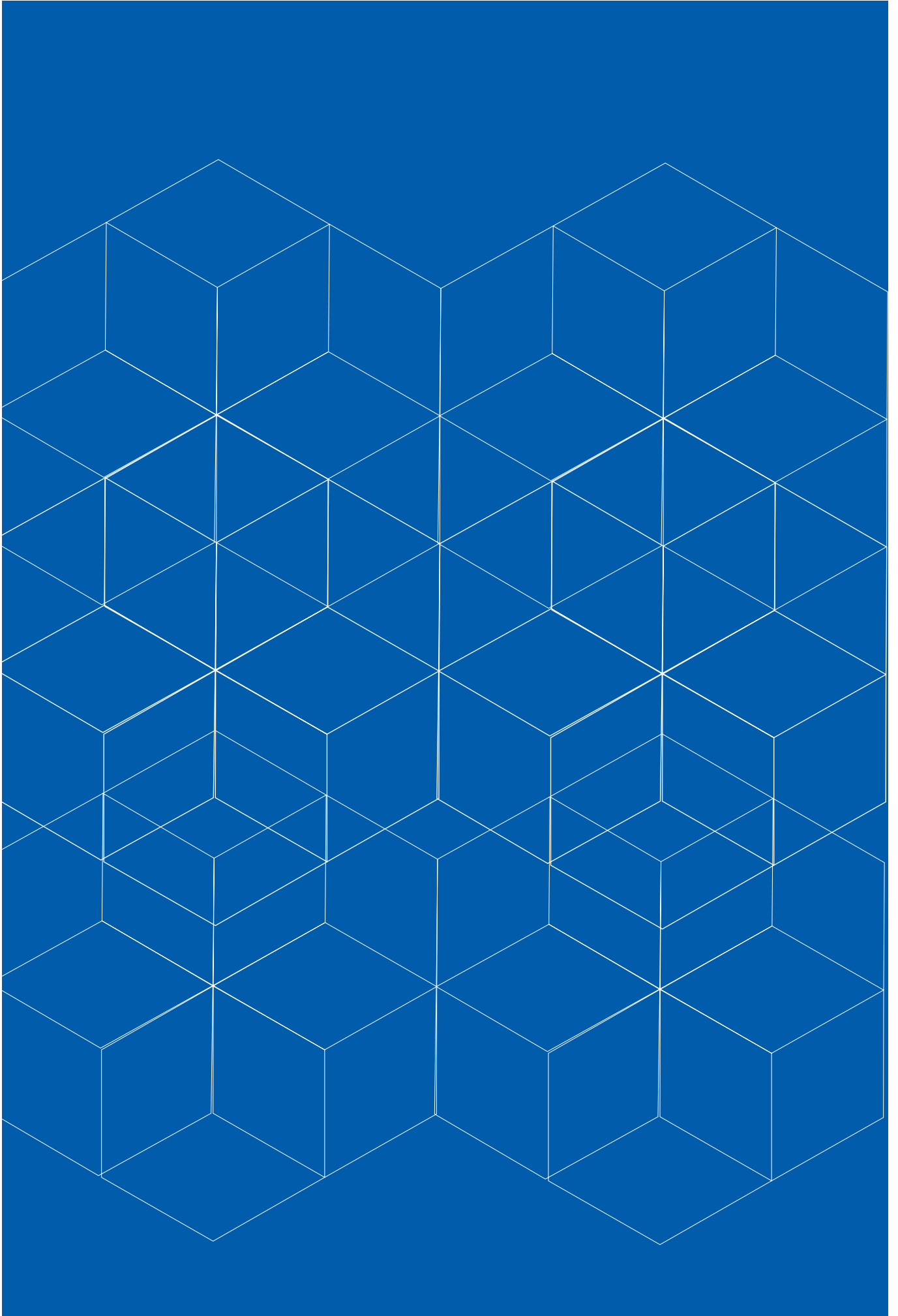


Rapport annuel **2017**





SOMMAIRE

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

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



**P4
MESSAGES**

**P6
2017 EN IMAGES**

**P12
EXPLORER LA NATURE DE L'UNIVERS**

**P20
LES MACHINES DES DÉCOUVERTES**

**P30
UN LABORATOIRE POUR LE MONDE**

**P32
REPOUSSER LES FRONTIÈRES
DES TECHNOLOGIES**

**P36
FORMER LES NOUVELLES
GÉNÉRATIONS**

**P40
AGIR POUR UNE RECHERCHE
RESPONSABLE**

**P44
CONSTRUIRE L'AVENIR**

**P50
GOUVERNANCE**

**P53
LE CERN EN CHIFFRES**



MESSAGE DU PRÉSIDENT DU CONSEIL

Cette année encore, les accélérateurs et expériences de physique du CERN ont battu des records, fruit d'efforts considérables. Plusieurs défis techniques importants ont été surmontés grâce à la polyvalence et aux compétences des équipes du CERN, qui ont travaillé de concert avec de nombreux scientifiques visiteurs et ingénieurs d'universités et d'instituts du monde entier. Le Conseil félicite la Direction du CERN pour les remarquables résultats obtenus par le Laboratoire, dans les limites du budget fixé.

Le bilan d'activités annuel et les états financiers du CERN 2017 sont les derniers vérifiés par la Chambre suprême de contrôle de Pologne (NIK). Celle-ci a assumé les fonctions de commissaires aux comptes de l'Organisation pendant la durée maximale prévue, trois ans plus une prolongation de deux ans. Au nom du Conseil, je tiens à la remercier pour le travail rigoureux, clair et assidu de vérification des comptes du CERN et de la Caisse de pensions qu'elle a accompli durant cinq ans. Le Conseil a nommé la Cour des comptes de Finlande prochains commissaires aux comptes de l'Organisation à compter du 1^{er} janvier 2018.

Les organes subsidiaires du Conseil sont essentiels à son fonctionnement. Le Comité des directives scientifiques et le Comité des finances sont les plus connus, mais d'autres jouent un rôle indispensable. Parmi eux, le Forum tripartite sur les conditions d'emploi (TREF), et le Comité d'audit, créé en 2017 par le Conseil pour succéder au Comité consultatif permanent sur les audits. Le Comité d'audit est une autre pierre angulaire de la surveillance des mécanismes de l'Organisation exercée par le Conseil. En particulier, le Conseil a pris note avec satisfaction de l'avis du Comité d'audit selon lequel la Direction du CERN avait considérablement progressé dans la cartographie des risques pour l'Organisation et dans l'élaboration de mécanismes visant à atténuer ces risques.

De nombreux objectifs fixés dans la stratégie européenne pour la physique des particules de 2013, ainsi que des projets menés dans différents pays, étant sur le point d'être réalisés, les questions en suspens de la physique des particules ont pu être mieux définies, tandis que d'autres sont apparues. Le moment est venu, alors que de

nouvelles données seront collectées en 2018, de lancer en septembre la prochaine mise à jour de la stratégie européenne. À cette fin, des étapes essentielles ont été franchies en 2017, avec l'établissement du Secrétariat de la stratégie et la nomination par le Conseil d'Halina Abramowicz comme secrétaire. Placés sous la présidence du secrétaire de la stratégie, les membres du Secrétariat sont les présidents du Comité des directives scientifiques, du Comité européen pour les futurs accélérateurs (ECFA) et de la Réunion des directeurs des laboratoires européens. Le Secrétariat s'est lancé dans sa mission et, en décembre, a soumis au Conseil pour commentaire une proposition de planning pour le processus de mise à jour.

Le CERN est attractif pour de nombreux pays souhaitant se joindre à ses recherches de pointe dans un esprit de collaboration internationale. En 2017, la République de Slovaquie est devenue État membre associé en phase préalable à l'adhésion. La République de l'Inde est devenue État membre associé et la Lituanie a signé un accord pour accéder au même statut. L'année 2017 a également été marquée par l'inauguration à Amman en Jordanie du Centre international de rayonnement synchrotron pour les sciences expérimentales et appliquées au Moyen-Orient (SESAME). Le CERN félicite chaleureusement SESAME, qui représente une nouvelle initiative scientifique au service de la paix, dans la tradition de notre Organisation. Le Conseil a été ravi d'apprendre que la demande d'accession du CERN au statut d'observateur a été approuvée par le Conseil de SESAME.

Dernier point, 2017 a vu le départ à la retraite bien mérité de Brigitte Van der Stichelen, qui dirigeait le Secrétariat du Conseil depuis 2001. Le Conseil lui souhaite tout le meilleur pour cette nouvelle étape de sa vie et se félicite que les responsabilités du Secrétariat aient été transférées à une personne tout aussi compétente.

Sijbrand de Jong



MESSAGE DE LA DIRECTRICE GÉNÉRALE

L'année 2017 a été remarquable pour le CERN, toutes les activités du Laboratoire ayant réalisé de grandes avancées. Le complexe d'accélérateurs a battu de nouveaux records de disponibilité du faisceau, et le LHC a atteint une luminosité de crête de $2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, soit un facteur deux fois supérieur à sa valeur nominale. Par conséquent, le LHC est sur le point de dépasser son objectif, qui est de fournir à ATLAS et CMS 150 fb^{-1} de données au terme de la deuxième période d'exploitation, fin 2018.

La profusion de données de haute qualité enregistrées à ce jour par les expériences a permis d'explorer en profondeur la gamme des masses de plusieurs TeV et d'effectuer un grand nombre de mesures de précision. La physique du boson de Higgs est entrée dans l'ère de la précision et, en 2017, les couplages de cette particule très spéciale aux fermions les plus lourds (le quark top, le quark bottom et le lepton tau) ont été établis.

Le projet d'amélioration des injecteurs du LHC (LIU), le LHC à haute luminosité (HL-LHC) et les expériences ont accompli des progrès considérables en vue de leur installation au cours des deux prochains longs arrêts.

À la plateforme neutrino du CERN, la construction de prototypes de détecteur à argon liquide pour l'expérience neutrino longue distance DUNE, aux États-Unis, a bien commencé. ISOLDE a célébré 50 ans de physique avec des faisceaux radioactifs, et l'installation innovante CERN-MEDICIS a produit ses premiers isotopes médicaux. L'anneau d'ELENA, amélioration de notre Décélérateur d'antiprotons unique au monde, a été installé et mis en service. Les études techniques relatives aux futurs projets et collisionneurs – Collisionneur linéaire compact (CLIC), Futur collisionneur circulaire (FCC) et physique au-delà des collisionneurs – ont bien progressé en vue de leur contribution à la mise à jour de la stratégie européenne pour la physique des particules.

En 2017, environ 2 000 jeunes, dont des boursiers, des doctorants et des étudiants d'été, ont été formés au CERN. Le programme *CERN Alumni* a été lancé, et un Bureau de la protection des données personnelles a été créé afin que

le CERN se conforme à la réglementation et aux bonnes pratiques en la matière. La Société américaine de physique a rejoint le Groupement pour la libre diffusion des résultats de physique des particules (SCOAP³), hébergé au CERN, qui rassemble plus de 90 % des publications dans le domaine de la physique des hautes énergies.

Le Comité directeur pour la protection de l'environnement du CERN a publié ses premières recommandations visant à atténuer l'impact du CERN sur l'environnement. Celles-ci comprennent des mesures pour la protection des cours d'eau aux abords des sites et pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

En 2017, le CERN a attiré le nombre record de 136 000 visiteurs sur son domaine, et 400 000 personnes ont visité nos expositions itinérantes.

Tous ces réalisations et autres performances décrites dans ce rapport n'auraient pas été possibles sans les compétences et le dévouement des membres du personnel du CERN, employés et associés, et sans l'appui indéfectible du Conseil. L'ensemble de la Direction et moi-même leur adressons nos plus sincères remerciements.

Fabiola Gianotti

A handwritten signature in black ink that reads "Fabiola Gianotti". The signature is written in a cursive, flowing style.

2017 EN IMAGES

Des records pour les accélérateurs, des cascades de données pour l'informatique, des moissons de résultats pour les expériences, de nouvelles nations dans la grande famille du CERN, et bien plus... découvrez l'année 2017 en images.



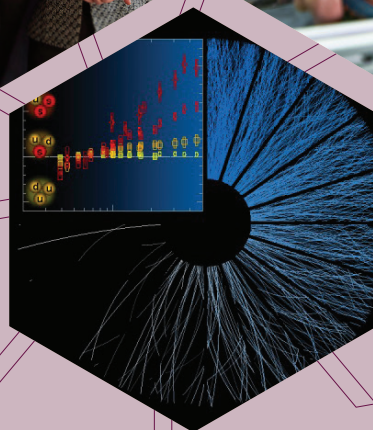
16 JANVIER

L'Inde devient État membre associé du CERN. Ici, Amandeep Singh Gill, ambassadeur et représentant permanent de l'Inde auprès de la Conférence du désarmement, pose aux côtés de Fabiola Gianotti, directrice générale du CERN. Dans leurs mains, les notifications officielles du gouvernement indien et du CERN. (CERN-PHOTO-201701-009-16)



18 JANVIER

L'expérience sur l'antimatière BASE annonce la mesure la plus précise jamais effectuée du moment magnétique de l'antiproton. Neuf mois plus tard, la collaboration améliore la précision de la mesure précédente d'un facteur 350 (voir p. 18). (CERN-PHOTO-201710-255-8)



24 AVRIL

De nouveaux résultats de la collaboration ALICE révèlent des phénomènes inédits dans des collisions de protons : l'observation de particules habituellement produites lors de collisions de noyaux lourds (voir p. 16). (OPEN-PHO-EXP-2017-003-2)

27 AVRIL

Le CERN et la Société américaine de physique signent un accord de publication en libre accès dans le cadre de l'initiative SCOAP³, le Groupement pour la libre diffusion des résultats de physique des particules (voir p. 34).

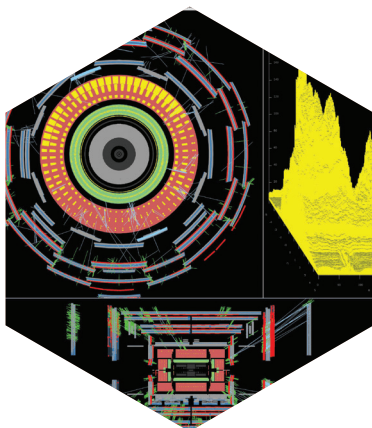
9 MAI

Frédéric Bordry, directeur des accélérateurs et de la technologie du CERN, Fabiola Gianotti, directrice générale du CERN, et Maurizio Vretenar, chef du projet Linac4, inaugurent le tout nouvel accélérateur linéaire du Laboratoire. Le Linac4 alimentera le complexe d'accélérateurs du CERN à partir de 2021 (voir p. 46). (CERN-PHOTO-201705-120-19)



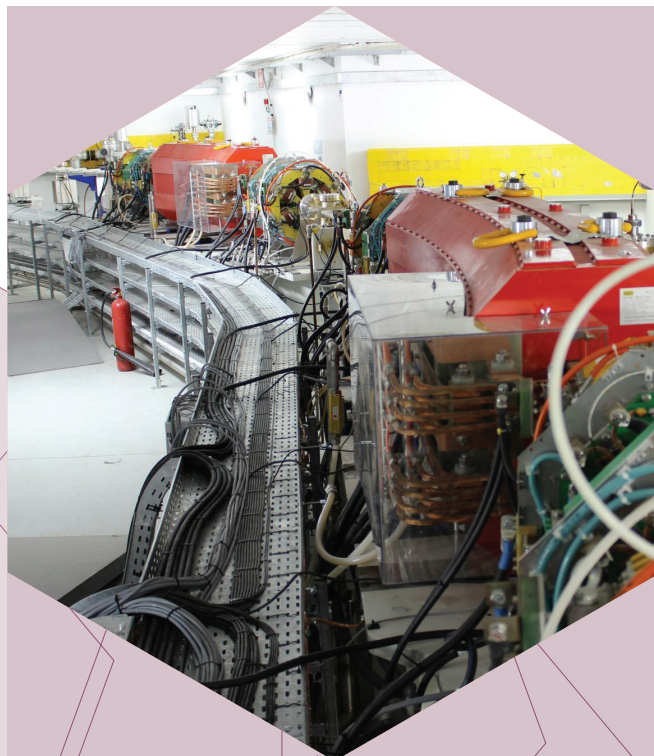
21 MAI

L'arrivée d'une vingtaine d'élèves hongrois au CERN marque le coup d'envoi du cycle de stages pour les élèves du secondaire des États membres. Au programme : deux semaines de découvertes et d'échanges scientifiques (voir p. 38). (CERN-PHOTO-201705-131-29)



23 MAI

Prêts pour la physique au LHC ! Les expériences commencent la prise des données en 2017.



16 MAI

SESAME, l'accélérateur du Centre international de rayonnement synchrotron pour les sciences expérimentales et appliquées au Moyen-Orient, est officiellement inauguré à Allān en Jordanie par le roi Abdallah II de Jordanie, entouré des représentants des membres de SESAME et des directeurs des organisations internationales qui ont soutenu le laboratoire.

SESAME est une source de lumière synchrotron qui permet de mener des recherches dans de nombreux domaines allant de la physique du solide aux sciences de l'environnement et à l'archéologie.

Fondé sur le modèle de gouvernance du CERN, SESAME est une collaboration inédite au Moyen-Orient qui rassemble l'Autorité palestinienne, Chypre, l'Égypte, l'Iran, Israël, la Jordanie, le Pakistan et la Turquie. Le CERN a par ailleurs grandement contribué sur le plan technique en développant des aimants à travers le projet CESSAMag, cofinancé par la Commission européenne.

Le 12 janvier, un faisceau circulait pour la première fois dans le synchrotron. La première lumière a marqué le début du programme d'expérimentation et de collaboration entre des scientifiques du Moyen-Orient.

12 JUIN

Le détecteur de neutrinos ICARUS quitte le CERN pour rejoindre sa nouvelle demeure, Fermilab, aux États-Unis. ICARUS arrivera à bon port au terme d'un périple de six semaines. (CERN-PHOTO-201612-323-10)



16 JUIN

Ameenah Gurib-Fakim, présidente de la République de Maurice, signe le livre d'or du CERN alors que Bidhya Devi Bhandari, présidente de la République démocratique du Népal, visite la salle de contrôle de l'expérience ATLAS aux côtés de Dave Charlton, ancien porte-parole de l'expérience. (CERN-PHOTO-201706-146-9 et CERN-PHOTO-201706-145-9)

27 JUIN

Fabiola Gianotti, directrice générale du CERN, et Linas Linkevičius, ministre des Affaires étrangères de la République de Lituanie, signent, en présence de Dalia Grybauskaitė, présidente de la République de Lituanie, un accord en vue d'octroyer à la Lituanie le statut d'État membre associé du CERN.

29 JUIN

Le Centre de calcul du CERN bat les records avec 200 millions de gigaoctets (pétaoctets) de données archivées de façon permanente dans ses bibliothèques de bandes magnétiques. C'est l'équivalent de 1 400 ans de films en haute définition (voir p. 26). (CERN-PHOTO-201705-115-7)

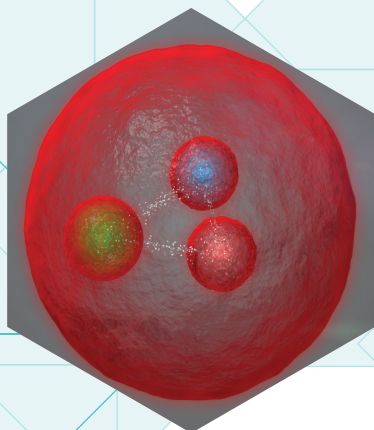
4 JUILLET

La République de Slovénie devient officiellement État membre associé en phase préalable à l'adhésion au CERN. Ici, Vojislav Šuc, ambassadeur de la République de Slovénie auprès des Nations Unies à Genève et des autres organisations internationales, remet la notification officielle à Fabiola Gianotti, directrice générale du CERN. (CERN-PHOTO-201707-165-1)



7 JUILLET

Frédéric Bordry, directeur des accélérateurs et de la technologie du CERN, accueille Duško Marković, premier ministre du Monténégro, dans le hall des aimants supraconducteurs. (CERN-PHOTO-201707-175-45)



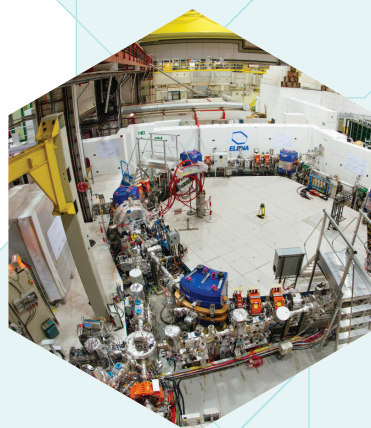
6 JUILLET

La collaboration LHCb observe une charmante nouvelle particule appartenant à la famille des baryons (comme les protons des atomes) et contenant deux quarks charmés et un quark up (voir p. 15). (OPEN-PHO-EXP-2017-004-7)



19 JUILLET

La physique rime avec musique, surtout lorsque le groupe de rock canadien Arcade Fire découvre le Centre de contrôle du CERN et que le groupe américain Pixies pose devant une maquette du détecteur CMS.

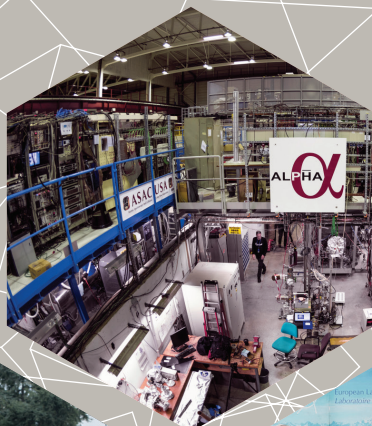


2 AOÛT

À vos marques, prêts, décélérez ! ELENA, le tout nouvel anneau de décélération du CERN pour les expériences sur l'antimatière, reçoit son premier faisceau d'antiprotons (voir p. 47). (CERN-PHOTO-201611-300-1)

3 AOÛT

L'expérience ALPHA publie la première observation de la structure hyperfine de l'antihydrogène, ouvrant la voie à une meilleure compréhension des différences entre matière et antimatière (voir p. 18). (CERN-PHOTO-201601-005-11)



12 SEPTEMBRE

Charlotte Warakaulle, directrice des relations internationales, et Rolf Heuer, président du Conseil de SESAME, posent devant les 58 serveurs informatiques prêts à être envoyés en Jordanie, pour être utilisés par le tout nouveau laboratoire synchrotron SESAME. En 2017, le CERN a également fait don de matériel informatique à des instituts algériens et bulgares. (CERN-PHOTO-201709-215-1)



17-21 SEPTEMBRE

Plus d'un millier de scientifiques et d'ingénieurs se réunissent à Genève dans le cadre de la grande conférence sur les supraconducteurs et leurs applications, EUCAS 2017. Pour l'occasion, un aimant supraconducteur trône devant le Palais des Nations Unies. (CERN-PHOTO-201709-213-1)



20 SEPTEMBRE

Māris Kučinskis, premier ministre de la République de Lettonie, profite de sa venue au CERN pour découvrir les expériences du laboratoire du CERN pour les écoles, S'Cool Lab. (CERN-PHOTO-201709-228-22)

20 SEPTEMBRE

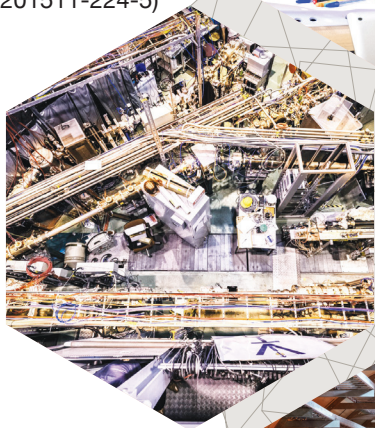
Les deux équipes gagnantes de l'édition 2017 du concours *Ligne de faisceau pour les écoles*, venues d'Italie et du Canada, arrivent au CERN pour mener leur expérience sur un accélérateur du CERN. (CERN-PHOTO-201710-242-29)

29 SEPTEMBRE

Le Laboratoire ouvre ses portes à plus de 1 400 personnes à l'occasion de la *Nuit européenne des chercheurs* au CERN. (CERN-PHOTO-201710-241-13)

16 OCTOBRE

Joyeux anniversaire ISOLDE ! La plus ancienne installation d'expérimentation du CERN encore en service fête ses 50 ans de physique. (CERN-PHOTO-201511-224-5)



15 DÉCEMBRE

Le CERN célèbre les 25 ans du programme d'expérimentation du LHC, correspondant à la réunion d'Évian, qui fut une étape cruciale de la conception et du développement des expériences LHC. (CERN-PHOTO-201712-303-5)

30 OCTOBRE

L'objectif de collecte de données du LHC pour 2017 est atteint. Trois jours plus tard, l'accélérateur établit un record de luminosité instantanée, c'est-à-dire du nombre de collisions par seconde (voir p. 21). (CERN-PHOTO-201802-030-6)



10-19 NOVEMBRE

Une ribambelle de volontaires passionnés, de nombreuses activités, des milliers de visiteurs de tous les âges... Le CERN sert un festin de science lors des *Automnales*, la foire annuelle de Genève, où il est hôte d'honneur (voir p. 37). (CERN-PHOTO-201711-279-13)



