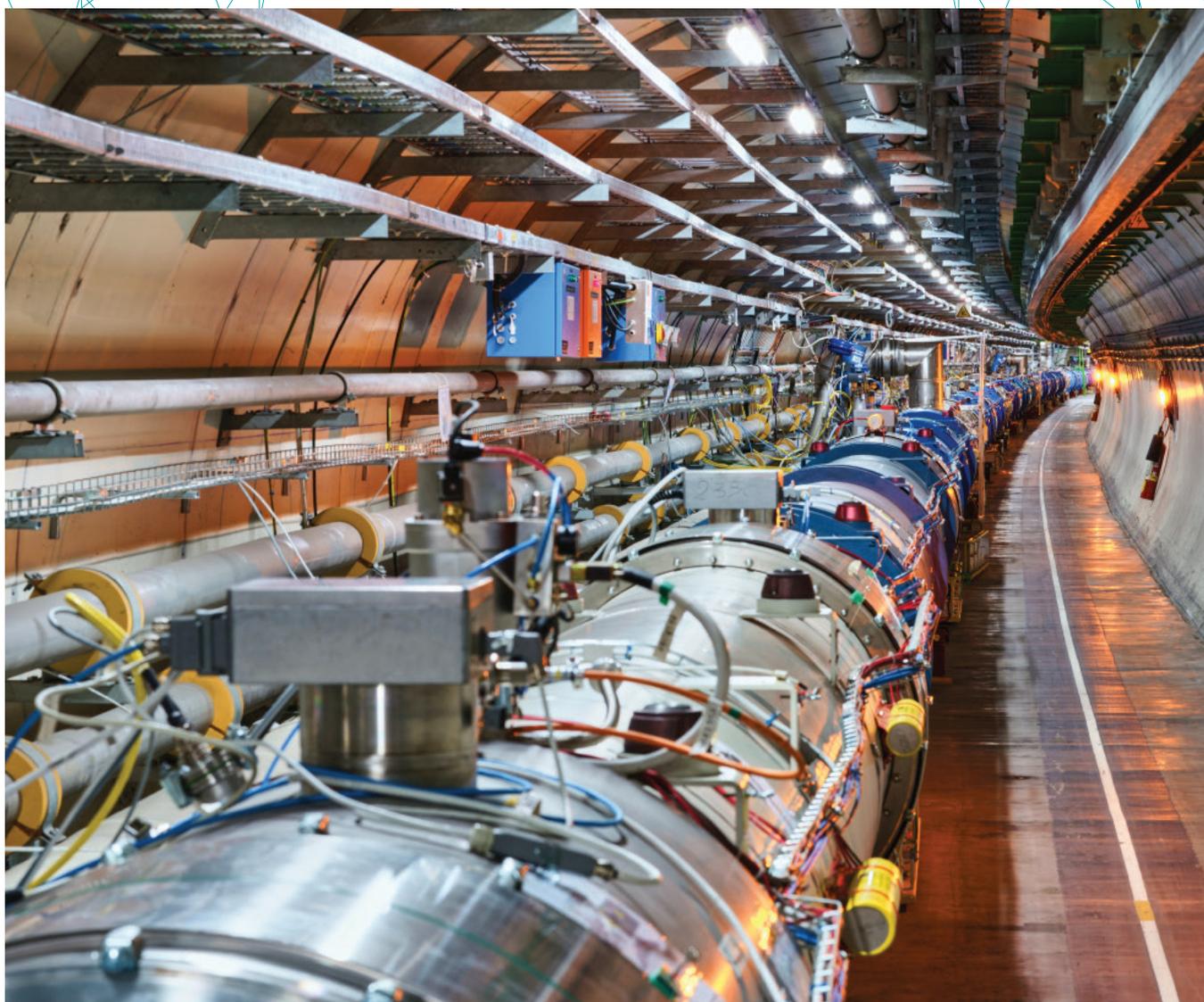


# LES MACHINES DES DÉCOUVERTES

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

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





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

## LE LHC A FOURNI AUX EXPÉRIENCES

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

### UNE BRILLANTE ANNÉE POUR LE LHC

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

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

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

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

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

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

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



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

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

## LE COMPLEXE D'ACCÉLÉRATEURS À PLEIN RÉGIME

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

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

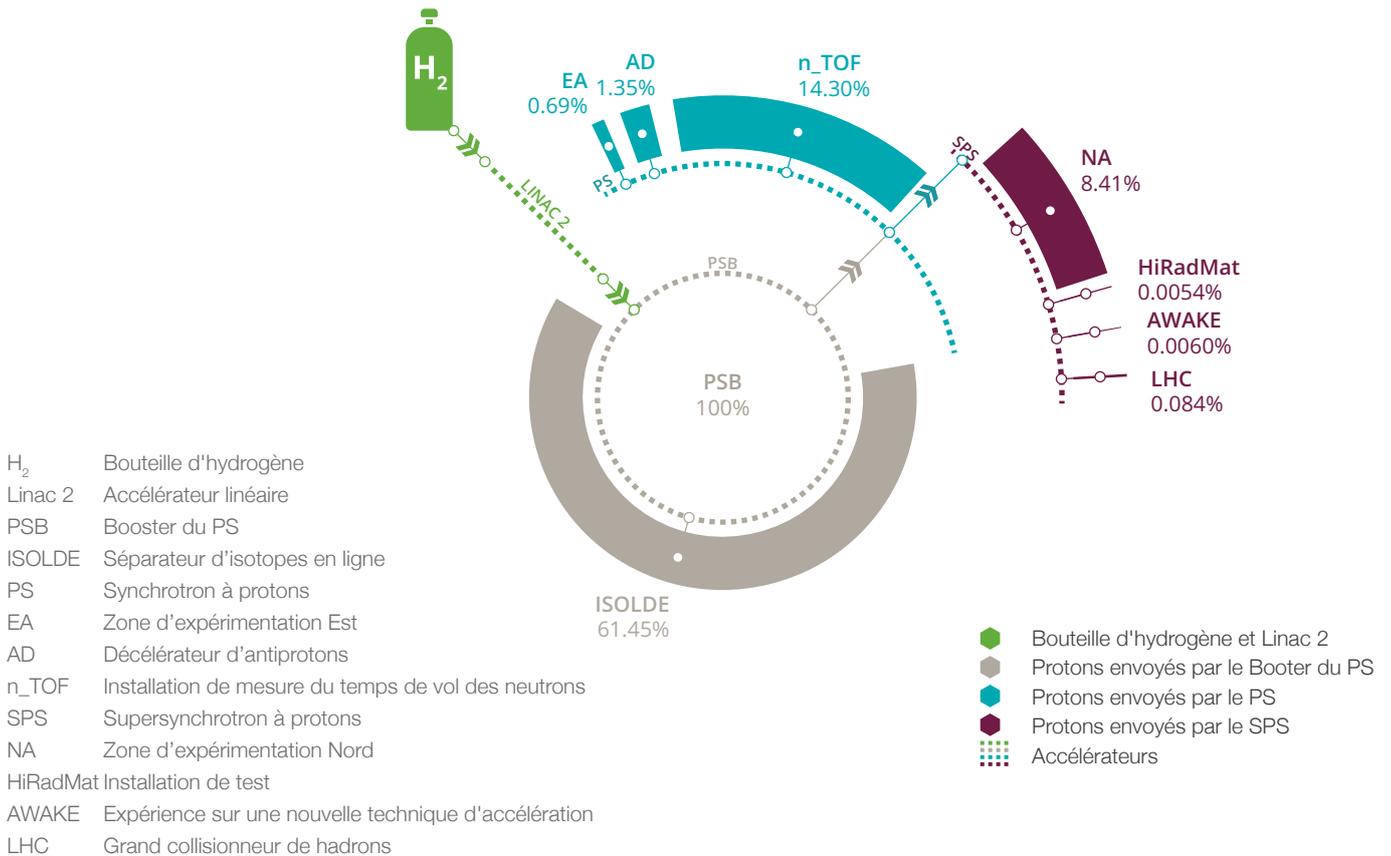
