fonctionner à une vitesse accrue. Cette amélioration, s'ajoutant à une rénovation complète des systèmes informatiques pour l'acquisition de données et le déclenchement de haut niveau, permettra à ALICE d'exploiter pleinement les collisions Pb-Pb à pas moins de 10 kHz lors de l'exploitation 2 du LHC.

À plus long terme, et en particulier pour le programme HL-LHC (voir p. 19), un ambitieux programme d'amélioration a été lancé. Il s'agit de renforcer substantiellement la performance des systèmes du détecteur pour les secteurs charme et beauté, et de préparer les luminosités élevées à venir, qui nécessiteront des vitesses de lecture allant jusqu'à 50 kHz pour les collisions

Travailler ensemble

En 2014, les expériences LHC ont travaillé ensemble étroitement dans des domaines essentiels de la physique, afin de combiner leurs analyses et d'améliorer ainsi la précision de leurs mesures. En particulier, les équipes d'ATLAS et de CMS ont pu calculer la masse du boson de Higgs avec une précision inégalée.

Autre fait marquant : la combinaison des mesures faites par CMS et LHCb des désintégrations en muons de deux mésons B neutres, $B_s^0 \rightarrow \mu\mu$ et $B^0 \rightarrow \mu\mu$. Ces particules apparentées sont constituées d'un quark b lié à un quark s, dans B_s^0 , ou à un quark d, dans B^0 . Il s'agit d'une piste formidable dans la recherche d'une nouvelle physique, car ces deux désintégrations subissent une importante réduction dans le Modèle standard. La chasse aux légers écarts par rapport aux prédictions continue.

Les collaborations CMS et TOTEM ont effectué ensemble l'analyse de particules chargées produites lors de collisions p-p, ouvrant ainsi la voie à de futures mesures conjointes.

Pb-Pb. En 2014, le Comité des expériences LHC a approuvé deux rapports de conception technique, l'un pour un nouveau trajectographe interne et l'autre pour une nouvelle électronique. D'autres études, relatives à un nouveau trajectographe aux petits angles pour les muons, à l'amélioration de la chambre à projection temporelle et à un nouveau système informatique en direct et en différé seront soumises pour approbation en 2015.

ATLAS : nombreux résultats

Le principal objectif d'ATLAS était d'extraire le maximum d'informations possible des données collectées lors de l'exploitation 1 du LHC, avant le lancement de l'exploitation 2 en 2015. Après avoir établi les principales propriétés du boson de Higgs et observé ses couplages bosoniques et fermioniques en 2013, l'expérience a pu obtenir de nouvelles mesures des deux voies de désintégration en deux photons et quatre leptons chargés (voir figure p. 22). Ces mesures ont permis de préciser la masse du boson de Higgs et ses couplages, et de mieux comprendre les divers mécanismes de production du boson dans les collisions p-p. ATLAS a également établi l'existence de la désintégration du boson de Higgs en deux bosons W et mesuré l'intensité du signal correspondant avec une précision d'environ 20 % – avancée importante dans la connaissance des propriétés de la particule. Ces travaux n'ont pour l'instant montré aucun écart par rapport aux prédictions du Modèle standard.

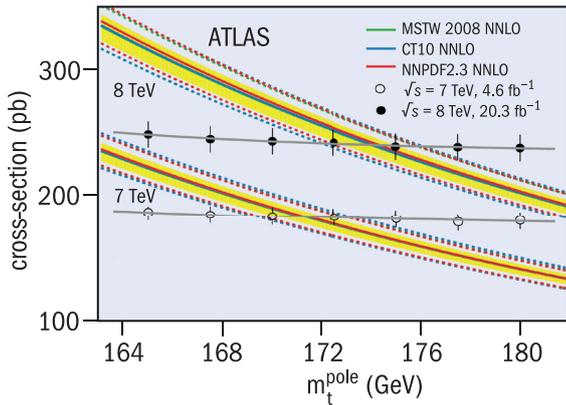
Des études approfondies du Modèle standard se sont poursuivies en 2014, avec de nombreux résultats, notamment les mesures les plus précises à ce jour du taux de production de quarks top, avec une incertitude d'environ 4 % seulement. Ces résultats, qui concordent bien avec les prédictions théoriques, peuvent être utilisés pour établir avec une grande précision la masse du quark top (voir figure p. 24) et pour fixer des limites à la production supplémentaire de quarks top par des processus liés à la physique hors Modèle standard, tels que la supersymétrie.

Mesurer les couplages des bosons W et Z entre eux permet de mettre à l'épreuve le modèle électrofaible sous-jacent, qui peut révéler des couplages anormaux et ainsi indiquer une nouvelle physique. Les processus correspondants sont toutefois extrêmement rares et leur observation n'a pu être possible que récemment, grâce à l'énergie dans le centre de masse et la luminosité élevées offertes par le LHC. ATLAS a mis en évidence la contribution purement électrofaible à la production d'un boson Z et de deux jets de particules, incluant le processus de fusion de bosons faibles, $WW \rightarrow Z$. Ces résultats concordent bien avec le Modèle standard.

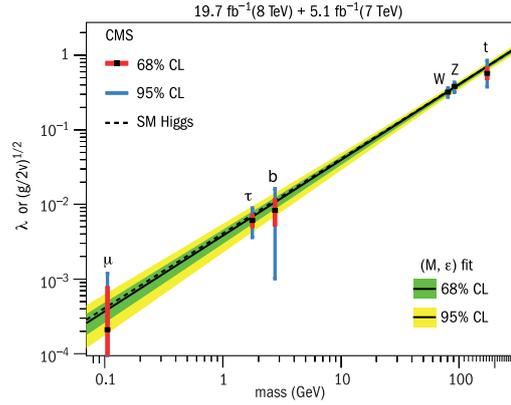
Parmi les nombreux autres résultats obtenus par ATLAS en 2014, on citera le taux de production de bosons W en combinaison avec des jets et une détermination plus précise de la probabilité totale des interactions p-p à l'énergie de l'exploitation 1 du LHC, au moyen des détecteurs ALFA dans ATLAS. À noter également de nouveaux résultats sur les collisions protons-ions, où l'étude de la production de jets permet de mieux comprendre la géométrie de ce type de collisions.

La recherche de nouvelles particules ou de nouveaux phénomènes s'est poursuivie sans relâche. ATLAS a approfondi son étude de la supersymétrie en recherchant des événements comptant deux ou trois leptons, associés à une énergie manquante, susceptibles d'indiquer une particule supersymétrique non détectée. Dans les deux cas, aucun écart notable par rapport au Modèle standard n'a été constaté. Ce résultat peut être utilisé pour fixer de nouvelles limites concernant la supersymétrie. De nombreuses autres études ont recherché de nouvelles particules dans divers scénarios, mais aucun indice de nouvelle physique n'a été détecté, ce qui limite fortement les modèles prédisant des particules ou phénomènes exotiques.

L'année a aussi été marquée par l'achèvement du programme intensif de maintenance, de consolidation et d'amélioration du détecteur entrepris pendant le LS1, avec en fin d'année une mise en service complète de tous les éléments en vue



Mesures réalisées par ATLAS de la probabilité de la production de paires de tops (section efficace) pour des énergies dans le centre de masse de 7 et 8 TeV, par rapport aux prédictions théoriques de la chromodynamique quantique en fonction de la masse du quark top.



Mesures effectuées par CMS montrant la manière dont le couplage du boson de Higgs avec d'autres particules augmente en fonction de la masse de celles-ci.

de l'exploitation 2 du LHC. La couche b insérable (IBL) a été installée à l'intérieur du détecteur à pixels, renforçant la capacité d'identifier et d'« étiqueter » les quarks lourds dans les jets denses de particules. Plusieurs séquences de mise en service au fil de l'année ont permis de réintégrer tous les éléments d'ATLAS et de commencer à s'entraîner à la prise de données à 100 kHz au niveau du premier déclenchement, contre 75 kHz pendant l'exploitation 1. De nouvelles fonctions ont été ajoutées à ce niveau, notamment la possibilité de sélectionner des événements dès ce stade selon leur topologie. Des améliorations majeures ont été apportées aux logiciels en différé ; la vitesse de reconstitution des événements a ainsi été accrue d'un facteur trois, ce qui permettra de profiter pleinement de la performance accrue du LHC après le LS1.

CMS : haute précision

L'une des principales priorités du programme de physique est l'étude détaillée du boson de Higgs, qui a beaucoup progressé en 2014, avec l'achèvement de l'analyse des données de la première exploitation et des analyses combinées visant à atteindre une plus grande précision. Après la publication de résultats sur les principaux canaux de désintégration du Higgs, une étape majeure a été franchie avec la mise en évidence de désintégrations en leptons tau et en quarks b, indice fort de l'existence de désintégrations fermioniques. À signaler également le calcul d'une nouvelle limite pour la largeur du Higgs, améliorée de plus de deux ordres de grandeur par rapport à la valeur précédente. D'autres études ont confirmé les prédictions du Modèle standard sur l'augmentation d'intensité du couplage du boson de Higgs avec d'autres particules en fonction de leur masse (voir figure en haut à droite).

Les premiers résultats combinés sur le Higgs présentés par CMS intégraient les données des principaux canaux analysés avec la totalité des données de la première période d'exploitation. La recherche de bosons de Higgs produits en association avec des quarks top, combinée à d'autres analyses, a révélé un écart

intéressant d'environ 2σ par rapport aux prédictions du Modèle standard, ce qui ouvre des perspectives de gains de sensibilité ultérieurement. CMS a également poussé sa recherche de bosons de Higgs jusqu'à l'échelle du téraélectronvolt. En combinant toutes les études menées, CMS interprète les données pour ces masses élevées dans le contexte de modèles intégrant la nouvelle physique et définit des limites pour les découvertes potentielles.

La recherche « classique » de particules supersymétriques et de matière noire se poursuit, mais CMS utilise aussi le boson de Higgs comme « éclairateur » pour explorer une nouvelle physique. On a pu ainsi définir plusieurs limites d'exclusion, sans trouver d'indices de l'existence de la matière noire ou d'autres particules nouvelles. Plusieurs nouvelles analyses sont en cours pour étudier les points inexplorés.

Les mesures de haute précision de la physique du Modèle standard ont débouché sur des résultats exceptionnels, notamment sur le quark top, la plus lourde des particules élémentaires. La combinaison des résultats obtenus par le LHC et par le Tevatron (Fermilab) avait permis de fixer une moyenne internationale pour la masse du top, rapidement détrônée par une nouvelle mesure de CMS, encore plus précise.

De nombreux résultats de physique des ions lourds ont été annoncés par la collaboration CMS, qui en a rendu compte lors de la conférence *Quark Matter 2014*.

Deux vastes opérations ont été menées par la collaboration CMS afin de se préparer au flux de données de la deuxième période d'exploitation. CSA14 (*Computing, Software and Analysis exercise*) a fourni aux équipes chargées du calcul, de l'informatique, de la validation et des analyses de physique de précieuses informations. PHYS14 a permis de prouver que les analyses de haute priorité étaient fin prêtées pour le premier fb^{-1} de données à venir.

