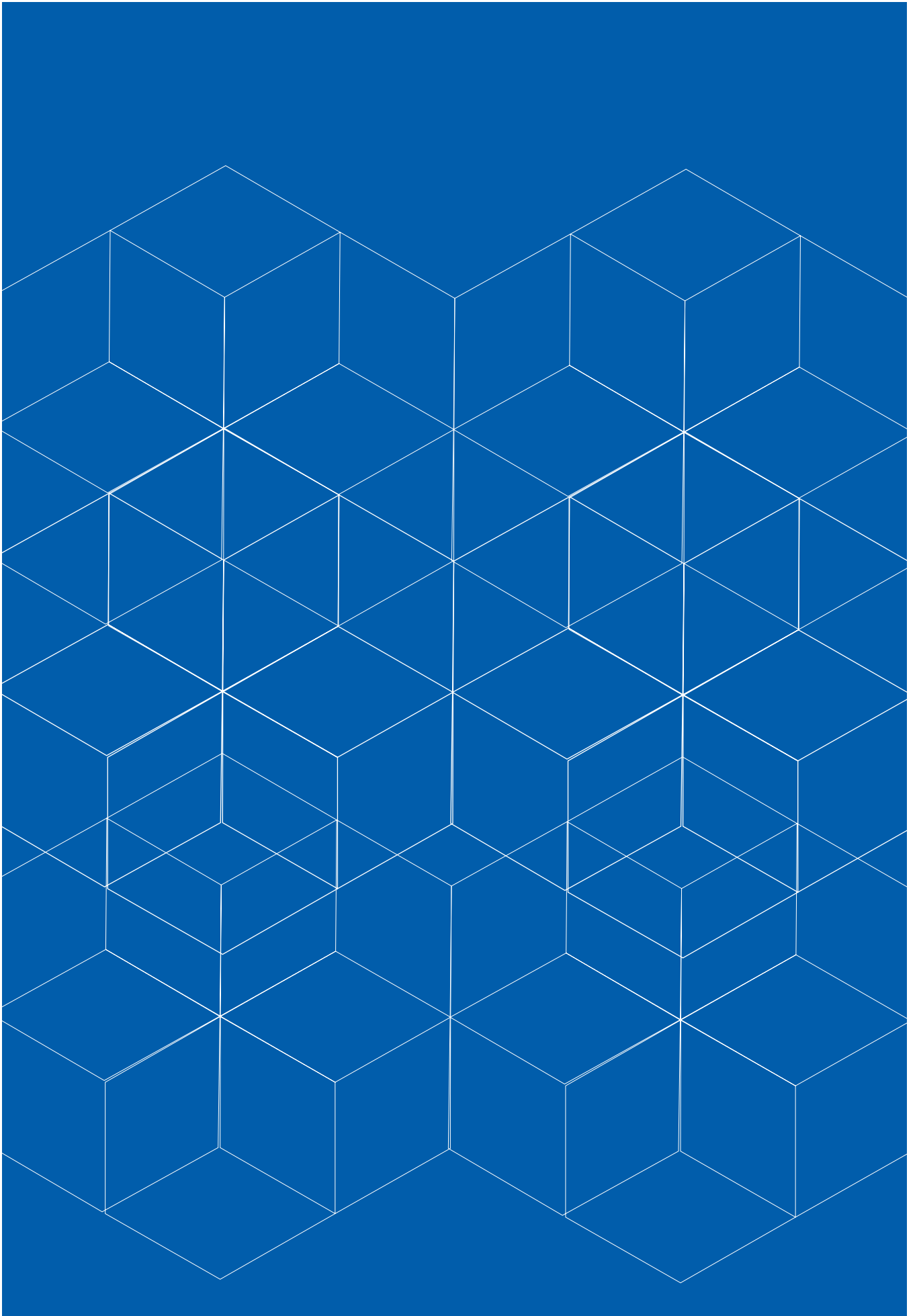




Rapport annuel **2018**





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 au monde permet de mener des recherches de physique fondamentale aux limites des connaissances pour comprendre de quoi l'Univers est fait et comment il fonctionne.

Créé en 1954, le CERN comptait 22 États membres en 2018. 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
2018 EN IMAGES**

**P12
UN LABORATOIRE POUR LE MONDE**

**P14
EXPLORER LA NATURE DE L'UNIVERS**

**P22
LES MACHINES DES DÉCOUVERTES**

**P30
REPOUSSER LES FRONTIÈRES
DE LA TECHNOLOGIE**

**P34
FORMER ET SENSIBILISER**

**P38
AGIR POUR UNE RECHERCHE
RESPONSABLE**

**P42
CONSTRUIRE L'AVENIR**

**P50
GOUVERNANCE**

**P53
LE CERN EN CHIFFRES**



MESSAGE DU PRÉSIDENT DU CONSEIL

La deuxième période d'exploitation du Grand collisionneur de hadrons du CERN, le LHC, qui s'est achevée fin 2018, a été un franc succès. Les expériences menées au LHC et auprès des autres accélérateurs du CERN continuent de produire de nombreux nouveaux résultats de physique : une prouesse compte tenu de l'incroyable quantité de données collectées. La recherche sur les accélérateurs a elle aussi connu de grandes avancées, notamment avec l'expérience AWAKE, de même que la préparation de la prochaine génération d'expériences neutrino avec ProtoDUNE. L'ensemble du personnel du CERN mérite d'être félicité pour la qualité de son travail, qui a rendu ces résultats possibles.

En 2018, la Cour des comptes de Finlande est devenue le nouvel organe de vérification des comptes de l'Organisation. Le Conseil lui sait gré de ses rapports sur les états financiers et les rapports annuels du CERN et de la Caisse de pensions pour 2018, et salue l'énergie avec laquelle l'équipe des commissaires aux comptes a accompli cette tâche.

La physique des particules arrive à un tournant de son histoire et les scientifiques vont devoir déterminer ses orientations futures. Pour apporter des réponses à des questions fondamentales sur l'existence et la nature de la matière noire et de l'énergie sombre, ou encore sur la nature et la signification de la structure des saveurs du Modèle standard, il faudra des accélérateurs et des expériences nouvelle génération. Plusieurs solutions sont à l'étude : collisionneurs de leptons linéaires ou circulaires, collisionneurs de protons circulaires, collisionneurs de muons et faisceaux de neutrinos de haute intensité. Pour examiner toutes ces options, le processus de mise à jour de la stratégie européenne pour la physique des particules a été lancé en 2018, avec la mise sur pied du Groupe préparatoire sur la physique et du Groupe sur la stratégie européenne. L'objectif est de déterminer la meilleure stratégie pour aborder ces questions importantes en optimisant les ressources. Le processus se poursuivra par la tenue, tout au long de 2019, de discussions approfondies qui mobiliseront l'ensemble de la communauté de la physique des particules. La nouvelle stratégie sera présentée au Conseil en vue de son adoption en mai 2020.

Le CERN reste attractif pour les pays qui souhaitent se joindre aux recherches de pointe de l'Organisation dans un esprit de collaboration internationale. En 2018, la République de Serbie a été admise en tant qu'État membre, et la République de Croatie en tant qu'État membre associé, ces statuts prenant effet après ratification par les parlements respectifs de ces deux pays des accords correspondants. La République de Lituanie est également devenue État membre associé du CERN, une fois ses procédures d'approbation internes menées à bien en janvier 2018.

Cette année était la dernière de mon mandat de président du Conseil, rôle qui a été pour moi source d'une grande satisfaction. En tant que président du Conseil, j'ai découvert un autre aspect de cet organisme scientifique exceptionnel menant des recherches hors du commun, à savoir la coopération très forte entre le Conseil et la Direction ; je remercie pour cela les membres du Conseil et l'équipe de la Direction du CERN. Je remercie également le Secrétariat du Conseil, le Service juridique et le service Traduction et procès-verbaux, qui contribuent tous à faciliter la tâche du président du Conseil. C'est avec plaisir et en toute confiance que je passe le flambeau à Ursula Bassler, prochaine présidente du Conseil.

Sijbrand de Jong



MESSAGE DE LA DIRECTRICE GÉNÉRALE

La deuxième période d'exploitation du LHC s'est achevée brillamment fin 2018. Le volume de données enregistrées par les expériences a dépassé nos ambitieux objectifs, grâce à la performance exceptionnelle du complexe d'accélérateurs ces quatre dernières années. Les détecteurs et les systèmes informatiques ont accueilli le déluge de données sans sourciller, générant de merveilleux résultats de physique. L'un des temps forts de l'année a été la détermination des couplages du boson de Higgs avec les quark t et b. De nombreux articles ont été publiés et d'autres vont suivre, car l'analyse va se poursuivre pendant le long arrêt de deux ans qui vient de débuter.

Si tous les regards étaient tournés vers le LHC en 2018, le CERN ne se résume pas à son installation phare. Cette année, des progrès considérables ont été réalisés dans l'ensemble du programme scientifique. Par exemple, l'expérience AWAKE a pour la première fois démontré l'accélération d'électrons par des champs de sillage plasma produits par un faisceau de protons, un résultat encourageant en vue de la mise au point de technologies pour les collisionneurs compacts de haute énergie. À la plateforme neutrino du CERN, le plus grand détecteur de neutrinos à argon liquide du monde, le prototype à phase simple destiné à l'expérience DUNE (aux États-Unis), a reconstitué des traces laissées par des particules incidentes d'un faisceau test.

Au-delà du programme scientifique, l'année 2018 aura été marquée par l'admission de la Serbie en tant qu'État membre et l'accession de la Lituanie et de la Croatie au statut d'État membre associé. Une fois menés à bien les processus de ratification de la Serbie et de la Croatie, la famille du CERN comptera 23 États membres et huit États membres associés. Le projet de Portail de la science, futur centre d'éducation scientifique et de communication grand public qui sera construit à proximité du Globe, a aussi bien progressé. Ce projet a été approuvé par le Conseil ; son financement est assuré essentiellement par des dons.

En 2019, ce ne sont pas des particules mais des êtres humains qui circuleront dans les tunnels des accélérateurs. Pendant toute la durée du long arrêt, les zones souterraines

seront très animées. L'amélioration des injecteurs du LHC (projet LIU) sera menée à bien, et d'importants travaux seront réalisés en prévision du LHC à haute luminosité (HL-LHC) qui succèdera au LHC en 2026. Les quatre grandes expériences du LHC vont également connaître des améliorations importantes. La tâche est ambitieuse et exigeante. Des centaines d'éléments seront remplacés, avec la contribution de nombreuses entreprises apportant leurs compétences technologiques. Le complexe d'accélérateurs du CERN redémarrera en 2021 pour une période d'exploitation de trois ans.

C'est également en 2018 qu'a été lancée la mise à jour de la stratégie européenne pour la physique des particules. Quelles installations devons-nous construire pour faire progresser les connaissances de physique fondamentale ? Quelles expériences faut-il concevoir ? Quelles seront les priorités de la recherche-développement sur les accélérateurs et les détecteurs au cours des prochaines années ? Autant de questions sur lesquelles notre communauté scientifique devra se pencher en 2019, alors que la mise à jour de la stratégie européenne pour la physique des particules dessinera le futur de la discipline. Les résultats du LHC, ainsi que les études techniques des futures machines et expériences, ont déjà fourni un impressionnant corpus d'éléments sur lesquels s'appuyer.

Toutes les réalisations exposées dans les pages de ce rapport ont été rendues possibles par les grandes compétences et le dévouement du personnel du CERN, ainsi que par le soutien continu et sans faille du Conseil. L'ensemble de la Direction du CERN se joint à moi pour les remercier. Je remercie également Sijbrand de Jong, président du Conseil sortant, pour une collaboration fructueuse, enrichissante et agréable au cours de ces trois dernières années.

Fabiola Gianotti

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

2018 EN IMAGES

Des nouvelles études sur le boson de Higgs au démarrage d'expériences sur l'antimatière, en passant par l'inauguration de l'esplanade des Particules ou le lancement de la stratégie européenne pour la physique des particules, l'année 2018 a réservé de belles surprises au CERN, à découvrir en images.



2 & 3 FÉVRIER

Le réseau des alumnis du CERN est officiellement inauguré lors d'un grand événement rassemblant quelque 400 participants de tous horizons géographiques et professionnels.

(ALUMNI-PHO-2018-002-77)

8 JANVIER

La Lituanie devient État membre associé du CERN, après la ratification de l'accord correspondant par son Parlement.

(OPEN-PHO-HIST-2017-001-2)



23 JANVIER

Fabiola Gianotti, directrice générale du CERN, copréside la réunion annuelle du Forum économique mondial de Davos qui avait pour thème « Créer un avenir commun dans un monde déchiré ».

26 & 27 FÉVRIER

Deux chefs d'État sont en visite au CERN : Filipe Nyusi, président du Mozambique (ci-dessus), et Alexander Van der Bellen, président de l'Autriche (ci-contre).

(CERN-PHOTO-201802-053-23)

(CERN-PHOTO-201802-054-1)



30 MARS

Les faisceaux sont de retour dans le LHC, qui entame sa septième année de fonctionnement et la dernière de la deuxième période d'exploitation.

(OPEN-PHO-ACCEL-2018-012-01)



1^{ER} JUIN

Des photographes du monde entier immortalisent les coulisses du Laboratoire à l'occasion du concours de photos *Global Physics Photowalk 2018*.

(CERN-PHOTO-201806-132-1)

4 JUIN

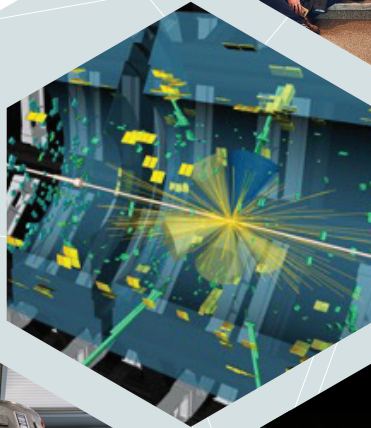
ATLAS et CMS publient les premiers résultats sur la production du boson de Higgs en association avec la particule élémentaire la plus massive que l'on connaisse, le quark top.

(ATLAS-PHOTO-2019-016-3)

12 JUIN

HALO, installation conçue lors d'une résidence artistique au CERN et inspirée des données de l'expérience ATLAS, est exposée lors de la foire internationale d'art contemporain *Art Basel*.

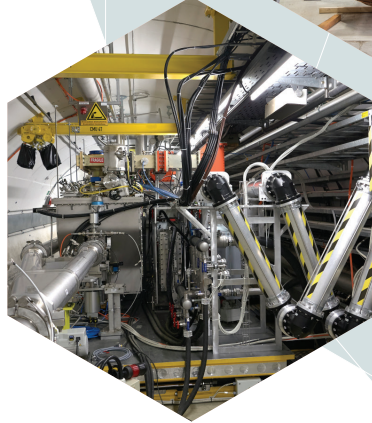
(OPEN-PHO-EXHI-2018-003-22)



1^{ER} JUIN

L'aimant FRESCA2, qui servira de station d'essai pour les supraconducteurs du futur, établit un nouveau record d'intensité, produisant un champ magnétique de 14,6 teslas.

(CERN-PHOTO-201603-062-2)



29 MAI

Des cavités-crabe font pivoter des faisceaux de protons pour la première fois. Le fonctionnement de ces composants-clés destinés au LHC à haute luminosité est validé.

(CERN-PHOTO-201803-055-2)

15 JUIN

Une cérémonie marque le démarrage des travaux pour le LHC à haute luminosité.

(CERN-PHOTO-201806-146-4)



1^{ER} JUILLET

Le programme de formation des enseignants fête ses 20 ans.

(OPEN-PHO-LIFE-2018-007-2)



20 JUILLET

ELENA, le nouveau décélérateur d'antimatière, envoie pour la première fois des antiprotons à une expérience, GBAR. Cette expérience étudie l'effet de la gravité sur l'antimatière.

(CERN-PHOTO-201804-086-10)



20 & 21 JUIN

Borut Pahor, président de la Slovénie, et Alain Berset, président de la Confédération suisse, sont en visite au CERN.

(CERN-PHOTO-201806-156-21)

(CERN-PHOTO-201806-158-1)

1^{ER} AOÛT

Le CERN est l'hôte d'honneur des festivités de la Fête nationale suisse à Genève.

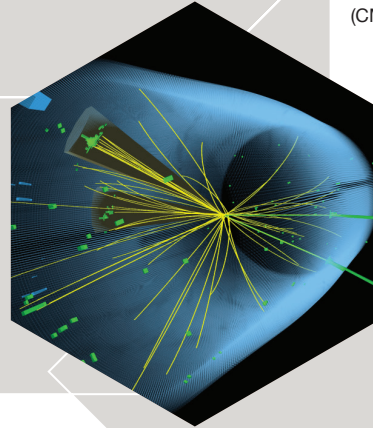
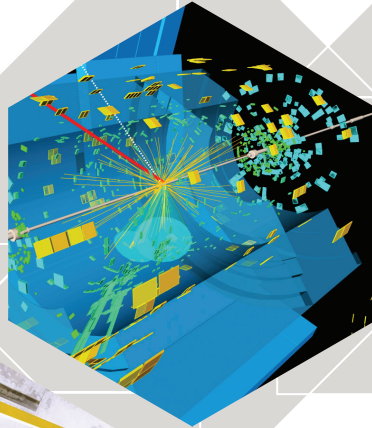
(CERN-PHOTO-201808-185-7)

28 AOÛT

La désintégration du boson de Higgs en quarks b est enfin observée.

(ATLAS-PHOTO-2018-022-1)

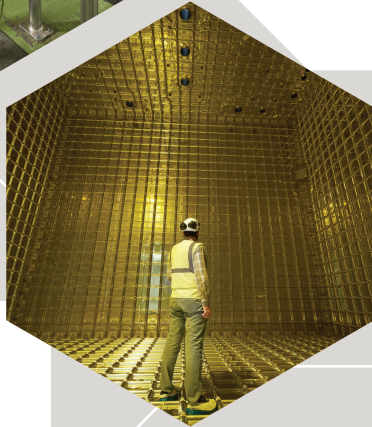
(CMS-PHO-EVENTS-2018-008-1)



29 AOÛT

La collaboration AWAKE annonce la toute première accélération d'électrons au moyen d'un champ de sillage créé par des protons circulant à travers un plasma.

(CERN-PHOTO-201711-284-5)



18 SEPTEMBRE

Le prototype de l'immense détecteur de neutrinos DUNE enregistre ses premières traces de particules.

(CERN-PHOTO-201710-248-2)



27 SEPTEMBRE

La collaboration LHCb découvre deux nouveaux baryons et trouve des indices de l'existence d'une nouvelle particule formée de quatre quarks.

(CERN-PHOTO-201801-025-18)

28 SEPTEMBRE

Le CERN, l'État de Genève et la commune de Meyrin inaugurent l'esplanade des Particules, qui marque l'entrée du Laboratoire et devient sa nouvelle adresse officielle. Le soir, le CERN accueille le grand public pour la *Nuit des chercheurs*.
(CERN-PHOTO-201809-249-55)



28 SEPTEMBRE

Le Conseil du CERN élit à sa présidence Ursula Bassler, qui prendra ses fonctions en 2019.
(CERN-PHOTO-201809-247-1)

8 OCTOBRE

Les gagnants du concours *Ligne de faisceau pour les écoles 2018* viennent au CERN pour mener leurs expériences de physique. Les deux équipes d'élèves du secondaire sont originaires d'Inde et des Philippines.

(CERN-PHOTO-201809-239-22)



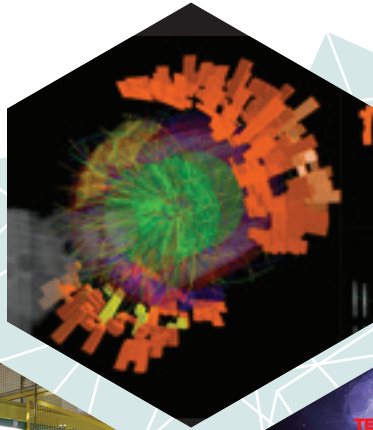
16 OCTOBRE

Le Conseil du CERN lance le processus de mise à jour de la stratégie européenne pour la physique des particules pour définir les grandes orientations de la discipline.

13 NOVEMBRE

Les premières collisions de noyaux de plomb inaugurent une nouvelle campagne avec des ions lourds au LHC.

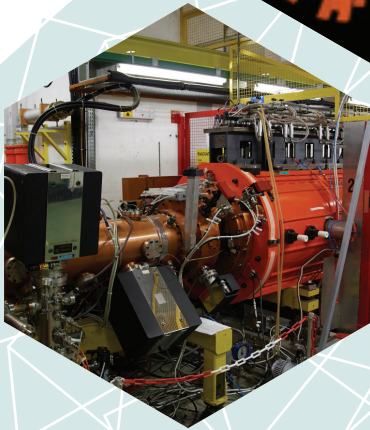
(ALICE-EVENTDISPLAY-2018-003-1)



24 OCTOBRE

Les derniers protons circulent dans le LHC en 2018, marquant la fin de la deuxième période d'exploitation de l'accélérateur. Deux semaines plus tard, le LINAC 2, accélérateur linéaire mis en service en 1972, est définitivement arrêté.

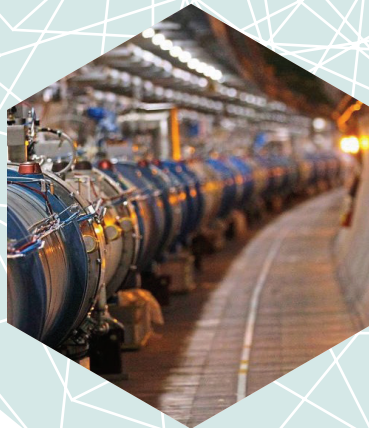
(CERN-PHOTO-201811-295-2)



20 NOVEMBRE

La cinquième édition de TEDxCERN accueille des spécialistes du numérique et des sciences de la vie pour évoquer les innovations scientifiques susceptibles de transformer notre monde.

(CERN-PHOTO-201811-305-3)



3 DÉCEMBRE

Le complexe d'accélérateurs et les expériences s'arrêtent pour deux ans pendant lesquels auront lieu d'importants travaux d'amélioration.

(CERN-PHOTO-201812-327-3)

19 DÉCEMBRE

Le premier résultat de l'accélérateur HIE-ISOLDE confirme que le noyau étain 132 appartient au groupe des noyaux doublement magiques.