approche les 60 ans ! Le système de suivi des anomalies des accélérateurs (« *Accelerator fault tracking system* », AFT), mis en place dans le LHC en 2015, est maintenant déployé dans tout le complexe d'accélérateurs. Il fournit en continu des données sur la disponibilité des accélérateurs, indiquant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

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

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

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

## LE CHEMINEMENT DES PROTONS



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

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

### Pour un souffle d'air

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

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

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

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

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

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



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

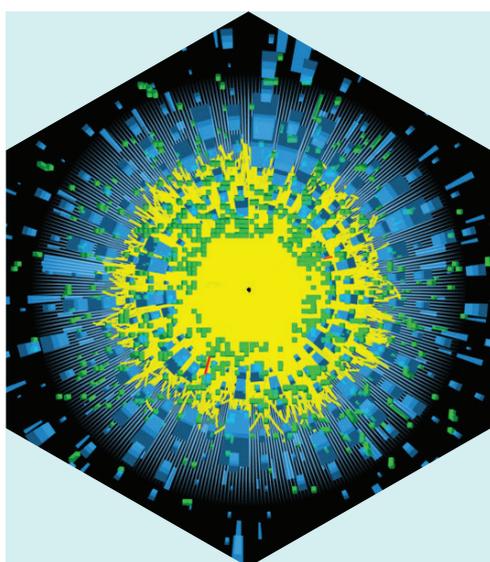
## UN IMPORTANT PROGRAMME DE CONSOLIDATION