Enfin, le travail de préparation d'une proposition technique pour le projet d'amélioration de CMS a bien avancé. On a ainsi démontré la nécessité de réaliser l'amélioration pour la phase 2,



CMS juste avant la fermeture de la structure. On peut voir le tube de faisceau et le nouveau système d'étanchéité environnementale. (CMS Collaboration)

en achevant les simulations du détecteur pour la phase 1 (compte tenu des hypothèses sur le vieillissement du détecteur), en évaluant les performances attendues du détecteur dans la phase 2, et en élargissant les objectifs de physique de manière à exploiter pleinement le potentiel du projet LHC haute luminosité (voir p. 19).

Les principaux objectifs du LS1 ont été atteints en 2014, certains avec de l'avance, ce qui a permis de résoudre des problèmes apparus pendant le long arrêt technique : le détecteur à pixels et le détecteur de pied de gerbe du calorimètre électromagnétique ont eu des défaillances imprévues qu'il a fallu corriger. Les principaux objectifs étaient d'installer un nouveau système d'étanchéité environnementale afin de faire fonctionner le trajectographe à une température beaucoup plus basse que lors de la première période d'exploitation (et ainsi prolonger sa durée de vie à des intensités de faisceau plus élevées), d'installer le tube de faisceau pour la phase 1 d'amélioration, et d'installer puis de mettre en service les chambres à muons afin de réaliser le projet initial. Le remplacement des photo-détecteurs dans la couche externe du calorimètre hadronique, a été réalisé en même temps que des améliorations majeures des infrastructures communes. Les systèmes de déclenchement et d'acquisition des données ont aussi été grandement améliorés pour tirer parti au mieux de l'énergie et de l'intensité élevées de la deuxième exploitation. D'autres opérations ont été menées, notamment des tests avec des rayons cosmiques.

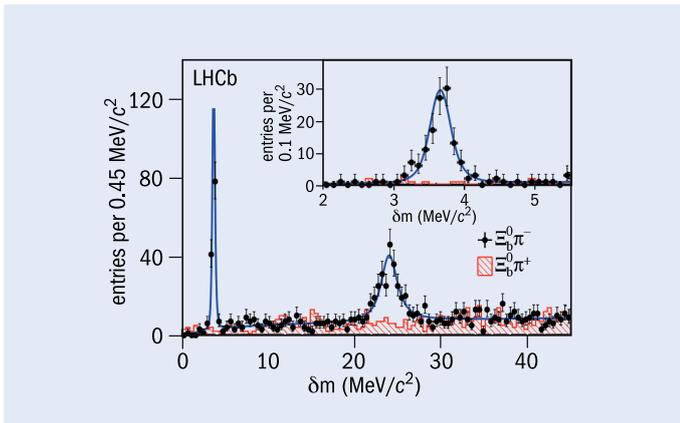
LHCb : beauté rare

L'expérience LHCb réalise des mesures précises de particules contenant des quarks beauté (b) ou charmés (c). Elle se concentre sur les désintégrations rares et sur la violation de CP (différence de comportement entre une particule et son antiparticule), phénomènes qui pourraient ouvrir la voie à une nouvelle physique via des effets quantiques. En 2014, la poursuite de l'analyse des données collectées pendant la première période d'exploitation a permis de bien avancer dans les mesures de référence.

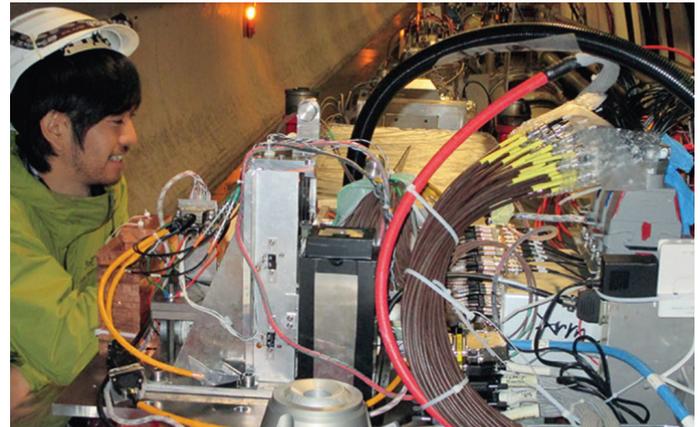
L'une des mesures les plus attendues concernaient l'analyse complète de φ_s , l'angle de violation de CP lié à l'interférence entre désintégration et mélange du méson B_s^0 avec son antiparticule. Ce résultat est très intéressant pour la recherche d'une nouvelle physique, la prédiction du Modèle standard pour φ_s étant très précise avec une valeur très faible, qui pourrait être augmentée par la nouvelle physique. La valeur $-0,010 \pm 0,039$ radians obtenue pour φ_s est la plus précise à ce jour et concorde bien avec le Modèle standard. Autre résultat marquant, la mesure précise de la phase γ , l'un des angles de la matrice de Cabibbo-Kobayashi-Maskawa, qui définit les interactions entre les six quarks du Modèle standard. C'est la première fois qu'une seule expérience obtient une précision inférieure à 10° .

La collaboration est aussi parvenue à mesurer R_K , le rapport de probabilité de désintégration d'un méson B^+ en $K^+\mu^+\mu^-$ ou en $K^+e^+e^-$. Ces désintégrations très rares se produisent deux fois sur 10 millions de collisions (2×10^{-7}), lorsqu'un quark b se transforme en quark s ($b \rightarrow s$), processus extrêmement sensible aux effets des particules existant uniquement au-delà du Modèle standard. D'après le Modèle standard, ce rapport devrait être très proche de 1 en raison du principe d'universalité leptonique, qui veut que les électrons (e) et les muons (μ) se comportent de façon identique. Les mesures de LHCb montrent que R_K est différent de 1 avec un niveau de signification de $2,6 \sigma$. Ce résultat, s'il est confirmé, pourrait être l'indice d'interactions leptoniques non universelles. La désintégration $B \rightarrow K^0 \mu^+\mu^-$, autre processus $b \rightarrow s$, montre elle aussi un écart marqué entre les mesures de la variable angulaire P_5' et les prédictions du Modèle standard, ce qui donne lieu à d'intenses débats au sein de la communauté de la physique des particules.

Le grand nombre d'échantillons de désintégrations collecté a permis d'étudier de manière approfondie les particules produites par différents canaux de désintégration. Par exemple, la collaboration LHCb a publié des résultats démontrant sans ambiguïté, pour la première fois, que certains hadrons, dans ce cas le Z(4430), ont une nature exotique qui ne s'intègre pas dans la version la plus simple du modèle des quarks.



Mise en évidence par LHCb de deux nouvelles particules, Ξ_b^- (premier pic) et Ξ_b^0 (deuxième pic), observées par leur désintégration en $\Xi_b^0 \pi^+$ et $\Xi_b^- \pi^+$. δm est la différence entre la masse de la paire $\Xi_b^0 \pi^+$ et la somme des masses individuelles de Ξ_b^0 et de π^+ .



Le détecteur Arm1 de LHCf. (T. Sako)

Elle a également montré qu'une structure $\bar{D}^0 K^-$ avec une masse de 2 860 MeV est composée de deux résonances, l'une avec un spin 1 et l'autre avec un spin 3. Cette observation d'une particule de spin 3 contenant des quarks lourds est inédite et devrait apporter d'autres enseignements dans le domaine de la spectroscopie des hadrons.

Autre résultat intéressant, la découverte de deux nouvelles particules, Ξ_b^- et Ξ_b^0 . Prédites par le modèle des quarks, ce sont des baryons contenant trois quarks (b, s et d). Leur observation et la mesure extrêmement précise de leurs propriétés permettent à LHCb de tester de manière rigoureuse des modèles de chromodynamique quantique à basse énergie.

Le programme visant à mesurer les sections efficaces est facilité par le remarquable étalonnage de la luminosité effectué par l'expérience. La luminosité a été mesurée avec une précision relative de 1,12 %, soit la meilleure jamais obtenue au LHC et dans un collisionneur de hadrons utilisant des faisceaux à paquets. Début 2013, LHCb a collecté des données lors d'une exploitation avec des ions plomb, et observé pour la première fois la production de bosons Z dans des collisions proton-plomb, pour une énergie dans le centre de masse de 5 TeV par paire de proton-nucléon.

L'amélioration de LHCb a été approuvée et sera réalisée au cours du deuxième long arrêt du LHC. Elle permettra d'augmenter d'un ordre de grandeur la capacité d'acquisition de données de l'expérience. En 2014, LHCb a choisi la technologie destinée aux trois unités de trajectographie situées derrière l'aimant, ouvrant ainsi la voie à la construction d'un trajectographe à fibres complet.

LHCf

L'expérience LHCf (*Large Hadron Collider forward*) étudie les particules neutres émises au point de collision à un angle presque nul par rapport à la ligne des faisceaux. Ces interactions « à petits angles » sont importantes pour comprendre ce qui arrive lorsque des rayons cosmiques de haute énergie entrent en collision avec

l'atmosphère. La collaboration a publié des résultats sur les pions neutres, obtenus lors de l'exploitation proton-plomb en 2014. Elle a également achevé l'amélioration des détecteurs du point de vue de la résistance aux rayonnements. Ces nouveaux détecteurs ont été testés au SPS en octobre, avant d'être installés à 140 m de part et d'autre du point de collision d'ATLAS. LHCf et ATLAS ont commencé à réfléchir à une mise en commun de la collecte et de l'analyse de données pour l'étude de la production de particules à petits angles.

MoEDAL

L'expérience MoEDAL (*Monopole and Exotics Detector At the LHC*) est conçue pour la recherche de particules hautement ionisantes révélatrices d'une nouvelle physique, comme des monopôles magnétiques ou des particules chargées massives à longue durée de vie. L'année 2014 a été fructueuse pour la collaboration avec notamment la publication d'un programme de physique décrivant plus de 30 scénarios de découvertes possibles. Le détecteur innovant de MoEDAL a été installé durant l'hiver 2014 pour une prise de données en 2015. Constitué majoritairement de dispositifs passifs, MoEDAL regroupe sur 100 m² des détecteurs de traces nucléaires en plastique agissant comme une pellicule photo sensible à la nouvelle physique. En outre, le dispositif de piégeage de 1 tonne pourra capturer les particules fortement ionisantes révélatrices d'une physique au-delà du Modèle standard. Le niveau de rayonnement est surveillé par un système de détecteurs à pixels TimePix en temps réel, à la pointe de la technologie.

TOTEM

Située comme CMS au point 5 du LHC, l'expérience TOTEM a pour mission de réaliser, au plus près des faisceaux du LHC, des mesures précises de particules produites à très petits angles lors des collisions. En 2014, l'analyse des données collectées pendant des cycles d'exploitation spéciaux en 2012 a mis en évidence pour la première fois un comportement non exponentiel



Au point 8, Becky Parker (au centre), enseignante, aux côtés de deux anciens élèves de la *Simon Langton Grammar School for Boys*, qui ont rejoint la collaboration MoEDAL en 2014. (CERN-GE-1311279 – 11)



Installation du dernier module du trajectographe à pailles, pesant près de 5 tonnes, dans NA62. (CERN-PHOTO-201409-176 – 4)

dans la diffusion élastique proton-proton pour une énergie dans le centre de masse de 8 TeV.

En vue de la deuxième période d'exploitation, des travaux de consolidation et d'amélioration ont été menés sur les pots romains, dispositifs cylindriques permettant de disposer les détecteurs au plus près du faisceau. De nouveaux pots destinés à recevoir des détecteurs de temps de vol de haute précision pour une exploitation à haute luminosité ont été ajoutés. La collaboration a élaboré une proposition d'amélioration et un rapport technique de conception concernant les mesures du temps de vol. Elle a également présenté un rapport technique de conception conjoint avec CMS. Ces documents, avalisés par le Comité LHC, décrivent les travaux de consolidation et d'amélioration devant être menés pour répondre aux objectifs de physique de la deuxième période d'exploitation.