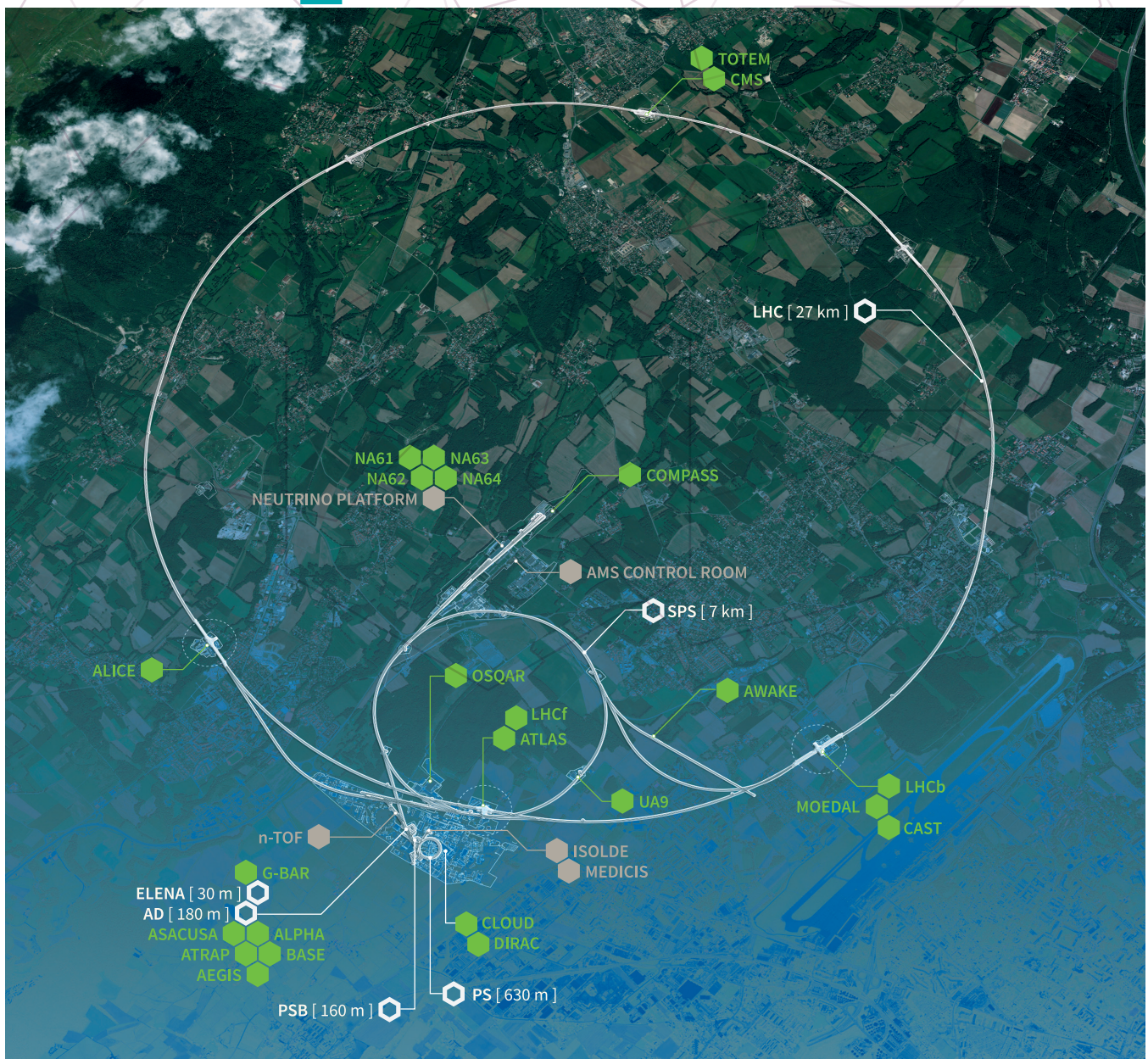
12 DÉCEMBRE

La nouvelle installation CERN-MEDICIS produit pour la première fois des radioisotopes destinés à la recherche médicale (voir p. 33). (CERN-PHOTO-201705-117-19)

EXPLORER LA NATURE DE L'UNIVERS

La mission du CERN est d'explorer la structure fondamentale de notre Univers grâce à un complexe d'accélérateurs unique, capable de générer des collisions de particules entre elles ou sur des cibles fixes. Les résultats sont enregistrés par des détecteurs géants et transmis à des milliers de physiciens qui les analysent.

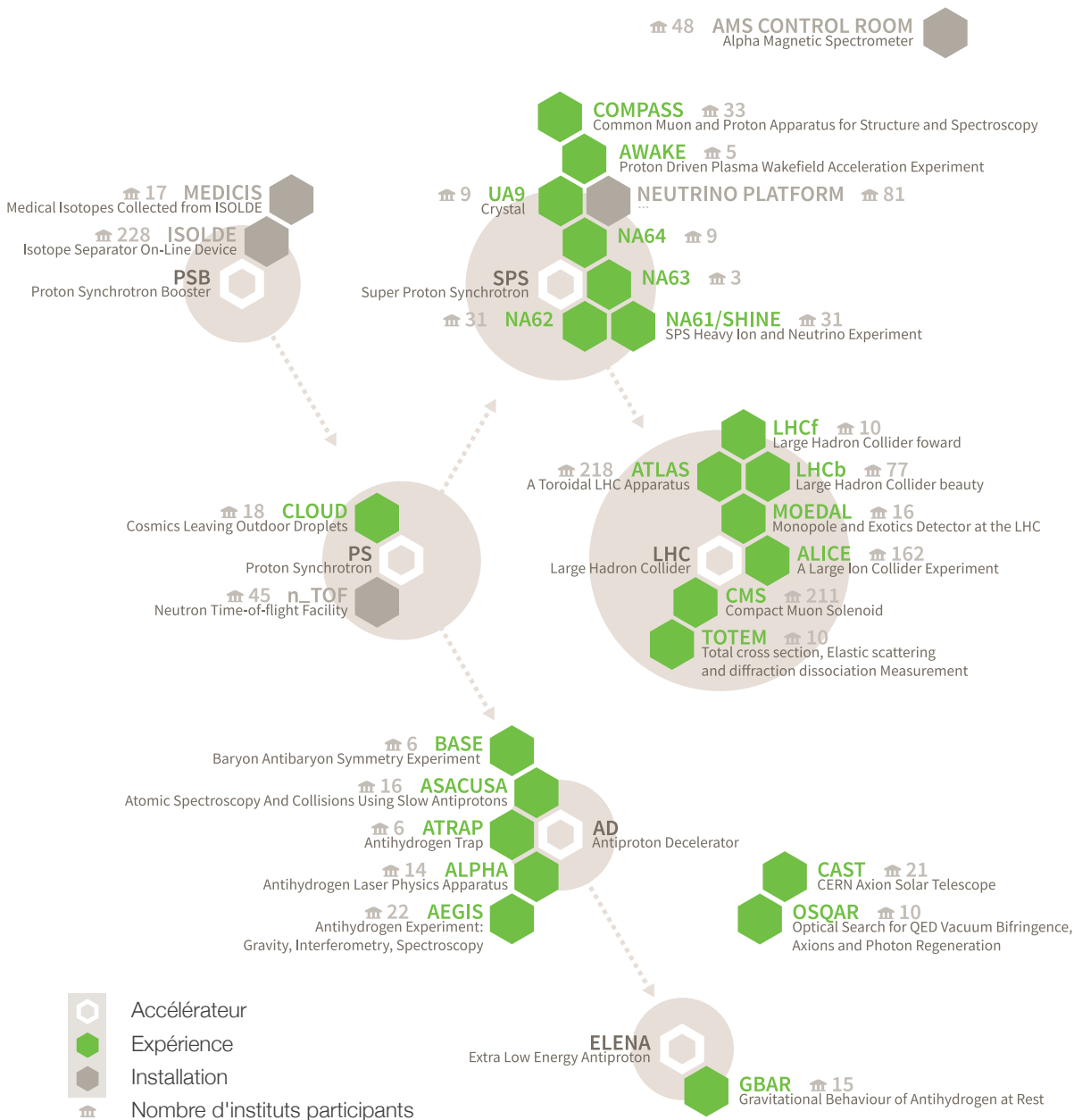
LE COMPLEXE D'ACCÉLÉRATEURS DU CERN ET LES EXPÉRIENCES QU'IL ALIMENTE



Le Grand collisionneur de hadrons (LHC) produit des collisions de protons au sein de quatre grandes expériences : ALICE, ATLAS, CMS et LHCb. En 2017, le collisionneur a fonctionné à une énergie dans le centre de masse de 13 TeV. En raison des remarquables performances de la machine, ATLAS et CMS ont développé de nouveaux outils pour traiter le très grand nombre de collisions. Au total, 70 pétaoctets de données ont été enregistrés par les expériences, plus de 330 articles scientifiques ont été publiés, et quelque 2 700 doctorants ont participé aux analyses. Cette année a également été marquée par le

25^e anniversaire du programme d'expérimentation du LHC : c'est en effet en 1992 que les lettres d'intention d'ATLAS et de CMS ont en effet été présentées, suivies de celles d'ALICE et de LHCb.

En 2017, les expériences LHC et les autres expériences du programme de physique du CERN ont permis de mieux comprendre le boson de Higgs, de mettre à l'épreuve de façon poussée le Modèle standard, de réaliser des mesures fondamentales de l'antimatière et de donner de nouvelles perspectives sur l'existence de nouvelles particules et forces.



Le complexe d'accélérateurs interconnectés du CERN alimente une multitude d'expériences et d'installations utilisées par des physiciens de plusieurs centaines d'instituts dans le monde.



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

PLUS DE 330 ARTICLES SCIENTIFIQUES ONT ÉTÉ PUBLIÉS ET QUELQUE 2 700 DOCTORANTS ONT PARTICIPÉ AUX ANALYSES.

LE BOSON DE HIGGS AU MICROSCOPE

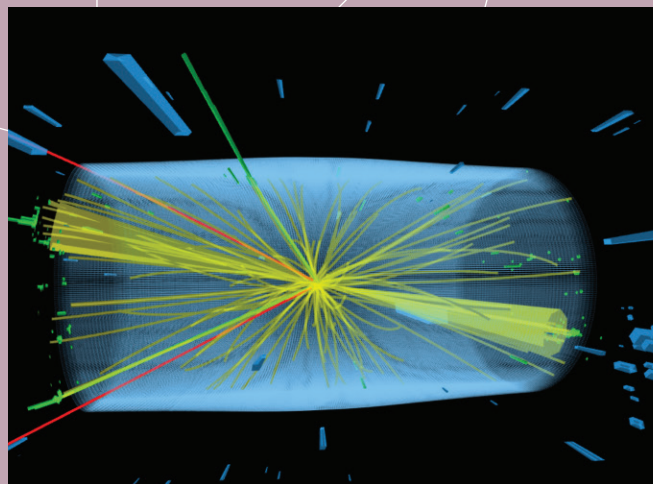
Le 4 juillet 2017 a marqué le cinquième anniversaire de la découverte du boson de Higgs par ATLAS et CMS. Tout au long de l'année, les deux expériences ont généré une profusion de nouveaux résultats sur le Higgs. Les prédictions du Modèle standard de la physique des particules concernant la manière dont le boson de Higgs interagit avec les autres particules sont très précises. La vérification de plus en plus poussée de ces prédictions, avec une précision croissante, occupe une grande place dans les programmes de recherche du LHC et des projets de futurs collisionneurs, car tout écart pourrait ouvrir la voie à une nouvelle physique.

Le boson de Higgs a été observé via sa désintégration en d'autres bosons ($\gamma\gamma$, ZZ et WW). Les processus correspondants ont été mesurés avec plus de précision grâce aux données recueillies à 13 TeV. En 2017, ATLAS et CMS ont établi les désintégrations et couplages complexes du Higgs à la troisième génération de fermions, en observant les premiers indices de sa désintégration en deux quarks bottom, et en étudiant pour la première fois les couplages Higgs-top. CMS a présenté la première observation à cinq sigmas par une expérience seule de la désintégration du boson de Higgs en deux leptons tau, et ATLAS a combiné les canaux de désintégration du Higgs les plus nets afin d'effectuer des mesures de sections efficaces avec une précision inédite.

NOUVELLES LIMITES POUR LE MODÈLE STANDARD

ATLAS et CMS ont publié d'importants résultats afin de tester le Modèle standard avec un niveau d'exigence inédit. Les grands volumes de données du LHC disponibles permettent aux collaborations d'améliorer la précision de leurs recherches et d'être plus sensibles à des processus très rares. Elles peuvent par exemple mesurer très

Événement candidat au boson de Higgs dans les collisions proton-proton enregistrées par CMS en 2016, montrant la production d'une paire de muons et de deux jets de haute énergie. (CMS-PHO-EVENTS-2016-007-3)



précisément les sections efficaces de certaines interactions, les masses de particules comme le boson de Higgs et le W, et la production électrofaible d'une paire de bosons W. ATLAS a observé le premier signe direct de la diffusion lumière-lumière à haute énergie dans des collisions plomb-plomb, processus très rare prédit par l'électrodynamique quantique. CMS a présenté une mesure précise de l'angle de mélange électrofaible $\sin^2\theta$ avec les données de la première période d'exploitation.

Du fait de sa masse importante, le quark top reste le moins étudié des quarks, et les mesures de ses caractéristiques sont propices à des recherches de physique au-delà du Modèle standard. Outre les mesures de sa masse, ATLAS a examiné les distributions angulaires des quarks top et de leurs produits de désintégration, et a découvert le premier signe d'un nouveau type de production de quark top isolé. CMS s'est intéressé aux processus rares générant des quarks top, comme la production d'un quark top unique ou de quatre quarks top simultanément, et a observé pour la première fois des quarks top dans des collisions proton-plomb. Les deux expériences ont uni leurs forces pour mesurer des asymétries de production de quarks top, une piste pour la recherche d'indices d'une nouvelle physique.

L'expérience LHCb a confirmé des éléments importants du Modèle standard, en commençant par la découverte du baryon doublement charmé (et doublement chargé), le Ξ_{cc}^{++} , prédit par le Modèle standard, mais jamais observé à ce jour. Cet état, et d'autres états semblables restant à observer, constituent une source précieuse d'informations sur la théorie de la force forte, la chromodynamique quantique. LHCb a aussi fait état de la manifestation de la désintégration la plus rare jamais observée du méson B^0 en une paire proton-antiproton, événement se produisant une fois sur environ 100 millions. La collaboration a présenté la première observation par une expérience seule de la désintégration d'un méson B en deux muons et la première mesure de la durée de vie effective de cette désintégration. L'expérience a utilisé de nouvelles techniques de spectroscopie du charmomium pour mesurer avec précision la masse et la largeur des mésons X_{c1} et X_{c2} . Enfin, LHCb a observé les premiers indices de violation de CP (charge-parité) dans les baryons, qui, s'ils sont confirmés, pourraient

permettre de franchir une nouvelle étape dans notre compréhension de la violation de CP et du déséquilibre cosmique entre matière et antimatière.

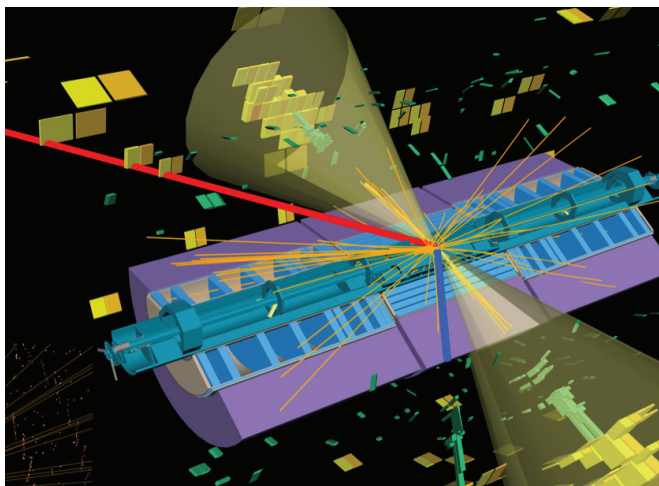
Avec les collisions d'ions lourds, les physiciens étudient des particules rares, comme les noyaux d'antihélium et les hypernoyaux (qui contiennent un baryon Λ , renfermant un quark étrange), et ainsi mieux comprendre la force forte. La collaboration ALICE a obtenu la mesure la plus précise de la durée de vie des « hypertritons » (états liés d'un proton, neutron et baryon Λ) lors des collisions plomb-plomb, et, s'appuyant sur une analyse des corrélations entre les kaons chargés et neutres, a formulé l'hypothèse que le méson $a_0(980)$, connu de longue date, est un tétraquark. ALICE a également mesuré la production de l'antiparticule de la particule alpha, l'antinoyau le plus lourd observé à ce jour.

En fin d'année, l'expérience TOTEM, qui étudie les interactions produites à petits angles, proches de la ligne de faisceau, avec des détecteurs situés à 220 mètres de part et d'autre de l'expérience CMS, a présenté des éléments à l'appui de l'existence d'un composé de trois gluons dénommé « odderon ». Théorisé dans les années 1970, il n'avait encore jamais été observé. Les résultats de TOTEM ont des implications sur la section efficace des collisions proton-proton au LHC et dans les futurs collisionneurs de haute énergie.

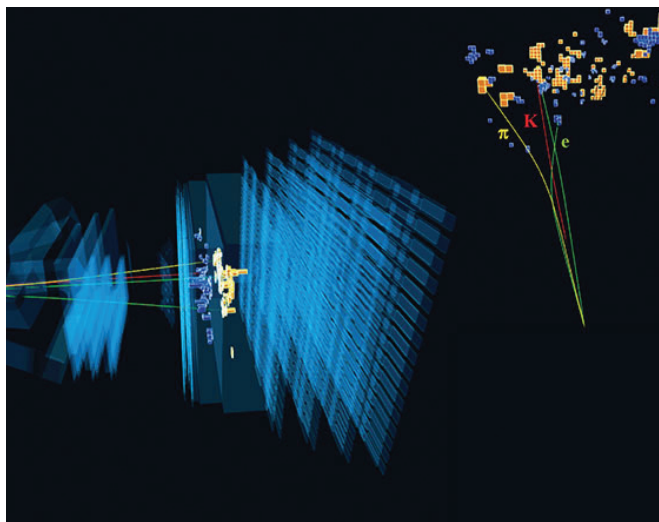
À LA RECHERCHE D'UNE NOUVELLE PHYSIQUE

Le Modèle standard décrit presque l'intégralité de ce qui a été mesuré par la physique des particules. Pourtant, il laisse en suspens des questions clés telles que la gravité et la matière noire, laissant penser qu'il existe des forces et des particules nouvelles au-delà de ce cadre théorique.

Cette année, de nombreuses recherches ont été menées dans ce domaine. ATLAS a repoussé au-delà de 2 TeV les limites concernant la masse des particules supersymétriques et a exploré des cas plus complexes, comme la supersymétrie avec spectre de masse resserré. CMS a mené plusieurs recherches relatives à la supersymétrie dans le secteur électrofaible et a exploré des états finaux difficiles à étudier expérimentalement avec une faible énergie manquante. ATLAS a également fait part des premiers résultats de ses recherches sur de nouvelles particules lourdes, notamment de matière noire, grâce aux données de la deuxième période d'exploitation, de la recherche d'une résonance de dibosons dans six canaux fondée sur les données de la première période d'exploitation, et de sa quête de particules à longue durée de vie à 13 TeV. CMS a examiné les signatures de di-jets à la recherche de particules de matière noire et a obtenu des limites plus restrictives pour de nouveaux processus de physique, tels que le mécanisme de « bascule » (« seesaw »), ainsi que



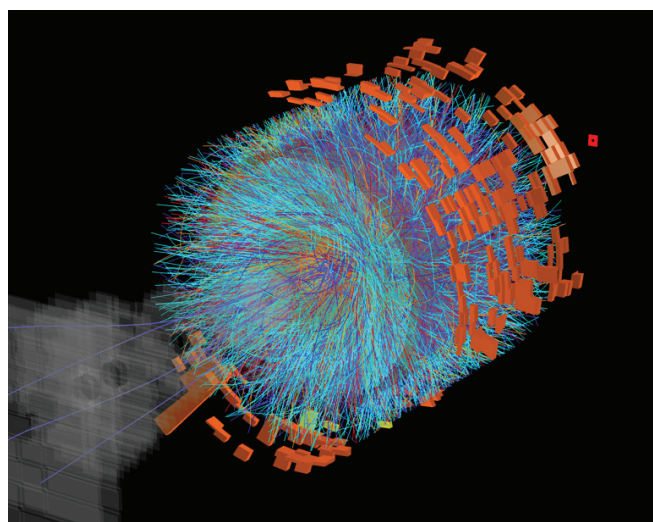
Candidat pour une paire de quarks top-antitop générée lors de collisions proton-proton, enregistré par ATLAS en 2016. (ATLAS-PHOTO-2018-016-1)



Un méson B^0 se désintègre en K^{*0} et en une paire électron-positon dans le détecteur LHCb. Ce type d'événement est utilisé pour tester l'universalité leptonique prédite par le Modèle standard. (OPEN-PHO-EXP-2018-004-1)

des contraintes plus rigoureuses quant à la possibilité de trous noirs microscopiques, de boules de corde et d'autres objets exotiques. L'ensemble des résultats d'ATLAS et de CMS sont en accord avec le Modèle standard, permettant d'éliminer certaines hypothèses de nouvelle physique.

L'expérience LHCb se spécialise dans les recherches moins directes de signes de nouvelle physique, en procédant à des mesures ultraprécises de processus du Modèle standard. Les analyses effectuées par LHCb ont produit des résultats qui pourraient remettre en cause le principe d'universalité leptonique, selon lequel les forces du Modèle standard ont le même effet sur tous les leptons. Tout écart pourrait être le signe que des particules nouvelles agissent dans les boucles quantiques du vide. LHCb a trouvé des indices dans ses données de la première période d'exploitation, en analysant le rapport des taux de désintégration pour des processus tels que $B \rightarrow K^* \mu \mu$ et $B \rightarrow K^* e e$. Une étude analogue sur l'universalité leptonique menée à LHCb sur les données de la même période et portant sur les processus $B \rightarrow D^* \tau \nu$ et $B \rightarrow D^* \mu \nu$ a trouvé des indices d'anomalies dans les rapports de désintégration, déjà signalés par les expériences BaBar et Belle aux États-Unis et au Japon. Ces indices n'ont pas de signification statistique confirmée, car ils sont limités par le volume de données de la première période d'exploitation. Une nouvelle analyse avec l'ensemble des données de la deuxième période d'exploitation (débutée en 2015), plus volumineuse, est donc attendue avec impatience. La possibilité que les particules de matière noire interagissent grâce à une force inconnue faiblement ressentie par les particules du Modèle standard a poussé LHCb à chercher des photons noirs, en obtenant de nouvelles contraintes plus rigoureuses pour la force de couplage entre ceux-ci et des photons classiques. CAST explore également l'univers sombre en pointant vers le Soleil un vaste aimant supraconducteur à la recherche d'axions de matière noire et de caméléons solaires (des candidats pour l'énergie noire). Cette expérience à la configuration unique devrait présenter de nouveaux résultats en 2018.



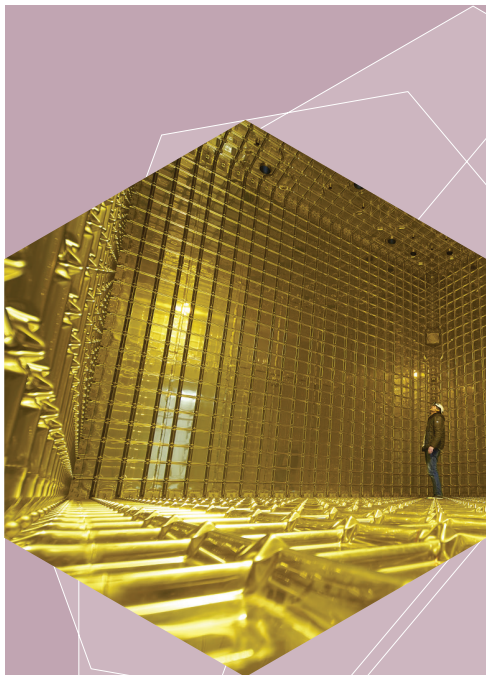
Résultats d'une collision entre deux noyaux de xénon dans le détecteur ALICE, conçu pour l'étude des collisions d'ions lourds. (ALICE-EVENTDISPLAY-2017-007-1)

EXPLORER LA DYNAMIQUE DES PREMIERS INSTANTS DE L'UNIVERS

Le LHC génère des collisions d'ions plomb et d'autres ions lourds afin de produire le plasma quark-gluon. Cette boule de feu, d'une température et d'une densité extrêmes, se rapproche des conditions des premiers instants de l'Univers. Dans la matière ordinaire, les quarks et les gluons sont confinés dans des protons et neutrons. Dans le plasma quark-gluon, au contraire, ils peuvent agir les uns sur les autres sur des distances bien plus longues. L'étude de cet état permet donc de tester la chromodynamique quantique, théorie qui décrit la force forte.