(OPEN-PHO-ACCEL-2016-016-2)

UN LABORATOIRE POUR LE MONDE

La coopération entre nations, universités et scientifiques est le moteur des recherches du CERN. En 2018, plus de 17 900 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 12 500 scientifiques de plus 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 2018

NOMBRE D'UTILISATEURS : 12 569

ÉTATS MEMBRES (7 395)

Allemagne 1 373 - Autriche 96 - Belgique 152 - Bulgarie 41 - Danemark 56 - Espagne 375 - Finlande 116 - France 834 - Grèce 133
Hongrie 63 - Israël 73 - Italie 1 528 - Norvège 89 - Pays-Bas 179 - Pologne 304 - Portugal 97 - Roumanie 106 - Royaume-Uni 952
Slovaquie 86 - Suède 104 - Suisse 380 - Tchéquie 258

ÉTATS MEMBRES ASSOCIÉS EN PHASE PRÉALABLE À L'ADHÉSION (72)

Chypre 16 - Serbie* 37 - Slovénie 19

*État membre depuis le 24 mars 2019

ÉTATS MEMBRES ASSOCIÉS (418)

Inde 207 - Lituanie 23 - Pakistan 37 - Turquie 117 - Ukraine 34

OBSERVATEURS (3 296)

États-Unis d'Amérique 1 998 - Japon 258 - Russie 1 040

AUTRES PAYS (1 388)

Afrique du Sud 69 - Algérie 2 - Argentine 15 - Arménie 13 - Australie 30 - Azerbaïdjan 4 - Bangladesh 2 - Bélarus 22 - Brésil 120
Canada 198 - Chili 19 - Colombie 24 - Croatie 38 - Cuba 3 - Égypte 19 - Émirats Arabes Unis 1 - Équateur 3 - Estonie 19 - Géorgie 32
Hong Kong 20 - Indonésie 7 - Iran 17 - Irlande 6 - Islande 3 - Lettonie 2 - Liban 16 - Madagascar 2 - Malaisie 9 - Malte 5 - Maroc 14
Mexique 59 - Mongolie 2 - Monténégro 7 - Nouvelle-Zélande 7 - Oman 4 - Pérou 3 - Porto Rico 1 - République de Corée 157 - République
populaire de Chine 327 - Singapour 4 - Sri Lanka 8 - Taiwan 57 - Thaïlande 18



La famille s'agrandit

Poursuivant son élargissement, la famille du CERN a accueilli de nouveaux pays en 2018. La Lituanie est devenue État membre associé du CERN en janvier. À sa session de décembre, le Conseil du CERN a décidé d'admettre la Serbie comme État membre de l'Organisation et la Croatie comme État membre associé, sous réserve de l'accomplissement par ces pays de leurs processus internes de ratification. En septembre, l'Estonie a par ailleurs déposé une demande d'accession au statut d'État membre. Fin 2018, le CERN comptait 22 États membres, trois États membres associés en phase préalable à l'adhésion et cinq États membres associés.

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 les pays qui contribuent au développement de la physique des particules. Le Laboratoire a ainsi signé des accords de coopération avec le Kazakhstan, les Philippines et la Thaïlande. Un accord de coopération avec le Paraguay a également été approuvé par le Conseil en septembre. 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.



Un réseau des hautes énergies

En février 2018, le programme « *CERN Alumni – le Réseau des hautes énergies* » a été officiellement inauguré lors de l'événement « Premières collisions », qui a rassemblé au CERN près de 400 participants du monde entier. Ce programme permet aux alumni, qui poursuivent leur carrière dans des domaines très variés, allant du monde institutionnel à l'industrie, en passant par l'économie, les technologies de l'information ou la médecine, 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. Fin 2018, le réseau comptait plus de 4 000 membres et six groupes régionaux aux États-Unis, aux Pays-Bas, au Royaume-Uni et en Suisse.

Treize événements ont par ailleurs été organisés tout au long de l'année, notamment « *Moving Out of Academia to... the Financial Sector* » et « *Moving Out of Academia to... Big Data* », dans le cadre d'une nouvelle série d'ateliers pour accompagner dans leur transition les futurs alumni qui envisagent de quitter le monde universitaire ou institutionnel pour d'autres secteurs professionnels.

EXPLORER LA NATURE DE L'UNIVERS

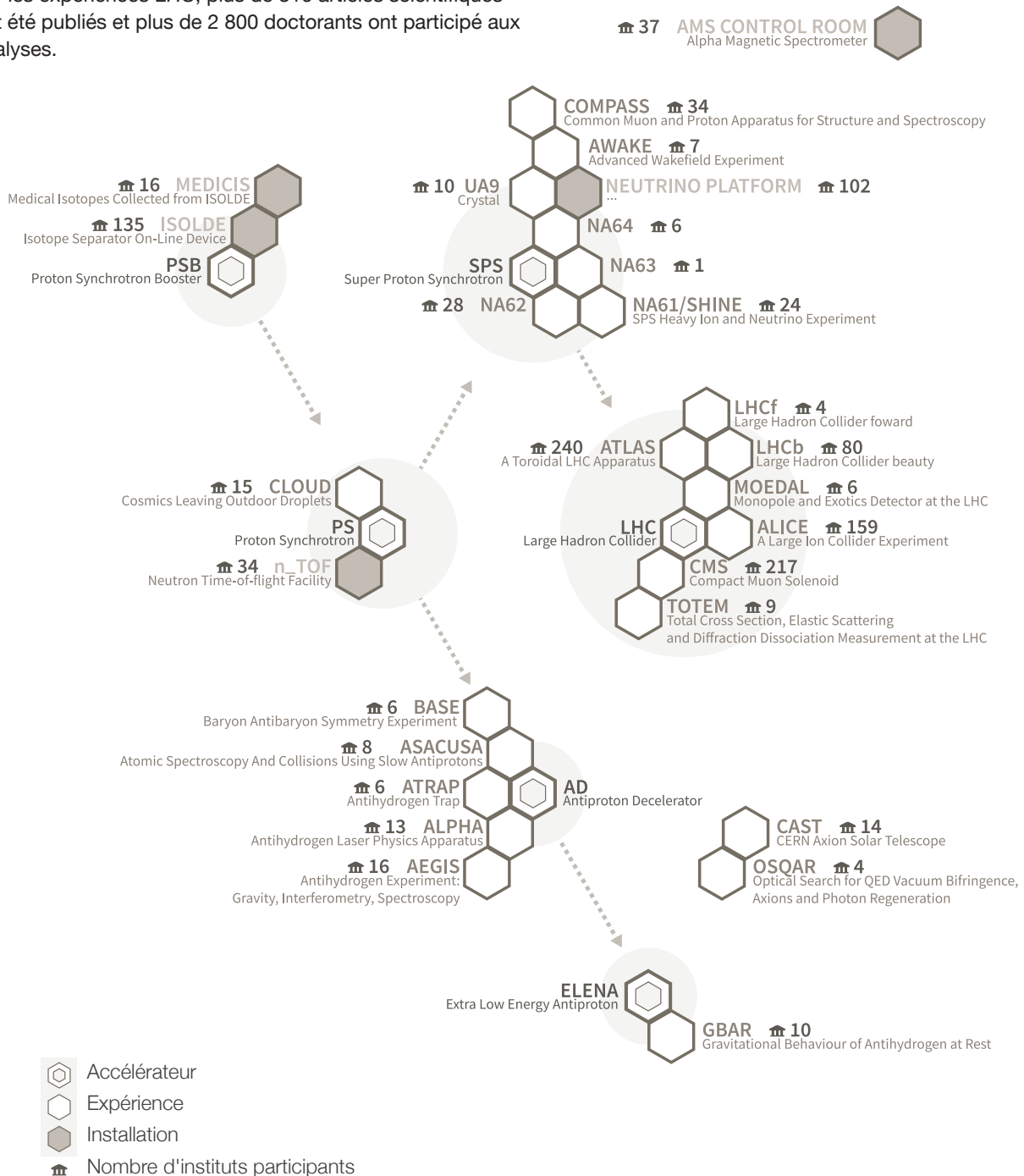
Pour explorer la structure fondamentale de l'Univers, le CERN utilise un complexe d'accélérateurs exceptionnel, dans lequel des faisceaux de particules entrent en collision ou percutent des cibles fixes. Les résultats sont enregistrés par des détecteurs et analysés par des milliers de physiciens, au CERN ou ailleurs.

Complexe d'accélérateurs du CERN, avec les expériences qu'il alimente

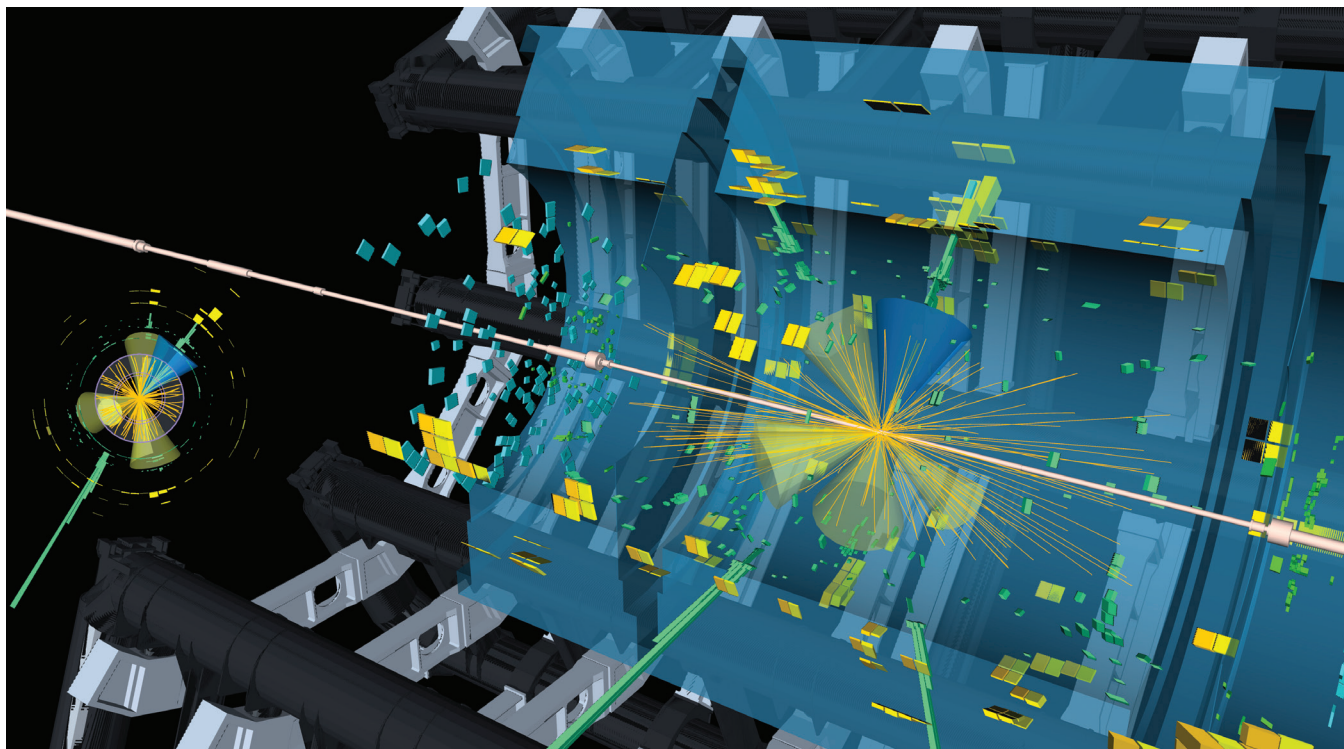


Le Grand collisionneur de hadrons (LHC) est l'accélérateur de particules le plus grand et le plus puissant du monde. Il produit des collisions de faisceaux de protons au sein de quatre grandes expériences : ALICE, ATLAS, CMS et LHCb. L'année 2018 a vu s'achever la très fructueuse deuxième exploitation du LHC (2015-2018). La machine a dépassé les attentes pour cette période en produisant environ 16 millions de milliards de collisions proton-proton à une énergie de 13 TeV (pour chacune des expériences ATLAS et CMS), ainsi qu'un immense volume de données pour les collisions plomb-plomb à une énergie de 5,02 TeV par paire de nucléons. Au total, 80 Po de données ont été enregistrées par les expériences LHC, plus de 310 articles scientifiques ont été publiés et plus de 2 800 doctorants ont participé aux analyses.

L'analyse des données du LHC, ainsi que de données d'expériences hors LHC, a déjà produit d'excellents résultats de physique, qui ont permis d'approfondir la connaissance de la matière aux échelles les plus petites et de parfaire les arguments scientifiques en vue de la prochaine mise à jour de la stratégie européenne pour la physique des particules. Parmi les avancées se trouvent des mesures précises de l'interaction du boson de Higgs avec les fermions de troisième génération, des tests rigoureux du Modèle standard et des études de plus en plus sensibles pour la recherche d'une nouvelle physique.



Les accélérateurs du CERN alimentent de nombreuses expériences et installations utilisées par des scientifiques du monde entier.



Événement candidat, enregistré par ATLAS, pour la production d'un boson de Higgs en association avec une paire top-anti-top. L'événement contient deux photons et six jets de particules. (ATLAS-PHOTO-2019-016-3)

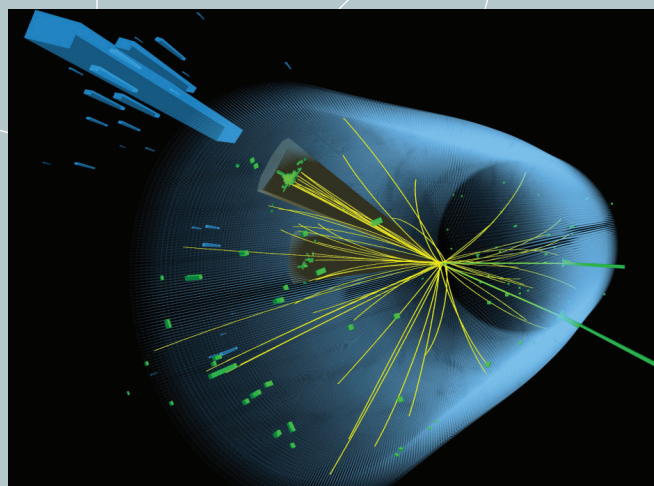
LE BOSON DE HIGGS AU MICROSCOPE

Le Modèle standard inclut des prédictions précises sur les interactions du boson de Higgs avec d'autres particules. La vérification de ces prédictions occupe une grande place dans les programmes de recherche auprès du LHC et des futurs collisionneurs proposés, car tout écart pourrait ouvrir la voie à une nouvelle physique. Pour cela, on étudie les désintégrations du boson de Higgs en particules plus légères, qui surviennent presque immédiatement après sa production. Cette année, ATLAS et CMS ont observé pour la première fois la désintégration du boson de Higgs en paires de quarks bottom-antibottom. Le Modèle standard prédit que ce mode de désintégration est le plus abondant ; cependant, ces paires pouvant être produites dans le LHC par divers processus, il est difficile d'isoler celles qui sont issues du Higgs.

Comme le quark top est plus massif que le boson de Higgs, la désintégration du Higgs en une paire top-antitop n'est pas possible. Toutefois, les scientifiques peuvent étudier les interactions Higgs-top en recherchant des exemples de production d'un Higgs en association avec une paire top-antitop ; en 2018, ATLAS et CMS ont mis en évidence cette « production associée » dans les données enregistrées les années précédentes. Le taux de production de ce processus, tout comme celui de la désintégration du Higgs en paires de quarks bottom-antibottom, correspond aux prédictions du Modèle standard, au niveau actuel de précision statistique.

LE LHC TESTE LES PRÉDICTIONS
DU MODÈLE STANDARD SUR LES
INTERACTIONS DU BOSON DE HIGGS
AVEC D'AUTRES PARTICULES. TOUT
ÉCART POURRAIT OUVRIR LA VOIE À
UNE NOUVELLE PHYSIQUE.

Événement candidat, enregistré par CMS, pour une désintégration du boson de Higgs en une paire de quarks bottom-antibottom, associée à une désintégration d'un boson Z en un électron et un positon. (CMS-PHO-EVENTS-2018-008-1)



METTRE À L'ÉPREUVE LE MODÈLE STANDARD

En 2018, les expériences LHC ont testé le Modèle standard avec un niveau de précision inédit. Le quark top reste une source de mesures et d'observations intéressantes, qui, associées à la mesure de la masse du boson de Higgs, s'avèrent essentielles pour réduire les incertitudes dans les prédictions du Modèle standard. ATLAS a mesuré la masse du quark top avec une précision de 0,3 % en combinant des données résultant de différents canaux de désintégration. CMS a exploré des modes de production rares du quark top sensibles aux indices de physique au-delà du Modèle standard. La collaboration a observé la production d'un quark top associé à un boson Z et un deuxième quark, et a mis en évidence la production d'un quark top associé à un photon et un autre quark. À noter à CMS également, des mesures de processus connus du Modèle standard avec une précision améliorée, ainsi que de nouvelles études de la physique des mésons B.

Le boson de Higgs a une incidence sur la probabilité de diffusion entre bosons W et Z. En 2018, ATLAS a observé des diffusions de paires de bosons W ainsi que des diffusions d'un W et d'un Z. De futures données permettront de mesurer cette diffusion avec une plus grande précision, en recherchant les écarts par rapport aux valeurs prédites. ATLAS a également mesuré l'angle de mélange électrofaible, paramètre essentiel pour comprendre l'unification de la force électromagnétique et de la force faible dans le Modèle standard, avec une précision inédite au LHC, comparable aux résultats les plus précis (sur la base d'une seule expérience) obtenus au LEP et au Tevatron.

Les physiciens cherchent à comprendre pourquoi l'Univers est constitué presque intégralement de matière, l'antimatière étant quasi inexistante. Cette asymétrie pourrait s'expliquer par la différence dans la manière dont matière et antimatière interagissent via la force faible. L'expérience LHCb, conçue pour étudier cette différence, appelée violation de CP

(charge-parité), a réalisé diverses mesures de précision. En 2018, plusieurs paramètres liés à la matrice CKM (Cabibbo-Kobayashi-Maskawa), qui quantifie la violation de CP possible dans les quarks, ont ainsi été mesurés. En particulier, la collaboration a mesuré l'angle γ au moyen de différentes méthodes et obtenu une valeur moyenne de 74° , avec une incertitude d'environ 5° – la mesure la plus précise de cet angle obtenue à ce jour par une seule expérience.

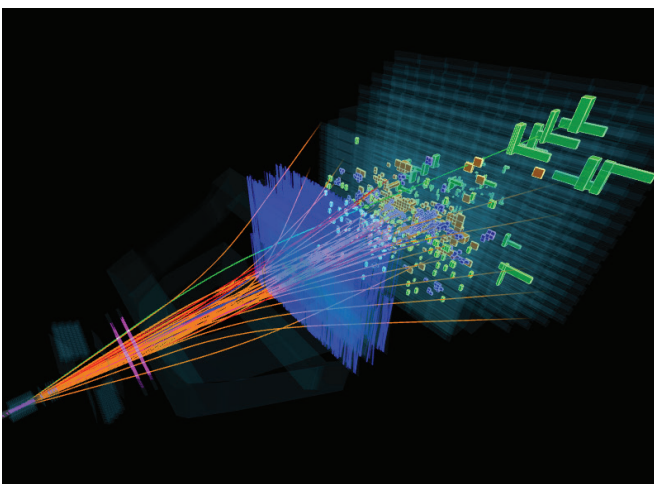
La collaboration a en outre observé le premier indice d'une transformation rare, celle du méson B_s en un kaon excité et en deux muons, et déterminé les meilleures limites concernant la transformation d'un méson B^+ en trois muons et un neutrino. LHCb a également mesuré la durée de vie du baryon doublement charmé Ξ_{cc}^{++} , observé pour la première fois par l'expérience en 2017, et celle de l'oméga charmé ($\Omega^0 c$). Cette dernière mesure, soit 268 ± 26 fs, est d'une précision inégalée, mais le chiffre est près de quatre fois supérieur aux résultats précédents et contredit des prédictions antérieures.

En plus de son mode de fonctionnement habituel, le mode « collision », LHCb a également fonctionné en mode « cible fixe », avec l'injection dans le tube de faisceau de gaz rares tels que l'hélium. Les atomes de ces gaz rares ont servi de cibles fixes pour les protons ; LHCb a pu ainsi observer dans ces collisions la production de particules J/ψ et D^0 et effectuer la première mesure de la probabilité de production d'antiprotons dans des collisions proton-hélium.

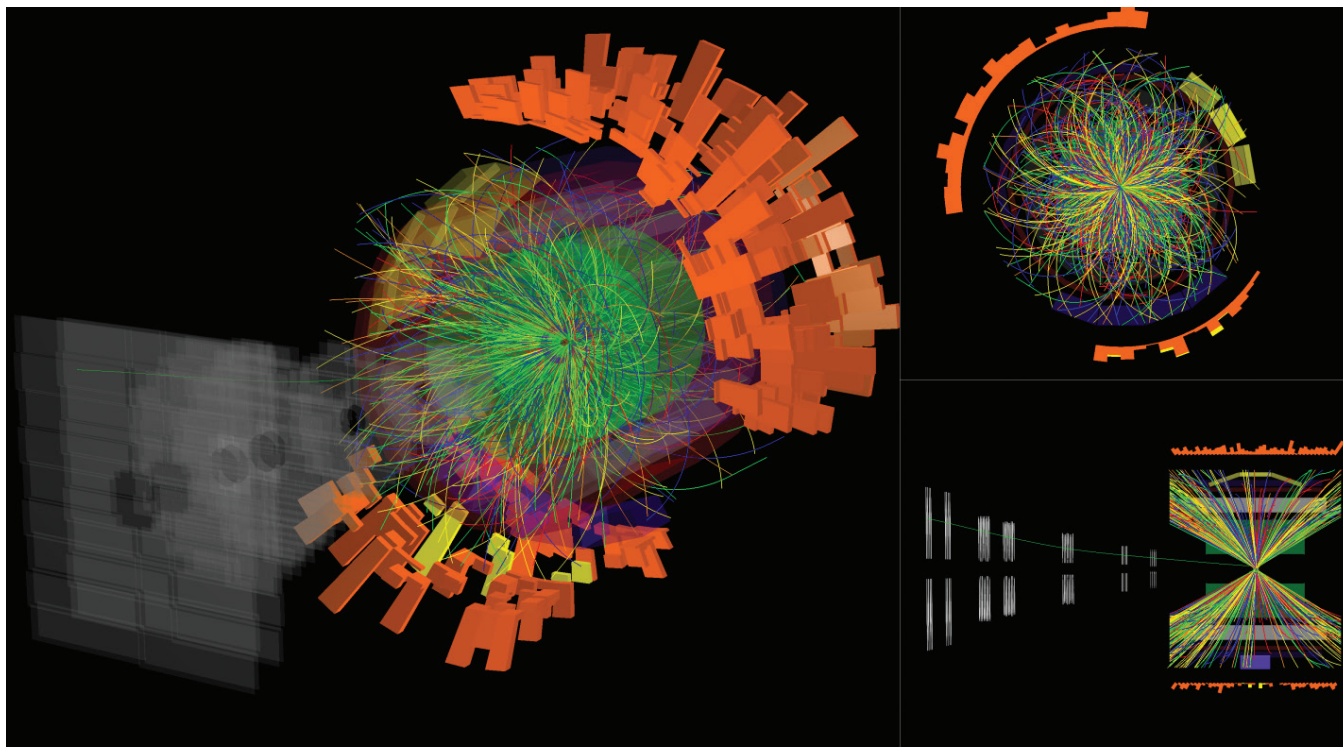
En fin d'année, l'expérience TOTEM, qui s'intéresse aux interactions à petits angles, au moyen de détecteurs situés à 220 mètres de part et d'autre de l'expérience CMS, a présenté de bons éléments à l'appui de l'existence d'un composé de trois gluons dénommé « odderon », théorisé en 1973. Ce résultat est dérivé des mesures précises de la probabilité des collisions proton-proton à de hautes énergies, et pourrait nous permettre de mieux comprendre les données produites par le LHC et les futurs collisionneurs.