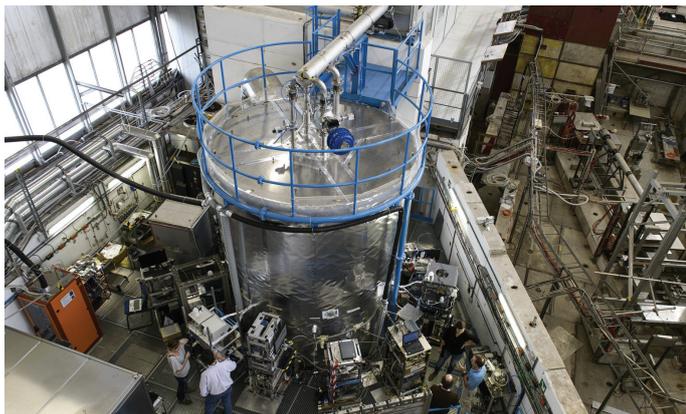
Faisceaux du SPS

En octobre, après le LS1, le SPS a recommencé à fournir des protons aux expériences de la zone Nord, sur le site de Préveressin. L'expérience COMPASS (NA58) a achevé ses préparatifs pour sa collecte de données en 2015. Elle étudiera l'impact d'un faisceau de pions de 190 GeV sur une cible d'ammoniac polarisée transversalement. L'objectif est de mesurer pour la première fois les effets de la polarisation des protons de la cible sur la production de paires de muons dans la réaction $\pi^+p \rightarrow \mu^+\mu^-X$. La ligne de faisceau a subi des modifications complexes, notamment le déplacement de deux mètres de la plus grande cible de protons polarisés du monde et de ses aimants supraconducteurs afin d'installer l'absorbeur, composé de tungstène, d'oxyde d'aluminium et de béton. Cette cible ne laisse passer que les muons (et les neutrinos), mais génère aussi de nombreuses particules de basse énergie, ce qui complique la reconstitution des événements. En 2014, la nouvelle configuration a pu être mise en service lors de l'exploitation pilote de deux mois, sans que la cible ne soit toutefois encore polarisée.

L'expérience NA61/SHINE utilise le faisceau du SPS pour comprendre dans quelles conditions et comment les quarks et les gluons, habituellement confinés dans les hadrons, peuvent se déplacer librement sous la forme d'un plasma quark-gluon. En 2014, la collaboration a publié les premiers résultats de ses études sur les collisions proton-proton et béryllium-béryllium aux énergies du SPS. Étonnamment, les collisions p-p montrent des variations en fonction de l'énergie semblables à celles liées à l'apparition du déconfinement dans les collisions Pb-Pb à NA49, une expérience précédente auprès du SPS. D'autre part, les résultats des collisions p-p et Be-Be n'ont montré aucune trace d'un hypothétique point critique au-delà duquel il y aurait une transition en douceur entre les phases de confinement et de déconfinement de la matière.

Avec le retour du faisceau dans le SPS, NA61/SHINE a pu tester plusieurs améliorations apportées pendant le LS1 à la ligne de faisceau, aux détecteurs et aux logiciels d'analyse. En outre, le Comité de la recherche du CERN a approuvé l'élargissement du programme de physique de NA61/SHINE pour inclure les mesures de la production de hadrons utiles à la modélisation des faisceaux de neutrinos pour les expériences en cours ou futures à Fermilab.

Le nouveau détecteur NA62 a reçu son premier faisceau du SPS en octobre. Début septembre, la dernière des quatre chambres de trajectographie du détecteur à pailles a été descendue à son emplacement dans l'expérience. Chaque chambre est constituée de 16 couches de pailles remplies de gaz, d'une grande fragilité, détectant les particules chargées qui les traversent. C'est la première fois qu'un dispositif de cette taille est placé directement dans l'enceinte à vide d'une expérience, ce qui va permettre de mesurer la trajectoire et l'impulsion des particules chargées avec une grande précision. Le principal objectif de l'expérience est d'explorer une échelle infinitésimale (10^{-21} mètre), en étudiant des désintégrations très rares du kaon. L'expérience NA63 étudie les effets quantiques des interactions se produisant dans un champ magnétique élevé lorsque des particules de haute énergie traversent de fines cibles amorphes



L'expérience CLOUD. (CERN-EX-1310264-02)



Le nouveau bâtiment EAR2 pour la source de neutrons n_TOF. (OPEN-PHO-CIVIL-2015-002 – 1)

et cristallines. En 2014, la collaboration a publié, avec les physiciens de l'étude CLIC (voir p. 20), des calculs sur le phénomène du *beamstrahlung*, à partir de comparaisons avec les données de NA63. Le *beamstrahlung* est un facteur limitatif des études sur les collisionneurs électron-positon de nouvelle génération tels que le CLIC. Il apparaît lorsque les particules d'un paquet de haute énergie « perçoivent » un champ électrique fort dû au paquet arrivant en sens opposé, entraînant l'émission d'un rayonnement intense. La force de ces champs peut avoir des effets indésirables tels que la perte de polarisation du faisceau ou des faisceaux plus diffus. Inversement, comme l'ont montré d'autres membres de la collaboration NA63, les effets de la polarisation des champs extrêmement forts peuvent permettre de tester le phénomène appelé biréfringence du vide.

Faisceaux du PS

La collaboration CLOUD cherche à répondre à deux des questions les plus complexes de la science de l'atmosphère : comment les nouvelles particules d'aérosol sont-elles formées dans l'atmosphère ? Et quels effets ces particules ont-elles sur le climat ? CLOUD tente plus particulièrement de déterminer, à l'aide d'un faisceau du PS, si la formation de ces particules est favorisée par l'ionisation des rayons cosmiques galactiques. En mai, la collaboration a montré dans une étude expérimentale publiée dans *Science* que les vapeurs biogènes oxydées se combinent avec de l'acide sulfurique pour former de nouvelles particules, ce qui peut en grande partie expliquer la formation de particules dans la basse atmosphère. Elle a également rendu compte d'études de modélisation à l'échelle mondiale prouvant le rôle fondamental des arbres dans la formation de nouvelles particules dans l'atmosphère, que l'on perçoit sous la forme d'un halo bleu lorsqu'on regarde une montagne lointaine. L'expérience DIRAC, menée au PS entre 2007 et 2012, a mesuré la durée de vie d'« atomes » inhabituels ($\pi^+\pi^-$ et πK) afin de vérifier les prédictions à basse énergie de la chromodynamique quantique pour les quarks légers. Ces durées de vie peuvent

être exprimées comme la fonction linéaire connue de deux longueurs de diffusion, qui caractérisent l'interaction. Les études menées tout au long de 2014 ont permis à la collaboration de mesurer pour la première fois la durée de vie de l'atome πK . Des analyses plus poussées ont permis d'observer pour la première fois des atomes de pionium à vie longue, avec une signification statistique supérieure à 7σ . Ces résultats permettent d'obtenir une nouvelle combinaison linéaire des longueurs de diffusion, et ainsi de mesurer chacune d'elles.

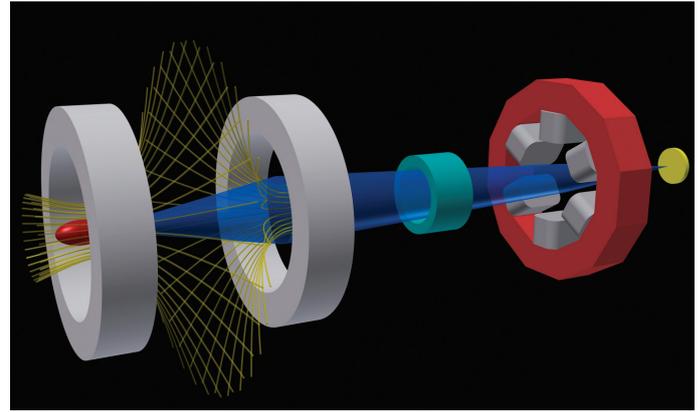
L'installation de mesure du temps de vol des neutrons, n_TOF, est une source de faisceaux pulsés de neutrons produits par l'interaction de protons du PS sur une cible en plomb. Les neutrons sont collimatés et guidés à travers des tubes de faisceau sous vide jusqu'à deux zones d'expérimentation : EAR1, placée à l'horizontale à environ 185 m de la cible, et EAR2, installée à la verticale à environ 20 m. EAR2, récemment construite, a reçu son premier faisceau de neutrons le 25 juillet. Son exploitation, parallèle à celle d'EAR1, vient compléter les recherches dans celle-ci. Le programme de physique d'EAR1 a inclus les mesures de la capture de neutrons du germanium 73 et du thulium 171, radioactif. La nouvelle ligne de faisceau a été mise en service à EAR2 et une expérience a été menée en fin d'année sur la section efficace de la fission du plutonium 240. Cette section efficace a été mesurée précédemment dans EAR1, lors d'une campagne d'expérimentation de plus de deux ans. Dans EAR2, les mesures ont pu être effectuées après six semaines, grâce à un flux de neutrons plus élevé et à un taux de neutrons bien supérieur, ce qui a permis de mesurer aussi la section efficace dans la zone située au-dessous du seuil. La faisabilité des expériences sur la fission dans EAR2 a ainsi pu être démontrée.

Le réveil d'ISOLDE

L'installation ISOLDE produit et accélère des faisceaux de noyaux radioactifs. La collaboration a tiré parti du LS1 pour améliorer le dispositif, notamment ISOLTRAP, et pour construire et mettre



La station IDS (*ISOLDE Decay Station*) est l'une des deux nouvelles stations d'expérimentation permanentes à l'installation ISOLDE. Elle permettra d'étudier la désintégration bêta et de mesurer la durée de vie d'états excités. (CERN-PHOTO-201410-212 – 5)



Le piège à rebroussement d'ASACUSA. De gauche à droite : le piège à rebroussement permettant de produire les atomes d'antihydrogène, une cavité micro-ondes (en vert) pour provoquer des transitions hyperfines, un aimant sextupôle (en rouge et gris) et un détecteur d'antihydrogène (en jaune). (Institut Stefan Meyer)

en service deux nouvelles stations permanentes, IDS (*ISOLDE Decay Station*) et VITO (*Versatile Ion-polarized Technique on-line*), qui a même recueilli des données. Des dispositifs mobiles ont été amenés par de nouveaux groupes d'ISOLDE, notamment des détecteurs de neutrons proposés par des groupes de Caen et de Madrid pour étudier la corrélation neutron-neutron dans le lithium 11, et le dispositif TATRA, du groupe de Bratislava, destiné à mesurer les désintégrations du mercure pauvre en neutrons.

Après le redémarrage du Booster du PS, qui fournit des protons à ISOLDE, 26 expériences et trois exploitations d'essai ont été menées entre fin juillet et mi-décembre. La toute première période d'expérimentation, lancée le 1^{er} août, a été accueillie dans l'effervescence. Des échantillons de lanthanides ont été collectés et envoyés à d'autres laboratoires (du terbium 149 et du terbium 155 à l'Institut Paul Scherrer, en Suisse, et du néodyme 140 à l'Université technique du Danemark, à Risø). Il s'agissait de trouver des éléments chimiques contenant des isotopes utilisables dans le domaine médical.