En 2017, la collaboration ALICE s'est appuyée sur les données collectées pendant les exploitations avec ions lourds en 2015 et 2016 pour tester le plasma quark-gluon sous tous les angles. L'un des principaux objectifs est de comprendre l'évolution de cet état primordial de sa naissance à la « congélation », moins d'un millième de milliardième de seconde plus tard, après laquelle il se condense en protons, neutrons et autres hadrons. ALICE a présenté de nouvelles mesures de la forme du plasma quark-gluon lors de la congélation, et a testé son évolution en déduisant de plusieurs façons, à partir de la mesure du méson J/ψ et de mésons contenant des quarks lourds, une propriété essentielle, l'écoulement elliptique.

Les mesures présentées cette année par ALICE fournissent l'indice le plus probant que des conditions semblables au plasma quark-gluon sont aussi créées lors de collisions proton-proton. ALICE a observé une hausse de la production de particules étranges, considérée comme l'un des signes de la formation du plasma quark-gluon, lors d'interactions proton-proton de grande multiplicité. Ces observations ouvrent la voie à de nouvelles études théoriques et expérimentales des collisions proton-proton et d'ions lourds, que mènent actuellement les quatre expériences LHC.



L'intérieur de l'un des détecteurs protoDUNE, conçus pour rejoindre les détecteurs lointains de l'expérience DUNE (Deep Underground Neutrino Experiment) aux États-Unis. (CERN-PHOTO-201710-248-3)

MYSTÉRIEUX NEUTRINOS

L'étude des neutrinos occupe une place importante dans le programme de physique des hautes énergies. Les physiciens se demandent en particulier d'où vient la masse, infime, de ces particules et si la symétrie charge-parité (CP) est conservée. La plateforme neutrino du CERN constitue la participation européenne aux projets menés aux États-Unis et au Japon dans ce domaine. Cette année a été marquée par de grandes avancées dans la technologie des détecteurs pour les futures expériences.

Une extension de la zone d'expérimentation Nord fournit des faisceaux chargés et un nouvel espace de test pour les détecteurs de neutrinos. La R&D relative à la technologie de la chambre à projection temporelle à argon liquide de grande envergure a bien progressé, notamment pour ce qui est des cryostats et des détecteurs. Après d'importants travaux de rénovation, le détecteur d'ICARUS, de 600 tonnes (comprenant deux modules), a été acheminé du CERN aux États-Unis au mois de juillet pour rejoindre le programme neutrino courte distance du Fermilab. En parallèle, le modèle de démonstration de la chambre à projection temporelle à argon liquide, de 3x3x1 m, a été achevé ; des traces de rayons cosmiques ont été observées et la construction de deux cryostats plus grands, d'un volume interne de 8x8x8 m chacun, a été réalisée. Les prototypes de détecteurs doivent y être installés dans le cadre de l'expérience internationale DUNE, aux États-Unis. Fin 2017, Baby MIND, un détecteur de muons magnétique, a été envoyé au Japon, où il jouera un rôle important dans la compréhension des oscillations des neutrinos par l'expérience T2K. Le dispositif de 75 tonnes a été conçu, construit puis testé avec faisceau au CERN pendant l'année. D'autres activités de physique des neutrinos sont également menées par les départements de physique théorique et expérimentale du CERN.

ISOLDE FÊTE 50 ANNÉES DE SCIENCE

En 2017, ISOLDE a fêté sa 50^e année de production d'isotopes radioactifs pour des recherches de physique très diverses, ainsi que de biophysique et de physique médicale. En 2017, 42 expériences sur la structure des noyaux exotiques (combinaisons rares de protons et de neutrons) ont été menées, grâce à la spectroscopie nucléaire de leurs désintégrations, la mesure de leur masse, la spectroscopie laser et l'étude de leurs réactions avec des faisceaux radioactifs post-accélérés. Les chercheurs ont également utilisé des sondes radioactives pour des recherches en physique des solides, des études des interactions fondamentales et des expériences biochimiques.

L'année a été marquée par les premières expériences au post-accélérateur HIE-ISOLDE, dont le troisième cryomodèle a été installé au printemps dans le cadre d'une mise à niveau d'envergure visant à accroître l'énergie des faisceaux d'ISOLDE. À partir de juillet, la machine améliorée a alimenté 12 expériences de physique avec des faisceaux ré-accélérés sur trois lignes de faisceaux, notamment l'étude sur la forme du sélénium 70 et des expériences avec du cuivre, qui ont révélé le noyau doublement magique du nickel. Depuis les premiers faisceaux post-accélérés fournis en 2001, ISOLDE a servi plus de 1 800 utilisateurs, et continue d'accueillir des expériences de pointe. Cette année a

également eu lieu la mise en service de MEDICIS (p. 33), nouvelle installation utilisant les protons restants en aval des cibles d'ISOLDE pour la production de radio-isotopes destinés à des applications médicales. MEDICIS est en lien avec des hôpitaux et des centres de recherche de la région, où ces isotopes peuvent être utilisés pour développer de nouveaux traitements et outils de diagnostic du cancer.

LA THÉORIE PROSPÈRE

En 2017, le département Physique théorique (TH) a produit une recherche de pointe venant à l'appui des activités du Laboratoire et servant la communauté internationale de la physique théorique, dans des domaines très divers : théorie des cordes, théorie quantique des champs, physique du Modèle standard (et au-delà du Modèle standard), chromodynamique quantique, physique des collisionneurs, physique des saveurs lourdes, théorie des champs sur réseau, théorie quantique des champs à haute température, ions lourds, cosmologie et astroparticules. Ainsi, en moyenne, environ un article par jour a été publié.

Parmi les résultats, on peut citer la prédiction précise de la production associée de bosons vecteurs et de jets au LHC, améliorant la sensibilité aux éventuels signaux de la matière noire ; une méthode de test de la structure temporelle du plasma quark-gluon combinant la physique du quark top et



*L'un des bureaux du département Physique théorique du CERN.
(CERN-PHOTO-201602-026-9)*

EN MOYENNE, LE DÉPARTEMENT

PHYSIQUE THÉORIQUE A PUBLIÉ

ENVIRON UN ARTICLE PAR JOUR EN 2017.

celle des ions lourds ; une étude poussée de l'interprétation théorique de l'antimatière des rayons cosmiques ; une exploration des propriétés et des conséquences phénoménologiques des théories de démultiplication « clockwork » et de dilaton linéaire ; une étude quantitative de la manière dont une énergie élevée peut favoriser les mesures de précision dans les collisionneurs de hadrons, et le calcul des corrections sous-dominantes de l'amplitude de Veneziano, ainsi qu'une preuve de leur universalité. En 2017, le département TH a accueilli 932 scientifiques (37 attachés, 560 visiteurs scientifiques payés et 335 visiteurs scientifiques non payés) et 68 boursiers. Il a également proposé entre cinq et huit séminaires par semaine, accueilli six instituts de théorie et organisé sept ateliers et rencontres.

L'ANTIMATIÈRE ET LES BASSES ÉNERGIES

Le Décélérateur d'antiprotons (AD) est une installation unique au monde fournissant des antiprotons de basse énergie pour des mesures de précision spectroscopiques, gravitationnelles et autres. Les premiers antiatomes avaient



été produits au milieu des années 1990. Aujourd'hui, les chercheurs comparent avec une précision inédite la matière et l'antimatière, pour mettre à l'épreuve les symétries fondamentales de la nature. L'AD sert une communauté d'environ 200 scientifiques et accueille cinq expériences opérationnelles : ALPHA, AegIS, ASACUSA, ATRAP et BASE, une sixième, GBAR, étant en phase de préparation.

En 2017, la collaboration ALPHA a poursuivi les mesures de référence, commencées en 2016, de la structure spectrale de l'antihydrogène, en étudiant sa séparation hyperfine. Ce travail, qui s'ajoute à d'autres analyses poussées, constitue le point culminant de recherches de plusieurs décennies qui visent à réaliser la spectroscopie d'antiatomes et à rendre possibles des tests de précision de la symétrie charge-parité-temps et des recherches d'effets au-delà du Modèle standard.

ASACUSA a publié des résultats clés concernant une méthode autre que celle d'ALPHA pour étudier la séparation hyperfine de l'antihydrogène « en vol », en montrant que cette méthode peut être appliquée avec succès aux atomes d'hydrogène. L'équipe a aussi fait part de ses avancées concernant une mesure plus précise du rapport de masses antiproton sur électron à l'aide de la spectroscopie des atomes d'hélium antiprotonique.

L'année 2017 a été très productive pour BASE, qui a réalisé la mesure la plus précise du moment magnétique de l'antiproton, un résultat 350 fois plus précis que celui de 2016. Pour la première fois, l'antimatière a ainsi bénéficié de mesures plus précises que la matière.

*Le porte-parole de l'expérience BASE travaille sur le détecteur de son expérience sur le Décélérateur d'antiprotons.
(CERN-PHOTO-201710-255-6).*

Cela n'a pas duré, car l'équipe a réussi, grâce à un dispositif à double piège, à mesurer le moment magnétique du proton avec une précision cinq fois plus élevée. Les deux valeurs sont ainsi en accord à un niveau de 1,5 milliardième.

AEGIS a réalisé d'importants progrès pour la première production pulsée d'antihydrogène par échange de charge, en particulier avec l'excitation du positonium dans l'aimant de l'expérience. ATRAP a annoncé des progrès techniques dans le domaine du refroidissement par laser d'atomes d'antihydrogène, et escompte des résultats basés sur les données recueillies en 2018. La préparation de l'expérience GBAR, qui doit mesurer l'effet de la gravité sur les atomes d'antihydrogène, avance. Ce sera la première expérience alimentée par l'anneau ELENA (voir p. 47). Ce nouveau décélérateur diminuera encore l'énergie des antiprotons pour permettre aux expériences d'en piéger beaucoup plus.

DES EXPÉRIENCES DANS LA LIGNE DE MIRE

Outre leur rôle d'injecteurs du LHC, le Booster du PS, le PS et le SPS fournissent des faisceaux à de nombreuses installations, avec environ 20 projets à cibles fixes, pour une communauté de plus de 1 200 physiciens.

NA58 (COMPASS), au SPS, a terminé l'acquisition de données afin d'étudier la structure 3D du nucléon à l'aide d'un faisceau de muons et d'un spectromètre avec une cible

à hydrogène liquide. En 2018, l'exploitation devrait permettre d'améliorer le niveau de signification du résultat. NA61 a poursuivi son examen des collisions d'ions lourds en mode cible fixe, et les mesures de la production de particules dans les cibles utilisées pour les projets neutrino au Japon et aux États-Unis. Cette année, l'expérience a également fonctionné pour la première fois avec des ions xénon.

NA62, qui étudie les désintégrations très rares du kaon comme fenêtre d'observation d'une nouvelle physique, a accumulé plus de trois mille milliards de désintégrations du kaon. L'excellente résolution du nouveau détecteur a permis à NA62 d'étendre sa recherche de leptons neutres lourds de masses proches de la masse du kaon. L'analyse des désintégrations extrêmement rares du kaon progresse bien, et l'acquisition de données continuera en 2018.

NA64 (SHINE) a élargi ses recherches de particules du secteur noir, et a défini de nouvelles limites intéressantes pour des possibles candidats à la matière noire.

CLOUD, qui reçoit des faisceaux du PS, est une expérience pluridisciplinaire qui étudie l'influence des rayons cosmiques sur les aérosols et la formation des nuages, étude qui pourrait améliorer la compréhension du changement climatique. Cette année, l'exploitation s'est concentrée sur la nucléation et croissance marines faisant intervenir des composés de l'iode, la nucléation et croissance biogéniques pures dans des conditions environnementales réalistes, et la nucléation et croissance anthropiques en conditions de pollution urbaine.



Le deuxième atelier sur la physique au-delà des collisionneurs s'est tenu au CERN en novembre 2017. (OPEN-PHO-EXP-2017-04)

LA PHYSIQUE AU-DELÀ DES COLLISIONNEURS

Le groupe d'étude sur la physique au-delà des collisionneurs a été créé en 2016 pour explorer les possibilités offertes par le complexe d'accélérateurs du CERN en complément des expériences s'appuyant sur des collisionneurs de haute énergie. Le groupe de travail a poursuivi son étude tout au long de l'année, et a organisé en novembre son deuxième atelier général, qui a réuni plus de 230 physiciens. De nouvelles collaborations ont été nouées entre différents groupes du CERN et avec des instituts, et portent déjà leurs fruits dans de nombreux domaines.

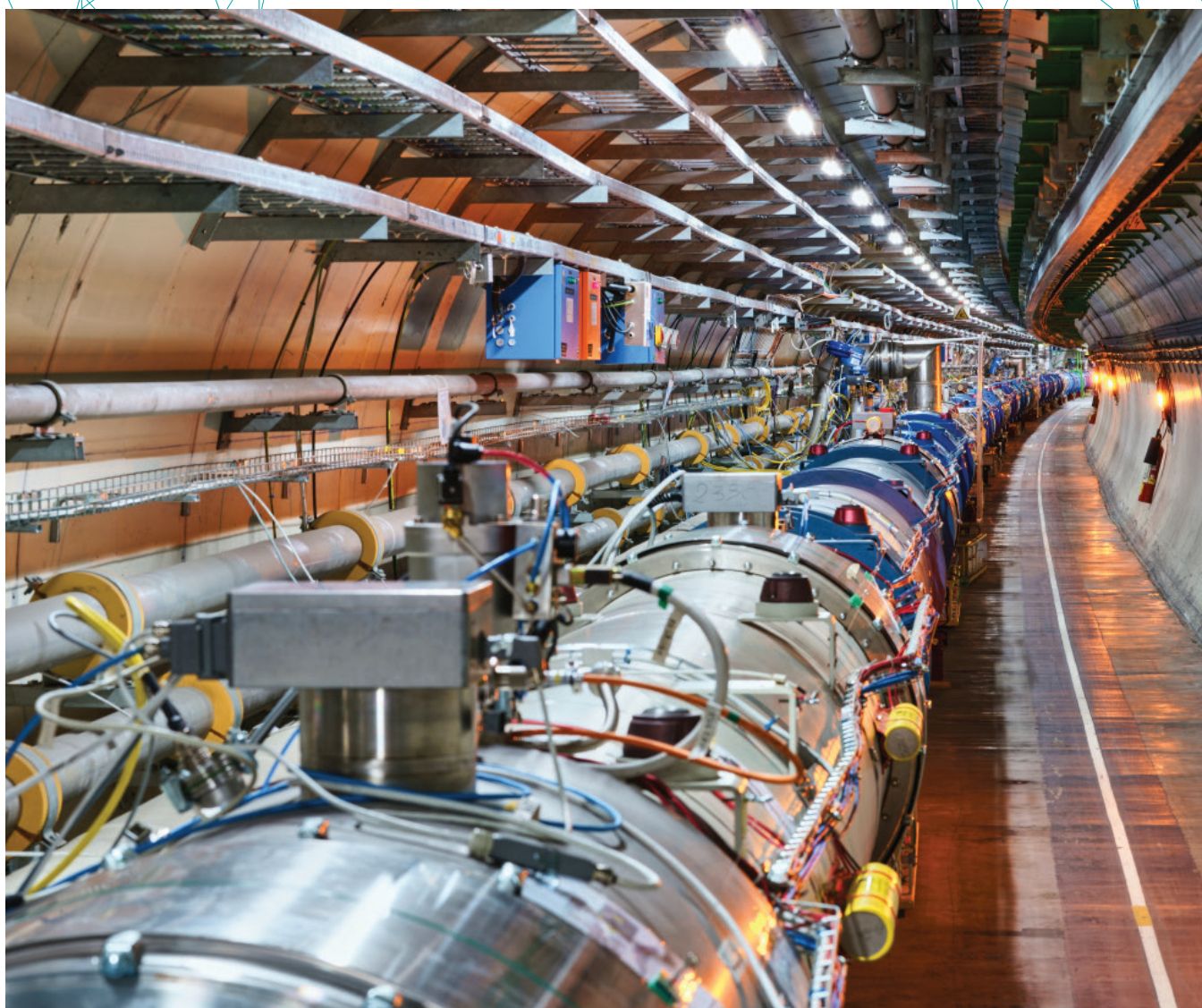
Des études ont débuté sur les possibilités du point de vue des accélérateurs et de la physique de poursuivre l'exploitation des expériences à cibles fixes du SPS (NA61, NA62, NA64, et COMPASS) tout en installant de nouveaux détecteurs actuellement en projet (NA64++, MUonE, DIRAC++, et NA60++). L'étude technique du dispositif d'arrêt de faisceau du SPS et l'optimisation du détecteur SHiP, chargé d'étudier le secteur caché, sont en bonne voie. Différentes possibilités sont en cours d'examen pour les expériences avec cibles fixes au LHC, par exemple l'utilisation de cibles gazeuses ou l'extraction de faisceaux à l'aide de cristaux, et le concept novateur d'usine à gamma se développe.

L'étude de conception d'un anneau de stockage pour la mesure du moment dipolaire électrique du proton progresse, et les projets hors accélérateurs, tels que le futur hélioscope IAXO, proposé pour succéder à CAST dans la recherche des axions solaires, sont en cours de discussion. De nombreuses autres activités sont envisagées. L'étude sur la physique au-delà des collisionneurs s'achèvera par la production d'un rapport en 2018, à temps pour la mise à jour de la stratégie européenne.

LES MACHINES DES DÉCOUVERTES

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

*Vue du LHC. En 2017, l'accélérateur a collecté plus de données que prévu.
(CERN-PHOTO-201802-030-6)*





Deux opérateurs du LHC dans le Centre de contrôle des accélérateurs. En 2017, les opérateurs ont joué sur de nombreux paramètres des faisceaux pour optimiser l'exploitation du LHC. (CERN-PHOTO-201709-214-10)

LE LHC A FOURNI AUX EXPÉRIENCES

10 MILLIONS DE MILLIARDS DE COLLISIONS,
SOIT 25 % DE PLUS QU'EN 2016.

UNE BRILLANTE ANNÉE POUR LE LHC

Le Grand collisionneur de hadrons (LHC) est le plus puissant accélérateur de particules du monde, faisant entrer en collision des particules à des énergies inégalées. Ces collisions permettent aux physiciens d'étudier les phénomènes qui régissent les particules et les forces.

En 2017, le LHC a effectué sa troisième exploitation à l'énergie de 13 TeV. Le grand anneau de 27 kilomètres de circonférence a fourni aux expériences LHC environ 10 millions de milliards de collisions. Les deux grandes expériences ATLAS et CMS ont chacune reçu une luminosité intégrée d'environ 50 femtobarns inverses (fb^{-1}), contre 40 initialement prévus. La luminosité est l'indicateur crucial d'un collisionneur, indiquant le nombre de collisions susceptibles de se produire par unité de surface et en un temps donné. La luminosité intégrée se mesure en femtobarns inverses, 1 fb^{-1} correspondant à 100 millions de millions de collisions potentielles.

Cette belle performance a notamment reposé sur l'excellente disponibilité du LHC et de ses injecteurs. Le LHC a fonctionné 81 % du temps (contre 75 % en 2016), délivrant des collisions durant 49 % du temps.

Pour augmenter la luminosité, les opérateurs ont joué sur des paramètres qui permettent de concentrer plus fortement les faisceaux avant les collisions. Une nouvelle configuration de l'optique de l'accélérateur, dite « compression télescopique achromatique » (ATS), a ainsi permis de réduire la dimension des paquets de protons aux points de collisions. Au lieu d'utiliser les seuls aimants quadripôles de part et d'autre des expériences pour resserrer les paquets, le système ATS utilise également les aimants situés plus

loin dans la machine, transformant sept kilomètres de l'accélérateur en un gigantesque système de focalisation. Ce système a été développé pour le LHC à haute luminosité (voir p. 45), mais a été testé avec succès au LHC. Jusqu'à 60 collisions de particules se sont ainsi produites à chaque croisement de paquets de protons au cœur d'ATLAS et de CMS, contre 40 en 2016.

Trois mois après le redémarrage du LHC, 2 556 paquets de protons circulaient dans la machine - une première. Cette belle progression a pourtant connu un coup d'arrêt en août, suite à un problème de vide. Un vide poussé (10^{-10} millibars) règne en effet dans les tubes de faisceaux afin que les protons ne rencontrent aucun obstacle sur leur parcours. Or, la présence accidentelle d'air, congelé et condensé sur la paroi de la chambre à vide, a perturbé l'exploitation pendant plusieurs semaines. Les équipes ont trouvé une solution en changeant la composition du faisceau (voir encadré p. 23). Un faisceau formé de 1 920 paquets plus denses a été utilisé à partir de début septembre.

Ce nouveau mode de fonctionnement a permis de maintenir un bon niveau de performance. Le LHC a même établi un nouveau record de luminosité instantanée : le 2 novembre, le pic de $2,05 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ était atteint, soit plus de deux fois la valeur nominale. Pour les expériences, cependant, des paquets plus denses signifient plus de collisions simultanées, compliquant l'analyse. Pour limiter cet empilement et niveler la luminosité entre le début et la fin d'une exploitation, les opérateurs ont fait varier l'angle de croisement des faisceaux et leur recouvrement. Ces deux manipulations ont également permis un gain de luminosité de 8 % au total.



Doté d'un nouvel arrêt de faisceau installé pendant l'arrêt technique, le SPS a fonctionné à plein régime en 2017. (CERN-PHOTO-201802-048-8)

Les collisions de protons ont pris fin le 11 novembre pour laisser place à des exploitations spéciales. La première consistait à effectuer des collisions de protons à une énergie de 5,02 TeV, qui correspond à celle prévue pour l'exploitation avec des ions plomb l'an prochain. Les physiciens ont ainsi pu récolter des données de référence. La seconde, à très faible luminosité, était destinée aux expériences TOTEM et ATLAS/ALFA, qui étudient les diffusions élastiques, lorsque deux protons interagissent sans entrer en collision. Pour ces études, le LHC a desserré au maximum les faisceaux dont l'énergie était limitée à 450 GeV. Durant l'année, le LHC a également réalisé plusieurs campagnes de tests, principalement en prévision du LHC à haute luminosité.

LE COMPLEXE D'ACCÉLÉRATEURS À PLEIN RÉGIME

Le CERN exploite un complexe de huit accélérateurs et un décélérateur qui alimentent des dizaines d'expériences (voir p. 12). Ces accélérateurs propulsent également les particules vers le LHC. Les protons pour le LHC sont préparés par quatre accélérateurs : le Linac 2, le Booster du PS, le Synchrotron à protons (PS), et enfin le Supersynchrotron à protons (SPS). Les ions lourds sont préparés dans le Linac 3 et l'Anneau d'ions de basse énergie (LEIR), avant d'être envoyés vers le PS et le SPS. Au total, $1,51 \times 10^{20}$ protons ont été accélérés en 2017 dans le complexe, ce qui équivaut à peu près au nombre de protons dans un grain de sable. Le LHC consomme moins de 0,084 % de ces protons.