Collision proton-proton enregistrée par LHCb début 2018.

(OPEN-PHO-EXP-2018-005-2)



LE MODÈLE STANDARD NE REND
PAS COMPTE DE LA MATIÈRE
NOIRE ET DE L'ÉNERGIE SOMBRE,
CE QUI SUGGÈRE L'EXISTENCE
DE PARTICULES ET DE FORCES
NOUVELLES.



Trajectoires de particules et dépôts d'énergie dans le détecteur ALICE lors des premières collisions de noyaux de plomb de 2018. (ALICE-EVENTDISPLAY-2018-003-1)

À LA RECHERCHE DE NOUVEAUX PHÉNOMÈNES

Le Modèle standard a résisté à tous les tests auxquels l'ont soumis les expériences. Pourtant, il ne rend pas compte d'éléments essentiels tels que la matière noire et l'énergie sombre, ce qui suggère l'existence d'une nouvelle physique qui reste à découvrir.

En 2018, ATLAS et CMS ont mené de nombreuses recherches dans ce domaine. Ainsi, ATLAS a recherché des événements dans lesquels des particules extrêmement massives se transforment en paires de bosons W et Z. L'analyse des données enregistrées a permis d'exclure jusqu'à 4,15 TeV l'existence de types spécifiques de ces particules massives. CMS a traqué les particules exotiques Z' (« Z prime »), prédites par certaines extensions du Modèle standard, et des particules hypothétiques appelées « leptoquarks », censées être des hybrides de leptons et de quarks. Les collaborations ont toutes deux recherché de nombreuses signatures différentes de la matière noire et de la supersymétrie, mais n'ont trouvé aucun indice de leur existence à partir des divers paramètres étudiés.

LA CHALEUR DE L'UNIVERS PRIMORDIAL

Le LHC produit également des collisions de noyaux de plomb pour générer des systèmes plus grands et plus chauds. Ces collisions recréent le plasma quarks-gluons, état dense de quarks et de gluons en liberté qui aurait existé dans l'Univers primordial. La collaboration ALICE a

montré que les jets de particules émergeant des collisions plomb-plomb sont plus resserrés que ceux formés dans les collisions proton-proton, ce qui s'explique par les rayonnements de faible énergie à de grands angles par rapport à l'axe du jet provoqués par l'interaction des particules du jet avec le plasma quarks-gluons.

En comparant ses résultats avec ceux du Collisionneur d'ions lourds relativistes RHIC, situé aux États-Unis, ALICE a observé que la production de mésons J/ψ au LHC n'était pas aussi réduite pour des impulsions transversales faibles, et a conclu que la réduction causée par le plasma quarks-gluons était contrecarrée par la recombinaison de quarks c et anti-c en mésons J/ψ. ALICE a aussi observé que la proportion de baryons Λ_c par rapport aux mésons D produits était plus élevée dans les collisions plomb-plomb que dans les collisions proton-proton et proton-plomb ; ce phénomène est attendu si les quarks c se lient à d'autres quarks du plasma quarks-gluons pour former des baryons et des mésons. La dynamique de ces processus sera étudiée avec précision à partir des données qu'ALICE recueillera au cours des prochaines exploitations du LHC. Par ailleurs, ALICE a observé que cette proportion de Λ_c par rapport aux D était plus élevée que prévu par les calculs théoriques, même dans les collisions proton-proton et proton-plomb.

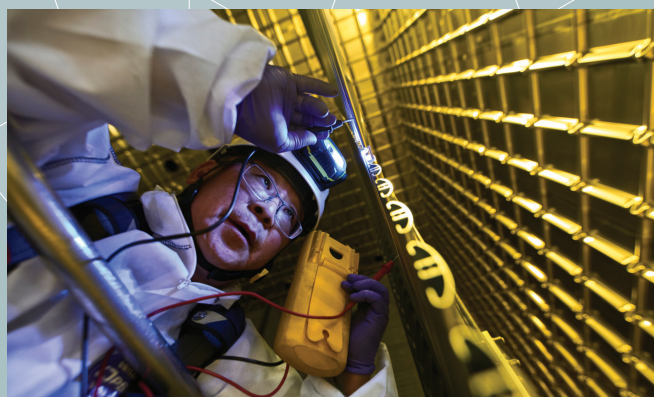
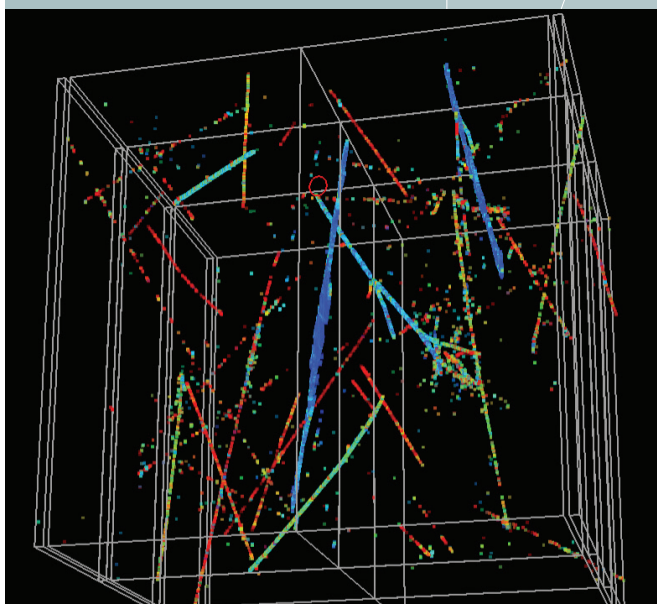
À LA POURSUITE DES NEUTRINOS

Les neutrinos, les particules massives les plus légères connues à ce jour, continuent d'occuper une grande place dans la recherche en physique des hautes énergies. Les chercheurs se demandent notamment comment ils acquièrent leur masse et s'ils violent la symétrie CP (charge-parité). L'expérience OPERA, au Laboratoire du Gran Sasso en Italie, a été conçue pour prouver, grâce à l'étude de faisceaux de neutrinos du muon envoyés depuis le CERN, à 730 km de là, que les neutrinos du muon peuvent osciller en neutrinos du tau. En 2018, la collaboration chargée de cette expérience a rapporté l'observation de dix événements candidats pour une conversion d'un neutrino du muon en neutrino du tau, et a clairement montré que les neutrinos du muon se transforment en neutrinos du tau entre le CERN et le Gran Sasso.

Pendant ce temps, les collaborations ATLAS et CMS cherchaient des neutrinos Majorana lourds, particules hypothétiques qui pourraient expliquer la très petite masse

des neutrinos au travers du « mécanisme de la bascule ». Elles n'en ont trouvé aucune trace dans les gammes de paramètres étudiées, mais cette absence de signal est cruciale car elle permet de définir des contraintes strictes pour les modèles théoriques.

La plateforme neutrino du CERN, créée pour soutenir la participation de l'Europe aux projets de recherche sur les neutrinos utilisant des accélérateurs aux États-Unis et au Japon, fournit des faisceaux chargés et un espace de test pour les grands détecteurs de neutrinos. En 2018 s'est achevée la construction de deux grands cryostat à membrane, destinés à accueillir des prototypes de $6 \times 6 \times 6 \text{ m}^3$ du futur détecteur à argon liquide de DUNE auprès de l'installation neutrino longue distance aux États-Unis, qui utilise des chambres à projection temporelle à phase simple et à phase double. Le premier grand prototype ProtoDUNE à phase simple a été mis en service en 2018 et a enregistré ses premières traces de particules lors de tests au CERN, démontrant la viabilité de cette technologie à grande échelle et marquant une étape importante du projet DUNE.

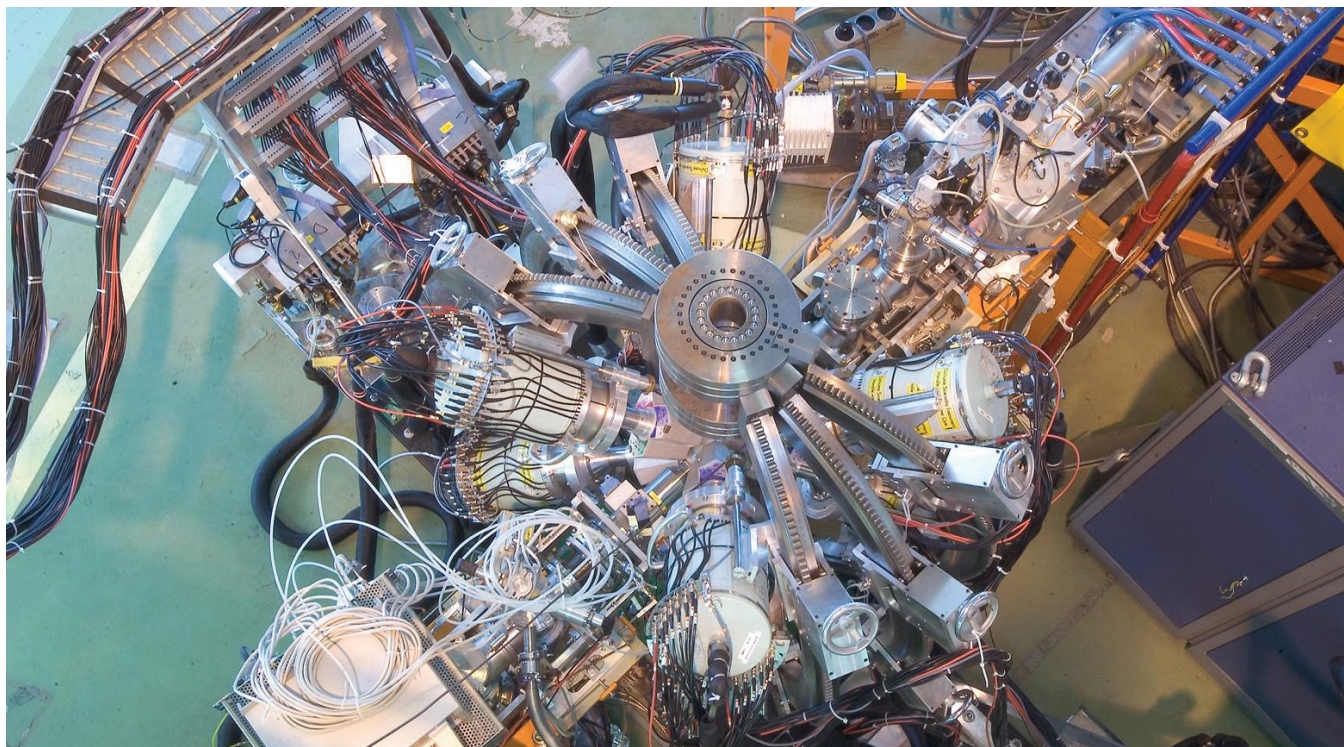


Intérieur du détecteur ProtoDUNE à phase double, en cours de construction, qui doit commencer à fonctionner en 2019. (CERN-PHOTO-201803-085-1)

Image en 3D d'un événement enregistré par le détecteur prototype ProtoDUNE à phase simple.

LA MAGIE DES FAISCEAUX EXOTIQUES

ISOLDE, installation de recherche nucléaire du CERN existant de longue date, envoie un faisceau de protons de 1,4 GeV du Booster du PS vers un poste de cible afin de générer des faisceaux d'ions radioactifs exotiques pour, entre autres, des études sur la structure des noyaux atomiques. Ces faisceaux peuvent être réaccélérés à l'aide des accélérateurs linéaires (linacs) REX/HIE-ISOLDE. L'énergie du linac supraconducteur HIE-ISOLDE a été relevée afin d'accélérer des faisceaux jusqu'à 9,5 MeV par nucléon (voir p. 25), y compris pour des noyaux riches en neutrons. Au total, un nombre record de 51 expériences ont été menées par des utilisateurs du monde entier.



Le système de détecteurs de rayons gamma MINIBALL auprès de l'accélérateur HIE-ISOLDE. (CERN-EX-0506009-07)

Quatorze d'entre elles ont utilisé 18 faisceaux différents de l'accélérateur HIE-ISOLDE, tandis que 37 expériences de basse énergie ont utilisé plus de 80 isotopes.

Parmi les faits marquants, les collaborations MINIBALL et HIE-ISOLDE ont fourni la première preuve directe que le noyau étain 132 (^{132}Sn), considéré comme doublement magique, mérite effectivement cette qualification. De tels noyaux présentent des couches complètes de protons et de neutrons et sont exceptionnellement stables. Le résultat en question est le premier obtenu par HIE-ISOLDE et montre que cette installation est essentielle pour mieux comprendre le fonctionnement interne des noyaux atomiques. À signaler également, la révélation et l'explication de l'étendue complète de l'alternance de forme paire-impair d'isotopes exotiques de mercure, la forme de leur noyau atomique passant de celle d'un ballon de football à celle d'un ballon de rugby. Ce résultat a pu être obtenu grâce à une combinaison sans précédent d'éléments expérimentaux, tels que la source d'ions RILIS et des techniques de modélisation théoriques et informatiques.

Pour la première fois, ISOLDE a créé, grâce à RILIS, des isotopes du chrome riches en neutrons en quantité impressionnante. Ces isotopes ont été mesurés par ISOLTRAP, dispositif qui réalise des mesures de masse auprès d'ISOLDE depuis 30 ans. Les nouvelles valeurs de masse obtenues sont jusqu'à 300 fois plus précises que les précédentes, ce qui jette une lumière nouvelle sur la structure nucléaire des isotopes du chrome.

LA THÉORIE PROSPÈRE

En 2018, le département Physique théorique du CERN (TH) a produit des recherches de pointe venant appuyer les activités du Laboratoire et servir la communauté internationale de la physique théorique. Celles-ci couvrent tous les domaines pertinents pour la physique des particules et ont donné lieu, en 2018, au dépôt de 342 articles sur le serveur arXiv.

Les études mathématiques, qui ont porté entre autres sur la théorie des cordes et la théorie quantique des champs, ont révélé des liens intéressants avec des hypothèses relatives aux propriétés de la gravité dans le régime quantique. Un important travail a été consacré à tous les aspects de la physique du LHC, allant de calculs précis de processus du Modèle standard à des hypothèses créatives sur des phénomènes qui pourraient révéler des signes d'une nouvelle physique. Les études en cosmologie et en astrophysique des particules, qui font aussi partie des activités de TH, ont porté sur l'évolution de l'Univers primordial et les méthodes d'observation pour extraire des informations sur la matière noire et l'énergie sombre. Des recherches ont été faites en physique des collisions d'ions lourds, branche dynamique de la recherche théorique qui étudie les propriétés de la matière dans des conditions extrêmes, telles que celles que l'on trouve au centre des étoiles. Des travaux ont aussi été menés sur la théorie de jauge sur réseau, qui explore les propriétés complexes des interactions fortes en simulant l'espace-temps physique sur une grille.

Les théoriciens ont apporté une contribution fondamentale au LPCC (Centre de physique du LHC du CERN) et aux groupes de travail sur la physique du LHC, du CLIC et du FCC, ainsi qu'au groupe d'études sur la physique au-delà des collisionneurs (voir p. 48). Ils ont aussi largement contribué aux documents présentés pour la mise à jour de la stratégie européenne pour la physique des particules.

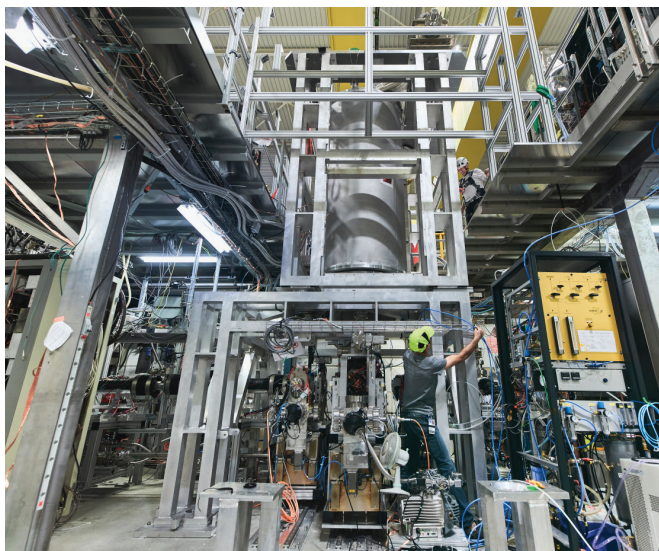
MISSION ACCOMPLIE POUR LES EXPÉRIENCES

En 2018, de grands progrès ont aussi été réalisés par les autres expériences et projets, dont beaucoup sont alimentés par des faisceaux du Booster du PS, du PS et du SPS (voir p. 25) : mesures de taux de production pertinentes pour la physique des neutrinos et étude de l'émergence du plasma quarks-gluons dans les collisions d'ions lourds avec des cibles fixes (NA61/SHINE) ; études de désintégrations rares du kaon et recherches de nouveaux leptons neutres lourds (NA62), avec la première recherche de la désintégration d'un kaon chargé positivement en un pion chargé positivement et une paire neutrino-antineutrino, basée sur des désintégrations du kaon en vol ; études des processus de rayonnement dans des champs électromagnétiques forts (NA63) ; recherches de particules du secteur sombre (NA64) ; mesures de processus induits par des neutrons pertinents pour la physique nucléaire et l'astrophysique (n_TOF) ; études de la structure des hadrons



L'expérience NA62 dans la zone Nord du CERN. (NA62-PHO-EXP-2017-001-2)

(COMPASS) ; recherches de caméléons et d'axions (CAST, OSQAR) ; études sur l'influence des rayons cosmiques sur la formation des nuages (CLOUD), paramètre important pour la modélisation des changements climatiques ; et collimation de particules au moyen de cristaux (UA9).



L'expérience ALPHA-g, ici lors de son installation dans le hall du Décélérateur d'antiprotons du CERN, a reçu son premier faisceau d'antiprotons le 30 octobre 2018. (CERN-PHOTO-201810-267-37)

EXPLORER L'ANTIMATIÈRE

Le Décélérateur d'antiprotons (AD) fournit des antiprotons de basse énergie pour, entre autres, des mesures spectroscopiques et gravitationnelles de précision, permettant de comparer plus précisément le comportement de la matière et celui de l'antimatière. L'AD accueille actuellement cinq expériences en exploitation. ALPHA, AEGIS, ASACUSA, ATRAP et BASE. Deux autres expériences, GBAR et ALPHA-g, une version verticale d'ALPHA, sont en préparation. Le nouvel anneau ELENA (voir p. 46) ralentit encore davantage les antiprotons, pour qu'ils puissent être plus facilement piégés par les expériences.

En 2018, la collaboration ALPHA a élargi ses mesures de la structure spectrale de l'antihydrogène, et réalisé les mesures directes de l'antimatière les plus précises jamais obtenues. L'équipe a déterminé la structure spectrale de la transition 1S-2S de l'antihydrogène avec une précision de l'ordre de quelques parties pour mille milliards, ouvrant la voie à une nouvelle ère d'études de haute précision des différences entre matière et antimatière et franchissant une étape importante du programme scientifique de l'AD. La collaboration a également réalisé la première mesure de la transition Lyman-alpha (ou 1S-2P), et a mesuré sa fréquence avec une précision de l'ordre de quelques parties pour cent millions. Par ailleurs, elle a réussi le tout premier refroidissement par laser de l'antihydrogène.

Les autres expériences de l'AD ont aussi connu des progrès notables : les équipements de BASE ont été ajustés pour effectuer des mesures précises des propriétés des antiprotons, et les premiers faisceaux d'antiprotons ont été fournis aux expériences GBAR et ALPHA-g, dont l'objectif est de déterminer si la gravité a le même effet sur la matière et sur l'antimatière.

LES MACHINES DES DÉCOUVERTES

Pour étudier l'infiniment petit, le CERN et les collaborations pour les expériences exploitent un complexe d'accélérateurs et de détecteurs unique au monde. Les accélérateurs propulsent d'infimes particules subatomiques à des vitesses faramineuses afin de les faire entrer en collision entre elles ou contre des cibles. Des détecteurs enregistrent ce qui se passe lors des collisions. Les énormes volumes de données enregistrées sont stockés et analysés à l'aide d'un réseau d'ordinateurs planétaire. Des centaines de scientifiques assurent l'exploitation et la maintenance de ces installations sophistiquées.

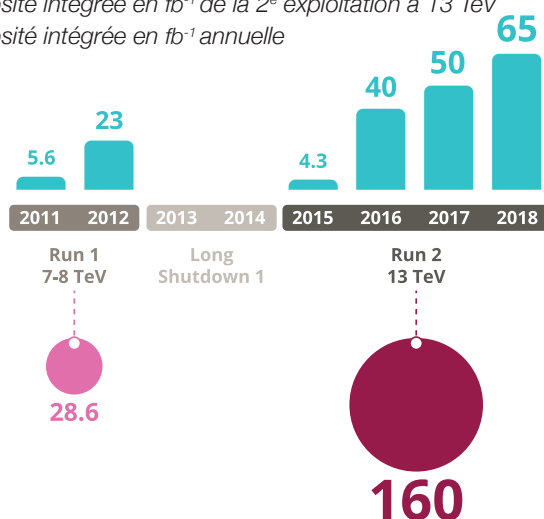
Le Grand collisionneur de hadrons a terminé sa deuxième période d'exploitation sur un record de collisions. (CERN-PHOTO-201802-030-4)





L'équipe des opérateurs et des membres de la Direction du CERN applaudissent le retour des faisceaux dans le LHC, le 29 mars 2018.
(OPEN-PHO-ACCEL-2018-012-01)

- Luminosité intégrée en fb^{-1} de la 1^{ère} exploitation à 7 et 8 TeV
- Luminosité intégrée en fb^{-1} de la 2^e exploitation à 13 TeV
- Luminosité intégrée en fb^{-1} annuelle



Évolution de la luminosité du LHC

Quantité de collisions proton-proton délivrées par le LHC depuis le début de son exploitation à chacune des expériences ATLAS et CMS. Cette quantité est exprimée par la luminosité intégrée (en femtobarns inverses, fb^{-1}) qui représente le nombre potentiel de collisions par unité de surface et sur une période donnée. Cette luminosité intégrée est indiquée pour les deux périodes d'exploitation : le LHC a atteint 28,6 fb^{-1} durant la première exploitation (Run 1) et 160 fb^{-1} durant la deuxième (Run 2).