Grâce à un ensemble de dispositifs de pointe complémentaires, on a pu déterminer les propriétés de l'état fondamental d'une longue liste d'isotopes de l'astate, l'élément chimique le plus rare sur Terre, avec des taux de production et des demi-vies qui varient de huit ordres de grandeur. Ce succès résulte de la synergie de trois équipements : les lasers de la source d'ions laser à ionisation résonnante, le dispositif à moulinet équipé de détecteurs de silicium et de germanium, et le dispositif de mesure de temps de vol multi-réflexeur d'ISOLTRAP utilisé comme spectromètre de masse.

Le projet ISOLDE à haute énergie et haute intensité (HIE-ISOLDE) a bien progressé en 2014 (voir p. 19), suscitant un intérêt croissant dans le monde, dans l'attente de son démarrage avec des faisceaux post-accélérés, prévu fin 2015.

Cette année passionnante s'est conclue avec l'édition annuelle de l'atelier ISOLDE et la réunion des utilisateurs, du 15 au 17 décembre, avec une célébration le 17 décembre du

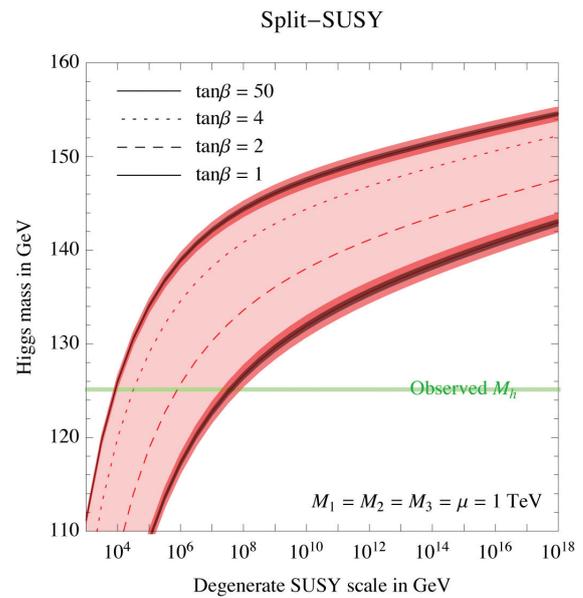
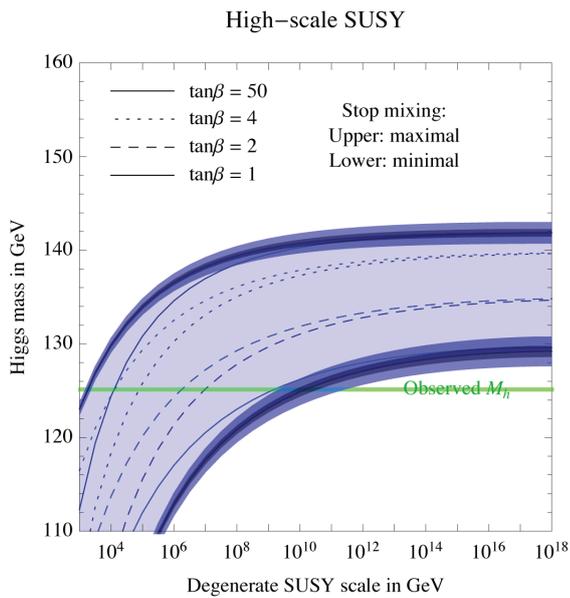
cinquantenaire de l'approbation d'ISOLDE par le Conseil, en présence de Torleif Ericson, qui était à l'époque Président du Comité des expériences de physique nucléaire. Des interventions de tous les anciens responsables du groupe ont permis de revenir sur les étapes marquantes de l'histoire de l'installation.

Zoom sur l'antimatière

Le Décélérateur d'antiprotons (AD) produit des antiprotons de basse énergie destinés à de nombreuses recherches, notamment la synthèse de l'antihydrogène. Les antiprotons sont créés lorsque les protons du PS entrent en collision avec une cible. Le retour du faisceau dans les expériences de l'AD a eu lieu en octobre, après les améliorations effectuées pendant le LS1. La collaboration ALPHA a poursuivi l'analyse des données collectées avant le LS1 et a présenté une nouvelle mesure précise de la charge de l'antihydrogène, qui s'est révélée compatible avec zéro jusqu'à la huitième décimale. La collaboration ASACUSA, qui a pour objectif de réaliser une spectroscopie micro-ondes très précise de l'antihydrogène, a également publié des résultats à partir de données collectées en 2012 rendant compte de la toute première production d'un faisceau d'atomes d'antihydrogène.

À l'automne, l'arrivée des faisceaux a rendu possible la mise en service d'un nouveau dispositif amélioré, ALPHA-2, qui permet un meilleur accès des lasers pour sonder les atomes d'antihydrogène piégés. Toujours dans le hall de l'AD, la collaboration ATRAP a terminé l'installation d'un piège à antihydrogène de deuxième génération pour permettre l'utilisation de lasers. L'expérience ASACUSA a mis en service une configuration nouvelle, qui comprend un nouvel aimant supraconducteur à « double pointe », un nouveau trajectographe et un nouveau détecteur final d'antihydrogène.

Le LS1 a aussi vu l'installation d'une nouvelle ligne de faisceau pour l'expérience BASE, dont l'objectif est de réaliser des mesures de haute précision du moment magnétique de l'antiproton. La collaboration a installé et mis en service l'ensemble du dispositif,



a recueilli des données sur des antiprotons pris isolément et a actionné un piège réservoir à antiprotons.

Les expériences AEGIS et GBAR sont conçues pour mesurer l'interaction gravitationnelle de l'antimatière. La collaboration AEGIS a terminé l'installation du dispositif et sa mise en service avec des antiprotons et des positons en vue de son exploitation en 2015. Pendant ce temps, les études concernant la future expérience GBAR d'ELENA (voir p. 18), à l'AD, se sont poursuivies, avec une version de démonstration déjà bien avancée à Saclay ; la mise en œuvre technique du dispositif au CERN est prévue pour 2016.

Astroparticules

Deux expériences du CERN qui traquent les particules pouvant être à l'origine de la matière noire ont poursuivi leurs recherches pendant le LS1 en utilisant les aimants dipolaires du LHC. L'expérience CAST scrute le soleil à la recherche d'axions produits par l'astre et d'autres particules candidates à la matière noire. En 2014, après la mise en service d'un deuxième système optique à rayons X améliorant encore la détection des axions solaires, les tubes de son aimant ont continué de fonctionner sous vide. Le détecteur au silicium, qui explorait la gamme d'énergie en-deçà de 1 KeV, a été remplacé par un détecteur InGrid à pixels sur le plan focal de l'un des télescopes à rayons X. La sensibilité de CAST à l'énergie noire devrait ainsi être améliorée. OSQAR, une expérience qui cherche en quelque sorte à détecter un rayonnement de lumière à travers un mur, traque les possibles oscillations quantiques entre les photons optiques et les particules candidates à la matière noire, telles que les axions ou les particules ressemblant à l'axion (ALP), dans le champ magnétique transversal de 9 teslas produit par deux dipôles LHC de réserve. En 2014, l'expérience a fonctionné avec une sensibilité exceptionnelle, en utilisant un rayonnement laser continu de 18,5 W émettant dans le vert (532 nm), mais n'a pas détecté de photon régénéré au-delà du « mur ». Ces résultats repoussent les limites de l'existence possible des axions et

des ALP à un niveau inédit pour une telle expérience menée en laboratoire.

Détecteurs pour le collisionneur linéaire

Le projet Détecteurs pour le collisionneur linéaire (LCD), mené au CERN, englobe des recherches sur la physique et les détecteurs pour un futur collisionneur linéaire électron-positon de haute énergie réalisées en collaboration avec des groupes d'étude partout dans le monde. Le CERN accueille notamment la collaboration CLICdp (*CLIC Detector and Physics*), qui s'intéresse au potentiel de physique de l'étude CLIC (voir p. 20) et s'attache à concevoir un détecteur adapté. En 2014, sa deuxième année d'existence, CLICdp a accueilli cinq nouveaux instituts et compte désormais 25 instituts et plus de 130 participants. Les études CLIC et ILC devant relever des défis similaires, CLICdp collabore également avec les équipes travaillant sur les concepts des détecteurs ILD et SiD.

En 2014, les simulations et le travail d'ingénierie ont avant tout visé à transformer les deux modèles de conception figurant dans le rapport préliminaire de conception du CLIC en un modèle optimisé. Pour cela, il a fallu définir les paramètres de dimension et de granularité des trajectographes et des calorimètres, et choisir les technologies adaptées. Le scénario prévoyant la construction de CLIC en plusieurs phases a également été réexaminé pour mieux définir l'étape à l'énergie la plus basse. À cette énergie, on va s'intéresser à la production de Higgs uniques et de paires de quarks top, mais le potentiel de physique dans les deux cas dépend de l'énergie exacte dans le centre de masse. Une solution de compromis permettant une physique précise aussi bien du top que du Higgs est à l'étude ; le résultat sera connu en 2015. Les études de simulation de physique ont continué le référencement des performances attendues des détecteurs et des algorithmes de reconstitution, ainsi que du potentiel de mesure des propriétés du Higgs. Un rapport exhaustif sur la physique du Higgs au CLIC est en cours d'élaboration et sera publié en 2015.

En physique des particules, le problème de la hiérarchie renvoie à l'écart considérable observé entre la masse mesurée du boson de Higgs, par exemple, et les prédictions fondamentales de la théorie quantique des champs. Généralement, pour rendre compte de cet écart, on intègre la supersymétrie. La figure montre les prédictions de la masse du boson de Higgs en fonction de l'énergie à laquelle se brise la supersymétrie, avec deux scénarios possibles : une supersymétrie à une énergie élevée et une supersymétrie dédoublée. La limite supérieure pour la supersymétrie constitue un résultat intéressant. Elle montre qu'une théorie selon laquelle la supersymétrie se briserait autour de 10^{19} GeV, c'est-à-dire à l'échelle de Planck, sans aucun changement à des énergies plus basses, est incompatible avec la masse du boson de Higgs mesurée au CERN. (D'après <http://arxiv.org/abs/1407.4081>)

Le retour des faisceaux alors que le LS1 touchait à sa fin a permis de mener des essais sur des détecteurs au PS et au SPS. Les éléments du prototype de détecteur à pixels, notamment les puces TimePix3 et CLICpix couplées à des capteurs fins, ont été testés et ont donné des résultats prometteurs. CALICE, avec l'aide de la collaboration CLICdp, a testé un système calorimétrique électromagnétique-hadronique ; la collaboration FCAL a donné la première démonstration du fonctionnement multiplan du calorimètre aux petits angles, et des études d'ingénierie en laboratoire ont vérifié le système de refroidissement à l'air du détecteur à vertex au moyen d'un modèle 3D grandeur nature et de la machine à fumée du service de Secours et du Feu du CERN.