En 2017, la chaîne d'accélérateurs a affiché une disponibilité moyenne supérieure à 90 %, atteignant même 99 % pour le Linac 2 et 97 % pour le Booster du PS. La performance est remarquable sachant que le plus jeune de ces accélérateurs, le SPS, a plus de 40 ans, et que le plus ancien, le PS,

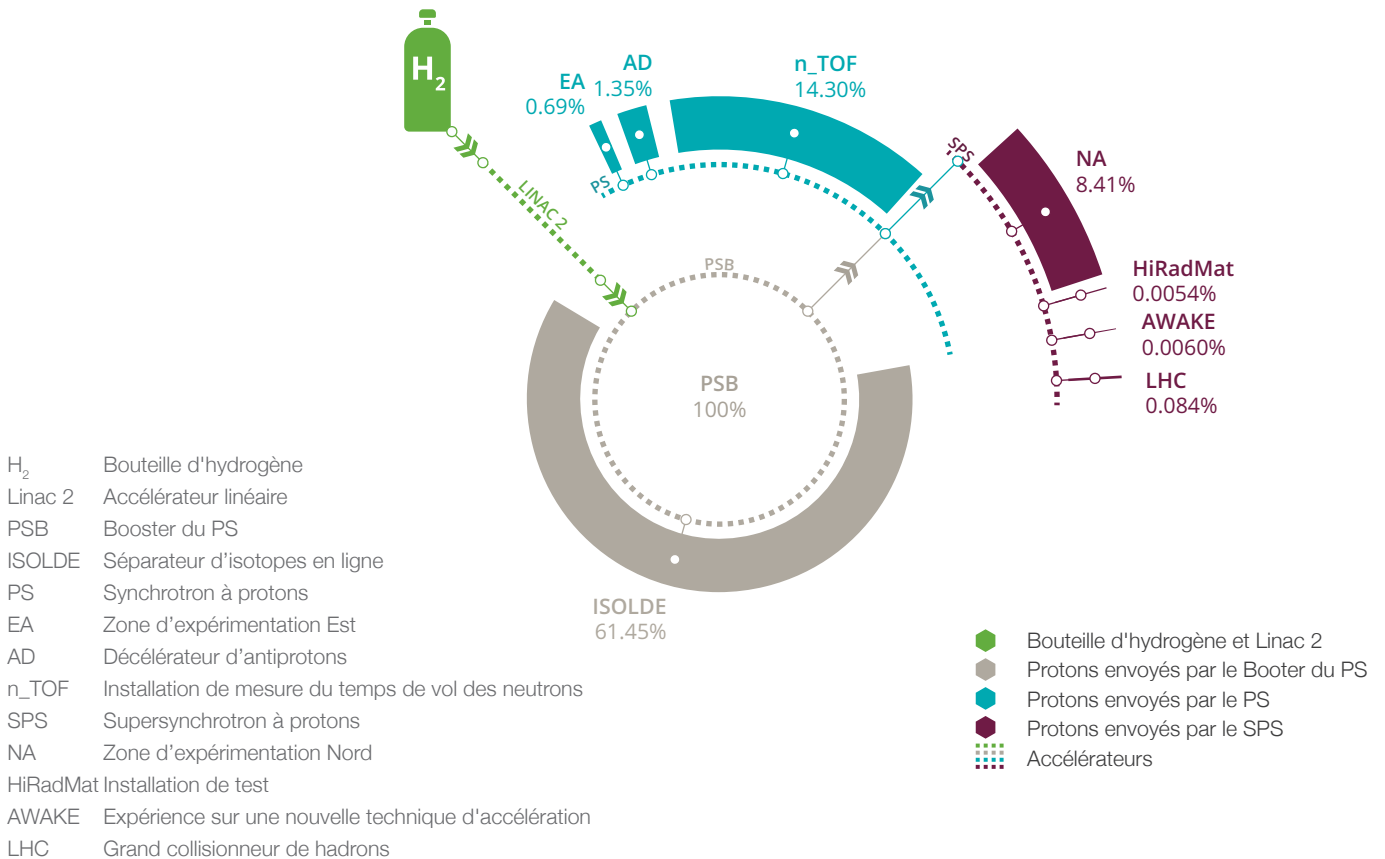
approche les 60 ans ! Le système de suivi des anomalies des accélérateurs (« *Accelerator fault tracking system* », AFT), mis en place dans le LHC en 2015, est maintenant déployé dans tout le complexe d'accélérateurs. Il fournit en continu des données sur la disponibilité des accélérateurs, indiquant l'origine des arrêts, et permet d'identifier les améliorations à apporter.

Le Booster du PS alimente le PS et l'installation de physique nucléaire ISOLDE, qui a fêté ses 50 ans. Il a fourni $9,28 \times 10^{19}$ protons à ISOLDE, environ 61 % de tous les protons envoyés dans la chaîne des accélérateurs. ISOLDE a par ailleurs propulsé des faisceaux d'ions radioactifs à des énergies inédites grâce à son nouvel accélérateur supraconducteur HIE-ISOLDE. Doté d'un troisième cryomodule, HIE-ISOLDE a fourni des faisceaux à des énergies jusqu'à 7 MeV par nucléon à 12 expériences. Le quatrième et dernier cryomodule a été assemblé pour être installé en 2018.

Un maillon plus loin, le PS redistribue les paquets de particules et les accélère avant de les transmettre à différentes installations. La plupart des protons préparés par le PS ont été envoyés vers l'installation de physique nucléaire n_TOF. L'accélérateur alimente également le Décélérateur d'antiprotons, qui a fourni des particules à cinq expériences sur l'antimatière au cours de 5 500 heures de fonctionnement.

Doté d'un nouvel arrêt de faisceau, le SPS a pu fonctionner à plein régime en 2017, alimentant le LHC, les expériences de la zone d'expérimentation Nord, l'installation de test HiRadMat et l'expérience AWAKE (voir p. 49). Le Linac 3 et le LEIR, les deux accélérateurs qui préparent les ions lourds, ont fait preuve de leur flexibilité en préparant pour la première fois des noyaux de xénon (voir encadré p. 24).

LE CHEMINEMENT DES PROTONS



Distribution des protons vers les différentes installations d'expérimentation, en pourcentage du nombre total de protons préparés par le Booster du PS

Le complexe d'accélérateurs propulse des particules (majoritairement des protons) vers une myriade d'expériences. En 2017, 151 milliards de milliards de protons ($1,51 \times 10^{20}$) ont été préparés, ce qui représente en réalité une toute petite quantité de matière, l'équivalent du nombre de protons dans un grain de sable. La majorité de ces particules sont utilisées par les installations ISOLDE et n_TOF. Le LHC en a utilisé une toute petite portion, seulement 0,084 %. Un peu moins de 14 % des particules servent aux tests de fonctionnement (développements machine) ou ne sont pas utilisés (envoi vers les arrêts de faisceaux, pertes, etc.)

Pour un souffle d'air

Une machine aussi complexe que le LHC, dotée de dizaines de milliers de composants, nécessite en permanence des ajustements et des réparations. Parfois, des difficultés plus sérieuses obligent les équipes à faire preuve de créativité. Au mois d'août, les opérateurs ont dû faire face à des pertes de faisceau inexplicables, à un point précis de l'anneau.

En cause ? La présence d'air dans la chambre à vide où circulent les faisceaux. Sept litres d'air s'étaient infiltrés ; une broutille comparé aux 110 000 litres de volume total des chambres à vide, mais assez pour perturber le passage des protons. Les

molécules gelées sur les parois du tube étaient en effet arrachées au passage du faisceau, générant des avalanches d'électrons d'autant plus importantes que le faisceau était intense. Un groupe de travail a été dépêché au chevet du LHC pour trouver un remède, sachant qu'il était impossible d'ouvrir la chambre à vide pour extraire le gaz.

Une petite amélioration a été obtenue en installant un aimant solénoïde pour faire circuler les électrons. Finalement, les spécialistes des accélérateurs ont contourné l'obstacle en changeant la composition du faisceau au niveau des injecteurs. Ce sont en effet deux injecteurs, le Booster du PS et le PS, qui divisent les faisceaux en paquets plus ou moins intenses, denses et

espacés. L'excellente flexibilité de ces deux machines permet aux opérateurs de proposer plusieurs structures de faisceau. En l'occurrence, un faisceau moins intense, composé de séquences de huit paquets de protons suivis de quatre espaces vides, a été mis en service.

Cette nouvelle composition a permis de limiter la chaleur déposée sur les parois des chambres à vide et par conséquent le phénomène de nuages d'électrons. Le nombre de paquets a été limité à 1 920. Mais les paquets étant plus denses, une excellente luminosité a pu être maintenue dans le LHC. Une fois les accélérateurs à l'arrêt, les équipes ont pu réchauffer partiellement le secteur et pomper 8,4 g de gaz.



Dans le cadre du programme de consolidation, une nouvelle cavité accélératrice du LHC a été produite au CERN, affichant des performances supérieures aux spécifications. (CERN-PHOTO-201803-084-1)

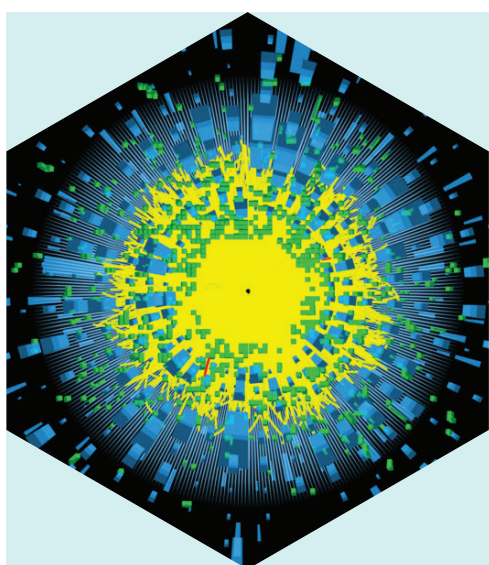
UN IMPORTANT PROGRAMME DE CONSOLIDATION

Une excellente disponibilité des accélérateurs est essentielle pour la réussite du programme de physique. C'est pourquoi les équipes techniques surveillent attentivement tous les rouages de ce grand complexe. Un important programme de consolidation se poursuit sur toutes les machines : le LHC, les injecteurs et les installations d'expérimentation associées.

En 2017, les interventions se sont déroulées durant l'arrêt technique prolongé jusqu'à fin avril et au cours des quelques jours d'arrêt programmés pendant l'année. Les équipes ont ainsi pu réaliser des opérations de maintenance courante, régler des dysfonctionnements et améliorer certains

systèmes. Ainsi, un aimant dipôle du LHC et l'arrêt de faisceau du SPS ont été remplacés. Des convertisseurs de puissance d'aimants résistifs ont été remplacés avec, à la clé, une bien meilleure tenue du LHC en cas de problème électrique, comme une variation de tension sur le réseau par exemple.

Pour tous les accélérateurs, les efforts de consolidation ont porté sur l'instrumentation de faisceau, ainsi que sur les systèmes d'injection et de déflexion, de radiofréquence et de vide. De multiples activités de rénovation ont également été menées sur les infrastructures techniques, de la distribution électrique aux ascenseurs et ponts roulants, en passant



Les expériences LHC ont pu collecter pour la première fois des données issues de collisions entre noyaux de xénon, comme celle-ci, enregistrée par le détecteur CMS. (CMS-PHO-EVENTS-2017-007-1)

Une gorgée de xénon

Le 12 octobre, le LHC a goûté à un breuvage très particulier. Pendant huit heures, l'accélérateur a, pour la première fois, généré des collisions de noyaux de xénon (contenant 54 protons et 75 neutrons). Ces collisions s'apparentent à des collisions d'ions lourds, comme le LHC en réalise régulièrement. Les expériences LHC ont pu collecter des données inédites.

Le LHC a en réalité profité d'une exploitation prévue pour l'expérience à cible fixe NA61/SHINE auprès du Supersynchrotron à protons (SPS). Le SPS a fourni à l'expérience durant huit semaines des ions xénon à six énergies différentes.

Les opérateurs ont également réalisé des manipulations originales avec le xénon. Ils ont injecté dans le SPS des atomes du gaz partiellement ionisés, conservant 15 de leurs 54 électrons. Ces faisceaux sont très fragiles. Les équipes sont parvenues à accélérer un faisceau, atteignant l'énergie de 81,6 GeV par nucléon. L'objectif était de tester l'idée d'une source de rayons gamma avec des énergies jusqu'à 400 MeV et des intensités très élevées dans le cadre de l'étude « Physique au-delà des collisionneurs » (voir p. 19).

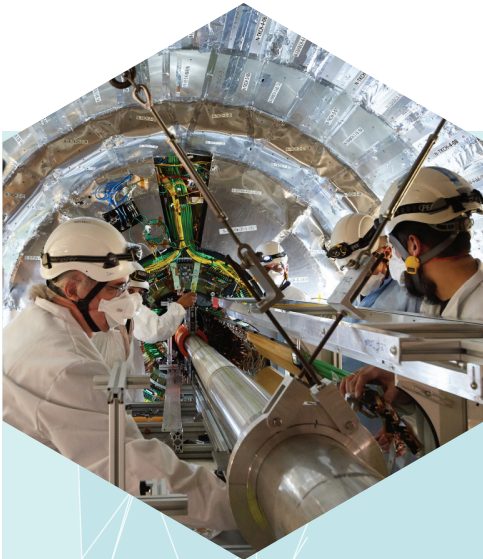
par la ventilation. L'utilisation des automates industriels est largement répandue, et plusieurs groupes, comme ceux de la cryogénie ou de la ventilation, ont rénové leurs systèmes. Le groupe en charge du contrôle des accélérateurs a poursuivi la maintenance de ses infrastructures. Dans les bureaux et les ateliers, les équipes ont fabriqué ou commandé des pièces de rechange et préparé les améliorations. Des cavités accélératrices supplémentaires pour le LHC sont par exemple en cours de fabrication - un travail crucial pour la conservation de ce savoir-faire au CERN. De nouveaux collimateurs sont également développés pour le LHC à haute luminosité (voir p. 45).

Les groupes de tous les domaines techniques ont également réalisé un effort considérable pour préparer l'important programme de travaux qui sera réalisé au cours du deuxième long arrêt technique.

UN MILLIARD DE COLLISIONS

PAR SECONDE AU CŒUR DES

GRANDS DÉTECTEURS DU LHC.



Opération à cœur ouvert pour CMS : le trajectographe à pixels, le cœur de l'expérience, a été remplacé par un dispositif plus performant avant le redémarrage du LHC en 2017. (CERN-PHOTO-201703-062-43)

Une nouvelle moisson de collisions

Les grands détecteurs du LHC réalisent chaque année des prouesses pour collecter toujours plus de données. Ces énormes machines, formées de millions de composants, fonctionnent à un rythme effréné pour identifier les particules issues des collisions. En 2017, les performances de l'accélérateur ont mis les détecteurs à rude épreuve. Le LHC a généré en moyenne près de 40 collisions à chaque croisement de faisceau (jusqu'à 30 millions de fois par seconde). En fin d'exploitation, ce taux a même atteint 60 collisions par croisement, deux fois et demie la valeur pour laquelle ATLAS et CMS ont été conçues. Environ un milliard de collisions par seconde se sont produites au centre des deux grands détecteurs. Les deux expériences sont parvenues à enregistrer plus de 90 % des données, soit plus de 45 femtobarns inverses chacune.

CMS a débuté l'année avec une transplantation de son cœur de pixels. Le détecteur le plus proche du point de collision, le trajectographe à pixels, a été remplacé par un nouveau dispositif formé d'une couche supplémentaire et de 124 millions de pixels au lieu de 66. Améliorant la précision de

détection, le nouveau détecteur permet de mieux faire face à l'empilement des données. La couche supplémentaire a permis de maintenir une bonne performance du trajectographe, malgré une défaillance de 5 % des alimentations. En fin d'année, tous les blocs d'alimentation ont été remplacés à titre de précaution. CMS a par ailleurs bénéficié d'améliorations des systèmes électroniques et de lecture de plusieurs de ses sous-détecteurs.

ATLAS a procédé à des améliorations avant le redémarrage, effectuant des réparations sur ses calorimètres et son système de détection des muons, remplaçant le système de distribution de gaz de son trajectographe à rayonnement de transition (TRT) et reconfigurant l'électronique frontale de la couche interne de son détecteur à pixels. Ces améliorations, entre autres, ont permis à ATLAS d'enregistrer les données avec une qualité et une efficacité inédites.

LHCb a enregistré $1,8 \text{ fb}^{-1}$ de données, avec des systèmes de déclenchement et de reconstruction des événements en temps réel renforcés. Sa ferme de processeurs a également été améliorée. Outre les collisions proton-proton et xénon-xénon, l'expérience a également pris des données en mode « cible fixe » avec du néon. LHCb a en effet la possibilité d'introduire des gaz nobles dans sa chambre à vide, générant des collisions entre les atomes injectés et le faisceau de protons.

ALICE, expérience spécialisée dans la physique du plasma quark-gluon obtenu avec des collisions d'ions lourds, a enregistré 986 millions d'événements proton-proton à une énergie de 5,02 TeV, dépassant ses objectifs. Cette prise de données lui a en effet permis d'effectuer des mesures de référence en vue de l'exploitation avec des ions plomb en 2018. Auparavant, ALICE avait collecté un milliard d'événements proton-proton (avec un déclenchement dit de « biais minimum »), dont une fraction avec un champ magnétique réduit pour des études spécifiques. L'expérience a également enregistré des événements dits de haute multiplicité, des données avec des déclenchements spécifiques et des événements xénon-xénon.



Le Centre de calcul du CERN héberge non seulement les serveurs, systèmes de stockage de données et équipements réseau destinés à la Grille de calcul du LHC, mais aussi les systèmes essentiels au fonctionnement quotidien du Laboratoire. (CERN-CO-1008289-04)

INFORMATIQUE : GÉRER LE DÉLUGE DE DONNÉES

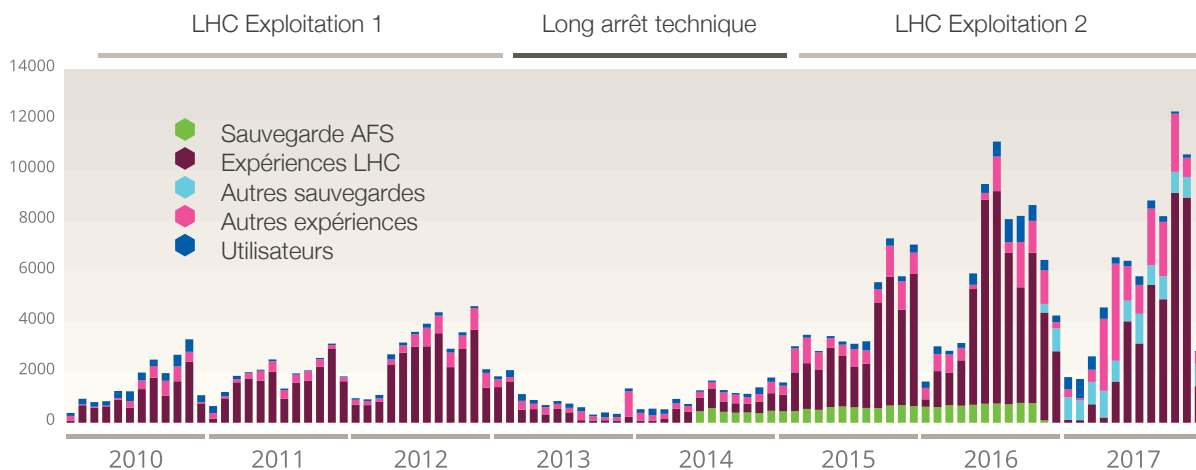
Cette année encore, l'infrastructure informatique du CERN a fait face à un déluge de données du LHC et a su le gérer avec succès. En effet, bien que les expériences aient globalement fait des progrès considérables pour réduire le nombre de fichiers dérivés sauvegardés sur bandes, plusieurs records de stockage de données ont été battus. Le chiffre de 200 pétaoctets de données stockées sur bandes magnétiques a été atteint fin juin par le système CASTOR (*CERN Advanced STORAge system*). À la fin de l'année, le total de données accumulées s'élevait à 230 pétaoctets. Lors des derniers mois d'exploitation, la performance du LHC a dépassé toutes les attentes en fournissant à ATLAS et à CMS une luminosité intégrée inédite. Ainsi, rien qu'au mois d'octobre, 12,3 pétaoctets de données ont été enregistrés sur bandes, soit un nouveau record mensuel.

Le stockage des données, facette essentielle de l'infrastructure informatique du CERN, nécessite d'être continuellement actualisé afin de faire face à une demande interne croissante. L'Organisation, qui gère actuellement le plus grand volume d'archives de données scientifiques dans le domaine de la physique des hautes énergies, est à l'avant-garde de la préservation des données ; elle est un membre fondateur de la collaboration DPHEP (*Data Preservation in High-Energy Physics*).

L'augmentation des volumes de données a eu pour conséquence d'accroître les besoins en termes de transfert de données, et donc de capacité réseau. Depuis le début du mois de février, une troisième liaison fibre optique de 100 gigabits par seconde relie le Centre de calcul du CERN à son extension située à quelque 1 200 km de distance, au Centre de recherche Wigner (RCP) pour la physique à Budapest (Hongrie). La bande passante additionnelle et la redondance qu'apportent cette troisième liaison ont permis au CERN d'utiliser de manière fiable et optimale la capacité de calcul et de stockage de son extension.

LA GRILLE TOURNÉE VERS L'AVENIR

Le rôle de la Grille de calcul mondiale pour le LHC (WLCG) est de fournir des ressources informatiques pour stocker, distribuer et analyser les données issues du LHC. Comme les années précédentes, elle a bien fonctionné en 2017 et s'est adaptée à la demande de performance toujours plus poussée des expériences, permettant la diffusion rapide de résultats de physique de haute qualité. Le Centre de calcul du CERN a continué de réaliser les tâches essentielles que sont le traitement des données et la vérification de leur qualité. Cependant, en octobre, en raison de l'excellente performance du LHC, les expériences ont commencé à observer un retard dans le traitement de



Volumes mensuels de données (en téraoctets) enregistrées sur bandes au CERN.

Ce graphique montre le volume de données enregistrées sur bandes générées par les expériences LHC et d'autres expériences, diverses sauvegardes et les utilisateurs. En 2017, au total, 72 pétaoctets de données (dont 40 pétaoctets de données du LHC) ont été enregistrés sur bandes, avec un record de 12,3 pétaoctets en octobre.

leurs données. Ceci a confirmé la nécessité de recourir à des ressources additionnelles pour l'année à venir, durant laquelle un niveau similaire de performance est attendu. L'exportation des données vers les centres de calcul de la Grille WLCG s'est bien déroulée, grâce aux augmentations de la bande passante effectuées les années précédentes. Enfin, les 170 centres de calcul de la Grille ont fourni les capacités nécessaires pour traiter et analyser ces données avec efficacité et ont fait face aux pics ponctuels. Toutes les activités basées sur du temps de processeur mis à disposition par des volontaires ont été consolidées en 2017 sous l'égide du projet LHC@home. Ces activités ont poursuivi leur croissance et ont permis d'atteindre des pics de 400 000 tâches exécutées simultanément.

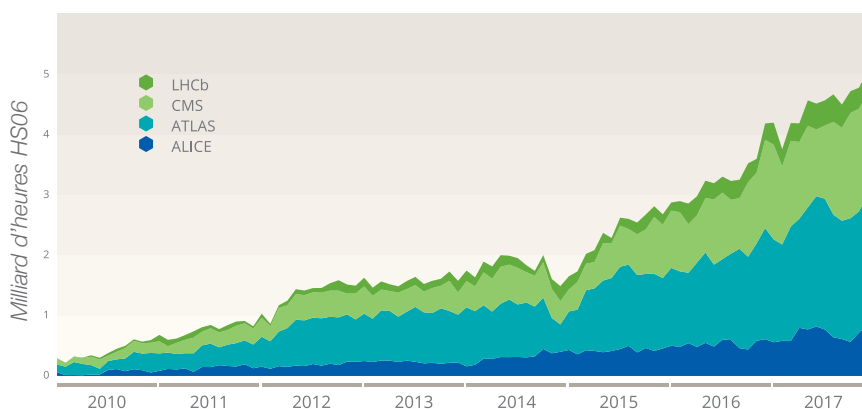
En ce qui concerne l'avenir, les besoins informatiques prévisionnels pour le LHC à haute luminosité excèdent de très loin ceux mobilisés pour l'actuelle seconde phase

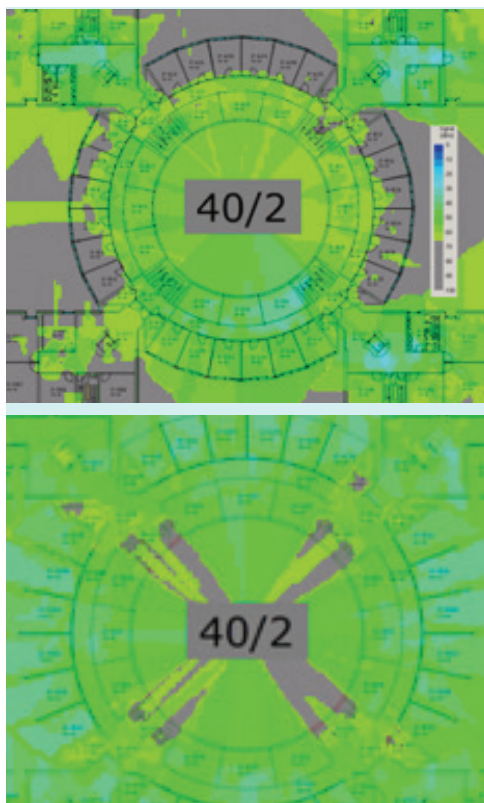
d'exploitation et ceux prévus pour la troisième phase d'exploitation. Les besoins en capacité de stockage et de calcul seront supérieurs de plusieurs ordres de grandeur à ce que, à budget constant, les projections en termes de progrès technologiques permettent d'espérer. Pour remédier à ce problème, la Fondation HSF (HEP Software Foundation) a publié cette année un livre blanc (voir p. 54), une forme de feuille de route pour la communauté, qui explore les défis informatiques à venir et décrit les mécanismes possibles pour les surmonter.

D'autres communautés scientifiques sont aussi confrontées à de tels défis. À titre d'exemple, le CERN et la Grille WLCG collaborent avec la communauté de la radioastronomie gérant le projet de radiotélescope *Square Kilometer Array* (SKA). Au mois de juin, le CERN et SKA ont signé un accord de collaboration portant sur la capacité de calcul et la gestion de données.

Évolution du temps de cœur de processeur global fourni par la Grille de calcul mondiale pour le LHC (WLCG).

Comme le montre le graphique, le temps de processeur global fourni par la Grille WLCG, exprimé en milliards d'heures HS06 par mois (HS06 étant la mesure de référence de la performance du processeur), augmente régulièrement. En 2017, la Grille WLCG a combiné les ressources informatiques d'environ 800 000 cœurs de processeurs.