LUMINOSITÉ AU SOMMET POUR LE LHC

Le 3 décembre au petit matin, les opérateurs stoppaient les faisceaux de particules du Grand collisionneur de hadrons (LHC), mettant ainsi fin, au terme d'une année fructueuse, à la deuxième période d'exploitation de l'accélérateur. En 2018, le plus puissant collisionneur du monde a produit plus de 13 millions de milliards de collisions de protons. Une luminosité intégrée de 66 femtobarns inverses (fb^{-1}) a été fournie à chacune des deux expériences polyvalentes ATLAS et CMS, soit 10 % de plus que l'objectif fixé. Paramètre important d'un collisionneur, la luminosité indique le nombre de collisions pouvant se produire par unité de surface et de temps.

Grâce à des améliorations permanentes, les performances du LHC ont augmenté d'année en année pour culminer en 2018. Au total, les quatre années de la deuxième période d'exploitation à une énergie de 13 TeV ont permis aux

expériences ATLAS et CMS de collecter chacune 160 fb^{-1} de données avec des protons, au-delà des 150 prévus.

La remise en marche avec faisceau du complexe d'accélérateurs a débuté le 2 mars, et celle du LHC le 29 mars. Un mois plus tard, la collecte des données du LHC était lancée avec la mise en circulation de deux faisceaux de 1 200 paquets de protons. Le nombre maximal de paquets, à savoir 2 556, était atteint début mai, deux semaines avant la date prévue. Comme en 2017, le LHC a affiché une disponibilité (temps de fonctionnement) de 75 %, faisant circuler des faisceaux et produisant des collisions pendant 49 % du temps. Afin d'augmenter la luminosité, tout en évitant un empiement de données trop important, plusieurs techniques testées au cours de l'exploitation précédente ont été mises en œuvre. La nouvelle configuration de l'optique dite « compression télescopique achromatique », développée pour le LHC à haute luminosité et qui permet de comprimer davantage le faisceau au point de collision, a été systématiquement utilisée.

Le LHC teste la haute luminosité

Des composants développés pour le LHC à haute luminosité ont déjà été mis en place dans le LHC pour être testés en conditions réelles, c'est-à-dire en présence de faisceaux. Deux nouveaux collimateurs à fil ont été installés pendant l'arrêt hivernal : leur conducteur intégré génère un champ magnétique pour compenser certaines perturbations de faisceaux. Un nouveau collimateur à cristal a été installé : les cristaux courbes dont il est doté, testés depuis plusieurs années dans le SPS et lors de périodes d'essais dans le LHC, dévient les particules qui s'éloignent de la trajectoire vers des absorbeurs. Pour la première fois, ce type de collimateur a été utilisé pendant une exploitation avec des faisceaux. Enfin, deux autres composants prototypes ont été installés : un collimateur avec des mâchoires en graphite-molybdène et un aimant à déflexion plus rapide doté d'un revêtement spécial pour limiter les échauffements. Cet aimant permettra de remplir de manière optimale le LHC.



*De nouveaux collimateurs développés pour le LHC à haute luminosité ont été installés dans le LHC, dont deux exemplaires près de l'expérience ATLAS.
(CERN-PHOTO-201801-011-1)*

Le paramètre β^* , en centimètres, mesure le taux de compression des faisceaux. Plus il est petit, plus le faisceau est comprimé et plus le nombre de collisions est important. En 2018, le LHC a fonctionné avec un β^* de 30 cm pour ATLAS et CMS, comparé aux 80 cm définis au moment de la conception du LHC. Pour optimiser la luminosité au cours des cycles, les opérateurs ont encore réduit le paramètre β^* à la fin des cycles, le ramenant à 27 puis 25 cm. Ils ont également fait varier l'angle de croisement des faisceaux. Ces opérations avaient aussi pour objectif de tester les méthodes d'exploitation pour le LHC à haute luminosité.

Les détecteurs du LHC ont fait face à ces quantités faramineuses de données. Le LHC a généré en moyenne près de 40 collisions simultanées à chaque croisement de faisceau (environ 30 millions de fois par seconde) au cœur d'ATLAS et de CMS, avec des pics à 60 collisions par croisement. Cette luminosité instantanée a contraint les systèmes de déclenchement et d'acquisition à fonctionner à pleine capacité. ATLAS et CMS sont parvenus à collecter plus de 94 % des données.

Les expériences LHCb et ALICE n'ont pas été conçues pour absorber un tel flux de données. Par conséquent, la luminosité instantanée est délibérément abaissée en jouant sur le recouvrement des faisceaux lorsqu'ils se croisent. En 2018, les deux expériences ont obtenu une luminosité intégrée plus élevée que prévu : $2,46 \text{ fb}^{-1}$ pour LHCb et $27,3 \text{ pb}^{-1}$ pour ALICE. Deux exploitations spéciales se sont déroulées avec des faisceaux décompressés, les protons se croisant à très faible angle pour que les expériences, notamment TOTEM et ATLAS/ALFA, réalisent des analyses spécifiques.

Quatre périodes de développement machine ont permis de tester des modes de fonctionnement et des équipements pour préparer les futures exploitations. Une vingtaine de tests ont été menés lors de chaque période, portant notamment sur les instabilités des faisceaux, la charge thermique transférée au système cryogénique, les réglages de l'optique ou encore des essais de nouveaux équipements comme les collimateurs.

VALSE D'IONS DANS LA GRANDE MACHINE

L'exploitation 2018 du LHC s'est achevée avec une quatrième campagne de collisions d'ions plomb. Pendant trois semaines et demie, le collisionneur a fait se percuter des noyaux d'atomes formés de 208 protons et neutrons, à une énergie de 5,02 téraélectronvolts (TeV) par paire de nucléons. Malgré une mise en service complexe, avec une réparation de la source d'ions, la collecte de données pour la physique a dépassé les prévisions. Un travail important a été réalisé sur les injecteurs pour augmenter le nombre d'ions dans chaque paquet et de paquets dans chaque faisceau. L'espace entre les paquets a été réduit de 100 à 75 nanosecondes. Combiné à une nouvelle configuration de l'optique, ce mode d'exploitation a permis d'augmenter la luminosité : ATLAS et CMS ont enregistré un record de luminosité instantanée atteignant six fois la valeur nominale. Au final, ATLAS et CMS ont collecté $1,8 \text{ nb}^{-1}$ de données, $0,9 \text{ nb}^{-1}$ pour ALICE et $0,24 \text{ nb}^{-1}$ pour LHCb.

Les ions plomb sont d'habitude entièrement « épluchés » de tous leurs électrons avant d'être accélérés. Mais le LHC

a réalisé une exploitation inédite avec des ions conservant encore un électron. Dans le cadre de l'étude « Physique au-delà des collisionneurs » (voir p. 48), une collaboration étudie en effet la possibilité d'accélérer des atomes partiellement ionisés. Grâce aux excellentes conditions de vide dans le LHC, la durée de vie du faisceau d'ions partiellement ionisé a atteint 40 heures.

LE PLUS GRAND RÉSEAU D'ACCÉLÉRATEURS

Les performances du LHC reposent également sur celles du complexe d'accélérateurs qui produit et accélère les faisceaux avant leur injection dans l'anneau de 27 km. Le CERN exploite une chaîne de huit accélérateurs et un décélérateur alimentant le LHC et des dizaines d'expériences (voir p. 14). Les protons pour le LHC sont préparés par une série de quatre accélérateurs : le Linac 2, le Booster du PS, le Synchrotron à protons (PS), et le Supersynchrotron à protons (SPS). Les ions lourds sont préparés dans le Linac 3 et l'Anneau d'ions de basse énergie (LEIR), avant d'être envoyés vers le PS et le SPS.

La disponibilité de la plupart des accélérateurs a dépassé 90 %. Ce score a même atteint 95 % pour le Booster du PS et 99 % pour le Linac 2. La prestation du Linac 2 a été d'autant plus remarquable que ce dernier propulsait ses derniers faisceaux. Après avoir préparé 30 000 milliards de milliards de protons durant ses quarante années de service, le premier maillon de la chaîne d'accélérateurs était définitivement arrêté le 12 novembre. Il laissera place au Linac 4, plus puissant (voir p. 44).

Le Booster du PS alimente le PS et l'installation de physique nucléaire ISOLDE. Il a fourni 10^{20} protons à ISOLDE, soit plus de 50 % de tous les protons envoyés dans le complexe d'accélérateurs. À l'orée de sa troisième année de fonctionnement, le nouvel accélérateur supraconducteur

HIE-ISOLDE a été doté d'un quatrième cryomodule d'accélération. L'accélérateur a fourni des noyaux d'atomes à 14 expériences à des énergies allant jusqu'à 9,5 MeV par nucléon, légèrement en-deçà des prévisions à cause d'une panne d'une cavité.

Un maillon plus loin, le PS regroupe les paquets de particules et les accélère avant de les transmettre à différentes zones d'expérimentation. La plupart des protons préparés par le PS ont été envoyés vers l'installation de physique nucléaire n_TOF, qui a reçu $2,31 \times 10^{19}$ protons, soit 6,5 % de mieux qu'escompté. Pour sa deuxième année de service, l'installation d'essai CLEAR a fonctionné durant 36 semaines, réalisant des tests pour des équipements du CERN, mais aussi pour des composants électroniques destinés à des applications médicales ou aérospatiales externes.

Le PS a par ailleurs envoyé des particules aux quatre lignes de faisceau de la zone Est, qui ont alimenté 27 expériences ainsi que les installations de test IRRAD (81 expériences) et CHARM (61 expériences). Également ravitaillé par le PS, le Décélérateur d'antiprotons (AD) a fourni des faisceaux à cinq expériences sur l'antimatière au cours de 4 700 heures de fonctionnement, ainsi qu'au nouveau décélérateur ELENA (voir p. 46). L'AD a cependant affiché une disponibilité réduite (64 %) en raison de plusieurs difficultés, principalement avec le système de refroidissement par électrons.

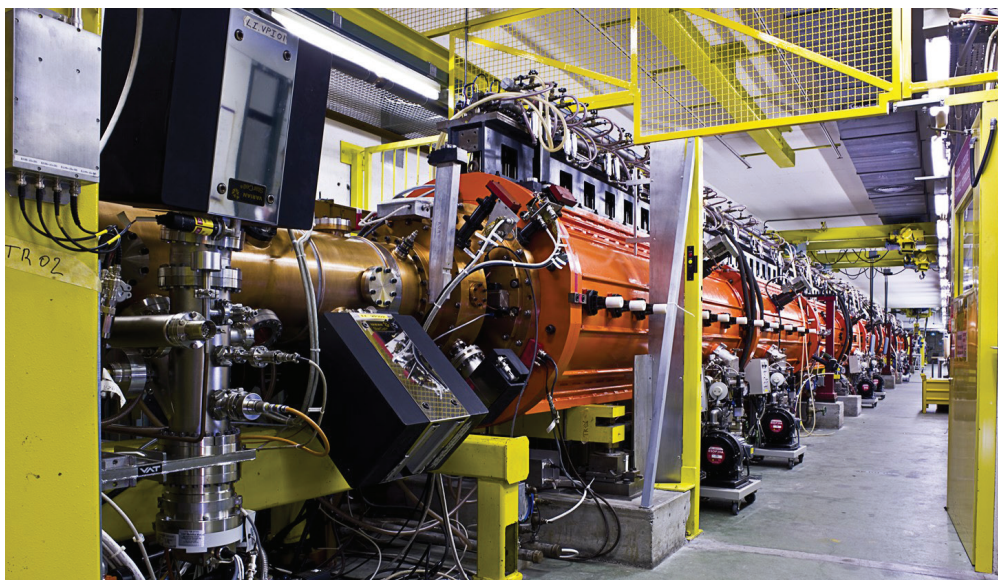
L'EXPLOITATION AVEC DES IONS

A PERMIS D'ATTEINDRE UNE

LUMINOSITÉ INSTANTANÉE

SIX FOIS SUPÉRIEURE À LA

VALEUR NOMINALE.



Après avoir préparé 30 000 milliards de milliards de protons en 40 ans de service, l'accélérateur linéaire Linac 2 a été mis à l'arrêt. Il sera remplacé après le long arrêt technique par le Linac 4. (CERN-EX-0804060-05)



Un nouveau transformateur de puissance de 400 kV, le plus grand du CERN, a été livré pour renforcer l'infrastructure électrique du Laboratoire.

(CERN-PHOTO-201810-254-31)

Le dernier injecteur de la chaîne, le SPS, propulse des protons vers le LHC, ainsi que vers les six lignes de faisceaux de la zone Nord, l'installation de test HiRadMat et l'expérience AWAKE (voir p. 49). Le SPS a livré des faisceaux d'excellente qualité au LHC. Il a également alimenté, avec une disponibilité de 80 %, la zone Nord, qui abrite 60 expériences. Parmi celles-ci, le détecteur prototype ProtoDUNE, sur la plateforme neutrino, a enregistré ses premières traces de particules (voir p. 19). HiRadMat a connu une année faste, avec un nombre record d'expériences (dix), dont certaines menées dans le cadre de l'accès transnational du projet européen ARIES.

Début décembre, le LHC consacrait une semaine de tests à l'entraînement de ses aimants supraconducteurs pour atteindre une énergie de 7 TeV par faisceau, au lieu de 6,5 TeV jusqu'à présent. L'objectif était d'évaluer le nombre de transitions résistives nécessaires pour préparer les aimants à une telle énergie.

Le deuxième long arrêt technique, de deux ans, a démarré le 10 décembre. Les préparatifs en cours depuis deux ans se sont intensifiés en 2018 (voir p. 44). De nombreuses interventions avaient déjà eu lieu sur les machines durant le dernier arrêt technique hivernal, dans le cadre notamment du projet d'amélioration des injecteurs du LHC. La campagne de décâblage, menée depuis plusieurs années, a continué avec le démantèlement de 240 kilomètres de câbles dans le PS. Une quinzaine d'aimants ont été remplacés sur la ligne de transfert entre le PS et le SPS. Une nouvelle instrumentation de faisceau a été installée sur la ligne de transfert entre le PS et le LEIR, tandis que celle du Linac 3 a été améliorée.

Dans le LHC, outre l'installation d'équipements pour la haute luminosité, les systèmes de contrôle du faisceau ont été mis à niveau et des travaux de consolidation de l'instrumentation ont été réalisés au point 4. L'infrastructure est également en pleine rénovation. L'un des faits marquants de l'année est la spectaculaire livraison d'un transformateur de puissance de 400 kilovolts, qui apporte une redondance pour l'alimentation électrique du Laboratoire.



De nouvelles infrastructures au service des accélérateurs

Un nouveau laboratoire de mesures magnétiques a ouvert ses portes sur le site de Meyrin en avril (photo). Doté de 17 bancs de test servant à réaliser l'ensemble des mesures et étalonnages sur les aimants résistifs, il a déjà testé une centaine d'aimants et de bobines. Sur le site de Prévessin, un laboratoire polymères de 400 m² avec des équipements de pointe (fours spéciaux, imprimantes 3D, etc.) est entré en service en fin d'année. Il remplace plusieurs ateliers qui n'étaient plus adaptés aux besoins du CERN. Des composants nécessitant des conceptions singulières y sont fabriqués pour les détecteurs et les accélérateurs. Ce laboratoire contribue également à l'imprégnation des bobines d'aimants supraconducteurs, notamment celles pour le LHC à haute luminosité. Enfin, les améliorations se sont poursuivies dans le hall de test des aimants supraconducteurs, infrastructure cruciale pour les futurs accélérateurs et à la pointe de ces technologies. Des bancs de test ont été modifiés pour répondre aux exigences des nouveaux aimants niobium-étain du LHC à haute luminosité et une station de test a été créée pour les lignes électriques supraconductrices. (CERN-PHOTO-201903-076-1)



Le Centre de calcul du CERN héberge non seulement les serveurs, systèmes de stockage de données et équipements réseau de la Grille de calcul mondiale pour le LHC, mais aussi les systèmes essentiels au fonctionnement quotidien du Laboratoire. (IT-PHO-CCC-2018-001-13)

REPOUSSER LES FRONTIÈRES DE L'INFORMATIQUE

Fin 2018, le LHC est arrivé au terme de sa deuxième exploitation, qui a vu la machine produire des collisions proton-proton à 13 TeV – le plus haut niveau d'énergie jamais atteint dans un accélérateur de particules. Pendant cette campagne, de 2015 à 2018, les performances de la machine ont dépassé toutes les attentes, et les expériences LHC ont donc produit des volumes de données sans précédent.

Cela a entraîné une utilisation exceptionnelle des ressources informatiques. De nombreux records ont été battus en termes d'acquisition, de débits et de volumes de données. Le système CASTOR (*CERN Advanced STORage system*), utilisant les bandes magnétiques pour l'archivage permanent des données, a atteint un volume de 330 pétaoctets (Po) de données enregistrées sur bande (330 millions de gigaoctets), l'équivalent de 2 000 ans d'enregistrement vidéo en HD. Pour le seul mois de novembre, un volume record de 15,8 Po a été enregistré sur bandes, résultat remarquable sachant que ce volume est supérieur à celui enregistré pendant la première année de la première exploitation du LHC. Le système de stockage distribué utilisé pour les expériences LHC a dépassé 200 Po de stockage brut, avec environ 600 millions de fichiers. Ce système *open source*, dénommé EOS, utilise des disques durs et a été développé au CERN pour les besoins en informatique hors du commun du LHC.

De nouvelles activités de recherche et développement en informatique ont déjà commencé en prévision de la troisième exploitation. CTA (*CERN Tape Archive*), un logiciel en cours de développement, remplacera à terme CASTOR. L'objectif

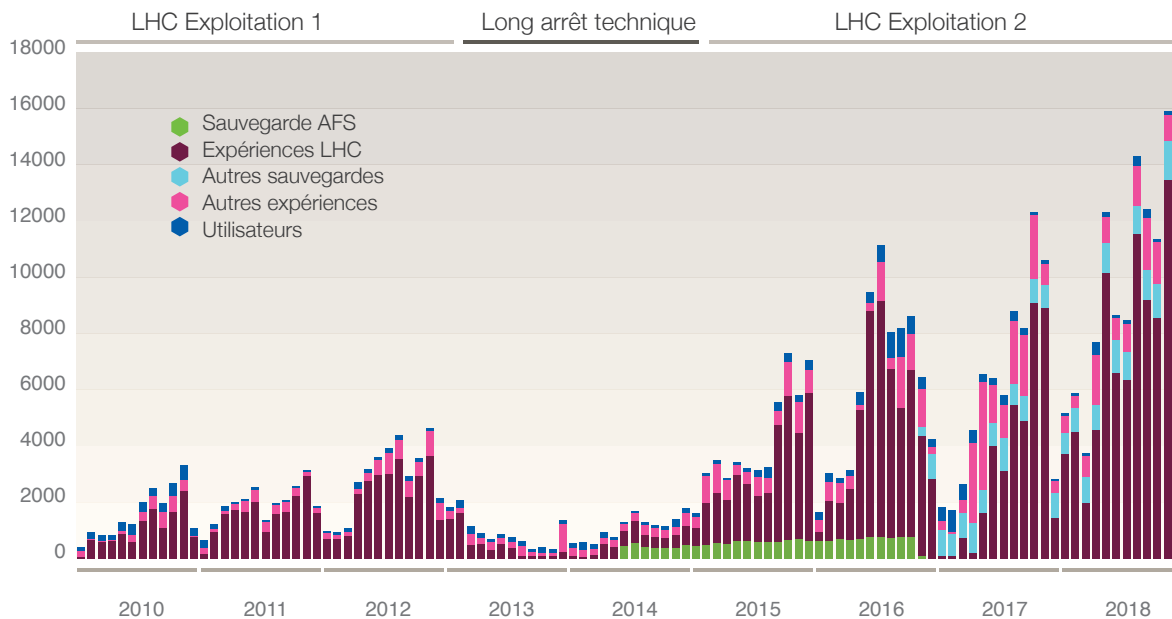
principal de CTA est d'utiliser plus efficacement les lecteurs de bandes, afin de faire face à la croissance exponentielle des débits de données attendue pendant les troisième et quatrième exploitations du LHC. Les volumes de données à archiver devraient être deux fois plus importants durant la troisième exploitation que pendant la deuxième, et à minima cinq fois plus importants durant la quatrième exploitation.

MONTÉE EN PUISSANCE DE LA GRILLE

En 2018, l'infrastructure globale de la Grille de calcul mondiale pour le LHC (WLCG) a bien fonctionné 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. Le temps de calcul distribué dans le monde entier via la collaboration WLCG a continué de croître, avec environ 800 000 cœurs de processeurs disponibles en 2018. La distribution de données est un aspect clé du service WLCG, et les taux de transfert ont atteint de nouveaux niveaux records d'environ 60 gigaoctets par seconde en continu. Les données ont ainsi été transmises efficacement aux 170 centres de calcul qui composent la Grille WLCG.

Le projet FTS (*File Transfer Service*), qui assure la distribution de la majeure partie des données dans la Grille WLCG, a transféré plus d'un milliard de fichiers pour un total de 830 Po de données. FTS est maintenant utilisé par plus de 20 expériences au CERN et dans d'autres disciplines scientifiques faisant un usage intensif de données. Sous



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, d'autres expériences, diverses sauvegardes et les utilisateurs. En 2018, un total de plus de 115 pétaoctets de données (dont 88 pétaoctets provenant du LHC) ont été enregistrées sur bandes, avec un record de 15,8 pétaoctets en novembre.

l'égide du projet LHC@home, toutes les activités basées sur du temps de processeur mis à disposition par des volontaires pour le CERN ont de nouveau fourni des ressources significatives en 2018, atteignant des pics de 400 000 tâches exécutées simultanément.

particules ou dans d'autres disciplines scientifiques. Elle se compose de trois écoles distinctes, dont chacune a sa spécialité.

ÉDUCATION ET PARTAGE

En 2018, la principale École d'informatique du CERN (CSC) s'est déroulée du 1^{er} au 14 octobre à Tel Aviv, en Israël. Elle a rassemblé 71 étudiants de 25 nationalités. Depuis le début des années 1970, elle offre un enseignement de haut niveau et promeut l'échange de connaissances dans le domaine de l'informatique scientifique auprès de jeunes chercheurs et ingénieurs travaillant dans le domaine de la physique des

En octobre, la cinquième École CERN-UNESCO sur les bibliothèques numériques a rassemblé environ 35 documentalistes et responsables de systèmes de gestion de bibliothèque. Venant du Cameroun, du Kenya, de Somalie, de Tanzanie, d'Ouganda, de Zambie et du Zimbabwe, ils se sont réunis pour acquérir de nouvelles compétences dans le domaine des systèmes de bibliothèque numérique. Les participants ont découvert des méthodes de gestion utilisant la plateforme de dépôt numérique *open source* Invenio, de Zenodo, ainsi que la plateforme Open Access Africa. Ensemble, les centres de calcul de Meyrin et de Wigner comptabilisent environ 15 000 serveurs, qui sont remplacés tous les quatre ou cinq ans lorsqu'ils ne répondent plus aux



CERN OPENLAB : RELEVÉ LES DÉFIS INFORMATIQUES DU FUTUR

En 2018, CERN openlab a entamé sa sixième phase triennale (2018-2020). À travers ce partenariat public-privé unique, le CERN collabore avec des entreprises informatiques et des instituts de recherche de premier plan afin d'accélérer le développement de technologies de pointe pour la communauté scientifique. Dans cette nouvelle phase, pas moins de 20 projets de recherche et développement sont menés dans des domaines tels que l'apprentissage automatique, l'analyse de données, l'informatique en nuage et l'acquisition de données. Du 5 au 6 novembre, CERN openlab a organisé le premier atelier au CERN portant sur l'informatique quantique pour la physique des hautes énergies. Plus de 400 personnes ont participé à cet atelier, qui a donné le coup d'envoi de discussions visant à déterminer quelles activités dans le domaine de la physique des hautes énergies sont susceptibles de bénéficier des technologies de l'informatique quantique.