En théorie

En 2014, l'unité Théorie (PH-TH) a continué de jouer un rôle de premier plan en tant que centre de référence dans tous les domaines de la physique des particules théorique. Ses recherches ont notamment porté sur la physique du Modèle standard directement liée au LHC, les aspects formels de la théorie quantique des champs, et la théorie des cordes. D'importants efforts ont été consacrés aux conséquences de la découverte du boson de Higgs, notamment au « problème de la hiérarchie » (voir p. 30). Les recherches ont majoritairement porté sur la phénoménologie en physique des particules au-delà du Modèle standard (extensions fondées sur la supersymétrie ou sur plus de quatre dimensions), le domaine des astroparticules, la cosmologie et la physique des ions lourds, mais aussi sur la théorie des champs sur réseau et la physique mathématique. Environ la moitié des travaux ont porté sur la physique des particules du Modèle standard ou au-delà du Modèle standard. Les projets recouvraient souvent plusieurs domaines, la matière noire revêtant par exemple un intérêt pour la cosmologie comme pour la physique des collisionneurs, et la physique des trous noirs étant liée aux collisions d'ions lourds d'un point de vue holographique. En moyenne, les membres du groupe ont publié

un article par jour. Le groupe est constitué de 18 membres du personnel et peut compter plus de 35 boursiers. En outre, il accueille entre 10 et 15 attachés scientifiques payés, et, chaque année, environ 800 visiteurs à court terme, payés ou non payés. Au total, l'effectif dépasse les 120 personnes pendant les mois d'été. La rotation rapide du personnel est une conséquence du rôle de premier plan que joue le groupe au niveau mondial pour les échanges scientifiques.

Les instituts de théorie, ateliers informels pouvant durer plusieurs semaines, sont importants pour favoriser la collaboration internationale et l'échange d'idées. Le but est d'optimiser les ressources en réunissant des chercheurs invités ayant des intérêts communs et en partageant les ressources avec la communauté internationale. En 2014, quatre instituts ont eu lieu sur les thèmes « Résurgences et transséries en série dans les théories quantique, de jauge et des cordes », « Avancées conceptuelles dans le domaine de la théorie de jauge sur réseau », « Résultats des théories de jauge supersymétriques de dimensions variées » et « Holographie numérique ».

Les membres de l'unité PH-TH ont participé très activement à plusieurs conférences et ateliers internationaux. Ils ont également pris part aux travaux du *Particle Data Group* et à de nombreuses activités d'enseignement au CERN, notamment au programme de formation académique, au programme des étudiants d'été et à celui des enseignants du secondaire, ainsi qu'aux écoles européenne et latino-américaine de physique des hautes énergies. 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, l'unité PH-TH a tenu son séminaire annuel, lors duquel elle a présenté au groupe l'ensemble des activités de recherche en cours. L'objectif était de faciliter l'intégration des nouveaux membres et d'échanger des idées dans un environnement stimulant. Le programme du séminaire donne une bonne idée des travaux du groupe en 2014 (voir <https://indico.cern.ch/event/302647/other-view?view=standard>).



Le CERN a reçu de nombreux messages pour son 60^e anniversaire via les réseaux sociaux. Parmi eux, cette photo envoyée par des étudiants croates. (Marina Furkes/Gymnasium 'Fran Galovi' Koprivnica)

Un impact sur le monde

Un anniversaire mémorable

Tout au long de l'année, le CERN et ses États membres ont célébré 60 ans de science au service de la paix en organisant manifestations, expositions et conférences. Les manifestations, qui ont atteint leur apogée en septembre, juste avant la célébration officielle du 60^e anniversaire (voir p. 6), ont placé le Laboratoire au centre de l'attention. On retiendra notamment un symposium sur la science au service de la paix, l'anniversaire de la première session du Conseil, un concert de l'Orchestre des Nations Unies, des projections du film *Particle Fever* et la deuxième édition de TEDxCERN sur le thème « En avant toute : dessiner l'avenir grâce à la science », ou comment la science peut contribuer à relever les grands défis mondiaux liés au climat, à la santé, à la nourriture, à l'eau et à l'énergie.

D'autres événements ont également eu lieu tout au long de l'année, parmi lesquels le festival CinéGlobe et Famelab en mars, la fête des voisins en mai et un concours d'informatique en décembre. Des expositions sur le CERN ont aussi été organisées dans 16 endroits différents. L'exposition *Accélérateur*

de science, qui s'est déplacée à Varsovie, à Athènes, à Valence et à Thessalonique, a attiré plus de 300 000 visiteurs. Des expositions plus thématiques ont aussi été présentées dans quatre autres lieux. Le « tunnel LHC interactif », quant à lui, a voyagé dans huit endroits différents, accompagné d'une grande exposition d'affiches.

Stimuler l'innovation

Créé en 2011, le Fonds pour le transfert de connaissances est devenu un outil précieux pour promouvoir les applications de la recherche fondamentale, et encourager les chercheurs du CERN à développer leurs idées. Il a déjà permis de financer 25 projets, dont six en 2014. D'autres activités, telles que les *Journées de l'innovation*, organisées par les départements Faisceaux et Ingénierie, ont aussi contribué à encourager le transfert de connaissances en tant qu'activité essentielle du CERN. Par ailleurs, l'idée d'un réseau de centres d'incubation d'entreprises reposant sur les technologies du CERN dans les États membres a commencé à se concrétiser. Quatre nouveaux centres



Des chercheurs du CERN ont pris part à la *Nuit européenne des chercheurs* à travers Pop Science, événement mêlant art, poésie, théâtre, musique et science dans différents lieux, à Genève et en France voisine. (CERN-PHOTO-201409-198 – 64)



Visite de la caverne de CMS par les jeunes Espagnoles lauréates du concours *CERNland*, organisé par le CERN, le *Centro Nacional de Física de Partículas, Astropartículas y Nuclear* (CPAN) et la Fondation Prince des Asturies. (CERN-PHOTO-201404-077 – 18)

d'incubation (Pays-Bas, Norvège, Grèce et Autriche) ont rejoint le STFC-CERN BIC, implanté au Royaume-Uni, afin d'aider des entreprises à commercialiser des concepts développés par le CERN.

En mars, le CERN a signé un accord-cadre avec l'Agence spatiale européenne (ESA) en vue d'une coopération axée sur la recherche et la technologie dans des domaines d'intérêt mutuel (informatique et préservation des données, matériaux de pointe, cryogénie, supraconductivité, radiorésistance, etc.). En avril, les deux organisations ont partagé un stand à la Foire de Hanovre, la plus grande foire industrielle du monde, aux côtés de 14 entreprises dérivées.

En décembre a été inauguré le bâtiment IdeaSquare, du nom d'un projet actuellement en phase pilote visant à favoriser l'innovation au CERN. Il s'agit de réunir industriels, chercheurs, ingénieurs et étudiants qui présenteront des idées innovantes du CERN. Deux programmes financés par l'UE ont déjà pris leurs quartiers à IdeaSquare et 46 étudiants ont déjà participé à des cours sur l'innovation. Le bâtiment a également accueilli un « hackathon », atelier où des équipes interdisciplinaires se sont appuyées sur des technologies du CERN pour proposer des solutions à des questions humanitaires ou sociales.

Les scientifiques de demain

Les cours d'une semaine proposés en 19 langues par le CERN aux enseignants du secondaire ont battu un record de participation, avec 1 200 inscrits venus de 22 pays. De plus, un cours de trois semaines pour enseignants du secondaire a attiré en juillet 54 participants de 32 pays, dont 10 enseignants du Moyen-Orient (de l'Autorité palestinienne, du Bahreïn, d'Iran, d'Israël, de Jordanie et de Turquie), dans le cadre d'une collaboration avec le projet SESAME, en cours de construction en Jordanie. Afin de permettre à des groupes scolaires en visite au CERN de réaliser des expériences, un nouveau laboratoire, le S'Cool Lab, a été construit et mis en service.

En septembre, deux groupes d'élèves, ayant remporté la première édition du concours *Ligne de faisceaux pour les écoles*, ont vécu une expérience particulière. Venus d'Athènes (Grèce) et de Nimègue (Pays-Bas), et sélectionnés parmi 300 candidatures, ils ont mené pendant 10 jours l'expérience qu'ils avaient proposée sur un faisceau d'essai au PS. Ce concours reproduit la manière dont les chercheurs procèdent pour accéder aux installations du Laboratoire. Il a été rendu possible grâce à l'initiative CERN & Société (voir p. 8).

En 2014, le CERN a organisé ou co-organisé des écoles spécialisées, qui ont attiré des centaines d'étudiants du monde entier. En 2014, la physique des particules figurait aux programmes de l'École européenne de physique et de l'École Asie-Europe-Pacifique de physique des hautes énergies. La science des accélérateurs a été abordée lors de l'École interuniversitaire sur les accélérateurs et de cinq écoles du CERN sur les accélérateurs, dont l'une était co-organisée avec les États-Unis. Le thème de l'informatique a été traité lors de l'École internationale du déclenchement et de l'acquisition de données, de l'École sur la Grille et les systèmes d'information avancés et de l'École de calcul électronique du CERN (CSC), ainsi que lors de l'école CSC inversée et de l'école CSC thématique. Cette année, quelque 300 étudiants de 77 pays ont aussi participé au programme des étudiants d'été de l'Organisation.

Collaborations et nouveaux horizons

En 2014, la Commission européenne a lancé son programme de financement Horizon 2020 (H2020). Le CERN a soumis des propositions pour divers sous-programmes. Sur les 17 nouveaux projets H2020 sélectionnés pour des financements en 2014, sept sont coordonnés par le CERN. Ils couvrent un large éventail de domaines et d'activités : étude d'isotopes pour applications médicales (MEDICIS-PROMED), développement de technologies innovantes de fibres optiques (INTELUM), collaboration internationale sur la science et la technologie des accélérateurs (E-JADE), techniques de résonance magnétique

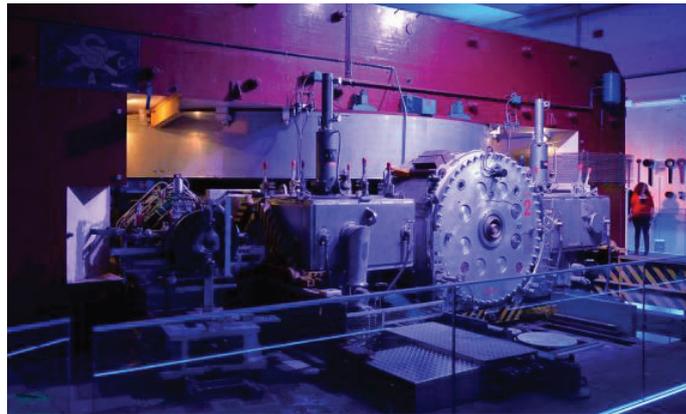
Redonner vie à 60 ans d'histoire

Le 60^e anniversaire du CERN était l'occasion rêvée de retracer l'histoire de l'Organisation. Le Service d'information scientifique s'est donc lancé dans un projet de numérisation sur le serveur de documents du CERN de toutes les images d'archive du Laboratoire. Soit environ 250 000 photographies, dont les plus anciennes, sur papier, sont de différents formats. Une fois la majorité des clichés scannés, un appel été lancé auprès des membres de la communauté du CERN et au-delà, pour interpréter le contenu de certaines images. L'archivage numérique de tous les numéros du *CERN Courier* et du *Bulletin* a également été mené à bien.