Le déploiement du wi-fi franchit des étapes importantes

Le projet de nouveau service wi-fi pour le campus du CERN a débuté il y a plusieurs années afin de moderniser l'infrastructure pour répondre aux besoins actuels en matière de mobilité, de souplesse et d'accessibilité. Après une phase pilote menée en 2016, l'infrastructure a été déployée dans quelque 70 bâtiments du domaine du CERN. Les nouveaux points d'accès sont gérés de manière centralisée, ce qui permet aux utilisateurs de se déplacer sans perdre la connexion au réseau.

Le nouveau service wi-fi permet aussi d'offrir aux visiteurs un service semblable à celui offert dans la plupart des espaces publics, tout en gardant leurs appareils séparés du réseau interne du CERN.

Couverture wi-fi avant (image supérieure) et après (image inférieure) le déploiement de la nouvelle infrastructure dans le bâtiment 40.

LA SCIENCE DANS LES NUAGES

Plus de 90 % des ressources informatiques du Centre de calcul du CERN sont déployées via un nuage privé basé sur OpenStack, un projet *open source* établissant un environnement en nuage extrêmement modulable. Du fait de l'augmentation des besoins informatiques des services du CERN et des expériences, le nuage privé du CERN comptait en 2017 plus de 280 000 cœurs de processeurs répartis dans son Centre de calcul et son extension. Les migrations de logiciels systèmes réalisées cette année ont simplifié leur configuration et rendu possible une augmentation continue de la capacité de calcul. Un projet de collaboration a également vu le jour avec SKA afin d'améliorer OpenStack à des fins d'utilisation scientifique et de partage d'expérience. Nombre des contributions à OpenStack ont été réalisées par l'intermédiaire de CERN openlab, en collaboration avec l'industrie.

Cette année, quatre projets cofinancés par la Commission européenne et auxquels le CERN a participé se sont terminés : ICE-DIP, EGI-Engage, INDIGO DataCloud, et AARC. Les résultats positifs de ces projets ont conduit le CERN à s'engager dans d'autres initiatives contribuant au nuage européen pour la recherche consacrée à la science ouverte (*European Science Cloud* - EOSC).

Le projet d'achat précommercialisation HNSciCloud d'Helix Nebula, coordonné par le CERN, répond aux besoins d'informatique en nuage d'un groupe de 10 instituts de recherche au service de communautés de recherche traitant des flux élevés de données. En 2017, les phases de conception et d'élaboration d'un prototype du projet

ont été achevées, et la phase pilote du processus d'achat précommercialisation a été lancée. HNSciCloud a joué un rôle essentiel dans la promotion et la démonstration des avantages de la fourniture de services en nuage commerciaux aux organismes publics de recherche de l'Union européenne. L'impact de cette initiative sur la politique européenne se reflète dans le projet EOSC, qui reconnaît l'utilité des services en nuage commerciaux.

ÉDUCER ET PARTAGER

Créée au début des années 1970, l'École d'informatique du CERN (CSC) promeut l'apprentissage et le partage de connaissances dans le domaine informatique entre jeunes scientifiques et ingénieurs de la physique des particules et d'autres sciences. Elle a célébré cette année sa 40^e édition, qui s'est tenue à Madrid. Depuis sa création, l'école a formé 2 600 étudiants originaires de cinq continents et 80 pays.

Ensemble, les centres de calcul du CERN et du RCP Wigner comptabilisent environ 15 000 serveurs. Ces derniers sont remplacés tous les quatre ou cinq ans lorsqu'ils ne répondent plus aux besoins poussés du Laboratoire. Ils restent cependant tout à fait adaptés à des environnements moins exigeants. Environ 1 990 nouveaux serveurs et équipements de stockage de données ont été déployés en 2017, tandis qu'un millier d'équipements obsolètes ont été retirés. Neuf palettes d'équipements informatiques ont été données par le CERN en 2017 à CERIST, en Algérie (février), à l'Université de Sofia, en Bulgarie (août) et à SESAME, en Jordanie (septembre, voir p. 10).



Le CERN inaugure son second hub réseau

Le fonctionnement du CERN est totalement dépendant de l'informatique et des services afférents. Il est donc crucial d'éviter toute interruption de longue durée. À cette fin, un projet validant la création d'un second hub réseau a été approuvé en 2014. Trois ans plus tard, ce dernier a commencé ses activités. Ce second hub réseau, en fournissant une connectivité en fibre optique avec le monde extérieur, le Centre de contrôle du CERN, le Centre de calcul et son extension basée au Centre de recherche pour la physique Wigner en Hongrie, ainsi qu'avec les salles techniques réseau principales du CERN, offre la redondance nécessaire au réseau de données du CERN.

Le second hub réseau du CERN, situé à Prévessin à proximité du Centre de contrôle du CERN, a été inauguré le 19 juillet 2017.

Le Portail des données ouvertes du CERN est la concrétisation de la politique de l'Organisation en matière de libre accès et de données ouvertes. Il permet aux expériences LHC de partager leurs données avec la communauté scientifique, y compris avec les chercheurs extérieurs aux expériences du CERN et les scientifiques citoyens. Il est également utilisé pour la formation et l'éducation par l'intermédiaire de ressources conservées spécialement à cet effet. Cette année a été marquée par la publication d'un important volume de données, contenant plus d'un pétaoctet de données de CMS, soit environ la moitié des données collectées par le détecteur en 2012. Outre les données scientifiques proprement dites, l'équipe du projet de préservation des données CMS et de libre accès aux données a rassemblé un ensemble complet d'outils complémentaires, dont des exemples de codes pour la réalisation d'analyses relativement simples, ainsi que des métadonnées, telles que des informations sur la manière dont les données sont sélectionnées et sur les conditions d'exploitation du LHC au moment de la collecte des données. Les premiers articles basés sur des données issues du Portail des données ouvertes ont été publiés.

En janvier, Up2U (*Up to University*), un partenariat réunissant des entreprises européennes, des laboratoires de recherche, des universités et des réseaux de formation, a été créé. Le CERN participe activement à ce projet d'une durée de trois ans, cofinancé par l'Union européenne, dont l'objectif est d'établir un lien entre l'enseignement secondaire et l'université, en fournissant aux élèves du secondaire des outils et des technologies de l'enseignement supérieur afin de les préparer à leur future carrière.

STIMULER LA COLLABORATION

Le CERN investit depuis longtemps, avec le cofinancement de la Commission européenne, dans un système ouvert d'archivage de données, de logiciels et de résultats scientifiques. Destiné à être utilisé au-delà de la communauté de la physique des hautes énergies, ce service s'inscrit dans une tradition de longue date de partage et de préservation du savoir scientifique pour le bien commun, et bénéficie du savoir-faire du CERN dans ce domaine. Zenodo est hébergé au CERN, et donne à la communauté scientifique la possibilité de choisir de stocker ses données dans un environnement non commercial et de les rendre librement et gratuitement accessibles à la société. En 2017, Zenodo a intégré une nouvelle fonctionnalité en réponse à une forte demande des utilisateurs, à savoir le contrôle des versions au moyen d'un DOI (*Digital Object Identifier*). Les auteurs peuvent ainsi mettre à jour le fichier d'une archive après sa publication, tandis que les chercheurs ont la possibilité de référencer une version donnée d'une archive ou toutes les versions de celle-ci.

Fin 2017, la cinquième phase de trois ans de CERN openlab est arrivée à son terme. Ce partenariat public-privé unique, au travers duquel le Laboratoire collabore avec des entreprises et des instituts de recherche de premier plan dans le domaine des technologies de l'information et de la communication, vise à accélérer le développement de solutions de pointe pour la communauté scientifique. CERN openlab a mené 20 projets sur les besoins essentiels des infrastructures du domaine des technologies de l'information et de la communication. En 2017, ses activités se sont aussi concentrées sur la préparation de sa sixième phase, qui débutera en 2018. Ce travail a débouché sur la publication, en septembre, d'un livre blanc sur les défis informatiques de la recherche scientifique (voir p. 54), qui présente les problématiques pouvant être résolues par des projets collaboratifs de R&D avec des entreprises de premier plan.

UN LABORATOIRE POUR LE MONDE

La coopération entre nations, universités et scientifiques est le moteur des recherches du CERN. En 2017, plus de 17 500 personnes du monde entier ont ainsi travaillé ensemble pour repousser les limites du savoir. Les membres du personnel titulaires du CERN, environ 2 600 personnes, participent à la conception, à la construction et au fonctionnement des infrastructures de recherche. Ils contribuent également à préparer et à exploiter les expériences, ainsi qu'à analyser les données recueillies pour une vaste communauté d'utilisateurs de plus de 12 200 scientifiques de 110 nationalités, provenant d'instituts dans plus de 70 pays.



RÉPARTITION DES UTILISATEURS DU CERN SELON LE PAYS DE L'INSTITUT DONT ILS DÉPENDENT, AU 31 DÉCEMBRE 2017

NOMBRE D'UTILISATEURS : 12 236

ÉTATS MEMBRES (7 162)

Allemagne 1 323 - Autriche 104 - Belgique 153 - Bulgarie 44 - Danemark 66 - Espagne 336 - Finlande 118 - France 867 - Grèce 132
Hongrie 58 - Israël 69 - Italie 1 444 - Norvège 91 - Pays-Bas 161 - Pologne 288 - Portugal 103 - Roumanie 110 - Royaume-Uni 898
Slovaquie 79 - Suède 96 - Suisse 375 - Tchéquie 247

ÉTATS MEMBRES ASSOCIÉS EN PHASE PRÉALABLE À L'ADHÉSION (75)

Chypre 17 - Serbie 36 - Slovénie 22

ÉTATS MEMBRES ASSOCIÉS (403)

Inde 206 - Pakistan 38 - Turquie 124 - Ukraine 35

OBSERVATEURS (3 268)

États-Unis d'Amérique 1 969 - Japon 266 - Russie 1 033

AUTRES PAYS (1 328)

Afrique du Sud 74 - Algérie 1 - Argentine 17 - Arménie 14 - Australie 32 - Azerbaïdjan 3 - Bangladesh 3 - Bélarus 24 - Brésil 131
Canada 179 - Chili 23 - Colombie 27 - Croatie 31 - Cuba 3 - Égypte 25 - Équateur 3 - Estonie 17 - Géorgie 26
Hong Kong 20 - Indonésie 7 - Iran 17 - Irlande 5 - Islande 2 - Liban 9 - Lituanie 23 - Madagascar 3 - Malaisie 7 - Malte 6
Maroc 12 - Mexique 60 - Mongolie 2 - Monténégro 7 - Nouvelle-Zélande 7 - Oman 4 - Pérou 3 - République de Corée 151 - République
populaire de Chine 266 - Singapour 3 - Taiwan 64 - Thaïlande 17



Poursuivant son élargissement, la famille du CERN a accueilli de nouveaux pays en 2017. L'Inde est devenue État membre associé en janvier, tandis qu'en juillet, la Slovénie a accédé au statut d'État membre associé en phase préalable à l'adhésion. Un accord a été signé en juin avec la Lituanie pour lui octroyer le statut d'État membre associé, et la Croatie poursuit son processus d'accession à ce même statut. Fin 2017, le CERN comptait 22 États membres et sept États membres associés, dont trois en phase préalable à l'adhésion.

De nombreux autres États ont par ailleurs établi un lien particulier avec le Laboratoire et contribuent à ses activités ; un réseau que le CERN continue à renforcer. Il soutient ainsi les pays qui contribuent au développement de la physique des particules. Dans ce contexte, le Laboratoire a signé des accords de coopération avec le Népal et le Sri Lanka. Cette ouverture sur le monde et le mélange des cultures qu'elle engendre sont essentiels pour le CERN dans sa quête d'idées nouvelles pour faire progresser les connaissances.

Naissance d'un réseau des hautes énergies

Avec des utilisateurs dans le monde entier, des centaines de scientifiques formés chaque année, le CERN a développé une vaste communauté d'« anciens » collaborateurs, étudiants ou employés. Ces alumni poursuivent leur carrière dans des domaines très variés, allant du monde académique à l'industrie, en passant par l'économie, les technologies de l'information ou la médecine. Pour formaliser ce réseau, le CERN a lancé en juin le programme « *CERN Alumni – le Réseau des hautes énergies* ». Cette plateforme permet aux

alumni de maintenir des liens avec le CERN, de profiter de la richesse et de la diversité de leur grande communauté, et de bénéficier de l'expérience et du soutien des membres du réseau. Le dispositif est par ailleurs stratégique pour soutenir les missions et les activités du CERN. Au cœur du réseau, une plateforme web interactive permet aux alumni de rester informés et d'interagir. Fin 2017, le réseau comptait déjà 2 500 membres et préparait son premier grand événement, une rencontre au CERN en février 2018.

REPOUSSER LES FRONTIÈRES DES TECHNOLOGIES

Le CERN inspire une pensée visionnaire. Le Laboratoire est pionnier dans les technologies liées aux accélérateurs, aux détecteurs et à l'informatique. Conformément à son plan de recherche à long terme, le Laboratoire innove constamment en élaborant des solutions qui bénéficient à l'industrie de ses États membres et à la société dans son ensemble. L'année 2017 marque les 20 ans de la structure renforcée créée par le CERN pour soutenir ses activités de transfert de connaissances et de technologies ; celles-ci battent leur plein aujourd'hui.

*Le premier isotope produit par CERN-MEDICIS. Cette nouvelle installation fournira une palette d'isotopes médicaux innovants pour les hôpitaux et les centres de recherche en Europe.
(CERN-PHOTO-201803-081-2)*



DES DOMAINES D'APPLICATION VARIÉS

Les avancées technologiques et scientifiques issues de la physique des hautes énergies contribuent depuis longtemps aux **technologies médicales et biomédicales**, en particulier dans les domaines de la thérapie, du diagnostic et de l'imagerie, ainsi que du traitement des données massives et de l'informatique médicale. En 2017, cette contribution a été considérablement renforcée grâce à l'approbation par le Conseil de la nouvelle stratégie du CERN pour les applications médicales.

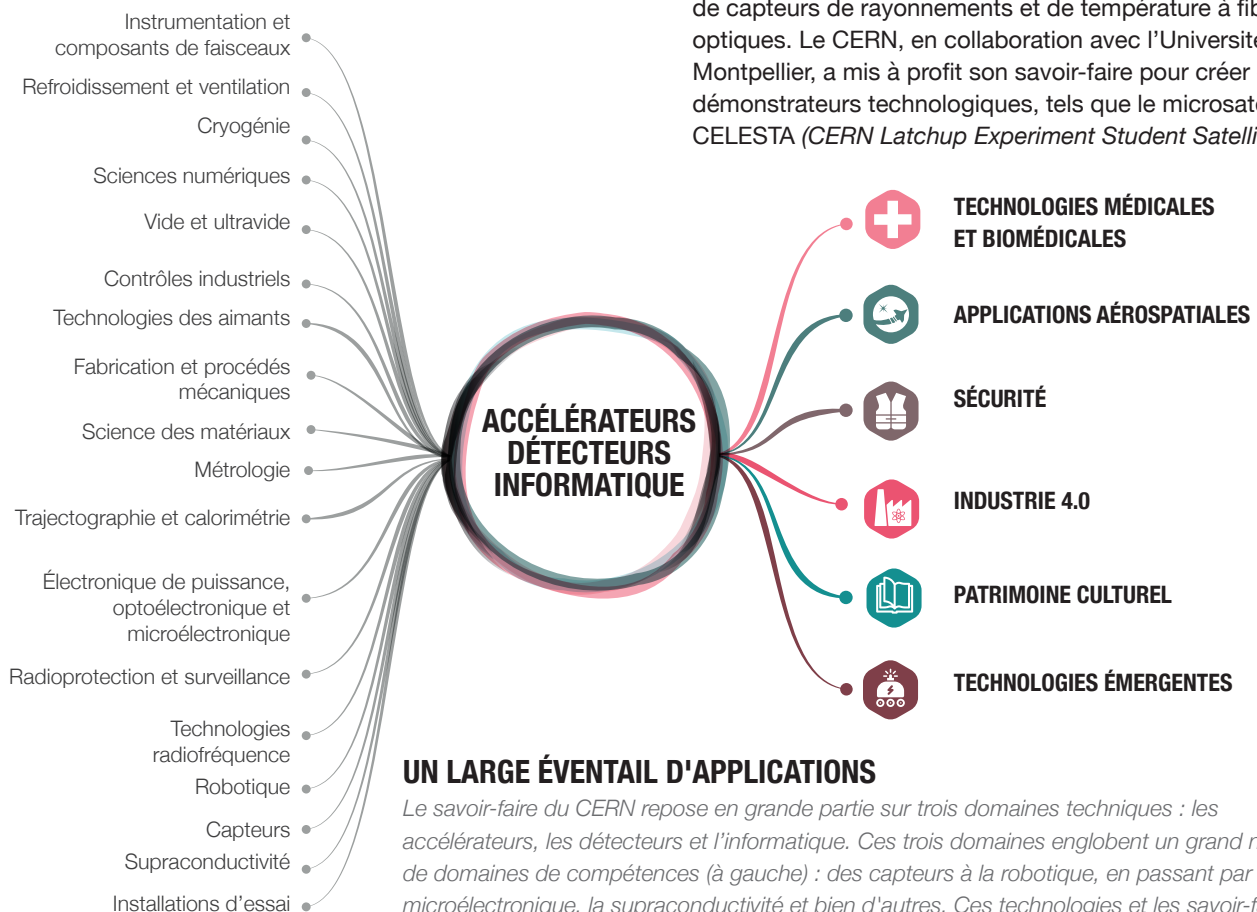
En septembre, CERN-MEDICIS (*Medical Isotopes Collected from ISOLDE*) a entamé sa phase de mise en service, avant de produire en décembre ses premiers isotopes. Cette installation unique en son genre est conçue pour produire des radioisotopes non conventionnels ayant les propriétés adéquates pour améliorer la précision de l'imagerie et du traitement des patients. Elle permettra d'élargir l'éventail des radioisotopes disponibles pour la recherche médicale, dont certains ne peuvent être produits qu'au CERN, et de les envoyer vers des hôpitaux et des centres de recherche en Suisse et en Europe pour des études.

Des spécialistes internationaux de la conception d'accélérateurs, de la physique médicale et de l'oncologie

se sont réunis au CERN en octobre, suite au premier atelier CERN-ICEC-STFC tenu en 2016. L'objectif est ambitieux : concevoir un accélérateur médical abordable, facile à utiliser et robuste pour les environnements difficiles. Le programme vise à mettre à disposition, d'ici à 2027, des installations et du personnel formé pour traiter les patients des pays à revenus faibles et intermédiaires.

Toujours dans le cadre des applications médicales, le CERN a partagé son savoir-faire en sciences numériques, un domaine ayant des applications stratégiques dans l'industrie. Des experts du CERN ont formé Sanofi Pasteur, la division vaccins de la multinationale des sciences de la vie Sanofi, à l'utilisation de nouvelles techniques d'apprentissage automatique pour relever divers défis de production. Cette collaboration permettra de tester des outils susceptibles d'améliorer la production de vaccins, afin que davantage de personnes aient accès à des vaccins vitaux.

L'**aérospatiale** est un autre grand domaine d'application des technologies et du savoir-faire du CERN. En avril, le Centre national d'études spatiales (CNES) français et le CERN ont signé un important accord-cadre de coopération. Avec l'appui du Fonds pour le transfert de connaissances du CERN, trois projets ont déjà démarré : les tests de sensibilité aux rayonnements du nano-satellite Eyesat dans l'installation CHARM, l'embarquement sur le nano-satellite NIMPH d'une charge utile secondaire basée sur le système de surveillance des rayonnements du LHC (RadMon), et le développement de capteurs de rayonnements et de température à fibres optiques. Le CERN, en collaboration avec l'Université de Montpellier, a mis à profit son savoir-faire pour créer des démonstrateurs technologiques, tels que le microsatellite CELESTA (*CERN Latchup Experiment Student Satellite*).



UN LARGE ÉVENTAIL D'APPLICATIONS

Le savoir-faire du CERN repose en grande partie sur trois domaines techniques : les accélérateurs, les détecteurs et l'informatique. Ces trois domaines englobent un grand nombre de domaines de compétences (à gauche) : des capteurs à la robotique, en passant par la microélectronique, la supraconductivité et bien d'autres. Ces technologies et les savoir-faire qui leur sont associés sont utiles à la société, trouvant des applications dans de nombreux domaines (à droite).



La start-up InsightART utilise le détecteur à pixels Medipix issu de la physique des particules pour effectuer des radiographies d'œuvres d'art comme celle-ci.

Les machines du CERN associent températures très basses, champs magnétiques intenses ou encore différents types de rayonnements, ce qui nécessite des dispositifs de **sécurité** innovants. Neasens, nouvelle entreprise dérivée des technologies du CERN, développe des capteurs intelligents pour mesurer le radon et combattre les risques liés aux concentrations élevées de ce gaz. Généré par la désintégration d'isotopes naturels, le radon est l'une des premières causes de cancer du poumon, après le tabac.

L' **Industrie 4.0** est la tendance à plus d'automatisation et d'efficacité dans les processus de fabrication, au moyen de machines et de capteurs connectés, de robots autonomes et de technologies de gestion de données massives. En 2017, un accord de licence a été signé entre LG Display et le CERN ; il donne à l'entreprise l'accès au logiciel Controls Middleware, initialement développé pour le LHC, pour l'automatisation de ses usines.

Plusieurs projets liés au **patrimoine culturel** ont recours à des technologies du CERN. InsightART, jeune entreprise de Prague, utilise par exemple la technologie Medipix pour radiographier des peintures afin d'évaluer leur état, de découvrir une œuvre cachée sous une peinture ou de démasquer des faux. Des scientifiques et des ingénieurs travaillent sur des **technologies émergentes** au CERN, en particulier dans le domaine de la supraconductivité. Une collaboration étroite avec l'industrie est cruciale pour produire de nouveaux supraconducteurs à haute température, essentiels à l'évolution des futurs accélérateurs et, peut-être, aux futurs dispositifs de transport et de stockage de l'énergie.

ACCÉLÉRER L'INNOVATION

Le **Fonds pour le transfert de connaissances du CERN**, qui vise à créer une passerelle entre la recherche et l'industrie, sélectionne des projets innovants fondés sur des technologies du CERN et susceptibles d'avoir un impact positif sur la société. Depuis sa création en 2011, il a financé 41 initiatives. En 2017, trois projets ont été retenus : un aimant supraconducteur compact pour des applications

spatiales, un accélérateur compact pour le patrimoine culturel et un laser 3D pour le contrôle qualité de dispositifs à semiconducteurs. Le **budget du CERN destiné aux applications médicales** a financé 11 projets et permis d'accueillir cinq nouveaux stagiaires, doctorants et boursiers.

Lancée et gérée par le CERN, **SCOAP³** (Groupement pour la libre diffusion des résultats de physique des particules) est une initiative mondiale en matière de libre accès qui rassemble 3 000 bibliothèques, organismes de financement et instituts de recherche de 47 pays. Depuis son lancement, en 2014, elle a mis en libre accès 15 000 articles rédigés par environ 20 000 scientifiques de 100 pays. En avril, le CERN et la Société américaine de physique ont signé un accord en vertu duquel, à partir de janvier 2018, les auteurs du monde entier pourront publier leurs articles de physique des hautes énergies dans les revues *Physical Review C*, *Physical Review D* et *Physical Review Letters* sans coût direct. SCOAP³ prendra ainsi en charge près de 90 % des articles paraissant dans les revues spécialisées dans ce domaine.

DE FRUCTUEUSES COLLABORATIONS

Le CERN collabore avec des organisations internationales et participe à des projets cofinancés par la Commission européenne, cinq comportant un important volet de transfert de connaissances. Outre les collaborations entamées avec AIDA-2020 en 2015 et QUACO en 2016, trois nouveaux

GRÂCE À L'INITIATIVE MONDIALE DE
LIBRE ACCÈS SCOAP³, PRÈS DE
90 % DES ARTICLES PUBLIÉS
DANS DES REVUES DE PHYSIQUE
DES HAUTES ÉNERGIES SONT
ACCESSIBLES À TOUS.

projets ont démarré en 2017 : ARIES, AMICI et FuSuMaTech. ARIES a pour objet d'améliorer les performances, la disponibilité et la durabilité des accélérateurs de particules, tout en faisant bénéficier la science et la société des retombées et des applications de la technologie des accélérateurs ainsi qu'en faisant grandir la communauté européenne des accélérateurs et en favorisant son intégration.

AMICI a pour but de consolider et d'exploiter les infrastructures existantes pour en faire bénéficier toute la communauté des accélérateurs, et de renforcer les capacités des entreprises européennes pour qu'elles soient concurrentielles sur le marché mondial. FuSuMaTech vise à établir un réseau de recherche, de développement et d'innovation durable en Europe afin de structurer et de renforcer la recherche sur les aimants supraconducteurs et les applications industrielles associées, avec des applications potentielles en imagerie cérébrale.