(CERN-HOMEWEB-PHO-2019-044-1)

besoins poussés du Laboratoire, mais restent cependant tout à fait adaptés à des environnements moins exigeants. En 2018, 200 serveurs et 12 commutateurs réseau ont été donnés à l'Université de Katmandou, au Népal, pour soutenir la recherche fondamentale et favoriser le développement des sciences et technologies.

LOGICIELS LIBRES POUR UNE SCIENCE OUVERTE

Depuis la sortie du logiciel du World Wide Web sous licence libre en 1994, le CERN n'a eu de cesse d'innover dans ce domaine, soutenant le matériel libre (avec la licence *CERN Open Hardware*), l'accès ouvert (avec SCOAP³ – Groupement pour la libre diffusion des résultats de physique des particules), et les données ouvertes (avec le portail de données ouvertes du CERN). Plusieurs technologies du CERN sont développées dans cette logique d'accès ouvert. Le logiciel de gestion de conférences et d'événements Indico, utilisé par plus de 200 sites dans le monde, a bénéficié de deux mises à jour importantes en 2018 et a permis de fournir leur badge à des milliers de visiteurs du CERN.

Zenodo, le système d'archivage de données ouvertes gratuit co-développé par le CERN et accessible à toutes les sciences, a vu son nombre de visiteurs multiplié par 2,5 par rapport à 2017. Zenodo a bénéficié d'une bourse du Fonds Arcadia, qui visait à améliorer des archives relatives à la biodiversité. Le CERN a également signé un mémorandum d'accord avec le réseau d'Amérique latine LA Referencia afin de faciliter l'usage de Zenodo dans cette partie du monde. Invenio est un logiciel *open source* de gestion de bibliothèque numérique bénéficiant de contributions internationales de nombreux instituts, et dont une mise à jour a été publiée en juin. Le CERN et l'Institut national d'informatique (NII) du Japon ont également signé un mémorandum d'accord pour

collaborer à une nouvelle plateforme basée sur Invenio, qui sera déployée dans plus de 500 universités japonaises.

LA SCIENCE DANS LES NUAGES

En 2018, le projet CernVM a célébré son dixième anniversaire. C'est maintenant un moyen extensible, portable et simple de configurer des environnements utilisateur permettant de développer et d'exécuter les logiciels de physique du LHC localement, sur des grilles et sur des nuages, quels que soient le système d'exploitation et le matériel.

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 comptabilise plus de 320 000 cœurs de processeurs dans son Centre de calcul.

Ces dernières années, le CERN a contribué activement aux communautés OpenStack et CentOS, et de nouvelles collaborations ont débuté en 2018 avec la fondation Cloud Native Computing et Tungsten Fabric. Le CERN est également devenu membre de la fondation Linux et est un membre fondateur de la fondation Ceph.

Le CERN participe à la mise en place du nuage européen pour la science ouverte (*European Science Cloud - EOSC*) via plusieurs projets Horizon 2020. L'EOSC vise à offrir à 1,7 million de chercheurs européens et à 70 millions de professionnels un environnement virtuel avec des services intégrés pour le stockage, la gestion, l'analyse et la réutilisation des données de la recherche, en fédérant les infrastructures de données scientifiques existantes actuellement dispersées entre les disciplines et les pays.



LA SÉCURITÉ INFORMATIQUE AU CERN

L'équipe de sécurité informatique protège les activités du CERN et sa réputation contre les cybermenaces. Elle mène des enquêtes de sécurité informatique, et met à profit son expertise pour comprendre les cas d'intrusion informatique au CERN ou au sein de la communauté.

Pour prévenir les incidents, l'équipe a établi un vaste réseau au sein de la communauté et avec l'industrie et les

pouvoirs publics. En 2018, des sessions de formation et de sensibilisation à la sécurité informatique ont été organisées dans tout le CERN, y compris une campagne de « clics » à grande échelle destinée à sensibiliser aux risques qu'il y a à cliquer sur des liens sans réfléchir. En outre, des membres de la communauté du CERN ont été sensibilisés et formés dans le cadre du « *WhiteHat Challenge* », et ont ainsi pu tester la résistance aux intrusions de leurs propres logiciels et les « pirater », pour mieux les sécuriser.

REPOUSSER LES FRONTIÈRES DE LA TECHNOLOGIE

Une part importante de la mission du CERN est de veiller à ce que son savoir-faire et ses technologies de pointe sortent du Laboratoire, pour que les industries des États membres et la société dans son ensemble puissent en bénéficier.

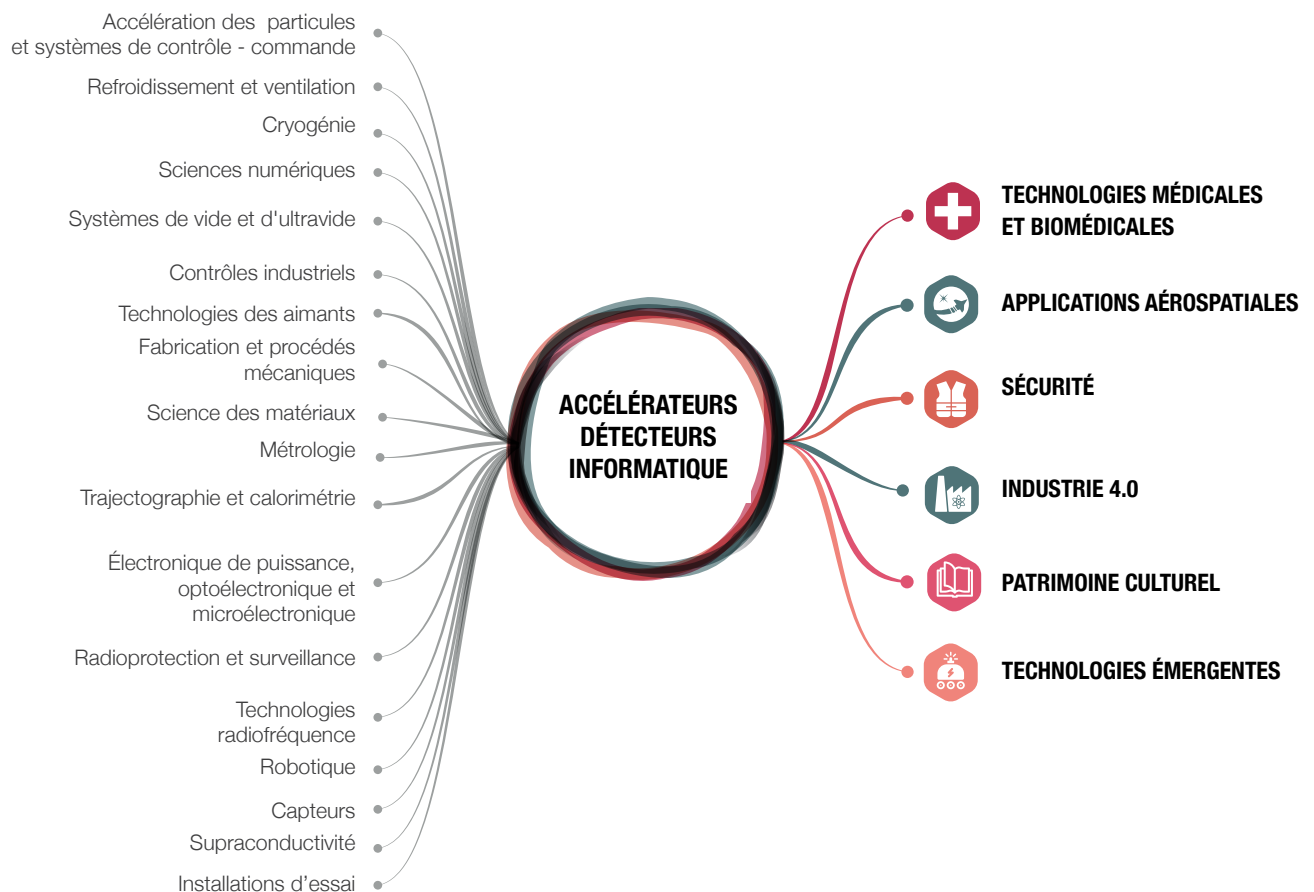
Cette année, de nombreuses activités de transfert de connaissances ont été menées dans divers domaines, de l'aérospatiale aux technologies médicales et biomédicales. Le CERN a participé à la conférence sur l'entreprenariat SLUSH à Helsinki, lors de laquelle le rapport « *State of European Tech* »

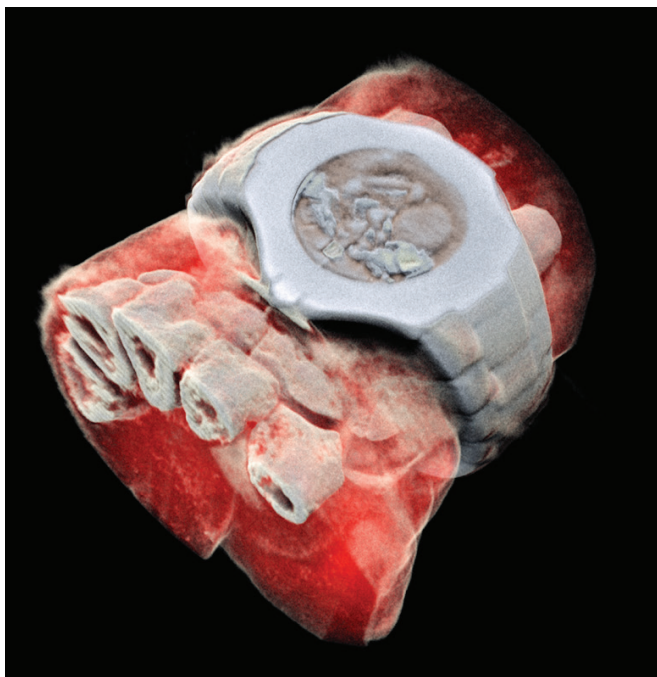
2018 a été présenté. Pour la première fois, le CERN a fourni des données pour l'élaboration de ce rapport et a été cité pour illustrer le rôle moteur que peuvent jouer les instituts de recherche pour l'innovation en apportant un capital technologique et humain.

Grâce aux journées de découverte du transfert de connaissances, créées cette année, les collaborations avec des multinationales ont augmenté. Cette initiative permet aux entreprises conviées de venir au CERN pour découvrir les possibles solutions aux défis industriels qu'elles rencontrent.

Des domaines d'application variés

Les technologies conçues pour le LHC, qui ont mené à la découverte du boson de Higgs, ont fait progresser les domaines des accélérateurs, des détecteurs et de l'informatique, et eu des retombées pour la société.





Une technologie du CERN a été à l'origine de la première radiographie couleur 3D sur un humain. Les couleurs, représentant les différents niveaux d'énergie des photons des rayons X enregistrés par le détecteur, permettent d'identifier des composants tels que graisse, eau, calcium, et des marqueurs de maladies.

TECHNOLOGIES MÉDICALES ET BIOMÉDICALES

La contribution de longue date du CERN au domaine des technologies médicales et biomédicales reste fructueuse. L'entreprise MARS Bioimaging Ltd (issue des collaborations Medipix et de l'Université de Canterbury, Nouvelle-Zélande) a produit les premières images en 3D couleur d'un corps humain avec son scanner révolutionnaire utilisant la technologie Medipix3, créée au CERN pour l'imagerie et la détection.

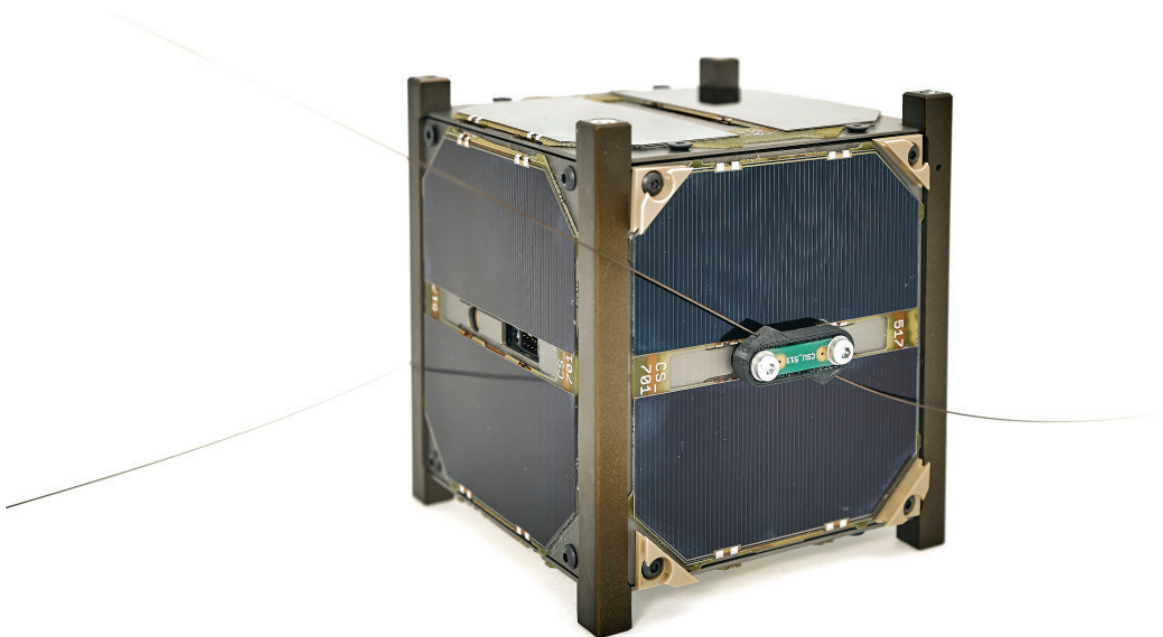
En 2018, le savoir-faire du CERN sur les aimants supraconducteurs a permis de concevoir le portique GaToroid, destiné à l'hadronthérapie. Les portiques font circuler le faisceau thérapeutique autour du patient afin d'irradier la tumeur depuis différents angles. GaToroid est révolutionnaire car son aimant toroïdal peut incliner le faisceau sans que la structure doive pivoter ; il est ainsi bien plus léger et moins coûteux que les dispositifs conventionnels.

Le CERN a organisé son premier Hackathon de technologies médicales, qui avait pour but de relever des défis proposés par des organismes de santé et des partenaires industriels avec des technologies du Laboratoire. Les projets gagnants visaient à améliorer l'accès aux soins vitaux dans les zones rurales grâce à la technologie C2MON, et à rendre plus efficace le contrôle des substances radiopharmaceutiques au moyen du détecteur GEMpix. Les deux équipes lauréates ont remporté un séjour au CERN pour poursuivre le développement de leur projet.

TECHNOLOGIES AÉRONAUTIQUES

Le CERN reste présent au sein de la communauté de l'aéronautique au travers de partenariats et par le fait qu'il donne accès à ses compétences et ses installations. L'installation CHARM, qui teste le matériel électronique dans des environnements de radiation complexes, a examiné son premier système spatial complet : CELESTA. Le satellite a été testé dans diverses conditions de rayonnements attendues dans l'espace, et a prouvé sa fiabilité. Sa charge utile, basée sur la technologie RadMon du CERN, a confirmé sa très haute sensibilité (y compris aux flux faibles) et montré une excellente performance.

Des spécialistes de l'ESA et d'IROC Technologies se sont rendus au CERN pour mener des tests sur VESPER, un faisceau d'électrons de haute énergie destiné aux tests d'irradiation, qui fait partie de l'installation CLEAR. VESPER a été utilisé pour mesurer les effets des électrons de haute énergie sur du matériel électronique de pointe qui pourrait servir lors de la mission JUICE, projet d'exploration de Jupiter et de ses lunes. Les résultats permettront d'améliorer la sonde spatiale de JUICE.



CELESTA, premier satellite entier testé par CHARM au CERN, en juillet, utilisera dans l'espace la technologie de surveillance des rayonnements du CERN.

(CERN-PHOTO-201807-181-2)

UNE LARGE PALETTE D'APPLICATIONS

L'environnement exceptionnel du CERN, mêlant températures extrêmement basses, champs magnétiques ultra-intenses, rayonnements et hautes tensions, nécessite des dispositifs de sécurité innovants pour détecter et prévenir les risques. La jeune entreprise SAFETYIN vise à améliorer la sécurité dans l'aviation grâce à un dispositif qui collecte, au moyen de l'outil *open source* ROOT/TMVA et de bibliothèques d'apprentissage automatique, des données aidant le pilote à mieux comprendre les situations. En 2018, SAFETYIN SaS a rejoint Innogex, l'incubateur français pour les technologies du CERN.

La construction et l'exploitation des accélérateurs, des détecteurs et des installations informatiques ont permis d'acquérir une expertise de l'industrie 4.0. A2O Innovative Solutions, jeune entreprise spécialisée dans les technologies d'allègement et de réduction des émissions de CO₂ ainsi que dans l'amélioration de l'efficacité opérationnelle, a rejoint le centre d'incubation du Royaume-Uni pour les technologies du CERN. A2O prévoit d'intégrer à son système CHASM la technologie CERN Multi Memory System, mise au point pour détecter la position du faisceau dans le LHC.

La collaboration MACHINA entre le CERN et l'INFN vise à construire un accélérateur de particules « miniaturisé » consacré au patrimoine culturel. Le dispositif MACHINA permettra de réduire le coût d'utilisation de la technique d'analyse PIXE, employée dans le monde pour l'étude des œuvres d'art. Le projet a été lancé en avril à l'*Opificio Delle Pietre Dure*, à Florence, institut de premier plan dans le domaine de la restauration d'œuvres d'art.

ACCÉLÉRATEUR D'INNOVATION

Le groupe Transfert de connaissances (KT) soutient l'innovation au CERN au travers de ses activités, collaborations et services. Il propose des conseils, des formations et des réseaux pour faciliter le transfert des technologies et du savoir-faire de l'Organisation. Cette année, des scientifiques et ingénieurs du CERN ont présenté au groupe 77 nouvelles technologies, dont des logiciels, des composants électroniques et des pièces de détecteurs et d'accélérateurs.

Le Fonds pour le transfert de connaissances du CERN est une passerelle entre la recherche et l'industrie. Créé en 2011 et financé par les recettes tirées des accords commerciaux du groupe KT, il a permis à ce jour de soutenir 44 projets. En 2018, trois projets ont été retenus : un convertisseur universel de longueur d'onde de laser à diamant, multimode à monomode, une méthode de revêtement en film mince pour des formes complexes et une plateforme de gestion de données de recherche *open source*. En outre, le budget du CERN pour les applications médicales a financé un nouveau projet sur la production de radioisotopes et les travaux de quatre nouveaux chercheurs.

DES COLLABORATIONS FRUCTUEUSES

Le CERN soutient les interactions entre les chercheurs, les entreprises et les décideurs politiques de ses États membres afin de faciliter le transfert de connaissances vers l'industrie. Il participe notamment à des projets cofinancés par la Commission européenne. Actuellement, il prend part à six projets reposant en grande partie sur le transfert de connaissances (AIDA-2020, QUACO, AMICI, ARIES, FuSuMaTech et ATTRACT) et représentant environ 34,5 millions d'euros de cofinancement de la Commission.

La moitié de ce montant provient d'ATTRACT, initiative qui vise à financer 170 concepts technologiques innovants dans les domaines de la détection et de l'imagerie. Ce projet est l'occasion pour le CERN et les communautés de la recherche et de l'innovation de renforcer des concepts technologiques et de nouer des liens pour le transfert de connaissances. Le premier appel à projets lancé par ATTRACT, en août, a reçu 1 211 réponses dans des domaines tels que les capteurs, l'électronique frontale et dorsale, les systèmes d'acquisition de données, l'informatique, les logiciels et l'intégration.

ENCOURAGER L'ENTREPRENEURIAT

Le CERN encourage la création d'entreprises dérivées de son savoir-faire et de ses technologies. On en compte à ce jour 28, spécialisées dans divers domaines.

En 2018, le Directoire élargi du CERN a adopté une nouvelle politique relative aux entreprises dérivées, qui expose de manière détaillée leur lien avec le CERN et le soutien que celui-ci leur apporte.

Dans le cadre du premier Programme du CERN pour les étudiants en entrepreneuriat (CESP), projet de la Fondation CERN & Société entièrement financé par l'entreprise Strangeworks, dix étudiants de différents pays ont été invités au CERN à la fin de l'été. Pendant cinq semaines, ils ont été encadrés par des experts du groupe KT du CERN pour chercher et identifier des technologies et des concepts en cours de développement susceptibles d'être exploités par de nouvelles entreprises.

Le CERN a signé son dixième accord concernant un centre d'incubation d'entreprises avec PARK INNOVAARE, en Suisse, centre géré en collaboration avec l'Institut Paul Scherrer (PSI) et la FHNW (Haute école spécialisée du nord-ouest de la Suisse).

LES ENTREPRISES ET LE CERN

Afin de construire et d'exploiter ses accélérateurs, ses détecteurs et ses installations informatiques, le CERN passe chaque année un grand nombre de commandes et de

contrats. Plus de 40 % du budget annuel de l'Organisation est reversé à l'industrie au travers des activités d'achat, qui sont un facteur d'innovation industrielle.

En 2018, le CERN a émis 175 demandes d'offres, 80 appels d'offres et 65 600 commandes. Le Service des achats a également attribué les principaux contrats en vue du futur LHC à haute luminosité, allant des travaux de génie civil aux pompes à CO₂ pour les détecteurs d'ATLAS et de CMS, en passant par les cavités-crabe RF supraconductrices. En outre, des contrats ont été passés pour des services d'architecte et de bureau d'études pour le nouveau Portail de la science (voir p. 35) et d'autres, en informatique, ont été renégociés avec Microsoft et Oracle. Afin de rationaliser les processus d'achat, une nouvelle plateforme d'achat en ligne a été créée pour les fournisseurs, et elle compte déjà plus de 2 000 inscrits.

Pour créer des liens entre le CERN et les industries nationales, le Service des achats participe régulièrement à des manifestations. Cette année, il a ainsi participé à des expositions industrielles et des visites organisées au CERN par huit États membres, et à des manifestations industrielles dans huit États membres et États membres associés. L'une d'elles, le premier *Big Science Business Forum (BSBF)*, qui s'est déroulée à Copenhague (Danemark), a réuni 18 des plus grandes organisations scientifiques pour une rencontre avec des entreprises européennes. Le CERN y a fait des exposés et tenu un stand présentant ses achats en cours et futurs.