Le Synchrocyclotron (SC), premier accélérateur du CERN, a commencé à être exploité en 1957 ; il était alors le plus grand accélérateur de particules d'Europe. Pendant 33 ans, il a fourni nombre de résultats de physique importants. Cette année a vu aboutir le vaste projet de rénovation visant à transformer le SC en un lieu d'exposition. Inauguré en juin, celui-ci a obtenu le label « Site historique » de la Société européenne de physique. Les visiteurs découvrent le fonctionnement de la machine grâce à des animations projetées en 3D. Cette exposition et les autres points de visite créés au Centre de données, au Centre de contrôle du CERN et auprès de l'installation d'essai des aimants dans le bâtiment SM18 sont autant de nouvelles possibilités proposées à des visiteurs toujours plus nombreux. En 2014, environ 103 000 visiteurs (dont 40 % de scolaires) ont participé à des visites guidées d'une demi-journée au CERN.



Photographie d'archive de 1956 montrant une bobine du Synchrocyclotron traversant le village de Meyrin pour rejoindre le CERN. (CERN-CE-5661005)



L'exposition Synchrocyclotron, inaugurée récemment. (CERN-PHOTO-201406-130 – 16)

nucléaire innovantes (BetaDropNMR), nouvelles structures mathématiques (MathAm), achat de services en nuage en Europe (PICSE) et vulgarisation scientifique (Pop Science). En outre, les bourses Marie Skłodowska-Curie de la Commission européenne ont permis à plus de 130 jeunes chercheurs de travailler au CERN en 2014.

Dans le cadre du Réseau européen de recherche sur la thérapie hadronique par les ions légers (ENLIGHT), plusieurs projets de l'UE menés par le CERN, ou auxquels celui-ci participe, ont permis de développer la thérapie hadronique. Deux d'entre eux ont pris fin en 2014 : ULICE, qui renforce la collaboration entre les centres actuels et futurs de thérapie hadronique en Europe, et ENVISION, qui met au point des outils d'assurance qualité de pointe. Pour que le CERN devienne un important vecteur d'échanges pour la physique médicale en Europe, le Bureau

du CERN pour les applications médicales a été créé en janvier. Il coordonne et structure les activités liées à des applications médicales au sein de l'Organisation et sert de catalyseur pour les collaborations avec des partenaires extérieurs. Son programme de travail initial comporte sept axes : le calcul à grande échelle, les détecteurs pour l'imagerie médicale, les radio-isotopes, la création d'une nouvelle installation biomédicale, la conception optimisée d'accélérateurs à usage médical, la simulation et la dosimétrie, et les applications autres que le traitement du cancer. Par ailleurs, le CERN a co-organisé à Genève en février la deuxième Conférence internationale sur la recherche translationnelle en radio-oncologie et la physique au service de la santé. L'événement a attiré de nombreux participants des domaines de la physique, de l'ingénierie, de la médecine, de l'informatique et de la biologie.



Un camp scientifique pour les enfants du personnel du CERN s'est tenu pendant l'été, proposant des activités pratiques ainsi qu'une visite du centre de formation Sécurité du CERN, que l'on voit ici. (CERN-HSE-PHO-2014-008 – 7)

Un lieu de travail

Le CERN reste un employeur attractif, comme en témoigne le nombre record de postulants en 2014, avec plus de 20 000 candidatures reçues et 146 comités de sélection organisés pour des postes sous contrat de durée limitée (18 000 candidatures et 106 comités en 2013). Dans le cadre du programme des boursiers, 320 personnes ont été recrutées, portant à 617 le nombre total de boursiers au CERN à la fin de l'année. Du côté du programme TTE (*Technician Training Experience*), créé en 2012, 48 techniciens récemment diplômés de neuf États membres ont pu lancer leur carrière au CERN. En outre, 389 étudiants techniques et doctorants ont été sélectionnés, et 289 étudiants venus d'États membres et d'États non-membres ont participé au programme des étudiants d'été. En reconnaissance de la qualité de ses programmes de formation, le CERN s'est vu attribuer par l'État de Genève le *Prix de l'entreprise formatrice* pour son programme d'apprentissage.

Le Bureau de la diversité a continué de mettre en œuvre des mesures visant à atteindre les sept objectifs stratégiques définis pour la période 2012-2014 dans le domaine du recrutement, de l'évolution de carrière et de l'environnement de travail. En

août, la politique sur la diversité a été adoptée et bien accueillie lors de sa présentation au Forum tripartite sur les conditions d'emploi (TREF) et au Conseil du CERN. Par ailleurs, la nouvelle politique en matière de formation et de développement mise en œuvre en 2014 a entraîné la réorganisation de la formation en cinq volets : direction d'équipe, développement personnel et communication, gestion technique, et technique et langue.

L'examen quinquennal 2015 des conditions financières et sociales des membres du personnel a débuté en 2014. Outre l'examen obligatoire des traitements de base des titulaires, des mensualités des boursiers et des allocations de subsistance des membres du personnel associés, en juin, le Conseil a approuvé la proposition de la Direction d'examiner la structure des carrières au CERN et les conditions sociales et financières liées à la diversité.

Le 60^e anniversaire du Laboratoire a coïncidé avec les 20 ans du TREF. Ce forum de discussion et organe consultatif auprès du Conseil est constitué de représentants des États membres, de la Direction du CERN et de l'Association du personnel. Il examine les aspects sociaux et financiers des conditions



Un nouveau parking, situé à proximité du Globe, a été inauguré en avril. Une centaine de places bleues sont réservées aux abonnés P+R. (OPEN-PHO-ACCEL-2015-006 – 1)



Le nouveau bâtiment pour ELENA a été inauguré après moins d'un an de travaux. Environ 10 000 tonnes de terre ont dû être déblayées par quelque 500 camions. (CERN-PHOTO-201404-075 – 1)

d'emploi du personnel de l'Organisation. Le TREF, qui a succédé à des groupes ad hoc constitués dans les années 1960 et 1970, s'est réuni pour la première fois le 27 septembre 1994. Parmi les mesures innovantes mises en place ces 20 dernières années figurent notamment le système de congés épargnés, les programmes de préretraite et l'allocation dépendance.

Nouvelles constructions

Côté construction, l'année 2014 a été chargée. Le 11 avril, le CERN a inauguré le bâtiment 393 (ELENA), accolé à l'AD. Il abritera une salle de nettoyage, des ateliers, ainsi que les générateurs des aimants à déflexion rapide afin de libérer de l'espace dans le hall de l'AD, où le futur anneau à antiprotons de très basse énergie (ELENA) sera installé. Au printemps, la construction du bâtiment 380 s'est aussi achevée, permettant à l'installation n_TOF d'héberger sa deuxième zone d'expérimentation, EAR2 (voir p. 28).

Le 24 mai, un nouveau bâtiment (SL53) a été inauguré sur le site de Cessy (France). Il accueillera les milliers de visiteurs qui viennent découvrir l'expérience CMS chaque année. Ses atouts :

une faible consommation énergétique et la possibilité, à terme, d'être chauffé en recyclant la chaleur dégagée par le détecteur. En octobre, sur le site de Meyrin, s'est terminée la construction du bâtiment 179 pour MEDICIS, une installation destinée à la production d'isotopes radioactifs pour des applications médicales. L'inauguration du bâtiment 772, qui abrite le laboratoire d'étalonnage du CERN, a eu lieu quant à elle en décembre sur le site de Prévessin. Ce bâtiment sera utilisé pour étalonner les instruments de mesure de radiation pour quatre types différents de champs de rayonnement ionisant. Toujours à Prévessin, les départements GS et BE et l'unité DGS ont mené ensemble un projet visant à concevoir, installer et valider un système de verrouillage actif dans le hall Nord. Ce système permet au SPS d'effectuer des « super-cycles » intégrant à la fois des cycles de protons de haute intensité pour le LHC et l'installation HiRadMat, et des cycles d'ions de faible intensité pour le hall Nord. Le verrouillage actif atténue les risques pour les personnes travaillant dans le hall Nord en cas d'extraction involontaire d'un faisceau de protons de haute intensité.

Dans les coulisses de GS

Tout au long de 2014, le département Services généraux d'infrastructure (GS) a mené une campagne de communication pour présenter ceux et celles qui contribuent au bon fonctionnement du CERN. Une série d'articles du *Bulletin* intitulée « Dans les coulisses de GS » a permis de faire connaissance avec les héros méconnus du Laboratoire. Nettoyage, maintenance, logistique, contrôle d'accès, bibliothèque, foyers-hôtels, magasins, service de Secours et du Feu, génie civil ou encore travaux de construction, le département GS fait en sorte que tout se déroule sans accroc.



Le CERN compte une centaine de stations de surveillance de l'environnement sur ses sites et à leurs abords. De nouvelles stations plus précises encore ont été installées en 2014. (CERN-PHOTO-201504-073 – 6)

Sécurité et environnement

Avec des dizaines de travaux se déroulant en parallèle, des activités aussi diverses que de la manutention, de la soudure, de l'électricité, de la mécanique, etc., le long arrêt technique qui s'est achevé en 2014 était une préoccupation majeure en matière de sécurité. Malgré l'impressionnant nombre d'heures de travaux – 3,4 millions – et de personnes impliquées – 1 600 –, le nombre d'accidents et la gravité de ceux-ci sont restés très faibles. Cette excellente performance est à mettre au crédit d'une organisation des travaux qui intégrait les contraintes de sécurité à toutes les étapes. Une forte implication des superviseurs et des coordinateurs de sécurité a également permis de limiter les accidents.

Les travaux dans les zones réglementées pour les radiations ont fait l'objet d'une attention particulière. Quelque 10 000 personnes ont reçu un dosimètre au cours des 18 mois de l'arrêt. Mais seulement deux doses ont excédé légèrement 3 millisieverts

(mSv), alors que l'objectif fixé était une dose maximum de 3 mSv par personne et par an. Plus de 98 % des personnes ont reçu une dose inférieure à 1 mSv. 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*) a grandement contribué à ce résultat. Cette approche a impliqué la mise en place de comités ALARA pour les travaux de risques plus élevés et la réalisation d'études des travaux dans les zones contrôlées afin de réduire au minimum les doses.

Le long arrêt technique a permis d'organiser des exercices pour réévaluer certaines normes de sécurité dans le tunnel LHC, en particulier aux abords des soupapes qui évacuent l'hélium en cas de surpression. En février, trois tests de fuite d'hélium ont été réalisés afin de mesurer la vitesse de propagation du gaz, la



Trois tests de fuite d'hélium ont été organisés dans le tunnel du LHC. (OPEN-PHO-SAFETY-2014-001)



Plusieurs exercices d'évacuation se sont déroulés au CERN, dont l'un au Jardin d'enfants. (OPEN-PHO-SAFETY-2014-002)

température, le taux d'oxygène dans le tunnel et l'impact sur la machine et les infrastructures.

Des exercices de sécurité sont régulièrement organisés dans le Laboratoire. En octobre, un vaste exercice d'évacuation s'est déroulé dans dix bâtiments du site de Meyrin. Environ 400 personnes ont été évacuées en quelques minutes. L'exercice avait été précédé par des séances de formation d'une centaine de personnes, dont des délégués à la sécurité et des guides d'urgence chargés d'aider à l'évacuation. L'exercice a permis d'identifier des axes d'amélioration du niveau de sécurité dans ces bâtiments et de sensibiliser les occupants. Plusieurs exercices similaires ont été menés sur les sites des expériences du LHC, au Globe de la science et de l'innovation ou encore au Jardin d'enfants.