FAVORISER L'ENTREPRENEURIAT

L'année 2017 a été marquée par la 50^e réunion d'entrepreneuriat. Ces réunions, organisées depuis plus de deux ans et demi, ont pour but de développer la **culture d'entrepreneuriat** au CERN et de favoriser la création de jeunes entreprises dérivées de technologies du Laboratoire. En outre, afin d'aider les entrepreneurs et les petites entreprises à amener sur le marché les technologies et les compétences du CERN, le Laboratoire a également mis en place un réseau de neuf centres d'incubation d'entreprises dans ses États membres. En 2017, ces centres ont accueilli cinq nouvelles jeunes entreprises.

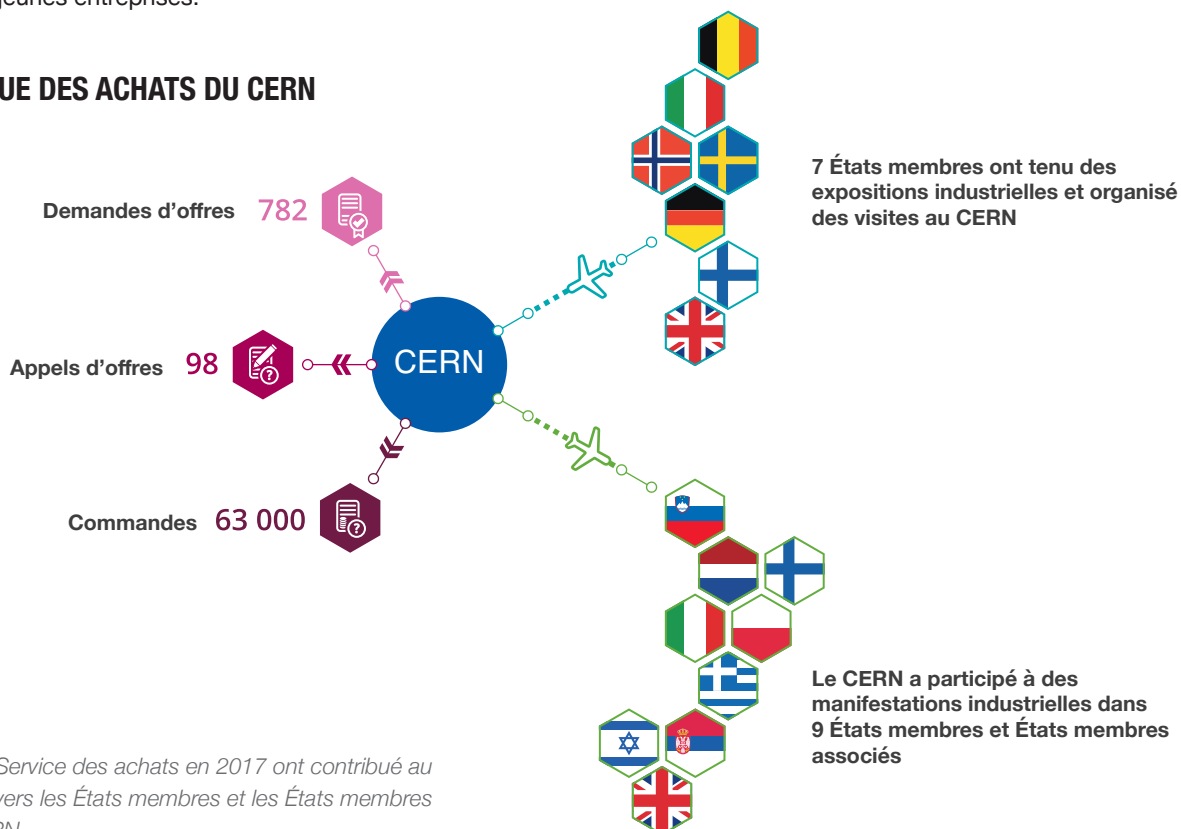
Au-delà, le groupe Transfert de connaissances apporte un appui aux entreprises dérivées et aux jeunes entreprises grâce à différents mécanismes et activités, allant de la concession de licences pour des technologies à l'élaboration de projets d'entreprise, en passant par des programmes de formation. À ce jour, il existe 23 jeunes entreprises et entreprises dérivées fondées sur une technologie du CERN.

UN INVESTISSEMENT RENTABLE

Le CERN a besoin d'un large éventail de produits et de services. Au travers de ses achats, la moitié de son budget annuel d'un milliard de francs suisses bénéficie à l'industrie. Les contrats liés à des produits technologiques de pointe peuvent par ailleurs stimuler l'innovation dans l'industrie. En 2017 ont été émis 782 demandes d'offres, 98 appels d'offres et 63 000 commandes, notamment par l'intermédiaire des magasins du CERN. Les contrats conclus portaient par exemple sur l'achat d'une infrastructure informatique pour ALICE et LHCb, l'assemblage de dipôles pour le LHC à haute luminosité, et des services tels que la maintenance du système de refroidissement et de ventilation des sites.

Grâce à son service des achats, le CERN veille à l'équilibre des retours industriels. Il y parvient en organisant des expositions industrielles au Laboratoire, en assistant à des manifestations dans les États membres et les États membres associés et, de manière générale, en travaillant à la création de liens forts avec les industries nationales. La limitation d'un appel d'offres, à savoir la possibilité de le soumettre uniquement aux pays ayant un retour industriel très faible, est aussi utilisée pour améliorer les retours industriels.

LA DYNAMIQUE DES ACHATS DU CERN



Les activités du Service des achats en 2017 ont contribué au retour industriel vers les États membres et les États membres associés du CERN.

FORMER LES NOUVELLES GÉNÉRATIONS

Le CERN propose de nombreuses activités d'éducation et de communication pour tous les publics, établissant une passerelle entre les sciences et la société. L'objectif est de favoriser la compréhension de la physique des particules et de la science en général, d'inspirer les jeunes, d'améliorer l'enseignement des sciences dans le secondaire et de former une nouvelle génération de scientifiques et d'ingénieurs.

Hôte d'honneur de la foire des Automnales, à Genève, le CERN a occupé le devant de la scène avec un stand de 1 000 m² dont l'architecture rappelle une collision de particules. Les 80 000 visiteurs ont découvert le CERN et la physique fondamentale au travers de visites virtuelles, d'ateliers, d'animations ou de projections de films. (CERN-PHOTO-201711-279-3)



LE CERN VU D'AILLEURS

En 2017, l'intérêt pour le CERN est resté fort, avec 138 000 articles publiés dans la presse, et l'organisation par le Bureau de presse de visites pour plus de 500 journalistes du monde entier. Le site web du CERN, home.cern, a compté plus de trois millions de visites, dont 85 % de nouveaux visiteurs.

L'Organisation a attiré un important public sur les réseaux sociaux : les mots « CERN » ou « LHC » ont été mentionnés plus de deux millions de fois. En mars, le compte Twitter du CERN a passé la barre des deux millions d'abonnés, et le Laboratoire a organisé sa première retransmission en direct sur Facebook, visionnée par 500 000 personnes, depuis la caverne de CMS. La vidéo de la chanson de Howie Day sur les collisions (récompensée par un *Lovie award*), a rencontré un grand succès. Enfin, plusieurs campagnes de communication ont utilisé des techniques nouvelles, comme des photos à 360 degrés et des grilles et *stories* Instagram.

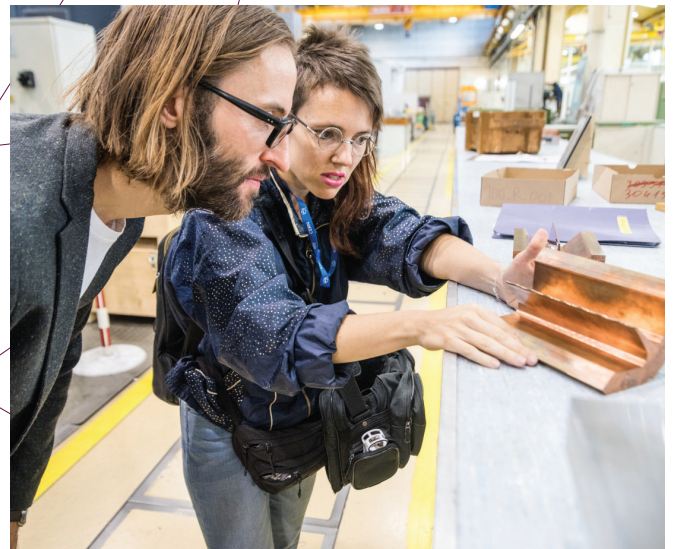
Une campagne de communication a mis en avant les femmes scientifiques du CERN lors de la Journée internationale des femmes et filles de sciences, le 11 février.



DES ÉCHANGES AVEC LA COMMUNAUTÉ LOCALE

Au niveau local, le principal événement de cette année a été la présence du Laboratoire à la foire genevoise des *Automnales*, en novembre. Des personnes qui n'auraient jamais pensé venir visiter le Laboratoire ont ainsi pu découvrir le CERN et en savoir plus sur la recherche fondamentale et ses applications grâce à des objets, des activités, des films, des jeux, et des casques de réalité virtuelle qui les ont transportées au cœur du détecteur CMS. Plus de 110 ateliers, animations et projections ont eu lieu, et plus de 170 bénévoles du CERN ont accueilli, guidé et informé les 80 000 visiteurs sur le stand du CERN.

Le Laboratoire a également organisé des conférences publiques au Globe et des animations pour la *Nuit européenne des chercheurs* (en septembre), qui ont attiré plus de 7 000 participants. En mai, le CERN était présent au *Royaume du Web*, et a accueilli plusieurs milliers de visiteurs sur son stand. Plusieurs campagnes de communication grand public ont été lancées cette année : des visites scolaires au moment de la *Journée internationale des femmes et filles de science*, la célébration de la *Journée mondiale des enseignants*, *Dark Matter Day*, sans oublier la mise en valeur de l'impact du CERN sur la société dans le cadre des Objectifs de développement durable lors des journées portes ouvertes des Nations Unies, en octobre.



La lauréate du prix Collide Pro Helvetia 2017, Laura Couto Rosado, avec son partenaire scientifique, au CERN. (CERN-PHOTO-201707-166-13)

Le programme *Arts at CERN* a accueilli 12 artistes renommés, qui ont visité le Laboratoire ou établi des partenariats avec des scientifiques pour des périodes de un à trois mois. Cette initiative a été intégralement financée par de grandes institutions du monde de l'art, comme la FACT au Royaume-Uni, Arts Council en Corée, Kontejner en Croatie et Pro Helvetia en Suisse. Un nouveau mécanisme a été lancé en collaboration avec la FACT pour financer la production et l'exposition des œuvres produites dans le cadre des résidences.

VISITER LE LABORATOIRE

Le CERN rencontre un franc succès auprès des visiteurs de marque, avec 136 visites protocolaires organisées (voir pp. 6 à 11). Cependant, il attire aussi le grand public, ainsi qu'un public d'enseignants et d'élèves, souhaitant découvrir comment les recherches du plus grand laboratoire de physique des particules explorent les mystères de l'Univers. Le nombre annuel de visiteurs a continué d'augmenter, passant de 20 000 en 2008 à 136 000 en 2017, soit une hausse de 13 % par rapport à 2016, déjà une année record. En outre, plus de 70 000 personnes ont visité les expositions permanentes (*Microcosm* et *Univers de particules*).

CETTE ANNÉE, LE CERN A ACCUEILLI

136 000 VISITEURS, SOIT 13 % DE PLUS

QU'EN 2016.

Les expositions itinérantes du CERN se sont rendues dans différents pays. Ainsi, l'exposition *Accélérateur de science* a été présentée pendant 4 mois à Istanbul, à 20 000 visiteurs, dont la moitié étaient des élèves du secondaire. Le tunnel interactif et *CERN en images*, expositions de plus petite taille, ont été montrées lors de la semaine du FCC à Berlin, ainsi qu'à *IdeenExpo*, à Hanovre, en juin (300 000 visiteurs) et aux *Journées portes ouvertes* du KIT, à Karlsruhe (35 000 visiteurs).

Un nouveau projet, le Portail de la science, a pour but de compléter les actions d'éducation et de sensibilisation du CERN. Il serait situé dans un nouveau bâtiment construit autour du Globe de la science et de l'innovation, qui offrirait, outre une zone d'accueil des visiteurs, des espaces pour les expositions permanentes et temporaires, des laboratoires de travaux pratiques et un auditorium de 1 000 places. Le CERN est en train de recueillir des fonds publics et privés pour la mise en œuvre de ce projet.

FORMER LES SCIENTIFIQUES DE DEMAIN

L'action du CERN en matière d'enseignement de la science s'adresse principalement aux enseignants et élèves du secondaire. Les programmes du CERN pour les enseignants du secondaire aident les participants à se former sur la physique des particules, à échanger avec des collègues, et à transmettre l'intérêt pour la science aux jeunes générations. Face au succès rencontré par le traditionnel programme international de trois semaines organisé en juillet, qui a rassemblé 43 enseignants de 34 pays, un nouveau programme de deux semaines a été proposé en août, avec 44 enseignants de 37 pays. En outre, près d'un millier d'enseignants de 58 pays ont pris part à l'un des 31 programmes nationaux d'une semaine offerts dans leur langue.

Le CERN a mis en place de nouveaux programmes destinés aux élèves afin d'améliorer leur compréhension de la science, de développer leurs compétences dans un environnement de pointe et de susciter des vocations pour une carrière dans la science ou l'ingénierie. Le programme de stages pour les élèves du secondaire a démarré en mai avec l'arrivée de 22 étudiants hongrois âgés de 16 à 19 ans, qui ont effectué un stage de deux semaines au CERN. La Hongrie est l'un des cinq pays (avec la Bulgarie, la France, la Norvège et le Portugal) ciblés par ce programme en 2017, avec environ 120 étudiants. Dans les prochaines années, le programme sera ouvert aux ressortissants de tous les États membres du CERN.

LES PROGRAMMES DU CERN POUR

LES ENSEIGNANTS CONTRIBUENT

À TRANSMETTRE L'INTÉRÊT POUR

LES SCIENCES AUX NOUVELLES

GÉNÉRATIONS D'ÉTUDIANTS.



Le programme de stages pour les élèves du secondaire a démarré en mai 2017 avec l'arrivée de 22 élèves hongrois âgés de 16 à 19 ans, que l'on voit ici en train de visiter l'installation d'essai des aimants du CERN. (CERN-PHOTO-201705-131-24)

Le camp d'été scientifique du S'Cool LAB, de deux semaines, a accueilli pour sa première édition 24 élèves du secondaire sélectionnés parmi plus de 200 candidats de 24 pays, qui ont pu pratiquer la physique en petits groupes. Par ailleurs, les ateliers du S'Cool LAB tournent à plein régime ; 7 230 élèves y ont été accueillis en 2017.

Le concours *Ligne de faisceau pour les écoles*, proposé pour la quatrième année consécutive, a reçu 180 propositions d'équipes d'élèves originaires de 43 pays. Les deux équipes gagnantes, du Canada et d'Italie, ont été invitées à mener leur expérience sur une ligne de l'accélérateur Synchrotron à protons en septembre. Les deux équipes rédigeront ensuite des articles scientifiques présentant les résultats de ces expériences.

Les *Masterclasses internationales*, organisées par le réseau IPPOG (Groupe international de communication grand public sur la physique des particules) et soutenues par le CERN, ont accueilli plus de 13 000 élèves dans 52 pays. Les participants passent une journée à travailler sur des données récentes des expériences LHC. Ils assistent également à des conférences sur la physique des particules et le processus de la découverte scientifique.

Plusieurs programmes ont bénéficié du soutien financier de la Fondation CERN & Société, dont l'objectif est de diffuser l'esprit de curiosité scientifique du CERN au bénéfice de la société. En 2017, la Fondation s'est concentrée sur l'appui aux activités pour les enseignants et leurs élèves : 90 enseignants ont reçu un soutien pour leur participation aux programmes nationaux, et 39 étudiants d'été originaires de pays non-membres ont reçu une bourse couvrant leurs frais de scolarité. Par ailleurs, la Fondation a intégralement financé le concours *Ligne de faisceau pour les écoles*.

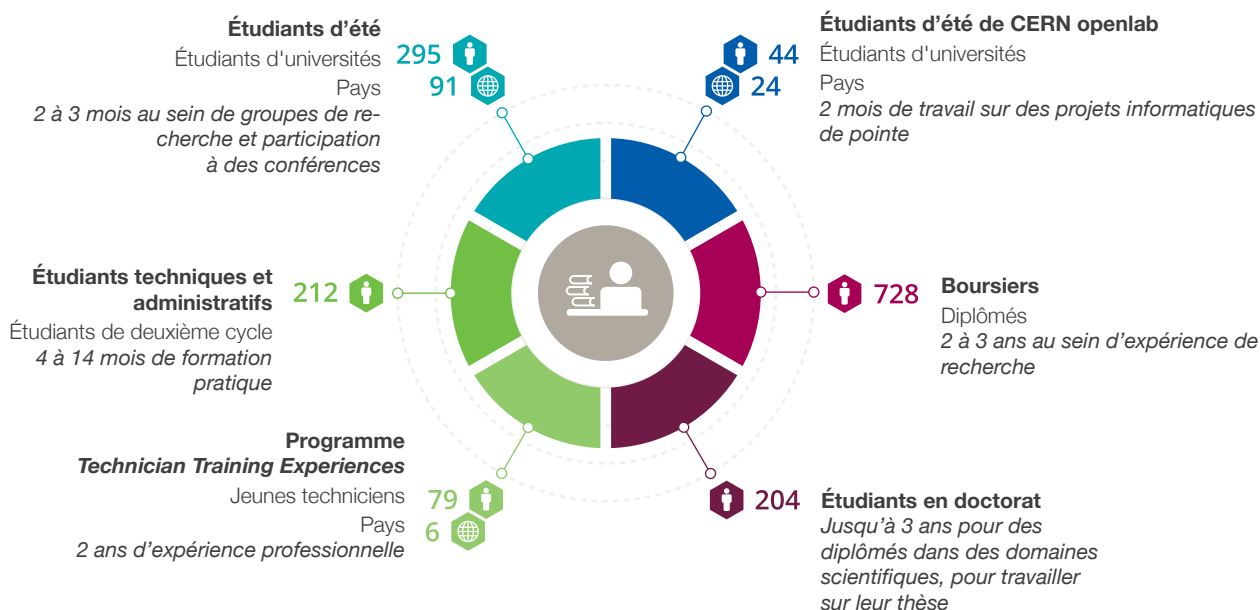


Les programmes de formation du CERN sont l'occasion d'acquérir de l'expérience en tout début de carrière. Ici, une étudiante d'été et son superviseur travaillent sur la physique d'ATLAS. (ATLAS-PHOTO-2016-015-4)

LES PREMIÈRES ÉTAPES DE LEUR CARRIÈRE

La formation des jeunes scientifiques fait partie intégrante des activités d'éducation du CERN. Le Laboratoire offre à des jeunes diplômés et des doctorants un environnement de formation enrichissant ; les États membres du CERN bénéficient ainsi d'un flux de professionnels très qualifiés venant contribuer à leur économie. Environ 2 000 jeunes ont bénéficié de programmes de formation en 2017, parmi lesquels plus de 800 boursiers, 400 étudiants techniques, administratifs et en doctorat, et 470 participants à des stages de courte durée.

LES PROGRAMMES DE FORMATION DU CERN



Le CERN propose un large éventail de formations qui permettent aux étudiants et aux jeunes diplômés d'acquérir d'excellentes compétences techniques et de bénéficier d'une expérience internationale

AGIR POUR UNE RECHERCHE RESPONSABLE

Le CERN veille à protéger la santé et la sécurité de toutes les personnes qui prennent part à ses activités, sont présentes sur son domaine ou vivent à proximité de ses installations. Le Laboratoire agit pour limiter l'impact de ses activités sur l'environnement et mettre en œuvre les bonnes pratiques en matière de sécurité.

Des membres du service environnement du CERN prélèvent des échantillons dans un cours d'eau recevant les effluents de plusieurs sites du Laboratoire. Chaque année, environ 3 000 échantillons sont prélevés sur les sites du CERN et à leurs abords pour surveiller l'impact des activités de l'Organisation sur l'environnement. (CERN-PHOTO-201804-100-5)



PRÉSERVER LA SANTÉ, LA SÉCURITÉ ET L'ENVIRONNEMENT

Le Comité directeur sur la protection de l'environnement (CEPS), créé cette année, a formulé une série de recommandations tendant à limiter l'impact environnemental du CERN. En parallèle, le Comité pour la gestion de l'énergie a continué de veiller à une utilisation optimale de l'énergie par le Laboratoire. Enfin, le Groupe de travail sur la mobilité a formulé ses premières recommandations visant à assurer la fluidité des déplacements au Laboratoire. Autres faits marquants de l'année : la mise en place d'une campagne en faveur du recyclage des déchets ordinaires, et l'élimination d'un volume conséquent de déchets radioactifs de faible activité.

UNE RECHERCHE RESPECTUEUSE DE L'ENVIRONNEMENT

Le Comité directeur sur la protection de l'environnement (CEPS) est chargé d'évaluer l'impact environnemental du Laboratoire dans 11 domaines, de déterminer les priorités et de proposer des mesures d'amélioration. Les premiers points examinés ont été la consommation d'eau au CERN et son réseau d'eau usée, ainsi que la manipulation et le stockage des substances dangereuses. Des mesures ont été définies et leur mise en œuvre est en cours. Dans certaines installations souterraines, par exemple, des hydrocarbures naturels suintent à travers la roche. Le renforcement du processus de captage permettra d'éliminer ces hydrocarbures avant qu'ils s'écoulent dans le réseau d'évacuation des eaux pluviales. Par ailleurs, des bassins de rétention vont être construits à des endroits stratégiques afin de contenir tout rejet accidentel de polluants, de réguler les afflux en cas de fortes précipitations et, ainsi, de préserver les cours d'eau environnants.

Les gaz émis par les systèmes de détection de particules sont une autre source potentielle de dégradation de l'environnement. Le CERN s'emploie à réduire considérablement ces émissions et a lancé, en parallèle, un projet de R&D sur des mélanges gazeux plus écologiques pour les futurs détecteurs.

Les accélérateurs de particules étant énergivores, le CERN s'efforce d'optimiser leur rendement. Le Comité pour la gestion de l'énergie (EMP) a été créé en 2015 et plusieurs mesures d'économie d'énergie ont été mises en place. Lors des récents travaux de consolidation du hall d'expérimentation de la zone Est, l'amélioration de l'efficacité énergétique a été intégrée au cahier des charges, avec notamment des aimants pulsés, qui ne seront sous tension que lorsque c'est utile. Cette mesure simple réduit la consommation d'énergie de 90 %. De même, un cycle « économie d'énergie » a été mis en place au SPS ; il s'enclenche lorsqu'il n'y a pas de faisceau reçu des accélérateurs situés en amont. Les grandes expériences LHC mettent elles aussi en place des modes de

fonctionnement économiques pour les périodes d'arrêt. Il est également prévu d'installer des dispositifs de récupération de la chaleur générée par les systèmes de refroidissement du CERN, qui serviront à chauffer le site de Meyrin et certains quartiers proches du Laboratoire.

COUP D'ACCÉLÉRATEUR POUR LE RECYCLAGE

Environ 50 % des déchets ordinaires produits par le CERN sont recyclés, ce qui place l'Organisation en position de leader dans la région de Genève. Pourtant, il est possible de faire encore mieux. Une semaine de sensibilisation a donc été organisée en novembre, afin d'encourager chacun à trier davantage. Le traitement des déchets des bureaux et restaurants du CERN se fait dans un centre spécialisé, et tout ce qui n'est pas recyclable ou compostable est incinéré pour produire de l'énergie. Sur les différents sites de travail du Laboratoire, le recyclage est activement encouragé. Ainsi, en 2016 (dernières données disponibles), le CERN avait recyclé 543 tonnes de bois, 294 tonnes de papier et carton et 5,4 tonnes de PET.

UN LABORATOIRE EN MOUVEMENT

Face à l'augmentation du nombre de personnes présentes au CERN, aux difficultés des parcours quotidiens transfrontaliers, aux multiples déplacements journaliers d'un site à l'autre et à la demande croissante de places de parking, la mobilité devient une préoccupation importante. En 2017, un groupe de travail sur la mobilité a été constitué, afin de rendre celle-ci plus sûre, plus verte et plus agréable pour tous. Les objectifs sont d'optimiser la gestion des

Des mesures ont été prises pour promouvoir l'utilisation du vélo, avec, par exemple, l'amélioration de la sécurité aux entrées des sites ou encore l'installation de bornes de réparation de vélos. (CERN-PHOTO-201804-087-4)



espaces de parking au CERN, de promouvoir des moyens de transport autres que la voiture, et d'améliorer la sécurité et la fluidité de la circulation sur les sites et à leurs abords. Le groupe de travail a réalisé des études afin d'élaborer un plan de mobilité qui sera soumis à la Direction en 2018, avec des objectifs d'ici à 2030. Entre-temps, de nombreuses mesures ont déjà été prises, telles que l'automatisation des accès au domaine, la création du Centre de mobilité, la construction d'une piste cyclable entre les sites de Meyrin et de Prévessin, l'amélioration de la sécurité des cyclistes et des piétons aux entrées du CERN, et l'installation de relais de réparation de vélos. Plusieurs idées nouvelles sont à l'étude, notamment des mesures visant à fluidifier davantage la circulation à l'entrée du site de Meyrin côté français, la création de pistes cyclables et de voies à sens unique sur les sites du CERN, et la mise en place d'un réseau de covoiturage.