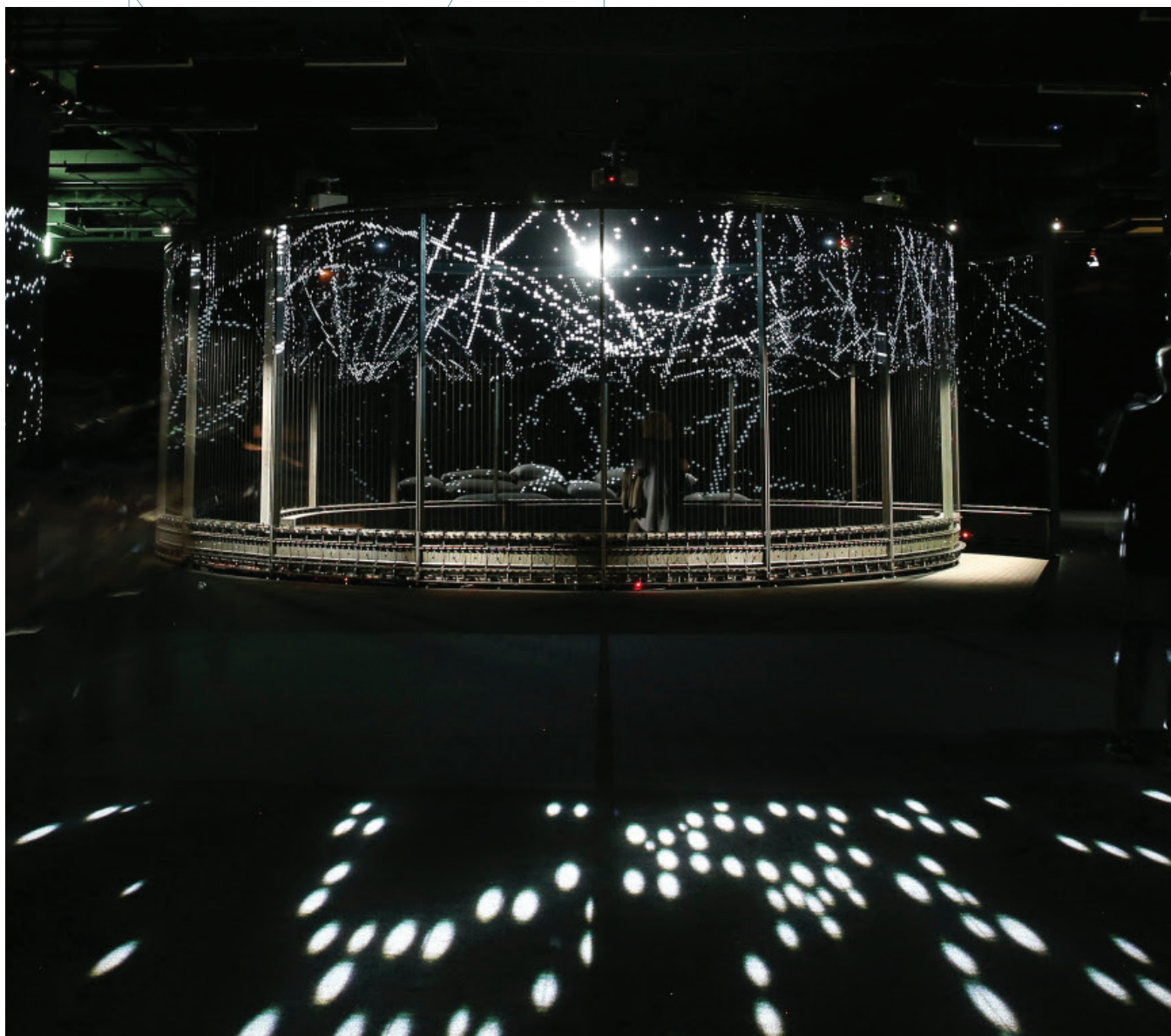
Frédéric Bordry, directeur des accélérateurs et de la technologie au CERN, a présenté les perspectives en matière d'achats pour le projet de LHC à haute luminosité lors du Big Science Business Forum.



FORMER ET SENSIBILISER

Dans un contexte où les avancées scientifiques et technologiques issues de la recherche fondamentale transforment notre société, le CERN souhaite attirer et inspirer des personnes de tous horizons. En 2018, le Laboratoire a permis à différents publics de découvrir ses recherches scientifiques et technologiques grâce à des initiatives visant à les rendre plus accessibles et à susciter des vocations pour une carrière dans la science ou l'ingénierie.

En juin, l'installation d'art immersive HALO a été exposée à Art Basel. Créée par Ruth Jarman et Joe Gerhardt (Semiconductor), artistes en résidence au CERN, elle utilise des données de l'expérience ATLAS. (OPEN-PHO-EXHI-2018-003-10)



SUSCITER L'INTÉRÊT

En 2018, les visites guidées ont attiré plus de 135 000 visiteurs de 86 pays, dont 56 % étaient des élèves d'établissements scolaires. De plus en plus populaires, elles permettent de découvrir l'envers du décor des installations techniques et de dialoguer avec des scientifiques ou des ingénieurs du CERN.

Les guides ont participé à de nombreux événements hors site, créant un lien avec la population locale. Le CERN a notamment été l'invité d'honneur de la ville de Genève à l'occasion de la Fête nationale suisse. Autre événement populaire, la *Nuit des chercheurs* a proposé des ateliers et des activités sur l'esplanade des Particules, fraîchement inaugurée, devant la réception du CERN (voir p. 10).



À l'occasion de la Fête nationale suisse, une jeune participante est transportée dans une caverne d'expérimentation grâce à un casque de réalité virtuelle. (CERN-PHOTO-201808-185-7)

En novembre, 900 personnes ont assisté à la conférence TEDxCERN à Genève. Plus de 4 000 personnes ont suivi la manifestation en ligne ou assisté aux retransmissions organisées par 34 instituts partenaires du CERN, partout dans le monde.

Le programme *Dans la peau de scientifiques*, destiné aux jeunes francophones, a permis à 700 élèves d'écoles primaires de découvrir la méthode scientifique au travers d'expériences pratiques menées en classe.

En juin, 1 800 professionnels de centres scientifiques et de musées des sciences de 58 pays sont venus à Genève à l'occasion de la conférence annuelle *Ecsite*. Le CERN a organisé des visites guidées pour les participants et un événement de bienvenue pour tous les intervenants. Le Laboratoire a également présenté aux musées souhaitant créer leurs propres expositions sur la physique des particules le matériel disponible au CERN, y compris des objets et des jeux interactifs. Des expositions permanentes ont ainsi pu être installées en 2018 dans des musées au Danemark, en Espagne et au Vietnam.

Cette année, l'exposition *Accélérateur de science* s'est rendue à Riga, en Lettonie, et a accueilli plus de 18 000 visiteurs. Le tunnel interactif du LHC a été montré dans des expositions en Allemagne, en Grèce, aux Pays-Bas et en Suisse. Cette modélisation numérique et interactive du LHC

invite les visiteurs à essayer de produire eux-mêmes des collisions de protons.

Le projet Portail de la science a été approuvé au mois de décembre par le Conseil du CERN, et des études sont en cours pour créer des laboratoires pédagogiques et des expositions pour les visiteurs de tout âge. Ce projet trouvera sa place au cœur d'un ensemble de nouveaux bâtiments conçus par l'architecte Renzo Piano, parmi lesquels un nouvel amphithéâtre et un restaurant.

ÊTRE SOURCE D'INSPIRATION

En 2018, les programmes pour les enseignants du secondaire ont fêté leur 20^e édition. Au fil des années, ils ont gagné en importance pour devenir un élément incontournable de l'offre de formation du CERN. Leurs retombées sont considérables, car chaque enseignant repart avec des idées inspirantes à partager avec ses collègues et à transmettre à ses élèves. Cette année, 906 enseignants de 55 pays sont venus au CERN pour participer à 31 programmes nationaux et à deux programmes internationaux. Le CERN s'adresse aussi directement aux élèves en leur proposant des expériences pratiques qui révèlent ce qu'une carrière scientifique peut réserver. En 2018, le programme de stages pour les élèves du secondaire a accueilli 118 participants venus d'Israël, des Pays-Bas, de Pologne, de République tchèque et de Suède.

S'Cool LAB a proposé des ateliers à 7 540 élèves âgés de 14 à 19 ans et a mis à la disposition des enseignants du matériel à utiliser en classe, dont, pour la première fois, des patrons imprimables 3D.

Le concours *Ligne de faisceau pour les écoles* a cette année encore inspiré des élèves du monde entier, qui ont proposé leurs propres expériences à mener sur une ligne de faisceau du CERN. En 2018, 42 pays ont été représentés, et deux équipes ont été retenues sur 195 : l'équipe venue d'Inde a mesuré le pic de Bragg des pions afin d'en évaluer le potentiel pour la thérapie contre le cancer, et l'équipe venue des Philippines a étudié les effets de la force de Lorentz sur les particules chargées relativistes.

Les lauréats du concours Ligne de faisceau pour les écoles lors de la préparation de leurs expériences au CERN, en septembre. (OPEN-PHO-MISC-2018-011-514)





LA DIVERSITÉ EST L'UNE DES FORCES DU CERN. ELLE EST DE PLUS EN PLUS PRÉSENTE DANS NOS PROJETS.

Des visiteurs aveugles et malvoyants collaborent avec les guides et l'équipe chargée des expositions afin de mettre au point des supports tactiles. (CERN-PHOTO-201812-327-29)

LA SCIENCE A BESOIN DE TOUT LE MONDE

La diversité est bien plus qu'un atout pour le CERN ; avec plus d'une centaine de nationalités représentées au sein de ses collaborations, c'est l'une des valeurs fondamentales de l'Organisation. La science a par ailleurs besoin de tous les esprits brillants. Le CERN redouble d'efforts pour refléter cette diversité et pour que ses programmes de formation, de recrutement de talents et de communication s'adressent au plus grand nombre. Avec ses mesures en faveur de la diversité, le CERN espère également avoir une influence positive sur d'autres instituts de recherche.

À l'occasion de la *Journée internationale des femmes et filles de sciences*, le 11 février, des enfants ont pu rencontrer des femmes au parcours inspirant. Un total de 102 classes des environs, soit environ 2 400 enfants, se sont inscrites pour assister à des conférences sur le CERN données par des chercheuses et ingénieures. Une grande partie des enfants présents venaient du primaire, tranche d'âge qui représente un groupe cible important pour susciter des vocations.

En avril, le réseau « Femmes dans la technologie » du CERN a participé à la *Journée des jeunes filles dans le secteur des TIC* et à l'atelier de programmation de Django Girls, deux rendez-vous visant à donner envie aux jeunes filles de s'orienter vers les technologies de l'information.

Dans le cadre des programmes destinés aux enseignants et aux élèves, des efforts sont déployés pour que les filles et les garçons bénéficient des mêmes opportunités et puissent rencontrer pendant leur séjour au CERN des femmes et des hommes pouvant les inspirer. En outre, 50 % des ateliers S'Cool LAB sont animés par des femmes.

Un environnement de travail inclusif, où toutes les voix sont entendues, est source de créativité. En 2018, les membres d'EIROforum ont créé un groupe de travail afin de collaborer en faveur de la diversité et de l'inclusivité sur le lieu de travail, d'échanger des idées et les meilleures pratiques en la matière, et de donner vie à des initiatives communes.

Le 5 juillet, la première édition de la *Journée mondiale des personnes LGBT+ dans le secteur des sciences, des technologies, de l'ingénierie et des mathématiques* a été une nouvelle occasion de souligner l'importance de la diversité.

En plus de son rôle moteur dans le cadre de ces initiatives, le Bureau de la diversité du CERN a mis en place de nouveaux stages destinés aux jeunes handicapés.

Pour toucher un public varié, nos contenus doivent être accessibles à tous. Dans ce but, l'équipe chargée des expositions a organisé en décembre un atelier avec des personnes aveugles et malvoyantes afin d'élaborer ensemble des supports pour les expositions.

MÉDIAS ET COMMUNICATION SUR LE WEB

Cette année, le CERN et le LHC ont suscité un intérêt très fort dans les médias ; l'Organisation a été citée 150 000 fois. Dans de nombreux cas, cet intérêt a été alimenté par des visites, 431 journalistes ayant été accueillis par le Laboratoire. La pose de la première pierre du LHC à haute luminosité a généré à elle seule 2 000 articles. Le Bureau de presse a aussi organisé dans les coulisses des installations du CERN un parcours photographique destiné aux amateurs (*Global Physics Photowalk*).

L'Organisation a confirmé sa forte présence et sa réputation sur les réseaux sociaux : les mots « CERN » et « LHC » ont été mentionnés plus d'1,6 million de fois. Le CERN est actif sur Twitter, Facebook, Instagram, YouTube et LinkedIn. C'est la vidéo *Voyage au cœur des atomes*, diffusée sur Facebook, qui a totalisé le plus de visionnages, avec 1,3 million de vues. Le Laboratoire a organisé de nouveaux événements *Facebook Live*, le plus populaire (diffusé depuis le tunnel du LHC) ayant rassemblé 1,7 million de personnes.



Des stands et des activités interactives attendaient les visiteurs de la Nuit des chercheurs sur l'esplanade des Particules.
(CERN-PHOTO-201809-250-8)

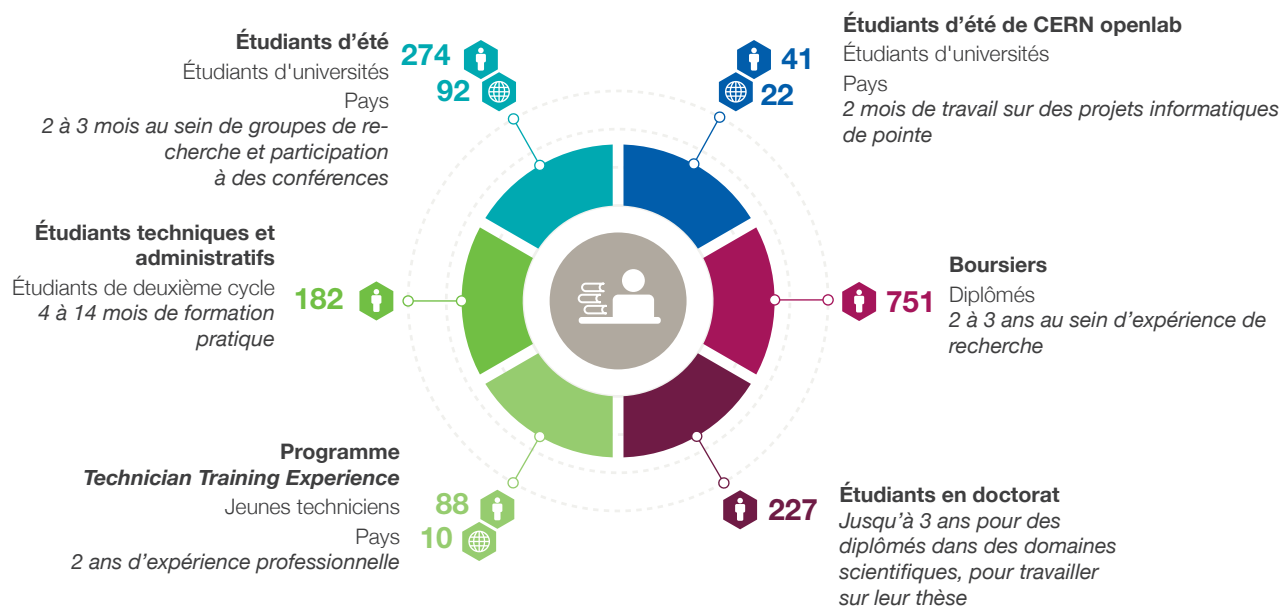
Faisant honneur à son statut de berceau du Web, le CERN a perfectionné sa présence en ligne au travers de son domaine de premier niveau, « .cern », dont l'approbation par la Direction début 2018 a lancé une année de changement pour les sites web du CERN. Ce travail important a compris la refonte du site web public et la mise en place d'un nouveau système de gestion de contenu pour les différents autres sites au CERN. Les pages du site home.cern ont comptabilisé neuf millions de vues et 3,5 millions de visiteurs.

LES PREMIÈRES ÉTAPES DE LEUR CARRIÈRE

La formation des jeunes scientifiques fait partie intégrante des activités pédagogiques 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 et jouissant d'une expérience internationale.

En 2018, les programmes de formation destinés aux jeunes scientifiques ont concerné plus de 830 boursiers, notamment dans le cadre du programme TTE (*Technician Training Experience*), plus de 330 étudiants d'été de 100 pays différents, plus de 400 doctorants et étudiants administratifs et techniques, quelque 120 stagiaires et environ 330 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

La santé, la sécurité et l'environnement ont une importance capitale pour le CERN, qui veille au bien-être de toutes les personnes qui utilisent ou visitent ses installations, tout en limitant au maximum son impact sur l'environnement.

Apiculteurs s'occupant de leurs ruches dans une prairie au CERN. (CERN-PHOTO-201806-165-11)



PRÉSERVER LA SANTÉ, LA SÉCURITÉ ET L'ENVIRONNEMENT

En 2018, les premières recommandations du Comité directeur pour la protection de l'environnement du CERN ont été mises en œuvre et le Comité pour la gestion de l'énergie a lancé avec succès les préparatifs pour la valorisation de la chaleur résiduelle du Laboratoire. Le Groupe de travail du CERN sur la mobilité a également vu ses premières recommandations mises en œuvre et a mené une grande enquête sur les habitudes de transport du personnel. Parmi les autres faits marquants, l'appui en matière de sécurité apporté aux principaux projets et expériences a été rationalisé et une filière d'élimination des déchets radioactifs de faible activité a été créée.

DES BASSINS DE RÉTENTION POUR PROTÉGER LES COURS D'EAU

Un important travail a été réalisé pour prévenir la pollution des eaux en aval des sites du CERN. Sur le site de Meyrin, plusieurs kilomètres de réseaux d'eaux pluviales et d'eaux usées ont été inspectés et réparés, et une étude complète a été menée sur les améliorations à apporter au réseau d'assainissement. Parallèlement, un contrat a été attribué pour la construction d'un ensemble séparateur d'huile et bassin de rétention au point 7 du LHC afin de contenir les éventuels polluants en cas de fortes pluies, comme recommandé par le Comité directeur sur la protection de l'environnement du CERN. Des contrats pour la construction de bassins de rétention sur d'autres sites du CERN seront attribués en 2019.

RÉCUPÉRER LA CHALEUR POUR CHAUFFER LES HABITATIONS

Les nouvelles zones commerciales et résidentielles fleurissent dans le Pays de Gex. À Ferney-Voltaire, l'une d'elles sera bientôt chauffée en partie grâce à la chaleur récupérée du LHC. Un accord établi par le CERN et les autorités locales, qui devrait être signé en 2019, prévoit la construction d'un convertisseur thermique au point 8 du LHC et d'un système de distribution pour acheminer la chaleur vers les habitations. Ce projet sera cofinancé par le CERN et les autorités locales ; le Laboratoire retrouvera son investissement d'ici à 15 ans en vendant la chaleur aux autorités locales à un prix attractif. Des études sont en cours en vue d'un projet similaire de chauffage des bureaux sur le site de Meyrin du CERN.

RATIONALISER LA GESTION DES DÉCHETS

L'exploitation des accélérateurs du CERN génère une faible radioactivité de leurs composants, qui doivent être stockés

à la fin de leur durée de vie jusqu'à ce qu'ils puissent être éliminés en toute sécurité dans les sites de stockage des États hôtes. Jusqu'à présent, ces déchets, des aimants pour la plupart, étaient traités dans le centre de traitement des déchets radioactifs du CERN avant approbation de leur transfert vers le site de stockage d'un État hôte.

Un processus lancé il y a trois ans a abouti cette année : les aimants usagés peuvent être traités, caractérisés et conditionnés *in situ* avant leur transfert vers le site de stockage définitif, sans autre traitement intermédiaire ou stockage au CERN. Ce processus est le fruit de discussions avec l'Agence nationale française pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA) et d'une collaboration étroite entre les départements Technologie et Ingénierie du CERN et l'unité Santé et sécurité au travail et protection de l'environnement (HSE). À la suite de la conclusion d'un accord entre le CERN et l'ANDRA, les premiers aimants ont été préparés et expédiés en juin vers une installation de stockage de l'ANDRA, en vue de leur élimination définitive.

Le CERN a également fait d'importants progrès concernant la gestion des déchets conventionnels. Le Laboratoire recycle déjà plus de 50 % de ses déchets, ce qui en fait un chef de file dans la région de Genève. Mais des améliorations sont toujours possibles. Parmi les progrès notables, la quantité de gobelets en plastique à usage unique a été radicalement réduite dans les restaurants du site de Meyrin. Cette mesure devrait permettre d'alléger d'une tonne et demie par an la quantité de déchets en plastique produits au CERN. Les gobelets en plastique à usage unique restants seront remplacés en 2019 par des gobelets en carton recyclables.

UN MEILLEUR APPUI POUR LA SÉCURITÉ

Le CERN a rationalisé ses services d'appui aux principaux projets et expériences en matière de sécurité (à l'exception de la radioprotection, qui possède son propre service) pour offrir aux responsables des projets et aux délégués à la sécurité une structure destinée à les aider à exercer leurs rôles et responsabilités en matière de sécurité. Ainsi, pour chaque projet, les aspects relatifs à la sécurité sont pris en compte dès les premières étapes et l'unité HSE en assure un suivi étroit, en adoptant une approche spécifique. Chaque chef de projet a un point de contact unique pour toutes les questions relatives à la sécurité, et bénéficie d'un appui personnalisé tout au long du cycle de vie du projet. Cette année, plus de 130 projets ont bénéficié de cette procédure.



La nouvelle isolation de l'immense bâtiment de la zone Est réduira les pertes d'énergie de 90 %.

(CERN-PHOTO-201805-130-3)

DES TRANSPORTS ET DES BÂTIMENTS PLUS ÉCOLOGIQUES

Cette année, le Groupe de travail du CERN sur la mobilité a mené une enquête afin de recueillir des informations sur les habitudes de déplacement du personnel. Les données obtenues serviront notamment à élaborer un plan de mobilité définissant les mesures à mettre en œuvre d'ici à 2030 pour faciliter les déplacements au CERN et aux alentours, et encourager le recours à des modes de transport durables. Beaucoup de membres du personnel vivent en zone rurale et effectuent donc leurs déplacements avec leur propre véhicule. Le covoiturage et le vélo représentent tout de même respectivement 8 % et 13 % des habitudes de transport.