La formation est un aspect primordial de la politique de sécurité. En 2014, plus de 5 600 personnes ont participé à une formation en groupe et 23 700 personnes ont suivi des cours en ligne. De nouveaux cours en ligne ont été développés, plus interactifs et ergonomiques. De nouveaux cours avec des exercices pratiques et des mises en situation ont été introduits au Centre de formation à la sécurité du site de Prévessin, dont les installations ont été perfectionnées. Un atelier de formation aux risques électriques et à l'utilisation des lasers a été ouvert. La portion de tunnel et sa maquette du LHC ont été équipées du système de radio TETRA pour les formations sur les communications en cas d'urgence. Deux nouvelles salles de formation ont été ouvertes afin de centraliser les cours de sécurité dans ce centre.

Pour formaliser et améliorer la prévention des risques professionnels, une stratégie baptisée ProSanTra (Promotion de la santé au travail) a été mise en place. Une attention particulière a été portée aux risques chimiques. Plusieurs visites de postes de travail particulièrement exposés à des risques liés à l'utilisation de produits chimiques dangereux ont été réalisées. Elles ont permis de rappeler les bonnes pratiques et de mettre en place de nouvelles fiches de postes détaillant les mesures de protection et d'atténuation vis-à-vis des risques chimiques.

C'est la dernière étape d'un projet engagé depuis trois ans sur la question. Les risques chimiques constituaient d'ailleurs le thème de la Journée mondiale de la sécurité et de la santé au travail, le 10 avril. Quelque 420 personnes ont participé à des activités de sensibilisation organisées au CERN.

Du fait de la superficie des sites et du nombre croissant d'utilisateurs, la sécurité routière est une préoccupation importante de la sécurité au travail. En 2014, des aménagements ont été réalisés pour sécuriser certaines portions des routes du CERN, favorisant une réduction de vitesse des véhicules.

Du côté des infrastructures médicales et de secours, un accord de coopération avec les Hôpitaux universitaires de Genève (HUG) a été approuvé par le Comité des finances. Il prévoit l'installation sur le site de Meyrin d'un centre d'intervention d'urgence (véhicule SMUR) géré par les HUG qui pourra intervenir sur les sites suisse et français du CERN et dans l'ouest du canton de Genève. Une triangulation des appels d'urgence, impliquant le centre des appels d'urgence du Canton de Genève et celui du CERN, permettra de répondre au mieux aux urgences médicales sur les sites du CERN. Les HUG assureront par ailleurs une formation du personnel médical et des pompiers du CERN.

Les efforts se sont poursuivis pour réduire l'impact sur l'environnement des activités du CERN. La période d'arrêt des accélérateurs a été mise à profit pour renouveler de nombreuses stations de surveillance de l'air, de l'eau et des radiations, en particulier sur le site de Prévessin. De nouvelles stations de mesure des radiations, avec des limites de détection encore plus faibles, ont été installées. Le CERN compte une centaine de stations de surveillance sur ses sites et à leurs abords. Toutes les mesures ont montré que l'impact radiologique des activités du CERN sur l'environnement a été négligeable en 2014 ; suivant la procédure habituelle, elles ont été transmises aux autorités suisses et françaises. Le CERN est engagé dans une politique d'amélioration continue de ses performances dans ce domaine.



Un cours d'habilitation électrique dans la nouvelle installation dédiée aux risques électriques et laser du Centre de formation. (CERN-HSE-PHO-2015-006 – 4)



L'un des stands organisés lors de la Journée mondiale de la sécurité et de la santé au travail. (CERN-HSE-PHO-2014-003 – 6)

Un groupe de travail a été mis en place pour mettre à jour l'inventaire des zones à risques de pollution des eaux au CERN et proposer un plan d'actions prioritaires sur les installations en 2015. Un détecteur d'hydrocarbures pilote a été installé au niveau des eaux d'évacuation du site de Prévessin. En fonction de ses résultats, d'autres détecteurs de ce type seront installés dans les années à venir. Ces actions font suite à trois événements ponctuels de pollution des eaux de rejet du CERN.

Le long arrêt technique a permis de mener des travaux d'amélioration des accélérateurs et des détecteurs, réduisant leur impact sur l'environnement. Plusieurs rénovations visant à réduire la consommation d'eau ont été effectuées. Le mode de fonctionnement de la boucle d'alimentation en eau brute du LHC, reliée au réseau incendie et aux tours de refroidissement, a été changé. Les systèmes de refroidissement

de grosses installations, comme ISOLDE, ont été remplacés. À fonctionnement égal, des dizaines de milliers de mètres cubes d'eau vont être économisés.

Pour réduire la consommation électrique, un nouveau système de contrôle des alimentations de l'accélérateur SPS est entré en service. Auparavant, les circuits des aimants étaient alimentés en permanence dès que l'accélérateur était prêt à recevoir du faisceau. Le nouveau système régule automatiquement l'alimentation des aimants en fonction de l'intensité du faisceau injecté dans le SPS, des requêtes de faisceaux des utilisateurs et des demandes des opérateurs des accélérateurs. Un projet de rénovation similaire, qui serait mené au cours du second grand arrêt technique, est à l'étude pour les alimentations de la zone Nord.

Une nouvelle politique de sécurité

En soixante ans d'existence, le CERN s'est agrandi, accueillant un nombre croissant d'expériences et d'utilisateurs. De grandes collaborations internationales se sont constituées et le nombre d'entreprises intervenant sur les sites s'est accru. Le jour de ses 60 ans, le CERN a adopté de nouveaux documents de référence de sécurité afin d'adapter sa politique de sécurité à ces changements, tout en tenant compte des bonnes pratiques reconnues internationalement. Une déclaration de politique générale de sécurité, plus concise et pérenne, a remplacé l'ancien document. La structure organisationnelle et les responsabilités en matière de sécurité sont désormais exposées dans un Règlement de Sécurité, complété par des documents annexes. Le nouveau Règlement réaffirme que les responsabilités en matière de sécurité suivent la ligne hiérarchique. Mais il tient aussi compte du fait que de nombreuses activités sont menées selon une structure matricielle, et prend en considération la réalité des grandes expériences. Il rappelle également que les instituts partenaires et les contractants doivent se conformer aux règles de sécurité du CERN. Enfin, il souligne l'importance de la responsabilité de chacun en matière de sécurité.

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. D. Tonev
M. L. Litov

Danemark

M. J.J. Gaardhøje
M. A. Kjaer

Espagne

M. F. Ballestro
S.E. M^{me} Ana María Menéndez-Pérez

Finlande

M. J. Äystö
M. P. Pulkkinen

France

S.E. M. N. Niemtchinow
M^{me} C. Cesarsky

Grèce

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

République de Hongrie

M. L. Korányi
M. P. Lévai

Israël

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

Italie

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

Norvège

M. B. Jacobsen
M. E. Osnes

Pays-Bas

M. S. De Jong
M. J.T.M. Rokx

Pologne

M. J. Gierlinski
M. J. Królikowski

Portugal

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

République slovaque

S.E. M. F. Rosocha
M. B. Sitár

République tchèque

S.E. M^{me} K. Sequensová
M. R. Leitner

Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord

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

Suède

M. M. Johnsson
M. B. Åsman

Suisse

M. B. Moor
M. O. Schneider

Candidat à l'adhésion

Roumanie

M^{me} R. Predescu
M. N. Zamfir

État membre associé en phase préalable à l'adhésion

Serbie

S.E. M.V. Mladenović
M. P. Adzić

Observateurs

États-Unis d'Amérique, Fédération de Russie, Inde, Japon, Turquie, Commission européenne, UNESCO

Comités du Conseil

Comité des directives scientifiques

Président

M. T. Nakada (Suisse)

Membres

M. M. Diemoz
M. K. Ellis
M^{me}. B. Gavela
M. M. Harrison
M. M. Huyse
M. F. Le Diberder
M. H. Murayama
M. K. Redlich
M. L. Rivkin
M^{me}. T. Rodrigo
M^{me}. N. Roe
M. V. Rubakov
M. C. Spiering
M. K. Tokushuku
M. D. Wark
M. T. Wyatt

Membres ès qualités

Président du Comité des expériences LHC

M. E. Elsen

Président du Comité des expériences SPS et PS

M. C. Vallée

Président du Comité des expériences ISOLDE et n_TOF

M. K. Blaum

Président du Comité européen sur les futurs accélérateurs

M. M. Krammer

Également présents

Présidente du Conseil

M^{me} A. Zalewska (Pologne)

Présidente du Comité des finances

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

Directeur général

M. R.-D. Heuer

Comité des finances

Présidente

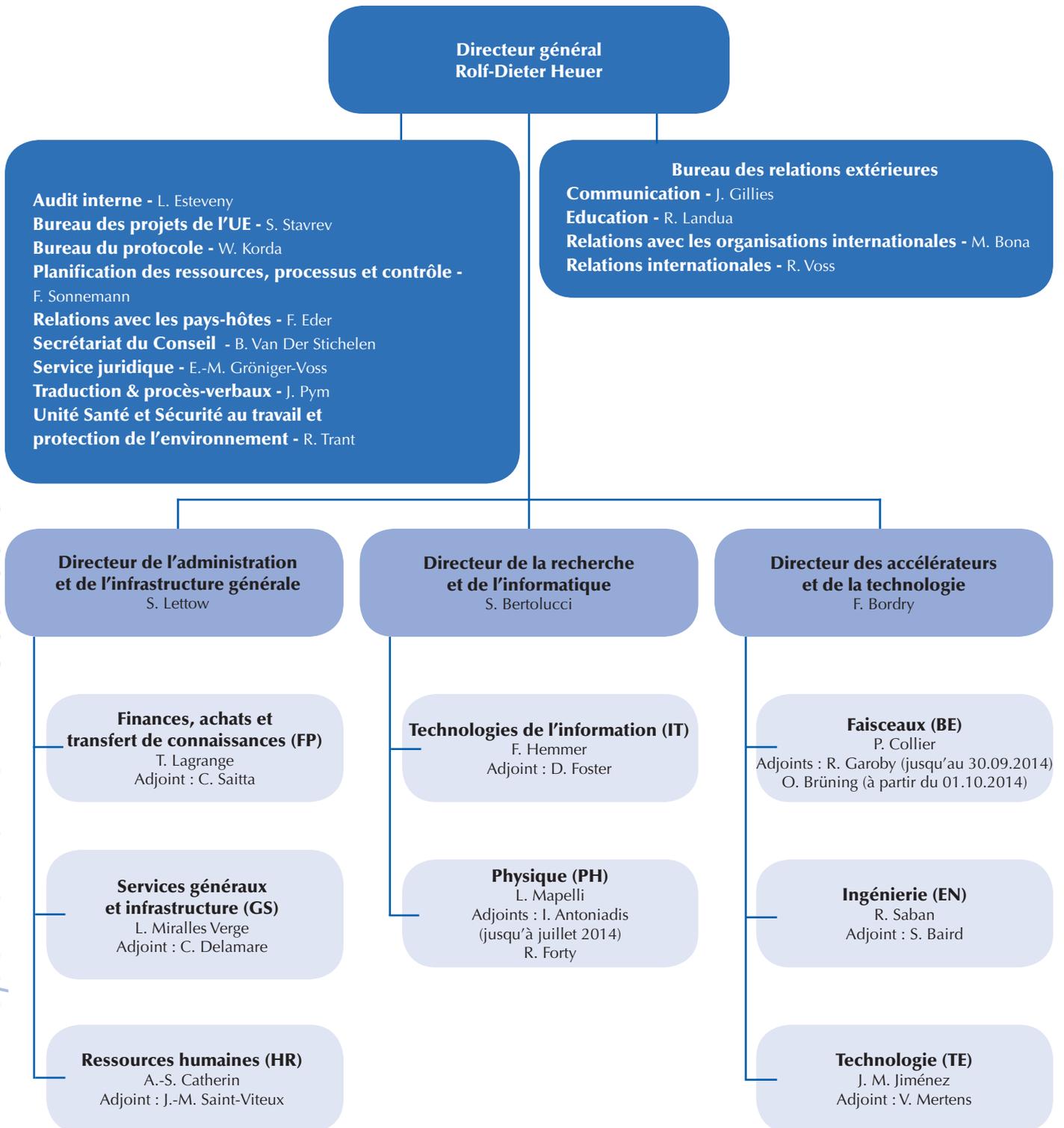
M^{me} Ch. Jamieson (Royaume-Uni)