RENDRE LA MOBILITÉ AU CERN PLUS

SÛRE, PLUS ÉCOLOGIQUE ET PLUS

AGRÉABLE POUR TOUS.

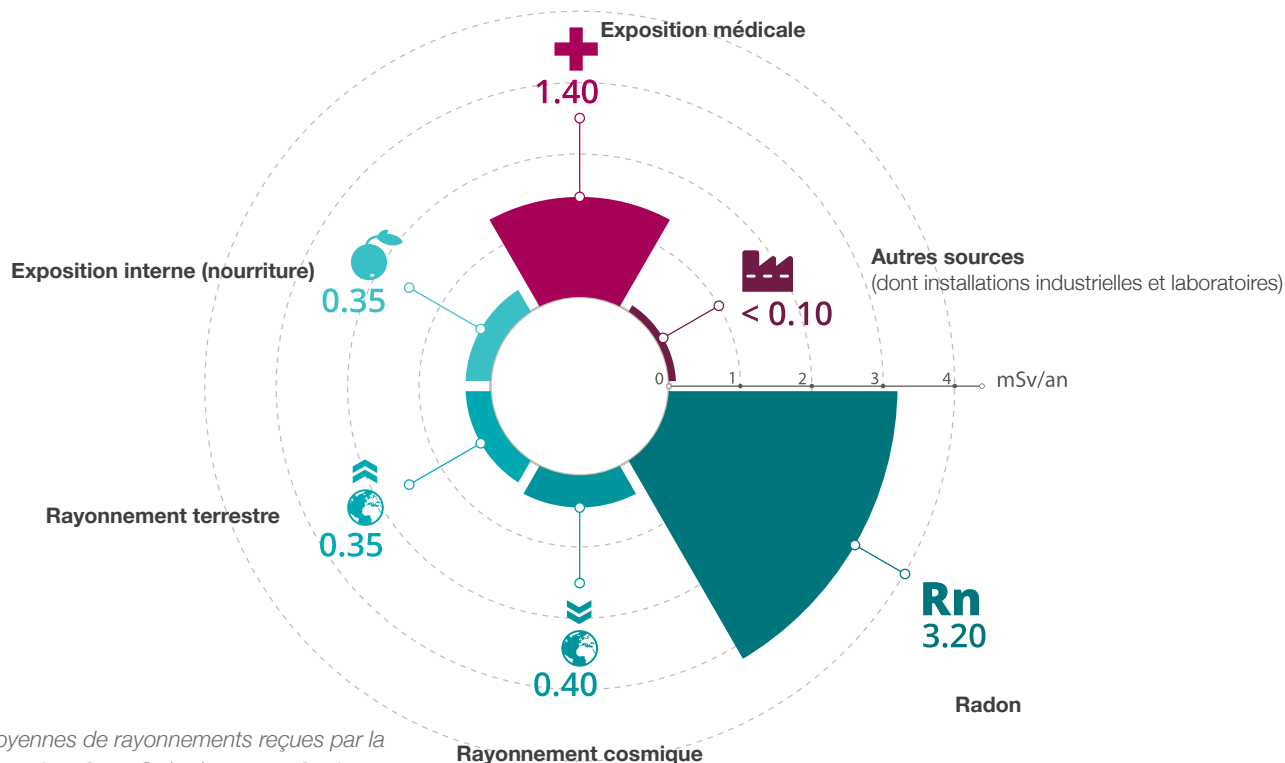
UN PARTENARIAT QUI SAUVE DES VIES

Le partenariat mis en place entre le CERN et les Hôpitaux Universitaires de Genève (HUG) en 2015 a été conçu pour optimiser la synergie entre les équipes d'intervention du CERN et le plus grand hôpital de la région. Dans ce cadre, une unité cardiobile et une équipe paramédicale sont postées en permanence au CERN.

L'EXPOSITION AUX RAYONNEMENTS IONISANTS

Dans notre quotidien, nous sommes en contact en permanence avec la radioactivité. Ces rayonnements sont dits « ionisants », car ils peuvent interagir avec la matière en arrachant des électrons aux atomes. Ils peuvent être d'origine naturelle, en provenance de la Terre, de l'espace (rayons cosmiques) ou de notre alimentation (exposition interne), ou d'origine artificielle, lors d'examens médicaux par exemple. Les doses reçues sont très variables d'une personne à l'autre (suivant le mode de vie notamment), et d'une région à l'autre.

Les rayonnements auxquels nous sommes exposés proviennent principalement du radon émis dans les habitations (gaz issu de l'uranium contenu dans les sols), des traitements médicaux et de la radioactivité naturelle. Les installations industrielles et les instituts de recherche constituent d'autres sources de rayonnements, bien plus faibles. La contribution du CERN est de l'ordre de 0,01 à 0,02 mSv/an aux abords directs de ses sites. Le CERN dispose de 136 stations de surveillance, prélève des échantillons et réalise de nombreuses analyses chaque année, qu'il soumet aux autorités compétentes de ses deux États hôtes.



Doses moyennes de rayonnements reçues par la population suisse [en mSv/an/ personne] suivant leur origine. (source : Office fédérale de la santé publique suisse OFSP, 2016).

Ce partenariat CERN-HUG dessert le Laboratoire, mais aussi la partie ouest du canton de Genève et la zone environnante. Il intègre en outre le CERN dans les systèmes d'intervention d'urgence de Genève. Ainsi, le Service du Secours et du Feu du CERN dispose d'une liaison permanente avec le centre de contrôle des services d'urgence de Genève. L'ambulance du CERN peut en cas de besoin prêter main-forte au service d'ambulance des HUG : les services de secours sont améliorés à la fois pour le CERN et pour le canton, et les chances de survie en cas d'incident sont fortement augmentées. Outre l'amélioration immédiate de l'action d'intervention, le partenariat avec les HUG apporte au CERN des avantages à long terme. Les HUG proposent maintenant au personnel du CERN travaillant au Service médical et au Service du Secours et du Feu une formation sur les interventions d'urgence, et le personnel ambulancier du Laboratoire peut également suivre un cours conduisant à l'obtention du brevet fédéral de technicien ambulancier, diplôme reconnu au niveau national en Suisse. Le partenariat permet également une formation en cours d'emploi pour le personnel de la salle de contrôle du Service du Secours et du Feu.

RECYCLER LES DÉCHETS DE FAIBLE ACTIVITÉ

L'exploitation des accélérateurs de particules conduit à rendre certains éléments radioactifs. La plupart des isotopes générés ont des demi-vies de quelques minutes, voire quelques secondes, mais certains ont une demi-vie plus longue. Certaines pièces restent donc radioactives pendant plusieurs années et doivent être stockées au CERN en attendant de pouvoir être évacuées vers le centre de traitement des déchets du Laboratoire. En 2017, environ 3 000 m³ de déchets ont été éliminés en toute sécurité. Il s'agissait en grande partie de modules d'accélération de l'accélérateur LEP, recyclés en Suisse comme métaux ordinaires après libération du contrôle, et de câbles, traités comme des déchets de très faible activité en France. Cette année, la quantité de déchets de faible activité éliminés a été nettement plus importante que les 630 m³ produits.

LE CERN S'ENGAGE POUR LES OBJECTIFS DE DÉVELOPPEMENT DURABLE

En octobre, l'Office des Nations Unies à Genève a tenu une journée portes ouvertes à laquelle le CERN était invité à participer. L'Organisation a saisi cette occasion pour montrer que la recherche au CERN contribue aux Objectifs de développement durable des Nations Unies. Au fil des décennies, les objectifs ambitieux de développement des Nations Unies ont attiré l'attention sur un certain nombre de problèmes cruciaux et ont changé la vie de millions de personnes.

Les Objectifs de développement durable et la recherche en physique fondamentale peuvent sembler éloignés à première vue, mais, sur les 17 objectifs, qui vont de l'élimination de la pauvreté et de la faim à la promotion de la paix et de la justice par des institutions efficaces, il y en a cinq auxquels le CERN contribue, simplement en accomplissant sa mission principale.

Ainsi, le CERN participe à la promotion de la bonne santé et du bien-être, domaine auquel les technologies d'accélération et de détection de particules contribuent depuis des décennies dans le cadre d'applications telles que les scanners médicaux et les accélérateurs destinés à la thérapie contre les cancers. Le CERN organise des programmes éducatifs pour les élèves et les enseignants du monde entier, contribuant à l'accès universel à l'éducation. Le Laboratoire promeut l'innovation dans le cadre de ses activités de transfert de connaissances. L'avènement de sociétés pacifiques et ouvertes à tous est un objectif inscrit dans la convention constitutive du CERN. Le dernier objectif vise à renforcer les moyens de mettre en œuvre les seize autres en revitalisant le partenariat mondial pour le développement durable. Le CERN est un modèle de coopération internationale dans le domaine scientifique, et reste un exemple dans différents domaines de la science.



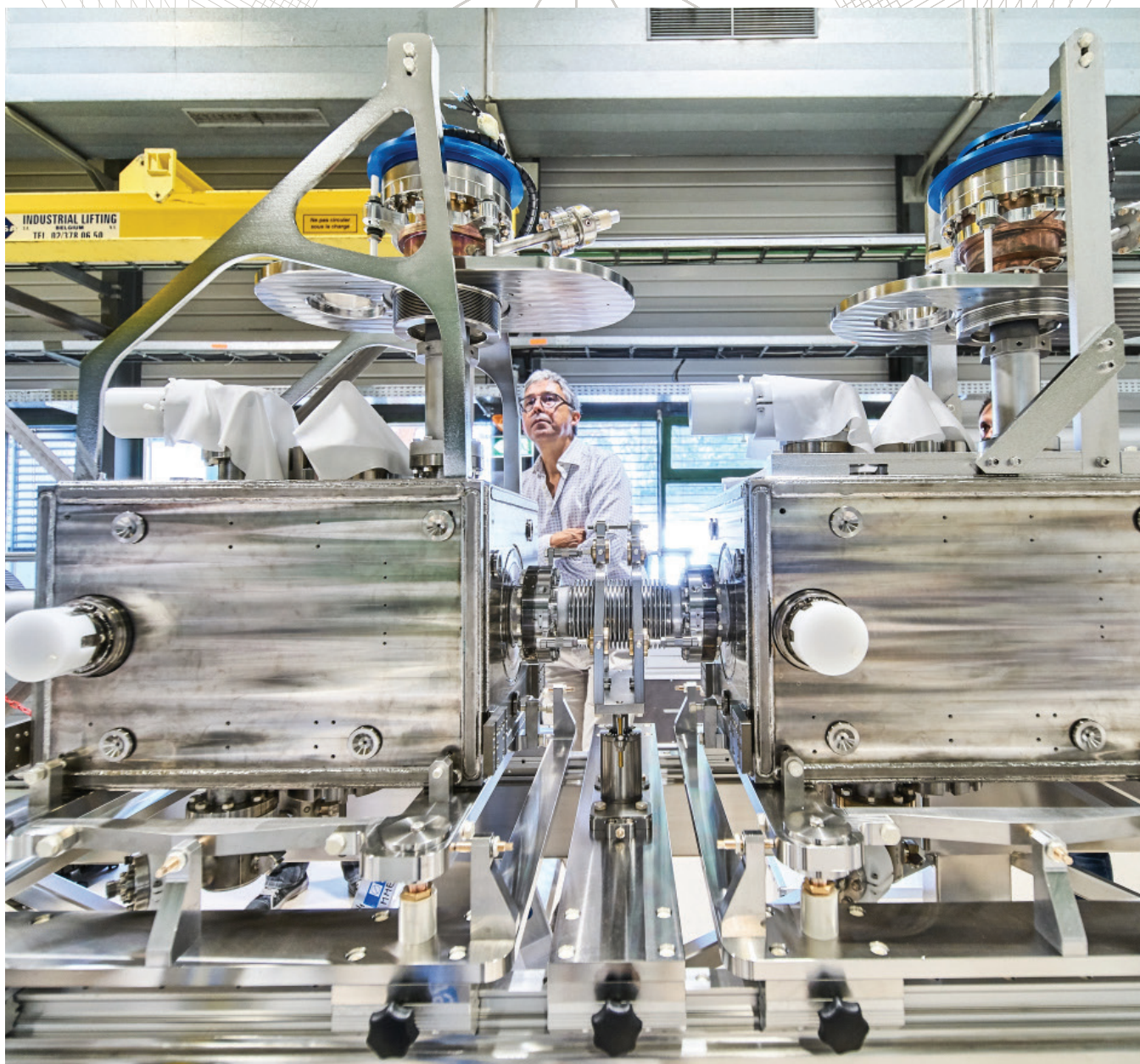
Les produits chimiques en lieu sûr

Un nouveau bâtiment a vu le jour en 2017 ; il abrite des laboratoires destinés au traitement de surface pour les équipements de vide et des ateliers de fabrication et de traitement de circuits imprimés. Une évaluation poussée des risques a été réalisée afin de garantir la sécurité de la manipulation des produits chimiques, débouchant sur l'intégration de systèmes de sécurité de pointe dans la structure du bâtiment. Par exemple, les cuves dans lesquelles les produits chimiques sont stockés sont dotées d'une double paroi et de détecteurs de fuite, et sont installées au-dessus de bassins de rétention de haute technologie pouvant résister à plus de 100 types de produits chimiques différents. Le bâtiment est équipé de panneaux solaires et d'un système de récupération de la chaleur qui permettent d'économiser la moitié de l'énergie nécessaire pour le chauffage des locaux.

CONSTRUIRE L'AVENIR

Au CERN, physiciens, ingénieurs et techniciens imaginent, conçoivent et construisent les installations qui permettront à la communauté scientifique de poursuivre sa quête de connaissances. Du LHC de nouvelle génération aux accélérateurs du futur, en passant par l'inauguration du nouvel accélérateur linéaire ou les premiers essais d'un décélérateur d'antimatière, les projets s'esquissent et se matérialisent dans les ateliers du CERN.

Assemblage des deux premières cavités-crabe pour le LHC à haute luminosité. Ces cavités orienteront les faisceaux avant leur croisement au cœur des expériences. (CERN-PHOTO-201708-196-5)





Fabrication d'un aimant correcteur pour le LHC à haute luminosité.
(CERN-PHOTO-201804-093-4)

LA HAUTE LUMINOSITÉ ACCÉLÈRE

Le LHC à haute luminosité, qui sera mis en service après 2025, entre dans sa phase ultime de développement. La fabrication a même commencé pour certains composants de ce LHC de deuxième génération.

Le LHC à haute luminosité fournira jusqu'à dix fois plus de collisions pour permettre aux physiciens d'étudier en détail les phénomènes découverts par le LHC. Pour réaliser cette amélioration majeure, de nouveaux équipements doivent être installés sur 1,2 kilomètre de l'accélérateur actuel. Augmenter le nombre de collisions implique d'injecter plus de particules dans l'anneau et de compresser plus fortement les paquets de particules avant leur croisement dans les expériences. C'est la tâche que rempliront des aimants de focalisation plus puissants. Ils font appel au niobium-étain pour générer des champs magnétiques de 11,4 teslas, contre 8,3 teslas pour ceux du LHC, en niobium-titane.

Vingt-quatre aimants quadripôles de deux longueurs différentes sont en développement au CERN et dans le cadre de la collaboration entre le CERN et le programme US HL-LHC AUP (*Accelerator Upgrade Program*), qui rassemble plusieurs laboratoires aux États-Unis. En 2017, deux prototypes courts ont été construits et testés au CERN ; ces essais permettent d'optimiser le procédé très délicat de fabrication des bobines. Un prototype à taille réelle de 4 mètres a été terminé aux États-Unis, tandis que la production d'un prototype à taille réelle de 7,2 mètres démarrait au CERN.

Les cavités dites « crabe » donneront une impulsion transversale aux paquets de particules afin de les orienter

de manière optimale avant la collision. Cette technologie, inédite pour une machine à hadrons, a enregistré une belle avancée : les deux premières cavités ont été fabriquées, en collaboration avec l'Université de Lancaster et le STFC au Royaume-Uni, assemblées puis testées avec succès. À la fin de l'année, elles étaient prêtes à être transportées dans l'accélérateur SPS. Une station de test radiofréquence dotée d'un réfrigérateur à hélium mobile inédit a été développée pour tester les cavités-crabe avec du faisceau en 2018.

Avec plus de particules filant dans la machine, la protection des équipements doit être renforcée. Cette sécurité repose sur un plus grand nombre de collimateurs qui absorbent les particules qui dévient de la trajectoire optimale. En 2017, trois nouveaux types de collimateurs ont été testés. Deux collimateurs avec fils ont été installés dans le LHC. Le conducteur inséré dans leurs mâchoires crée un champ électromagnétique qui corrige les perturbations générées par le faisceau circulant en sens opposé. Un prototype de collimateur formé de graphite de molybdène, qui perturbe moins le faisceau, a été testé avec succès. Enfin, des collimateurs à cristaux ont également été essayés dans le LHC : ils dévient les particules qui s'écartent du faisceau vers un absorbeur.

Pour faire de la place aux collimateurs, des aimants de courbure (dipôles), plus courts et plus puissants que ceux du LHC, également à base de niobium-étain, sont développés. Deux nouveaux prototypes courts de ces dipôles à 11 teslas ont été fabriqués et testés.

Outre les aimants principaux, sept types d'aimants correcteurs seront installés, parmi lesquels seize aimants dotés d'une géométrie de bobinage originale, dite « cosinus θ inclinée ». En 2017, un prototype court a dépassé les performances requises et la fabrication des composants pour le prototype de taille réelle a commencé. Trente-six autres aimants correcteurs, de conception dite « superferrique », sont développés dans le cadre d'une collaboration avec l'INFN. Deux nouveaux prototypes ont été construits et testés au laboratoire INFN-LASA de Milan.

La haute luminosité représente également un défi pour les experts du vide et de la cryogénie. Le phénomène de nuages d'électrons, qui dégrade le vide et perturbe les faisceaux, est d'autant plus important que les faisceaux sont intenses. En 2017, un minuscule robot a été développé par le CERN en collaboration avec ses partenaires britanniques du STFC et de l'Université de Dundee. Il peut traiter in situ avec un faisceau laser certaines portions de chambre à vide afin de modifier la structure de la surface et ainsi de piéger les électrons.

**LE LHC À HAUTE LUMINOSITÉ
FOURNIRA JUSQU'À DIX FOIS PLUS
DE COLLISIONS POUR DES ÉTUDES
DE PRÉCISION.**



La nouvelle installation de test CLEAR ouvre ses portes à la R&D pour les accélérateurs et à des mesures pour d'autres domaines scientifiques, comme l'espace ou les applications médicales. (CERN-PHOTO-201711-271-12)

À LA POINTE DES ESSAIS

Pour développer des composants de pointe, il faut pouvoir mesurer leurs performances. Au CERN, les laboratoires effectuent des tests aux limites de l'existant.

En 2017, une nouvelle installation d'essai pour les composants d'accélérateur a été mise en service. CLEAR (*CERN Linear Electron Accelerator for Research*), qui a pris le relais de l'installation CTF3 du projet CLIC, est dotée d'une ligne de faisceau d'électrons pour tester les structures accélératrices du CLIC, ainsi que des composants pour le LHC à haute luminosité et les injecteurs. Si sa mission première reste la R&D pour les accélérateurs, CLEAR ouvre ses portes à d'autres domaines scientifiques. Des mesures de rayonnements sur des composants électroniques pour des missions spatiales, des tests de dosimétrie pour des applications médicales ou encore des essais pour les lasers à électrons libres ont été réalisés en 2017, et le programme pour 2018 s'annonce également riche et diversifié.



L'un des prototypes courts d'un quadripôle en niobium-étain pour le LHC à haute luminosité est inséré dans le tout nouveau banc de test vertical du hall de test des aimants supraconducteurs. (CERN-PHOTO-201708-191-20)

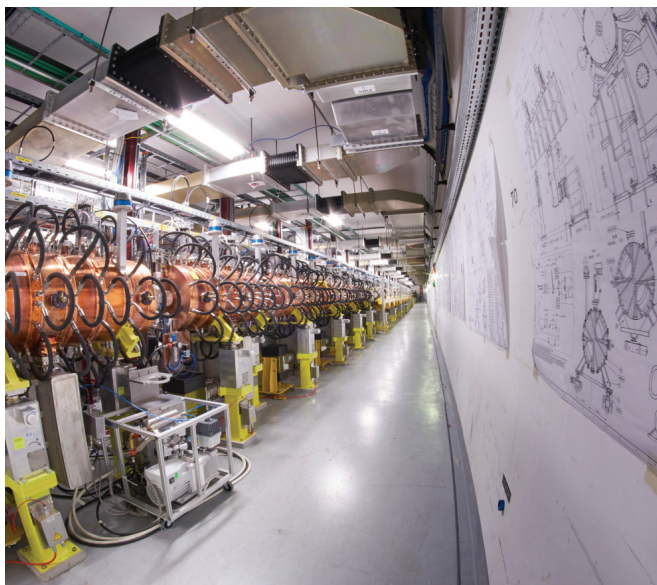
Le hall de test des aimants supraconducteurs, dispositif essentiel pour le LHC à haute luminosité et les accélérateurs du futur, a poursuivi sa rénovation. Un banc de test vertical, capable de délivrer des intensités de courant allant jusqu'à 30 000 ampères, a été mis en service. Un banc horizontal pour les aimants plus longs et une station d'essai pour les liaisons supraconductrices sont en préparation. Dans le même hall, l'aimant FRESCA2 a été mis en service, générant un champ de 13,3 teslas. Développé en collaboration avec l'institut français CEA, cet aimant est destiné à tester les câbles en niobium-étain et supraconducteurs haute température pour des accélérateurs du futur.

LA FAMILLE DES ACCÉLÉRATEURS S'AGRANDIT

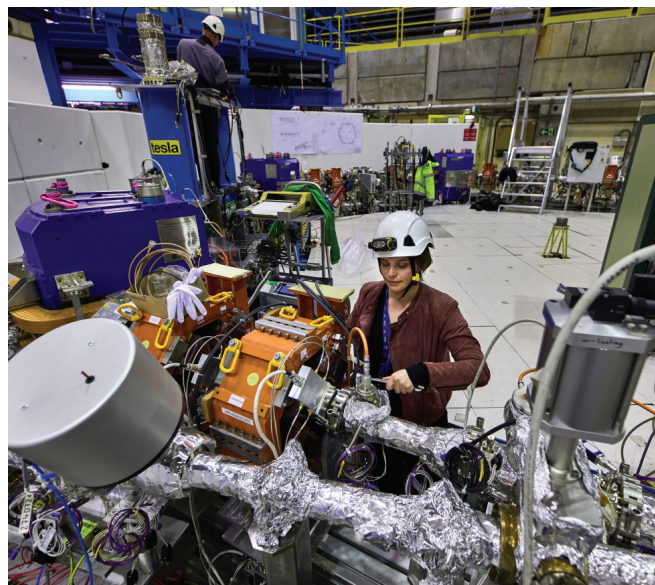
Le 9 mai, la famille des accélérateurs du CERN s'est agrandie avec l'arrivée de son plus jeune membre, l'accélérateur linéaire 4 (Linac 4), le premier accélérateur inauguré depuis le démarrage du LHC en 2008. Il sera raccordé au Booster du PS en 2019, puis remplacera le

Linac 2 comme premier maillon de la chaîne d'accélération après le deuxième long arrêt technique, en 2021.

Au printemps, le Linac 4 de 160 MeV a été entièrement mis en service. Il est entré dans une phase de fonctionnement autonome afin d'évaluer et améliorer sa fiabilité avant son raccordement au complexe d'accélérateurs. La disponibilité générale de l'accélérateur durant cette phase initiale a



L'accélérateur linéaire Linac 4, inauguré en mai 2017, comporte quatre types de structures accélératrices pour accélérer les faisceaux jusqu'à 160 MeV. (CERN-PHOTO-201704-093-11)



Le nouveau décélérateur d'antiprotons ELENA a franchi de nombreuses étapes de mise en service en 2017. (CERN-PHOTO-201804-086-6).

atteint 91 %, une valeur impressionnante pour une nouvelle machine. Cette phase se poursuivra durant une bonne partie de 2018.

L'injection de particules du Linac 4 dans le Booster du PS a été testée et l'ensemble des équipements pour la ligne de transfert entre les deux machines a été préparé. Ainsi, un système de distribution verticale divisera le faisceau issu du Linac 4 en quatre faisceaux et les orientera grâce à des aimants de déflexion rapide. Les faisceaux seront ensuite déviés verticalement par de nouveaux aimants à septum vers les quatre anneaux superposés du Booster du PS.