L'enquête a déjà permis de mettre en place des actions concrètes. Des trottoirs et pistes cyclables supplémentaires sont en cours de construction sur le domaine du CERN. La fréquence des navettes sur les sites, et entre eux, a augmenté, de même que le parc de vélos. Et lorsque la voiture est le seul choix possible, le flux de circulation aux entrées du Laboratoire aux heures de pointe a été fluidifié. À la suite de discussions auxquelles ont participé le CERN, les autorités locales et l'opérateur genevois de transport public, des solutions d'amélioration des transports sont mises en place du côté français de la frontière à proximité du Laboratoire.

Il ressort de l'enquête que le personnel du CERN a une sensibilité écologique concernant ses déplacements. Lorsque des solutions vertes existent, elles sont utilisées, et les résultats de l'enquête permettent d'en déployer de nouvelles.

Les projets de rénovation des infrastructures et des bâtiments se sont poursuivis. L'un des plus importants concerne la zone Est : un immense bâtiment de

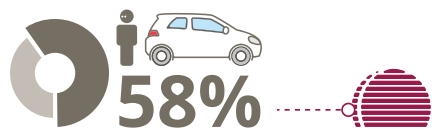
100 000 m³, qui abrite quatre lignes de faisceau issues de l'accélérateur Synchrotron à protons (PS) et plusieurs expériences. La première phase de travaux a débuté avec une nouvelle isolation, qui permettra de réduire de 90 % les pertes d'énergie. La deuxième phase, qui commencera en 2019, consistera à rénover les lignes de faisceau, notamment en remplaçant les aimants et leurs alimentations électriques par des systèmes bien plus efficaces.

LA R&D AU SERVICE DE LA SÉCURITÉ

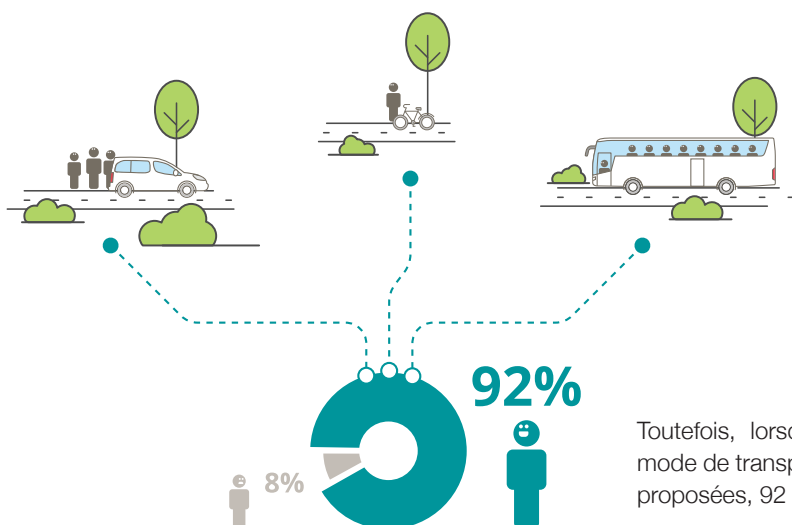
Au CERN, la recherche ne consiste pas seulement à élucider les mystères de l'Univers ; elle concerne aussi des questions plus concrètes. Par exemple, le projet CROME met au point des détecteurs de rayonnements très performants, fiables, rentables et nécessitant peu de maintenance, susceptibles d'être utilisés au-delà du domaine de la recherche scientifique. Les détecteurs équipés du dispositif CROME seront installés à l'intérieur comme à l'extérieur des sites du CERN et effectueront des mesures en temps réel, notamment de très faibles débits de dose, et un enregistrement permanent et fiable de données.

La R&D menée dans le cadre du projet CROME pour la prochaine génération de systèmes électroniques s'est poursuivie à un rythme soutenu, avec des tests réalisés sur un prototype conçu cette année. La production en série de dispositifs CROME (alarmes, systèmes d'alimentation sans coupure et un premier lot de détecteurs) a commencé cette année et s'intensifiera en 2019, conformément au calendrier d'installation des nouveaux équipements de détection pendant le deuxième long arrêt du complexe d'accélérateurs du CERN.

LE PERSONNEL DU CERN A
 UNE SENSIBILITÉ ÉCOLOGIQUE
 CONCERNANT SES DÉPLACEMENTS.
 LORSQUE DES SOLUTIONS VERTES
 EXISTENT, ELLES SONT UTILISÉES.



Sur les 4 300 personnes qui ont répondu à l'enquête, 58 % viennent au travail en voiture et sont seules au volant.



Toutefois, lorsqu'on leur demande si elles changeraient de mode de transport si des solutions plus écologiques leur étaient proposées, 92 % ont déclaré qu'elles y songeraient.



Un nouveau bâtiment pour le centre de formation Sécurité du CERN a été inauguré en novembre. Toute l'équipe de formation à la sécurité se retrouve désormais au même endroit et peut offrir un meilleur service à la communauté du CERN. Cela sera particulièrement important pendant le deuxième long arrêt technique, puisque de nombreuses équipes d'utilisateurs et de contractants viendront au Laboratoire y effectuer des travaux,

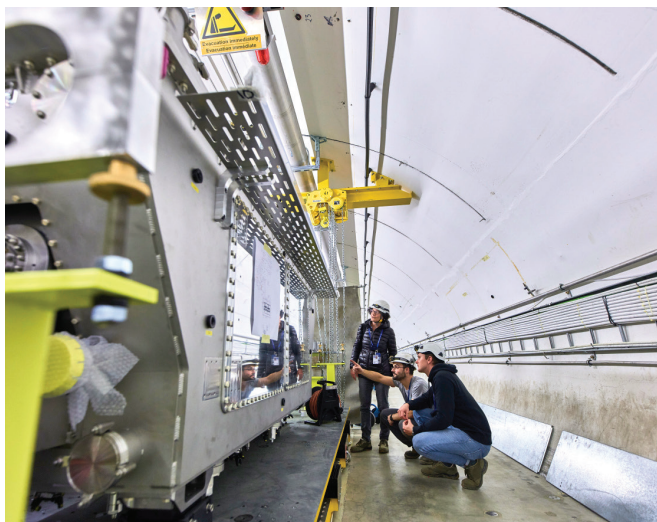
chacune avec ses propres exigences en matière de sécurité. Le centre compte maintenant six salles de formation, ainsi que des installations pratiques, telles qu'un simulateur d'incendie et une reproduction du tunnel du LHC. Cette année, quelque 6 100 personnes ont suivi une formation à la sécurité en présentiel, et la semaine-type comptait 16 sessions de cours (CERN-PHOTO-201904-081-2)

CONSTRUIRE L'AVENIR

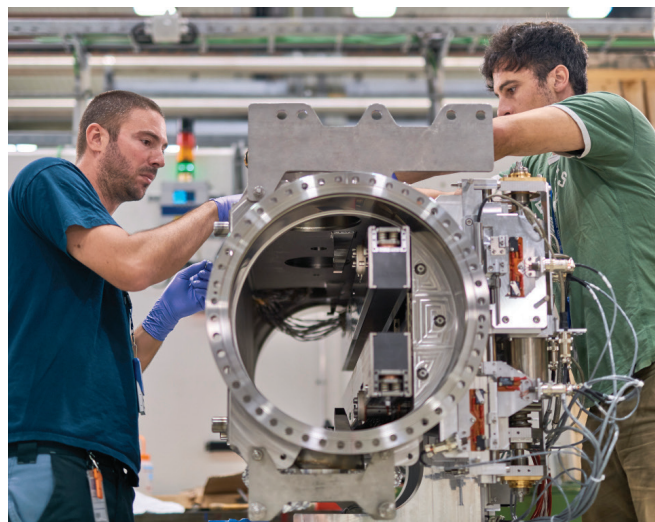
Au CERN, physiciens, ingénieurs et techniciens imaginent, conçoivent et construisent les installations qui permettront à la communauté scientifique de poursuivre sa quête de connaissances. Du LHC de nouvelle génération aux accélérateurs du futur, de l'amélioration du complexe d'accélérateurs et des expériences du LHC au test réussi d'une technique d'accélération révolutionnaire, de nouveaux projets prennent vie au CERN.

Les travaux de génie civil ont commencé aux points 1 et 5 du LHC, sur les sites des expériences ATLAS et CMS, pour l'excavation des puits, galeries et cavernes du projet LHC à haute luminosité. (CERN-PHOTO-201805-131-2)





Les deux premières cavités-crabe, qui serviront à incliner les faisceaux de protons avant les collisions, ont été testées avec succès avec des faisceaux. (CERN-PHOTO-201801-026-8)



Le prototype d'un absorbeur qui sera installé au point d'injection du LHC à haute luminosité a été testé avec faisceaux dans l'installation HiRadMat. (CERN-PHOTO-201808-190-5)

LE PROJET DE LHC À HAUTE LUMINOSITÉ À MI-PARCOURS

Le LHC à haute luminosité (HL-LHC) devrait être mis en service en 2026. Cette amélioration importante, lancée en 2010, va accroître la luminosité de l'accélérateur et ainsi permettre aux physiciens de rechercher des phénomènes rares.

L'année 2018 a été marquée par le début des travaux de génie civil aux points 1 et 5 du LHC, où se situent les expériences ATLAS et CMS. Sur chaque site sont construits un puits, une caverne de service, une galerie de service et plusieurs tunnels d'une longueur totale d'un kilomètre. À la fin de l'année, les deux puits de 60 mètres de profondeur avaient été creusés.

Le HL-LHC nécessite l'installation de nouveaux équipements sur 1,2 km des 27 km de l'accélérateur. Parmi les nouveaux éléments-clés à installer se trouvent les quadripôles des triplets internes et d'autres aimants, des cavités-crabe, des liaisons supraconductrices, de nouvelles installations cryogéniques, des absorbeurs et des collimateurs.

Installées en amont et en aval d'ATLAS et de CMS, les cavités-crabe inclineront les paquets de protons de chaque faisceau afin de maximiser leur zone de recoupement. Les deux premières cavités ont été testées avec des faisceaux du SPS, à l'aide d'un banc d'essai mobile et d'une boîte froide. Elles ont généré un champ transverse capable d'incliner les paquets de protons, une première mondiale. Environ 70 heures de test ont été effectuées en 2018.

La première phase de test des longues lignes supraconductrices a également été menée en 2018. Composées d'un câble en diborure de magnésium inséré dans un cryostat flexible, ces lignes alimenteront en électricité les quadripôles des triplets internes. Une ligne

de 60 mètres, pouvant transporter 20 000 ampères, a été testée ; ses performances cryogéniques et électriques ont dépassé les attentes.

Une centaine d'aimants de 11 nouveaux types sont en cours de développement. Parmi eux se trouvent des dipôles et quadripôles plus puissants utilisant un composé niobium-étain supraconducteur. La fabrication de prototypes courts et de longueur complète de dipôles de 11 teslas s'est achevée et la préparation des contrats pour leur production industrielle a commencé. Le quatrième modèle court du quadripôle du triplet interne a été testé, et les prototypes sont en phase de fabrication aux États-Unis et en Europe. La collaboration américaine a reçu l'approbation du ministère de l'Énergie des États-Unis, et un financement intégral.

Avec l'augmentation de la luminosité, la protection de la machine doit être renforcée. Des collimateurs à très basse impédance, capables d'absorber les particules qui s'écartent de la trajectoire optimale, ont été testés dans la machine avec succès. Le prototype d'un collimateur spécial, qui sera raccordé aux dipôles de 11 teslas, a été assemblé ainsi que le cryostat de l'aimant.

Les absorbeurs, installés au point d'injection, jouent eux aussi un rôle essentiel pour la sûreté de l'exploitation. Un prototype capable de résister à des faisceaux de haute intensité a été testé avec succès. Les performances des prototypes de l'écran de faisceau, destiné à protéger l'aimant supraconducteur des particules résiduelles provenant d'ATLAS et de CMS, ont été excellentes.

La collaboration HL-LHC s'agrandit : des accords ont été signés avec le KEK (Japon), l'IHEP (Chine), l'INFN (Italie) et Triumph (Canada). Par ailleurs, le STFC et des universités associées du Royaume-Uni se sont engagés à fournir des éléments essentiels.



Installation du nouveau système d'amplificateurs à transistors développé pour les cavités accélératrices du SPS.

(CERN-PHOTO-201902-037-2)

EN ROUTE VERS LE SECOND LONG ARRÊT TECHNIQUE

Décembre 2018 a marqué le coup d'envoi du second long arrêt technique (LS2). Au cours des deux prochaines années, les équipes vont maintenir, rénover et améliorer l'infrastructure, la chaîne d'injecteurs et le LHC pour préparer la troisième période d'exploitation et le LHC à haute luminosité. La plupart de ces améliorations sont réalisées dans le cadre du projet d'amélioration des injecteurs du LHC (LIU). En 2018, les équipes ont continué à préparer ces travaux de grande envergure.

Le Linac 4 sera intégré à la chaîne des accélérateurs du CERN au cours du LS2. Le nouvel accélérateur linéaire fournira des protons à une énergie de 160 MeV, contre 50 MeV avec l'ancien Linac 2. Une phase de fonctionnement autonome a eu lieu afin d'évaluer et d'améliorer ses performances avant son raccordement au Booster du PS. La disponibilité moyenne du Linac 4 lors de sa dernière période d'exploitation en 2018 a atteint plus de 95 %.

Le Booster du PS va subir une métamorphose complète. De nouveaux systèmes d'alimentation, d'injection, d'accélération (avec des cavités radiofréquence), de guidage (avec des aimants) et d'extraction vers le PS sont ainsi en préparation depuis 2011. En 2018, de nouveaux équipements – notamment des aimants à septum et de déflexion, et plusieurs aimants dipôles, quadripôles et correcteurs – ont été testés.

Le nouveau système radiofréquence (RF) du Booster du PS repose sur des cavités à base d'un matériau magnétique composite (FineMet), développé avec l'institut japonais KEK. Les 24 cavités qui seront installées (six pour chacun des quatre étages de l'accélérateur) et les quatre cavités de rechange ont été livrées en 2018.



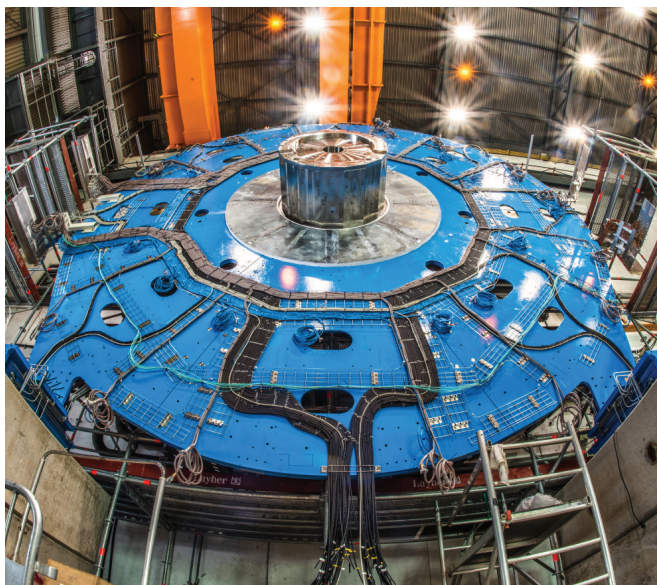
Assemblage de la maquette du nouveau système d'injection du Linac 4 vers le Booster du PS. (CERN-PHOTO-201708-201-7)

Un bâtiment a par ailleurs été édifié pour accueillir le nouveau système d'alimentation du Booster (POPS-B), testé avec succès fin 2018. Pour guider les faisceaux plus énergétiques, ses convertisseurs de puissance alimenteront les aimants avec des intensités électriques de 5 500 ampères, contre 4 000 auparavant.

Le nouveau système d'amplificateurs de puissance des cavités accélératrices du SPS a été validé. Basé sur des transistors radiofréquence, il augmentera la puissance RF fournie aux cavités et renforcera le système actuel. Une tour contenant 320 transistors a fonctionné pendant 1 000 heures, donnant le feu vert à la production en série. Quelque 10 240 transistors répartis dans 32 tours seront installés.

L'installation de nouveaux équipements pour stabiliser les faisceaux et de nouveaux moniteurs pour en contrôler les paramètres a permis de franchir des étapes importantes pour tous les injecteurs. Le PS a ainsi produit avec succès des paquets de $2,6 \times 10^{11}$ protons, l'intensité requise par le futur HL-LHC, mais avec des émittances encore trop larges. Des faisceaux de haute intensité ont également été transférés du SPS vers le LHC avec des paquets contenant jusqu'à $2,3 \times 10^{11}$ protons, mais dans des trains très courts, afin d'étudier la charge thermique induite dans ces conditions sans précédent.

Dans le LEIR, un nouveau mode de fonctionnement du système RF a permis de transférer trois paquets de particules (au lieu de deux) au PS. Une nouvelle manipulation RF dans le PS a aussi permis de resserrer ces trois paquets lors de l'extraction vers le SPS. La nouvelle configuration a permis d'approcher la luminosité requise pour le HL-LHC et offre une plus grande flexibilité pour le cas où la manipulation de faisceau dans le SPS présenterait des difficultés.



Les disques de support ont été achevés pour les nouvelles petites roues d'ATLAS, qui permettront d'identifier les muons émis à de petits angles. (CERN-PHOTO-201806-175-1)

LES EXPÉRIENCES SE PRÉPARENT À LA HAUTE LUMINOSITÉ

En 2018, les expériences se sont préparées en vue de la réalisation rapide et sûre de toutes les activités prévues pendant le deuxième long arrêt. La phase d'installation des nouveaux éléments a été précédée par le démantèlement et le retrait d'anciens composants.

La collaboration ALICE remplacera entièrement ses trajectographes, y compris le trajectographe interne et la chambre à projection temporelle. En 2018, la collaboration a produit l'ensemble des chambres à multiplicateur d'électrons dans du gaz (GEM) qui formeront le nouveau système de lecture de la chambre à projection temporelle et en a testé une grande partie dans la caverne. La construction du nouveau trajectographe interne, basé sur des capteurs à pixels, a bien progressé. Le tonneau interne est achevé, le tonneau extérieur et l'électronique de lecture devraient bientôt l'être. La production du trajectographe aux petits angles pour les muons, utilisant la puce ALPIDE, a également progressé, ainsi que la fabrication de composants électroniques pour tous les sous-détecteurs et le système de déclenchement. Les services nécessaires pour la nouvelle salle de calcul sont prêts et l'installation des deux premiers modules a commencé.

La collaboration ATLAS a avancé dans la construction de nouveaux détecteurs destinés aux « petites roues », servant à identifier les muons émis à des angles assez petits par rapport au faisceau. Ces détecteurs, qui combinent des chambres Micromégas et TGC (*Thin Gap Chamber*), reconstitueront avec précision la trajectoire des muons et les identifieront rapidement au premier niveau du système de déclenchement. Six rapports de conception technique ont été approuvés pour la deuxième phase du programme d'amélioration. Elle comprend un nouveau trajectographe au silicium, des systèmes de lecture pour les calorimètres et des détecteurs de muons. De plus, un système de

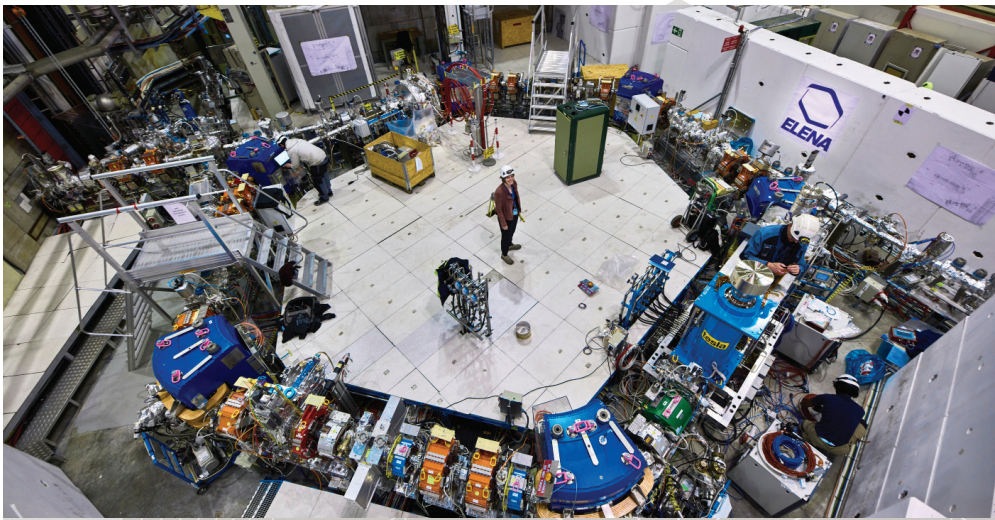


Prototypes de modules de détection pour la deuxième phase de l'amélioration du calorimètre de CMS. (CERN-PHOTO-201812-333-1)

déclenchement et d'acquisition de données innovant permettra à ATLAS d'augmenter d'un ordre de grandeur la vitesse de déclenchement et de lecture. Ces améliorations ont progressé dans leurs phases de spécification et de développement de pré-prototypes.

En vue de l'augmentation de la luminosité pendant les deuxième et troisième exploitations, CMS a amélioré début 2018 les photodétecteurs et l'électronique frontale des bouchons du calorimètre hadronique. Tous les convertisseurs de tension du trajectographe à pixels ont été remplacés et les procédures d'exploitation ont été adaptées, ce qui a permis au détecteur d'afficher de belles performances en 2018. De nouveaux composants électroniques ont également été installés dans le système de lecture des chambres à tubes de dérive à muons. La deuxième phase du programme d'amélioration de CMS en vue du HL-LHC a aussi bien progressé ; une chambre GEM de démonstration, destinée au système à muons, a fonctionné dans le détecteur. Des chambres GEM destinées à former une nouvelle couche de détection dans les bouchons ont été produites. La qualification des capteurs au silicium pour le trajectographe et les bouchons du système de calorimètre a bien avancé. Les prototypes de plusieurs circuits intégrés ont été conçus ou produits, et la fabrication et l'assemblage des modules ont commencé.

LHCb a testé les 11 000 kilomètres de fibres scintillantes pour le trajectographe SciFi. La production en série de ces fibres a été réalisée dans quatre centres différents. La collaboration a livré et contrôlé la qualité de plus de 3 500 tubes photomultiplicateurs multi-anodes pour les détecteurs Cherenkov à focalisation annulaire (RICH). Le premier lot de 24 systèmes de lecture frontaux faits sur mesure a été reçu et testé. Deux rapports de conception technique sur l'informatique ont été élaborés et présentés au Comité des expériences LHC. La construction du nouveau centre de données sur le site de l'expérience a bien progressé, avec la mise en place des premiers modules destinés à accueillir les unités centrales.



Le nouveau décélérateur d'antimatière ELENNA a poursuivi sa mise en service et a été raccordé à sa première expérience.