Membres

Un ou plusieurs délégués par État membre

Organisation interne

Secteurs
Départements

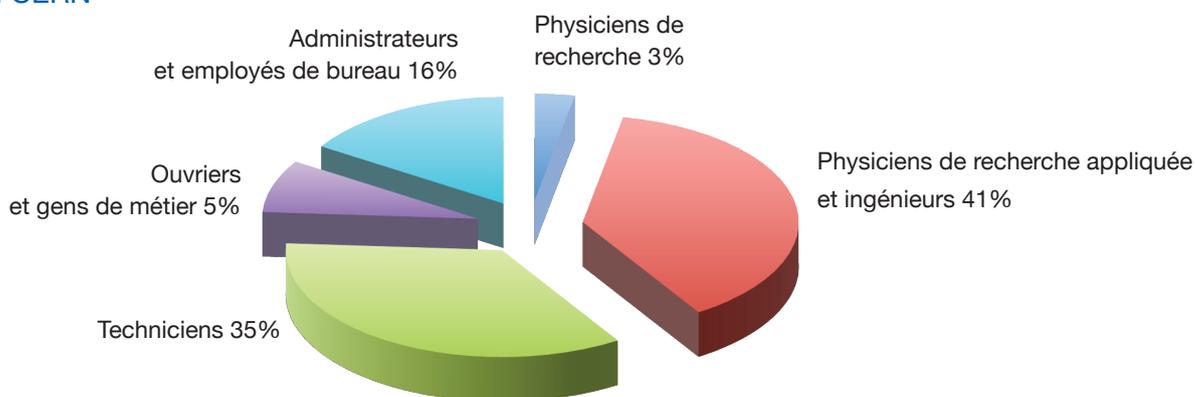


Départements et groupes

S DIR	Secteur du bureau du Directeur général	S AT	Secteur des accélérateurs et de la technologie	PH-ADO	Exploitation du détecteur d'ATLAS
DG	Directeur général	BE	Département des faisceaux	PH-ADP	Traitement de données d'ATLAS
DG-AS	Support administratif	BE-ABP	Physique des accélérateurs et faisceaux	PH-ADT	Acquisition de données et déclenchement d'ATLAS
DG-CO	Communication	BE-ASR	Administration, sécurité et ressources	PH-AID	Détecteurs et systèmes d'ALICE
DG-CS	Secrétariat du Conseil	BE-BI	Instrumentation de faisceaux	PH-AIO	Coordination et gestion d'ALICE
DG-DG	Bureau du Directeur général	BE-CO	Contrôles	PH-AIP	Informatique et physique d'ALICE
DG-DI	Bureau du Directoire	BE-HDO	Bureau du chef de département	PH-CMD	Acquisition de données et déclenchement de CMS
DG-EDU	Education	BE-OP	Opération	PH-CMG	Physique, logiciels et matériel de calcul de CMS
DG-EU	Bureau des projets de l'UE	BE-RF	Radio-fréquence	PH-CMO	Organisation de CMS
DG-IA	Service d'audit interne	EN	Département Ingénierie	PH-CMX	Systèmes expérimentaux de CMS
DG-IR	Relations internationales	EN-CV	Refroidissement et ventilation	PH-DI	Bureau du chef de département
DG-LS	Service juridique	EN-EL	Ingénierie électrique	PH-DT	Technologie des détecteurs
DG-PRT	Bureau du protocole	EN-GMS	Gestion générale et secrétariats	PH-ESE	Systèmes électroniques pour les expériences
DG-RH	Relations avec les pays-hôtes	EN-HDO	Bureau du chef de département	PH-LBC	Informatique de LHCb
DG-RPC	Planification des ressources, processus et contrôle	EN-HE	Ingénierie manutention	PH-LBD	Détecteurs de LHCb
DG-TM	Traduction et procès-verbaux	EN-ICE	Contrôles industriels et ingénierie	PH-LBO	Coordination de LHCb
DGS	Unité Santé et Sécurité au travail et protection de l'environnement	EN-MEF	Infrastructures machines et zones expérimentales	PH-LCD	Détecteurs pour les collisionneurs linéaires
DGS-DI	Bureau du chef de l'Unité HSE	EN-MME	Ingénierie mécanique et matériaux	PH-SFT	Logiciels pour les expériences
DGS-RP	Groupe Radioprotection	EN-STI	Sources, cibles et interactions	PH-SME	Petites et moyennes expériences
DG-SEE	Groupe Ingénierie de sécurité et environnement	TE	Département Technologie	PH-TH	Physique théorique
S AI	Secteur de l'administration et de l'infrastructure générale	TE-ABT	Transfert de faisceaux	PH-TOT	Expérience TOTEM
FP	Département des finances, achats et transfert de connaissances	TE-CRG	Cryogénie	PH-UAD	Utilisateurs antiprotons
FP-DI	Bureau du chef de département	TE-EPC	Convertisseurs de puissance électrique	PH-UAI	Utilisateurs ALICE
FP-FAS	Services financiers et comptables	TE-HDO	Bureau du chef de département	PH-UAT	Utilisateurs ATLAS
FP-KT	Transfert de connaissances	TE-MPE	Protection des machines et intégrité électrique	PH-UC3	Utilisateurs CTF3
FP-PI	Approvisionnements et services industriels	TE-MSC	Aimants, supraconducteurs et cryostats	PH-UCM	Utilisateurs CMS
GS	Département des services généraux et de l'infrastructure	TE-RPA	Ressources, planification et administration (jusqu'au 30.09.2014)	PH-UFT	Utilisateurs cibles fixes
GS-AIS	Systèmes d'information avancés	TE-VSC	Vide, couches et surfaces	PH-UGC	Utilisateurs collaboration générale
GS-ASE	Accès, sécurité et outils d'ingénierie	S RC	Secteur de la recherche et de l'informatique	PH-UHC	Utilisateurs LHC autres
GS-DI	Bureau du chef de département	IT	Département des technologies de l'information	PH-UIS	Utilisateurs ISOLDE
GS-FB	Secours et feu	IT-CF	Gestion des équipements informatiques	PH-ULB	Utilisateurs LHCb
GS-IS	Services intégrés	IT-CIS	Services de collaboration et d'information	PH-ULD	Utilisateurs détecteurs des collisionneurs linéaires
GS-ME	Service médical	IT-CS	Systèmes de communication	PH-UNT	Utilisateurs n_TOF
GS-SE	Ingénierie site	IT-DB	Services de bases de données	PH-UOP	Utilisateurs autre physique
GS-SIS	Service d'information scientifique	IT-DI	Infrastructure du département	PH-URD	Utilisateurs R&D
GS-SMS	Support gestion des services	IT-DSS	Services de données et de stockage	PF	Caisse de pensions
HR	Département des ressources humaines	IT-OIS	Systèmes d'exploitation et services d'infrastructure	PFMU	Unité de gestion de la Caisse de pensions
HR-CB	Rémunération et prestations	IT-PES	Plateformes et services d'ingénierie	PF-BA	Prestations et comptabilité
HR-DHO	Bureau du chef de département	IT-SDC	Support à l'informatique distribuée	PF-AAR	Allocation d'actifs et gestion de risque
HR-FL	Conseillers HR	PH	Département de physique	PF-IPM	Gestion interne de portefeuille
HR-LD	Formation et développement	PH-ADE	Systèmes expérimentaux d'ATLAS	PF-MO	Middle Office
HR-SA	Secrétariat de l'Association du personnel (administrativement rattaché à HR)			PF-GMS	Administration générale
HR-TA	Acquisition de talents				

Le CERN en chiffres

Personnel du CERN



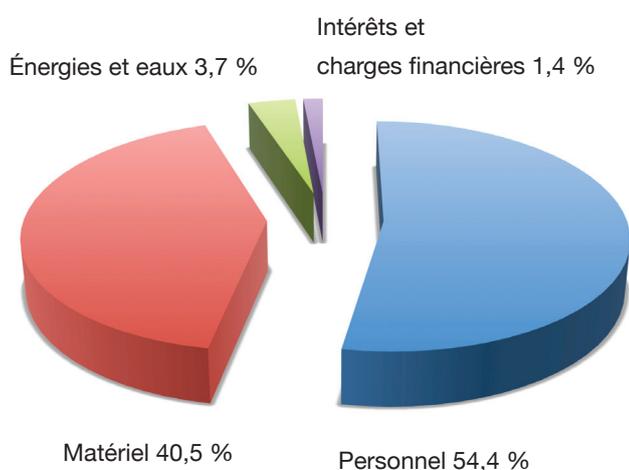
Évolution des effectifs des membres du personnel titulaires *Postes à financement externe inclus*

2011	2424
2012	2512
2013	2513
2014	2524

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

2011	11 449
2012	12 080
2013	12 313
2014	13 142

Dépenses du CERN



Total des dépenses 1133,7 MCHF

Personnel	616,7
Matériel	459
Marchandises, consommables et fournitures	228,8
Autres charges de matériel	230,4
Énergies et eaux	42,2
Intérêts et charges financières	15,8

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 permanent 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. La toute dernière génération d'accélérateurs de particules atteint des énergies de plusieurs milliers de milliards d'électronvolts (de l'ordre du TeV). Un TeV représente à peu près l'énergie cinétique d'un moustique en vol.

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.

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 permettant d'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).

HL-LHC

Projet LHC haute luminosité, qui vise à accroître le potentiel de découvertes du LHC en augmentant la luminosité d'un facteur 5 à 10.

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, notamment dans le domaine des sciences de la vie. (Voir également isotope).

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 (beauté). La catégorie des 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, qui sont des particules de matière, sont désignés collectivement 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 ; enfin, 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, particules formées d'une paire quark-antiquark, et les baryons, particules formées de trois quarks. Le pion et le kaon sont deux types de mésons. Les neutrons et les protons (constituants la matière ordinaire) sont des baryons ; les neutrons contiennent un quark u et deux quarks d ; les protons contiennent 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 également 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.

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 également ceux du LHC.

Supersymétrie

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

Supraconductivité

Propriété de certains matériaux, habituellement à très basse température, de conduire l'électricité sans résistance. Un courant électrique émis dans un circuit supraconducteur y circulera éternellement, pour autant que le circuit reste suffisamment froid.

Transfert de technologies

Promotion de technologies développées, par exemple au CERN, afin d'en transmettre les bénéfices socioéconomiques et culturels.

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 pour le LHC*)

Grille 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.