L'accélérateur de 86 m est un élément essentiel du projet d'amélioration des injecteurs du LHC (projet LIU), qui vise à mettre à niveau la chaîne d'injecteurs du LHC pour le LHC à haute luminosité. Le projet LIU prévoit le remplacement du système d'accélération du Booster du PS. Cette année, 28 cavités accélératrices radiofréquence de nouvelle génération ont été assemblées. Durant le deuxième long arrêt technique, 24 d'entre elles seront installées et quatre seront conservées comme cavités de substitution. Avec cette mise à niveau, l'accélérateur pourra fournir des faisceaux de plus grande intensité et à une énergie plus élevée, jusqu'à 2 GeV (contre 1,4 GeV actuellement).

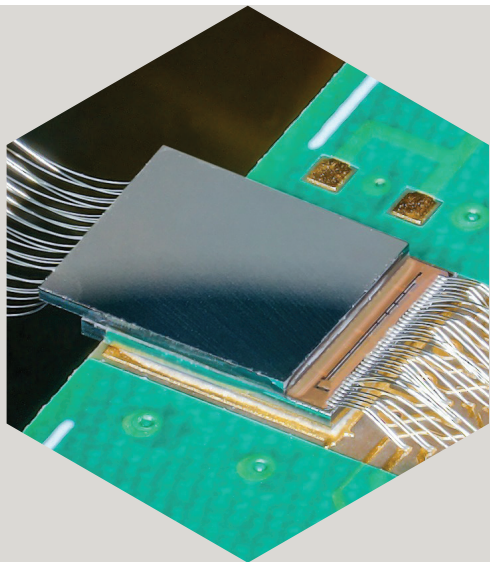
En 2016 et 2017, un grand nombre d'activités durant l'arrêt technique hivernal prolongé ont été consacrées au projet LIU. Une campagne de décâblage d'envergure a été menée au Booster du PS, au PS et au SPS, au cours de laquelle près de 13 000 câbles obsolètes ont été retirés. Au SPS, la campagne pour réduire les nuages d'électrons s'est poursuivie ; du carbone amorphe a été appliqué sur les faces internes de certaines chambres à vide afin de limiter le phénomène d'avalanche électronique.

L'ANTIMATIÈRE CIRCULE DANS SON NOUVEAU DÉCÉLÉRATEUR

En 2017, ELENA, le nouvel anneau de décélération d'antiprotons, a franchi plusieurs étapes cruciales de sa mise en service. Raccordé au Décélérateur d'antiprotons, ELENA (*Extra Low ENergy Antiproton*) doit ralentir davantage les antiprotons avant de les transmettre aux expériences sur l'antimatière. L'énergie sera ainsi ramenée de 5,3 MeV à seulement 0,1 MeV. Plus les antiprotons sont lents, mieux les expériences peuvent les piéger pour les étudier. Le dispositif de décélération couplé au système de refroidissement par électrons, installé en fin d'année, permettra aux expériences de capturer 10 à 100 fois plus d'antiprotons.

Après la circulation des premiers faisceaux d'ions H⁻ (un proton entouré de deux électrons), le système de radiofréquence, l'instrumentation de faisceau et le système de correction ont été testés et mis en service. ELENA a également reçu ses premiers antiprotons de son grand frère, le Décélérateur d'antiprotons. Les systèmes de radiofréquence des deux décélérateurs ont en effet été synchronisés. À basse énergie, les faisceaux sont difficiles à contrôler, ce qui rend la mise en service d'ELENA ardue. Les équipes ont testé l'anneau avec des ions de très basse énergie, seulement 0,085 MeV. Le faisceau a été maintenu durant plusieurs centaines de millisecondes et des antiprotons ont même effectué un parcours de plusieurs secondes - un succès.

Enfin, la ligne de transfert des antiprotons vers l'expérience GBAR a été préparée. L'installation devrait recevoir ses premiers faisceaux tests d'ELENA en 2018. Les autres expériences seront raccordées au cours du deuxième long arrêt technique.



Un prototype de détecteur à pixels créé pour le détecteur de vertex du CLIC. La puce au-dessus mesure seulement 3 mm de large, mais contient pourtant plus de 16 000 pixels. (OPEN-PHO-EXP-2017-010-1)

LES COLLISIONNEURS DU FUTUR S'ESQUISSENT

Le CERN mène actuellement deux études pour l'avenir de la physique des collisionneurs au-delà du LHC à haute luminosité ; l'une sur un collisionneur circulaire (FCC) et l'autre sur un collisionneur linéaire (CLIC). L'étude préliminaire de chaque machine est en cours, et les résultats seront intégrés à la mise à jour de la stratégie européenne pour la physique des particules en 2019.

L'étude sur un **futur collisionneur circulaire (étude FCC)**, réunissant plus de 120 instituts de 33 pays, porte sur une infrastructure d'accélération d'envergure, d'une circonférence d'environ 100 km. Le nouveau tunnel pourrait accueillir un collisionneur de leptons ou un collisionneur de hadrons avec une énergie de collision de 100 TeV. Des collisions d'ions lourds ou lepton-hadron, et des expériences à cibles fixes sont envisagées. L'étude porte également sur un LHC à plus haute énergie dans le tunnel existant.

En 2017, la collaboration a défini la conception et les paramètres de base de ces machines, ainsi que leurs systèmes et infrastructures techniques. Ce travail formera une partie essentielle du rapport technique de conception de l'étude FCC, prévu pour la fin 2018.

L'optique des faisceaux a été optimisée. Le potentiel de physique a été exploré minutieusement au cours de la première semaine d'étude consacrée au projet. Les équipes ont poursuivi leur travail sur l'emplacement du tunnel dans la région et ont produit des études préliminaires démontrant la compatibilité d'une telle infrastructure avec les exigences socio-économiques et environnementales des deux pays hôtes.

Les technologies-clés pour un collisionneur de leptons sont les cavités radiofréquence (RF) supraconductrices et la production de puissance RF à rendement élevé. Une

LE CERN MÈNE DEUX ÉTUDES POUR L'AVENIR DE LA PHYSIQUE DES COLLISIONNEURS.

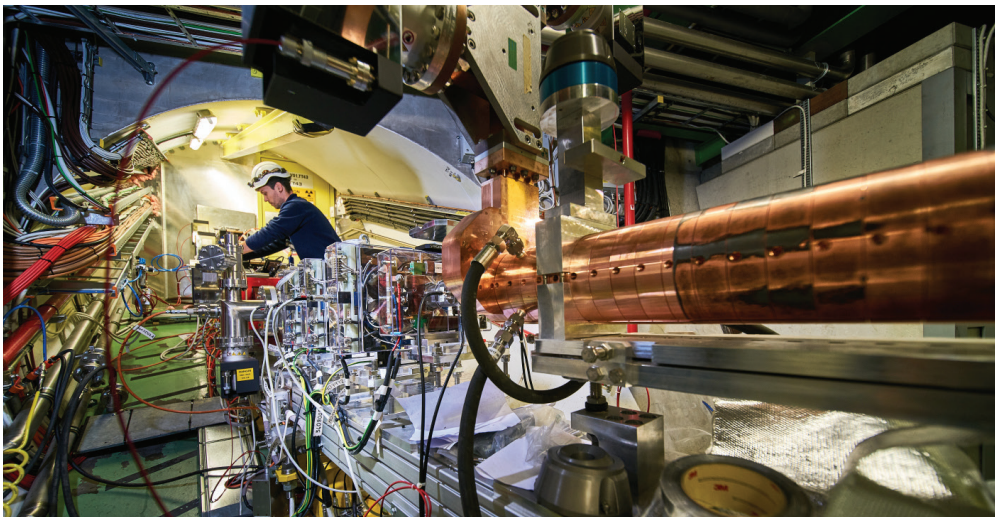
collaboration entre le CERN, LNL (Italie) et STFC (Royaume-Uni) étudie les performances maximales de la technologie niobium-cuivre et s'intéresse à d'autres matériaux, comme le niobium-étain. Des travaux de R&D en collaboration avec les laboratoires JLAB et FNAL (États-Unis) portent sur les techniques pour améliorer les performances obtenues avec du niobium massif. Des méthodes réduisant le coût des cavités et améliorant leur qualité sont explorées avec des partenaires industriels. Des technologies permettant un meilleur rendement de la production de puissance RF sont développées avec le CLIC. Au CERN, des modèles courts du principal dipôle à double ouverture du collisionneur de leptons ont été construits tandis qu'un modèle d'aimant quadripôle est en cours de fabrication. Enfin, un système d'injection innovant à haut rendement a été conçu.

Des aimants en niobium-étain sont à l'étude pour le collisionneur de hadrons. Ils pourraient générer des champs magnétiques de 16 teslas, deux fois plus que les aimants du LHC. Des collaborations ont été nouées avec des instituts et des entreprises pour fabriquer des câbles en niobium-étain plus performants à un coût abordable. Un modèle de démonstration est en cours de construction au CERN. Des études ont été initiées avec des économistes et des entreprises pour définir les avantages de dispositifs supraconducteurs en niobium-étain dans différentes applications : solutions compactes et précises pour l'imagerie et la spectroscopie magnétique de résonance nucléaire, ou encore cyclotrons supraconducteurs plus légers pour la thérapie par faisceaux d'ions.

Deux lignes de faisceaux de rayonnement synchrotron ont été mises en place à KARA, à Karlsruhe (avec un financement du projet européen EuroCircol) et à DAFNE, à Frascati, afin de tester les prototypes d'écran de faisceau pour le collisionneur de hadrons. Le financement du projet EAStrain (réseau de formation Marie Curie) a été approuvé en mai 2017. Ce projet couvre trois technologies essentielles pour l'étude FCC : les câbles supraconducteurs, les couches minces supraconductrices et la réfrigération cryogénique.

Le projet **CLIC (Collisionneur linéaire compact)** porte sur la conception d'un collisionneur linéaire électron-positon à haute luminosité pour explorer la frontière des hautes énergies. Il s'appuie sur un système innovant d'accélération à deux faisceaux et exige la création de structures accélératrices à gradient élevé. Une mise en service en trois phases est prévue, à des énergies de collision de 0,38, 1,5 puis 3 TeV.

Les études sur les accélérateurs menées en 2017 ont eu pour but de réduire les coûts et la consommation d'énergie du CLIC. Les principales activités ont porté sur les



Installation de l'expérience AWAKE en 2017. AWAKE va tester l'accélération d'électrons avec un champ de sillage. (CERN-PHOTO-201711-284-12)

sources de radiofréquence à rendement élevé, les aimants permanents, les tests avec nano-faisceau, l'optimisation des structures accélératrices et des études de mise en œuvre relatives au génie civil, à l'infrastructure, aux calendriers et à la configuration du tunnel. La participation potentielle de l'industrie aux technologies essentielles du CLIC fait l'objet d'une évaluation systématique.

Les équipes du projet CLIC collaborent activement avec des projets d'autres disciplines, intéressés par l'utilisation de techniques d'accélération à gradient élevé, ce qui ouvre la voie à une utilisation plus large de la technologie en bande X à 12 Ghz. Cette technologie permet de réduire la taille et la consommation d'énergie des machines. Elle pourrait trouver d'autres applications, comme les sources de photons utilisées pour l'analyse de matériaux, de prélèvements biologiques et de processus moléculaires. Les bancs d'essai de la technologie en bande X au CERN permettent de faire la démonstration des systèmes RF destinés à de telles applications. Cette année, la proposition d'étude de conception CompactLight, qui porte sur le premier laser à électrons libres à rayons X (XFEL) basé sur la technologie en bande X à 12 Ghz, a été approuvée par la Commission européenne.

L'évaluation du potentiel de physique du CLIC s'est poursuivie, le but étant de déterminer ce potentiel aux différentes énergies de collision jusqu'à plusieurs TeV. Un rapport complet sur les études de physique sur le quark top aux trois seuils d'énergie est en préparation. La R&D sur les détecteurs de vertex et les trajectographes a bien progressé. Le but est de mettre au point des technologies capables de répondre aux exigences en matière de résolution en position, de synchronisation et de faible masse. La R&D sur les pixels au silicium se poursuit en synergie avec les améliorations des détecteurs ATLAS et ALICE, et le développement du détecteur à pixels Medipix et des puces Timepix. Ces dernières ont fait l'objet d'essais avec différentes configurations, et plusieurs voies de développement ont été définies. L'année 2017 a également vu le lancement d'évaluations des performances du nouveau modèle de détecteur pour le CLIC au moyen d'une nouvelle suite logicielle de simulation et de reconstitution d'événements.

VERS UNE RÉVOLUTION DE L'ACCÉLÉRATION

Le CERN pourra bientôt tester une technologie révolutionnaire d'accélération des particules grâce à la nouvelle expérience AWAKE (accélération par champ de sillage plasma entraînée par des protons). En novembre, la phase d'installation s'est achevée, avec la mise en place des trois derniers éléments-clés de l'expérience : la source d'électrons, la ligne de faisceaux d'électrons et le spectromètre à électrons.

À la fin de l'année, la mise en service de l'ensemble de l'expérience, y compris les éléments récents, avait commencé, ainsi que les préparatifs pour une année cruciale. En 2018, AWAKE testera une nouvelle technologie d'accélération des particules, consistant à faire « surfer » des électrons sur les ondes de charge électriques, appelées champs de sillage.

Pour cela, AWAKE a besoin de quatre ingrédients : des protons, des électrons, un laser et du plasma. Un faisceau de protons est d'abord injecté au cœur de l'expérience, une cellule de plasma de 10 mètres remplie de gaz ionisé par un faisceau laser. Quand les protons traversent le plasma, ils attirent des électrons libres, ce qui génère des champs de sillage. Un faisceau d'électrons est ensuite injecté, derrière le faisceau de protons. À la manière d'un surfeur glissant sur une vague, les électrons sont alors accélérés par le champ de sillage, et leur énergie peut augmenter de plusieurs gigavolts.

En 2016, des champs de sillage avaient déjà été créés par AWAKE à partir de faisceaux de protons. En 2017, la stabilité de la phase, la reproductibilité et la résistance des champs ont été prouvées. La prochaine étape sera de montrer qu'ils peuvent être utilisés pour accélérer des électrons. La technologie mise au point par AWAKE pourrait permettre la production de gradients d'accélération des centaines de fois plus élevés que ceux générés avec les cavités radiofréquence actuelles. Ainsi, les futurs collisionneurs pourraient atteindre des énergies plus élevées sur des distances plus courtes.

CONSEIL DU CERN

Composition au 31 décembre 2017

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

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

ÉTATS MEMBRES

Allemagne

M. S. Bethke
M. V. Dietz

Autriche

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

Belgique

M^{me} V. Halloin
M. D. Ryckbosch

Bulgarie

M. L. Litov
M. D. Tonev

Danemark

M. J. J. Gaardhøje
M. R. Michelsen

Espagne

S.E. M. C. González-Aller
Jurado
M. B. Sánchez Gimeno

Finlande

M^{me} P. Eerola
M. P. Pulkkinen

France

M^{me} U. Bassler
S.E. M^{me} E. Laurin

Grèce

M. K. Fountas
S.E. M^{me} A. Korka

Hongrie

M. P. Lévai
M. J. Pálinkás

Israël

M. E. Rabinovici
S.E. M^{me} A. Raz Shechter

Italie

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

Norvège

M^{me} L. Furuberg
M. E. Osnes

Pays-Bas

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

Pologne

M. D. Drewniak
M. J. Królikowski

Portugal

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

Roumanie

M. F. Buzatu
M^{me} B. Păduroiu

Royaume-Uni

M. B. Bowsher
M^{me} C. Durkin

Slovaquie

S.E. M. J. Podhorský
M. B. Sitár

Suède

M. M. Johnsson
M^{me} K. Jon-And

Suisse

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

Tchéquie

S.E. M. J. Kára
M. R. Leitner

ÉTATS MEMBRES ASSOCIÉS EN PHASE PRÉALABLE À L'ADHÉSION

Chypre

S.E. M. G. Kasoulides
M. P. Razis

Serbie

M. P. Adzić
S.E. M. V. Mladenović

Slovénie

M. T. Boh
M. D. Zavrtanik

ÉTATS MEMBRES ASSOCIÉS

Inde

M. A. Mohanty
M. A. Srivastava

Pakistan

S.E. M. F. Amil
M. M. Naeem

Turquie

M. Z. Demircan
M. U. Güneş

Ukraine

M. B. Grinyov
M. A. Zagorodnyy

OBSERVATEURS

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

COMITÉS DU CONSEIL

COMITÉ DES DIRECTIVES SCIENTIFIQUES

Président

M. R. K. Ellis
(Royaume-Uni)

Membres

M^{me} L. Baudis
M^{me} C. Biscari
M. R. Brinkmann
M^{me} B. Gavela
M^{me} B. Heinemann
M. M. Huyse
M. F. Le Diberder
M. G. Martinelli
M. H. Montgomery
M. Y. Nir
M. K. Redlich
M^{me} T. Rodrigo
M. V. Rubakov
M^{me} H. Schellman
M. Y. Suzuki

Membres ès qualités

Président du Comité des expériences LHC

M. F. Forti

Président du Comité des expériences SPS et PS

M. J. Nash

Président du Comité des expériences ISOLDE et n_TOF

M. K. Riisager

Présidente du Comité européen sur les futurs accélérateurs

M^{me} H. Abramowicz

Également présents

Président du Conseil

M. S. de Jong

Président du Comité des finances

M. O. Malmberg

Directrice générale

M^{me} F. Gianotti

COMITÉ DES FINANCES

Président

M. O. Malmberg
(Finlande)

Membres

Un ou plusieurs délégués
par État membre et État
membre associé

ORGANISATION INTERNE

Directrice générale

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

Fabiola Gianotti

Doris Forkel-Wirth

Directeur des accélérateurs et de la technologie

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

Frédéric Bordry

Paul Collier
Roberto Losito
José Miguel Jiménez

Directeur des finances et des ressources humaines

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

Martin Steinacher

Florian Sonnemann
James Purvis
Thierry Lagrange
Lluis Miralles

Directrice des relations internationales

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

Charlotte Warakulle

Ana Godinho

Directeur de la recherche et de l'informatique

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

Eckhard Elsen

Manfred Krammer
Frédéric Hemmer
Gian Giudice

Direction de projets

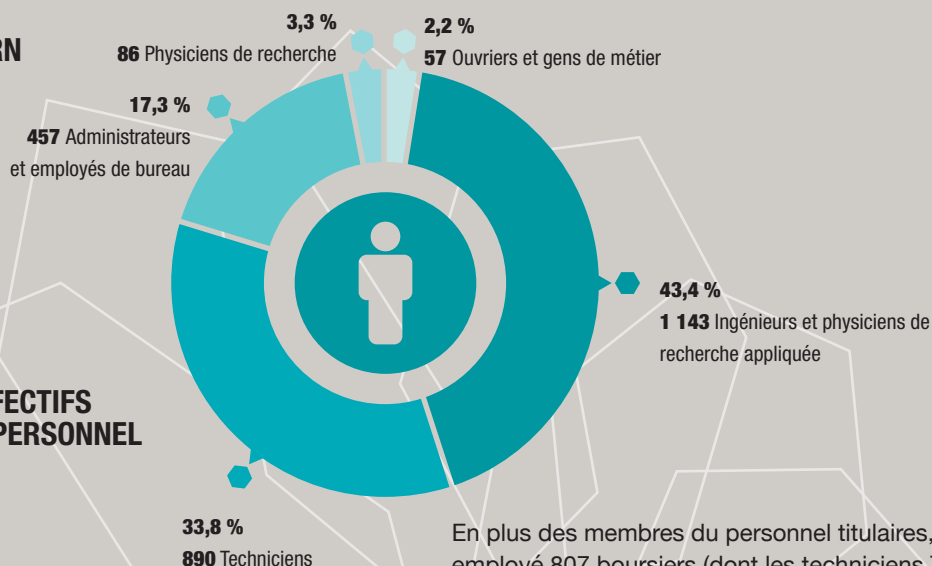
Advanced Wakefield Experiment (AWAKE)
CERN Neutrino Platform
Extra Low ENergy Antiproton (ELENA)
Future Circular Collider Study (FCC)
High Intensity and Energy ISOLDE (HIE-ISOLDE)
High Luminosity LHC (HL-LHC)
LHC Injectors Upgrade (LIU)
Linear Collider Studies (CLIC and LCS)
Physics Beyond Colliders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

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

LE CERN EN CHIFFRES

PERSONNEL DU CERN

Total
2 633 personnes



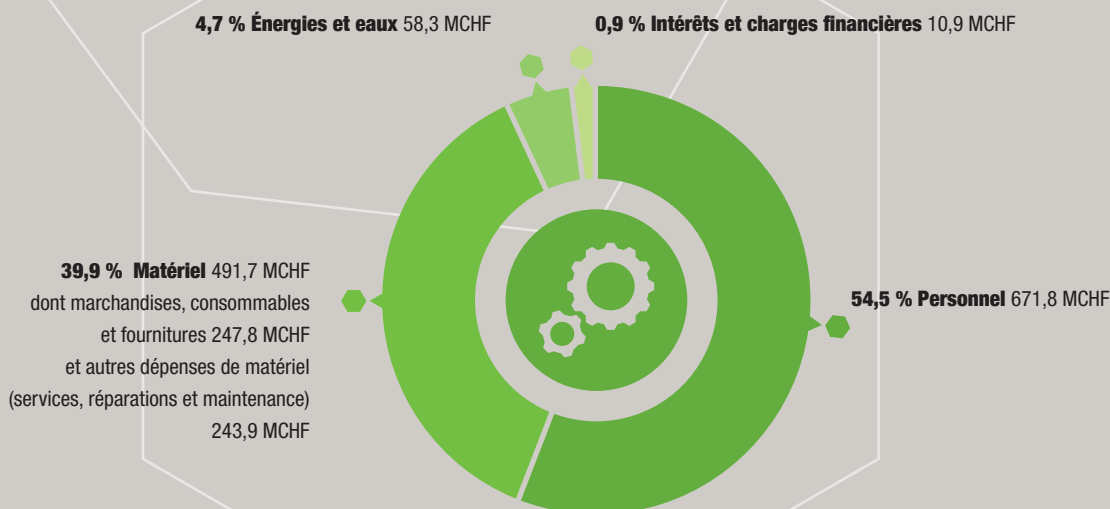
ÉVOLUTION DES EFFECTIFS DES MEMBRES DU PERSONNEL TITULAIRES

2013	2 513
2014	2 524
2015	2 531
2016	2 560
2017	2 633

En plus des membres du personnel titulaires, le CERN a employé 807 boursiers (dont les techniciens TTE), formé 579 étudiants et apprentis, et accueilli 1 277 attachés en 2017. L'infrastructure et les services du CERN sont utilisés par une grande communauté scientifique, représentant 12 236 utilisateurs (voir p. 30).

DÉPENSES DU CERN

Total des dépenses 1 232,7 MCHF



En 2017, plus de 40 % du budget du CERN a été dépensé dans l'industrie au travers d'achats de matériel et de services. Le CERN s'efforce d'équilibrer le retour industriel entre ses États membres (voir p. 35).

CERN

1211 Genève 23, Suisse

<http://home.cern>

Soixante-troisième rapport annuel de l'Organisation européenne pour la Recherche nucléaire. Le Rapport annuel du CERN présente les faits marquants et les principales activités du Laboratoire. Une version électronique est disponible à l'adresse :

<http://library.web.cern.ch/annual-reports>

En plus de cette publication, un bilan d'activités annuel détaille les avancements et les dépenses par activité par rapport aux objectifs approuvés par le Conseil du CERN. Ce rapport est disponible à l'adresse : <http://cern.ch/annual-progress-report-2017>

Le Rapport annuel 2017 du Transfert de connaissances au CERN (en anglais) est disponible à l'adresse : <http://kt.cern/about-us/annual-report>

Le Rapport annuel openlab 2017 (en anglais) est disponible à l'adresse :

<http://openlab.cern/resources/annual-reports>

Le Rapport annuel CERN & Society 2017 (en anglais) est disponible à l'adresse :

<http://cern.ch/go/cernandsociety2017>

Le Livre blanc de la Fondation HSF (en anglais) est disponible à l'adresse :

<http://cern.ch/go/whitepaperHSF>

Le Livre blanc d'openlab sur les défis informatiques de la recherche scientifique est disponible à l'adresse : <http://cern.ch/go/whitepaperopenlab>

La Liste des publications du CERN (un catalogue de toutes les publications connues sur les recherches menées au CERN pendant l'année) peut être consultée à l'adresse :

<http://library.cern/annual/list-cern-publications-2017>

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

Images :

Robert Hradil, Monika Majer/ProStudio22.ch : pp. 3, 14 et 31

SESAME: p. 7, droite

Robertas Dačkus/Bureau de la Présidence de la République de Lituanie : p. 8, en bas au centre

Samuele Evolvi: p. 11, tout à fait à gauche

Roger Claus : p. 26

InsightART : p. 34

CERN : toutes les autres images

Réalisation éditoriale et graphique :

Groupe Éducation, communication et activités grand public du CERN

eco.office@cern.ch

Traduction et relecture :

Service de traduction du CERN, ATIT

ISSN 0304-291X

ISBN 978-92-9083-486-1 (version papier)

ISBN 978-92-9083-487-8 (version électronique)

© Copyright 2018, CERN