(CERN-PHOTO-201804-086-10)

DES ANTI-PROTONS EXCEPTIONNELLEMENT LENTS

Après plusieurs mois de mise en service, ELENNA (*Extra Low ENergy Antiproton*), le nouvel anneau de décélération d'antiprotons du CERN, a produit des faisceaux d'antiprotons aux caractéristiques très proches des valeurs nominales. C'est une excellente nouvelle pour les expériences sur l'antimatière qui seront reliées à ELENNA après le deuxième long arrêt technique et seront ainsi alimentées en antiprotons à très basse énergie. Seule l'expérience GBAR a été connectée au nouvel anneau en 2018 ; l'installation a

reçu ses premiers faisceaux le 20 juillet. Plus les antiprotons sont lents, mieux les expériences peuvent les piéger pour les étudier. Raccordé au Décélérateur d'antiprotons (AD), ELENNA doit ainsi ralentir davantage les antiprotons, ramenant leur énergie de 5,3 MeV à seulement 0,1 MeV.

Pour atteindre de telles performances, le dispositif de décélération d'ELENNA est couplé à un système de refroidissement par électrons. Ce système, qui a été testé et mis en service à l'automne, permet de concentrer les paquets de particules en diminuant l'émission du faisceau,

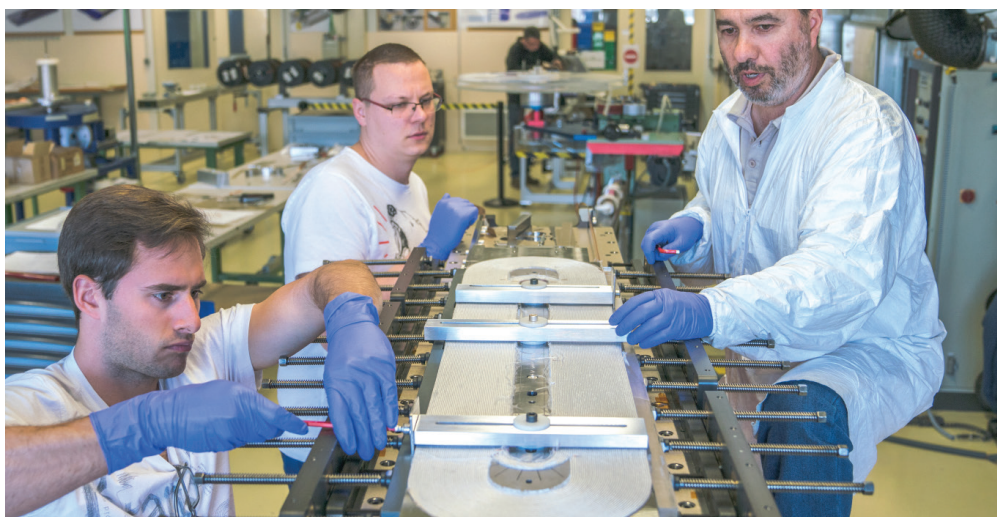
autrement dit, ses dimensions transversales et sa dispersion en énergie. Il est ainsi possible de fournir aux expériences des faisceaux plus denses, augmentant leurs chances de piéger des antiprotons.

Dès la fin des tests avec faisceaux, en novembre, le démontage des lignes de transfert magnétiques reliant l'AD aux autres expériences a démarré. Ces lignes seront progressivement remplacées par des lignes électrostatiques reliant ELENNA aux expériences.

L'AVENIR DE LA PHYSIQUE DES PARTICULES SE DESSINE

Au cours de sa session de septembre, le Conseil du CERN a lancé formellement la mise à jour de la stratégie européenne pour la physique des particules, processus de deux ans auquel participera toute la communauté et qui vise à définir une vision commune de l'avenir de la discipline en Europe. En décembre, le Groupe sur la stratégie européenne, établi pour coordonner ce processus, a reçu 157 projets d'accélérateurs et d'expériences présentés par des universités, des laboratoires, des instituts nationaux, des collaborations et des chercheurs. Le CERN, avec ses instituts partenaires, a proposé plusieurs contributions majeures, notamment des projets de nouveaux collisionneurs (FCC et CLIC) et des expériences utilisant les machines existantes.

QUELQUE 157 PROJETS ONT ÉTÉ
SOUJES DANS LE CADRE DE
LA MISE À JOUR DE LA STRATÉGIE
EUROPÉENNE POUR LA PHYSIQUE
DES PARTICULES.



Assemblage au CERN d'une bobine destinée au projet ERMIC d'aimant de test de 16 teslas.

(CERN-PHOTO-201804-088-4)

L'ÉTUDE FUTUR COLLISIONNEUR CIRCULAIRE

En décembre, le projet FCC (Futur Collisionneur Circulaire) a présenté son rapport préliminaire de conception portant sur une infrastructure de recherche installée dans un nouveau tunnel de 100 km de circonférence. Le document détaille les paramètres, l'intérêt pour la physique et les possibilités d'expérimentation d'un collisionneur de leptons (FCC-ee), pour repousser les frontières de la précision, suivi d'un collisionneur de hadrons de 100 TeV (FCC-hh), pour repousser les frontières de l'énergie. Des collisions d'ions lourds ou leptons-hadrons et des expériences avec cibles fixes sont également envisagées. L'étude porte également sur la possibilité d'un LHC à haute énergie dans le tunnel actuel.

En 2018, la collaboration a développé des schémas d'injection et a affiné l'optique des faisceaux pour garantir une performance maximale. Des études de génie civil ont été menées avec des partenaires internationaux, notamment sur l'optimisation des coûts et la réutilisation des matériaux d'excavation. Les résultats préliminaires ont montré la compatibilité d'une telle infrastructure avec les exigences socio-économiques et environnementales des États hôtes.

Les technologies-clés du FCC-ee sont les cavités radiofréquence (RF) supraconductrices et la production de puissance RF à rendement élevé. La collaboration a détaillé un scénario par phases pour l'installation des équipements de la RF dans le FCC-ee. De grands progrès ont été réalisés dans le développement de cavités RF en titane et cuivre, qui atteignent un gradient équivalent à celui des cavités en niobium. Des techniques de fabrication innovantes, s'appuyant sur des matériaux nouveaux, ont permis de réduire les coûts et d'améliorer la qualité de la fabrication des cavités, avec le soutien du projet européen EASITrain cofinancé par le programme cadre de l'Union européenne Horizon 2020. La collaboration a pu construire et tester avec succès des prototypes pour les principaux dipôles et quadripôles du collisionneur de leptons. Leur conception innovante, à double ouverture, nécessite moins de bobines, ce qui permet de réduire les coûts et l'énergie consommée.

Le FCC-hh de 100 TeV s'appuie sur des aimants supraconducteurs en niobium-étain capables de générer 16 teslas, soit deux fois plus que les aimants du LHC. La conception de différents profils d'aimants a été menée à bien par le programme EuroCirCol, cofinancé dans le cadre de Horizon 2020. Les deux premiers aimants à champ élevé (15 teslas pour le projet MDP aux États-Unis et 16 teslas pour le projet ERMIC au CERN) ont été assemblés au Fermilab et au CERN et seront testés en 2019 au CERN. Le système de vide de faisceau est un autre élément critique car il doit absorber l'important rayonnement synchrotron émis par le faisceau. Trois prototypes d'écran de faisceau ont subi à KARA (Karlsruhe) un test de rayonnement synchrotron à température ambiante (cofinancé dans le cadre du projet européen EuroCircol), qui a validé la conception du système de vide du FCC-hh.

L'étude FCC participe aussi activement au projet RI-PATHS, qui vise à développer de nouveaux outils pour l'évaluation de l'impact socioéconomique des infrastructures de recherche en Europe. Les premiers résultats d'une analyse coût-bénéfice du LHC et du HL-LHC ont été publiés en 2018 ; ce travail est aujourd'hui élargi au FCC.

L'ÉTUDE COLLISIONNEUR LINÉAIRE COMPACT

Un plan de mise en œuvre et les documents pour la mise à jour de la stratégie européenne pour la physique des particules ont été finalisés en 2018 pour l'étude CLIC (Collisionneur linéaire compact).

Le CLIC est un projet de futur collisionneur linéaire électrons-positons à haute luminosité, planifié en trois étapes, de 380 GeV à 3 TeV. Il repose sur un concept innovant d'accélération à deux faisceaux produisant des champs d'accélération pouvant atteindre 100 mégavolts par mètre, permettant de maîtriser les dimensions et le coût du projet.

Parmi les réalisations techniques, il faut citer des études sur le faisceau d'entraînement et la mise au point de systèmes

RF. Des essais portant sur des éléments, des systèmes et des méthodes pour les futurs collisionneurs et collisionneurs d'électrons linéaires ont été menés sur l'installation CLEAR (*CERN Linear Electron Accelerator for Research*), sur l'ATF2 au KEK, sur des lasers à électrons libres (FEL) tels que celui de FERMI à Trieste et sur des anneaux de faible émittance tels que celui d'ALBA à Barcelone. La collaboration a également mis au point et testé des structures en bande X au CERN et dans des instituts partenaires. De nombreux progrès techniques ont permis d'améliorer les éléments les plus critiques et les plus sensibles du point de vue du coût et de la consommation électrique, dans le cadre d'une démarche globale d'optimisation du projet.

En parallèle, la collaboration réalise une étude systématique de la participation de l'industrie aux technologies essentielles du CLIC, qui sont de plus en plus utilisées pour d'autres applications. Plusieurs accords ont été conclus en vue de travaux de développement pour de petits accélérateurs et éléments utilisant la technologie en bande X, notamment pour des linacs FEL. L'étude de conception de la Commission européenne CompactLight (FEL à technologie en bande X), qui compte 24 partenaires, a commencé en 2018.

L'évaluation du potentiel de physique de l'accélérateur CLIC pour des énergies de collision allant jusqu'à plusieurs TeV s'est poursuivie, donnant lieu à plusieurs rapports élaborés en étroite collaboration avec la communauté des théoriciens. Par ailleurs, la R&D sur les détecteurs de vertex et les trajectographes a beaucoup progressé, notamment avec la

conception de capteurs monolithiques innovants. La R&D sur les pixels au silicium se poursuit en synergie avec les progrès accomplis par la collaboration Medipix/Timepix et les groupes de R&D sur le LHC à haute luminosité.

LE PROGRAMME SUR LA PHYSIQUE AU-DELÀ DES COLLISIONNEURS

Une vingtaine de projets ont été présentés au Groupe sur la stratégie européenne dans le cadre du programme de physique au-delà des collisionneurs. Lancé en 2016, ce programme explore le potentiel scientifique et la faisabilité des nombreuses possibilités offertes par le complexe d'accélérateurs du CERN en complément des expériences s'appuyant sur des collisions à haute énergie. Les groupes BSM (*Beyond Standard Model*) et Chromodynamique quantique ont conjointement réalisé des analyses comparatives du potentiel de physique au CERN et ailleurs dans le monde. Le groupe BSM a produit des graphiques de sensibilité pour, entre autres, les portails scalaires, vectoriels, Higgs et axions vers le secteur caché. Concernant les accélérateurs, les potentiels de la zone Nord - production du faisceau destiné aux recherches de matière noire et aux études de précision, et alimentation des expériences de chromodynamique quantique - a fait l'objet d'une analyse poussée. Le projet BDF (*Beam Dump Facility*) a bien avancé, avec la réalisation du test d'un prototype de cible et d'études de génie civil et d'intégration. Cette installation à cible fixe de haute intensité, polyvalente,

Assemblage d'un prototype de cible pour le projet BDF (Beam Dump Facility). Ce projet, élaboré dans le cadre de l'étude sur la physique au-delà des collisionneurs, vise à fournir de nouveaux faisceaux aux expériences de la zone Nord. (CERN-PHOTO-201808-199-17)



utiliserait les faisceaux de protons du SPS pour alimenter les nouvelles expériences de la zone Nord et en particulier, dans sa phase initiale, l'expérience SHiP qui a pour objectif la recherche de particules de matière noire. Un groupe étudie la possibilité d'une nouvelle installation de faisceaux d'électrons, à partir d'un accélérateur linéaire qui injecterait des électrons à 3,5 GeV dans le SPS. Ce faisceau serait accéléré à 16 GeV et envoyé vers une expérience étudiant la matière noire située sur le site de Meyrin. Une expression d'intérêt a été présentée au Comité du SPS. Le SPS pourrait également alimenter l'installation nuSTORM, qui produirait un faisceau de neutrinos au moyen d'un anneau de stockage de muons.

La collaboration EDM, qui a pour objectif d'utiliser les mesures de précision du moment dipolaire électrique du proton et du deutéron à la recherche de signes d'une physique au-delà du Modèle standard, a élaboré une feuille de route pour le développement d'un prototype d'anneau.

L'Usine à gamma a connu une année fructueuse, avec l'injection et l'accélération d'ions partiellement épluchés dans le LHC (voir p. 25). La mise en place d'une expérience de démonstration de principe dans le SPS est en cours d'étude.

Le programme sur la physique au-delà des collisionneurs a également apporté son soutien à la proposition d'expérience FASER. Située près du tunnel du LHC, à 480 m du point d'interaction d'ATLAS, cette expérience étudierait les particules à longue durée de vie. Une phase de préparation s'est déroulée en 2018, avec pour objectif une installation pendant le LS2, après approbation. Les études sur des expériences à cibles fixes dans le LHC se sont poursuivies. L'installation d'une cellule de stockage de gaz pour le VELO de LHCb a été approuvée pour le deuxième long arrêt, et un certain nombre de possibilités, notamment l'extraction des protons au moyen de cristaux, ont été envisagées.



L'expérience AWAKE avec le système de spectromètre à électrons et la cellule plasma de 10 mètres.
(CERN-PHOTO-201711-284-5)

LES ÉLECTRONS SURFENT LES VAGUES DE PLASMA

La collaboration AWAKE a franchi une étape cruciale : l'expérience a accéléré des électrons au moyen d'un champ de sillage généré par des protons filant à travers un plasma. Cette première mondiale a été réalisée deux ans seulement après le début de l'installation de l'expérience.

Tandis que les accélérateurs conventionnels utilisent des cavités radiofréquence pour accélérer les particules, AWAKE étudie l'utilisation de protons pour créer des vagues de plasma (appelées champs de sillage) qui accélèrent des électrons en les faisant « surfer ». Cette technologie permettrait la production de gradients

d'accélération des centaines de fois plus élevés que ceux générés avec les cavités radiofréquence actuelles.

AWAKE a fait des progrès fulgurants depuis ses débuts. La cellule plasma a été installée début 2016, et quelques mois plus tard, l'expérience enregistrait les premiers champs de sillage générés par des protons. Lors des premiers essais d'accélération réalisés en 2018, des électrons ont été accélérés d'un facteur 100 environ sur une distance d'à peu près 10 mètres : injectés dans la cellule plasma d'AWAKE à une énergie d'environ 19 MeV, ils ont atteint une énergie de presque 2 GeV.

AWAKE s'est préparée pour sa deuxième période d'exploitation, qui devrait démarrer après le LS2. L'objectif est d'accélérer des particules jusqu'à

des niveaux d'énergie de plusieurs GeV tout en préservant la qualité du faisceau, et de démontrer l'adaptabilité du processus d'accélération par champ de sillage.

L'objectif final, d'ici à la fin de la deuxième période d'exploitation, est de pouvoir utiliser le modèle d'AWAKE pour des expériences de physique des particules telles que des expériences avec cibles fixes pour la recherche de photons sombres, et de futurs collisionneurs électron-proton ou électron-ion (expérience PEPIC - *Plasma Electron Proton/Ion Collider*), où les électrons accélérés par AWAKE entrent en collision avec des protons (ou des ions) du LHC.

CONSEIL DU CERN

Composition au 31 décembre 2018

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

M. J. Schieck
S.E. M^{me} E.
Tichy-Fisslberger

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. F. Rivasseau

Grèce

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

Hongrie

M. P. Lévai
M. I. Szabó

Israël

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

Italie

S.E. M. G. L. Cornado
M. F. Ferroni

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^{me} A. L. Nunes Barata

Roumanie

M. F. Buzatu
M^{me} A. Ghinescu

Royaume-Uni

M^{me} C. Durkin
M. M. Thomson

Slovaquie

S.E. M. J. Podhorský
M. B. Sitár

Suède

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

Suisse

M. G. Haefliger
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. Adžić
S.E. M. D. Zlatanović

Slovénie

M. J. Štromajer
M. D. Zavrtanik

ÉTATS MEMBRES ASSOCIÉS

Inde

M. A. Mohanty
M. A. Srivastava

Lituanie

M. J. Banys
S.E. M. A. Krivas

Pakistan

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

Turquie

M. Z. Demircan
M. U. Güneş

Ukraine

M. B. Grinyov
M. A. Zagorodniy

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. R. Cousins
M^{me} B. Gavela
M^{me} B. Heinemann
M. M. Huyse
M. G. Martinelli
M. H. Montgomery
M. Y. Nir
M. K. Redlich
M. V. Rubakov
M^{me} H. Schellman
M^{me} M.-H. Schune

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. J. D'Hondt

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
représentants par État
membre et État membre
associé

TREF (FORUM TRIPARTITE SUR LES CONDITIONS D'EMPLOI)

Présidente

M^{me} B. Åsman
(Suède)

Membres

Un représentant par État
membre

COMITÉ D'AUDIT

Président

M. O. Malmberg
(Finlande)

Membres

Au moins un délégué du
Conseil, nommé par le
Conseil
Au moins deux membres
experts externes, nommés
par le Conseil

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

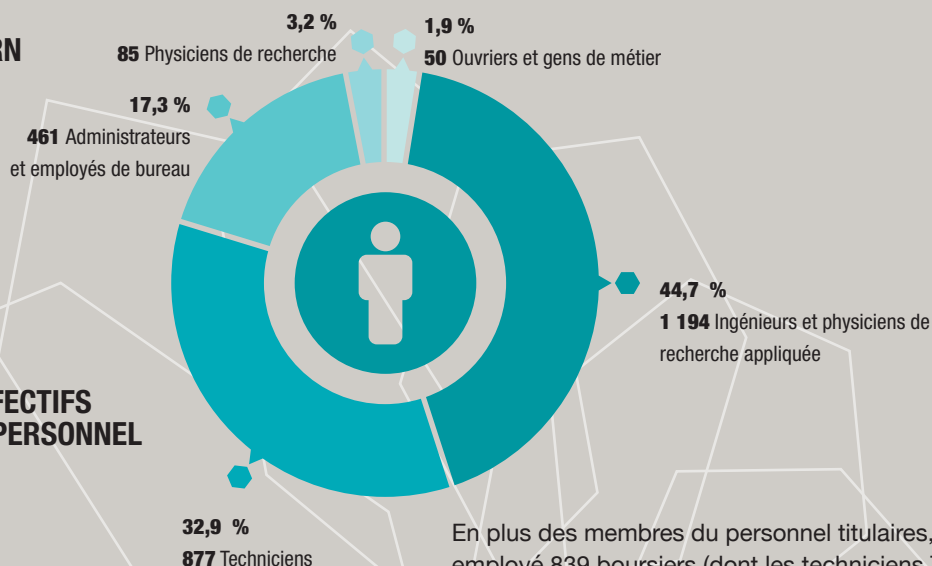
Advanced Wakefield Experiment (AWAKE)
CERN Neutrino Platform
Extra Low Energy Antiproton (ELENA)
Future Circular Collider Study (FCC)
High Intensity and Energy ISOLDE (HIE-ISOLDE)
High-Luminosity LHC (HL-LHC)
LHC Injectors Upgrade (LIU)
Linear Collider Studies (CLIC and LCS)
Physics Beyond Colliders (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
2 667 personnes



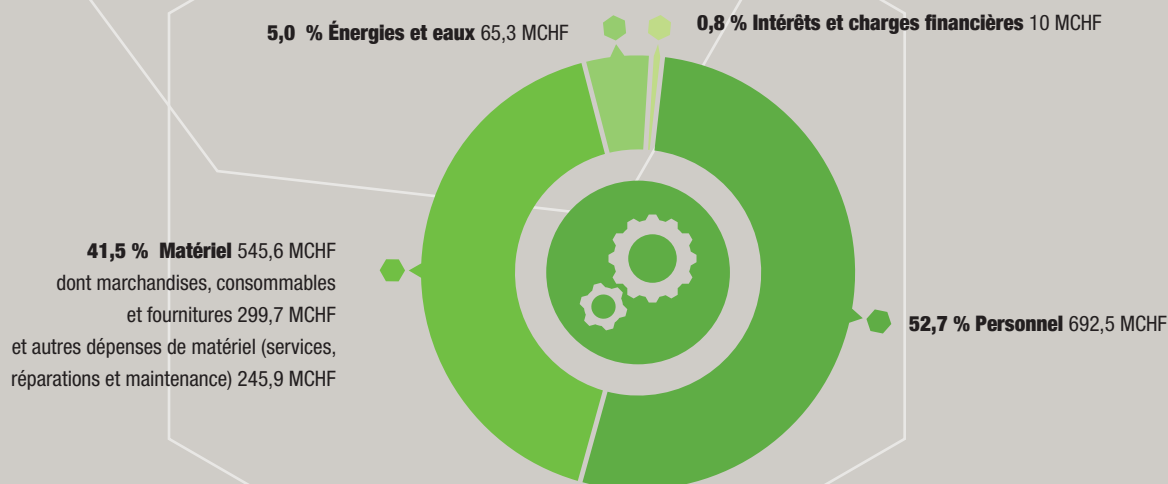
ÉVOLUTION DES EFFECTIFS DES MEMBRES DU PERSONNEL TITULAIRES

2014	2 524
2015	2 531
2016	2 560
2017	2 633
2018	2 667

En plus des membres du personnel titulaires, le CERN a employé 839 boursiers (dont les techniciens TTE), formé 547 étudiants et apprentis, et accueilli 1 320 attachés en 2018. L'infrastructure et les services du CERN sont utilisés par une grande communauté scientifique, représentant 12 569 utilisateurs (voir p. 12).

DÉPENSES DU CERN

Total des dépenses 1 313,4 MCHF



En 2018, 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. 33).

CERN
Esplanade des Particules 1
Case postale
1211 Genève 23
Suisse
home.cern/fr

Soixante-quatrième 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.cern/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/go/annual-progress-report-2018>

Le Rapport annuel 2018 du Transfert de connaissances au CERN (en anglais) est disponible à l'adresse : <http://kt.cern/about-us/annual-report>

Le Rapport annuel openlab 2018 (en anglais) est disponible à l'adresse : <http://openlab.cern/resources/annual-reports>

Le Rapport annuel CERN & Society 2018 (en anglais) est disponible à l'adresse : <http://cern.ch/go/cernandsociety2018>

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-2018>

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

Images :

World Economic Forum : p. 6
Robert Hradil, Monika Majer/ProStudio22.ch : p. 13
Dune collaboration : p. 19, gauche
MARS Bioimaging Ltd : p. 31
Morten Nørulf/BSBF : p. 33
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 978-92-9083-531-8 (version papier)
ISBN 978-92-9083-532-5 (version électronique)

DOI : 10.17181/RapportAnnuel2018
<http://dx.doi.org/10.17181/RapportAnnuel2018>

© Copyright 2019, CERN