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

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

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

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



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

## Une gorgée de xénon

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

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

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

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

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

## UN MILLIARD DE COLLISIONS

## PAR SECONDE AU CŒUR DES

## GRANDS DÉTECTEURS DU LHC.



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

### Une nouvelle moisson de collisions

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

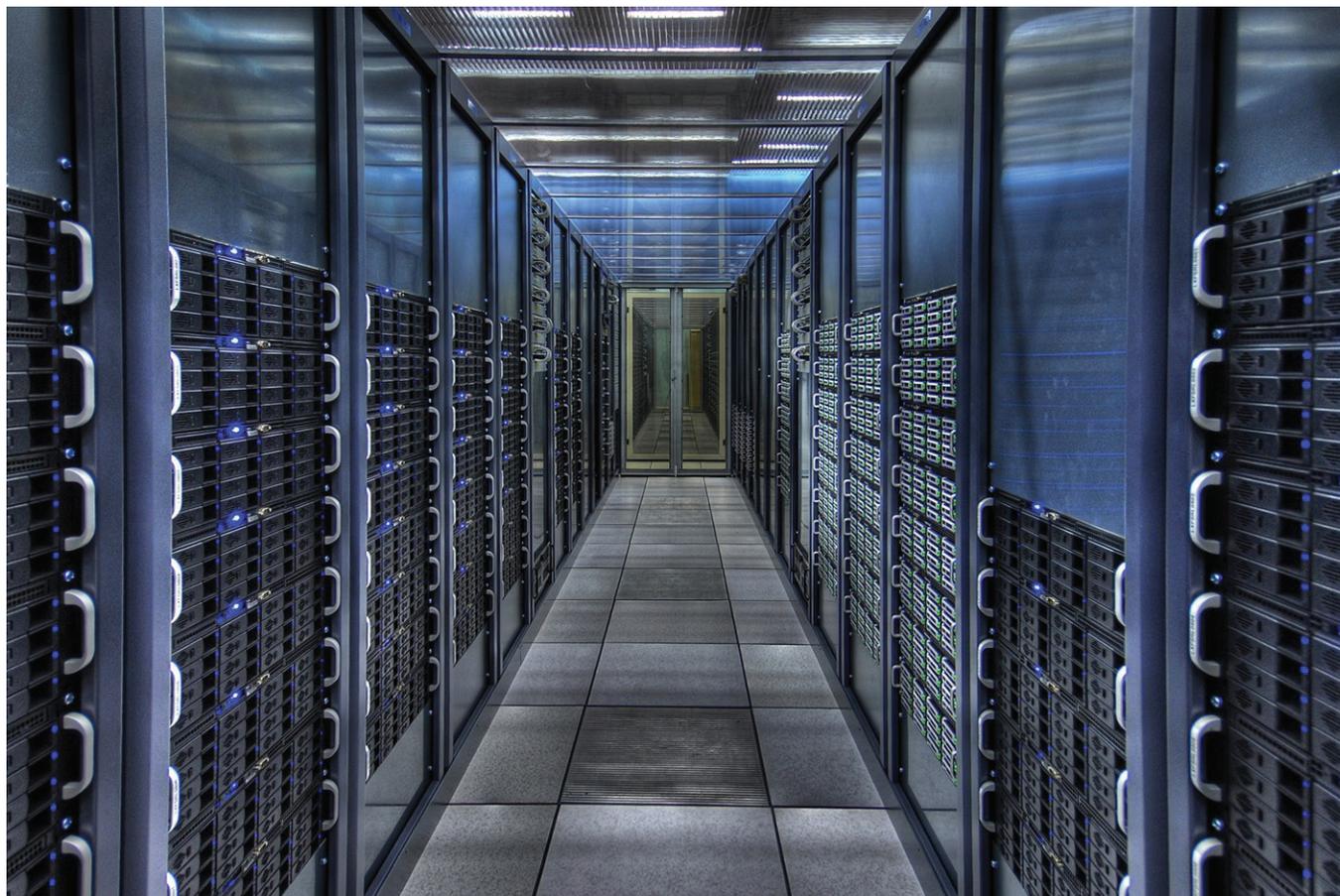
CMS a débuté l'année avec une transplantation de son cœur de pixels. Le détecteur le plus proche du point de collision, le trajectographe à pixels, a été remplacé par un nouveau dispositif formé d'une couche supplémentaire et de 124 millions de pixels au lieu de 66. Améliorant la précision de

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

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

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

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



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

## INFORMATIQUE : GÉRER LE DÉLUGE DE DONNÉES

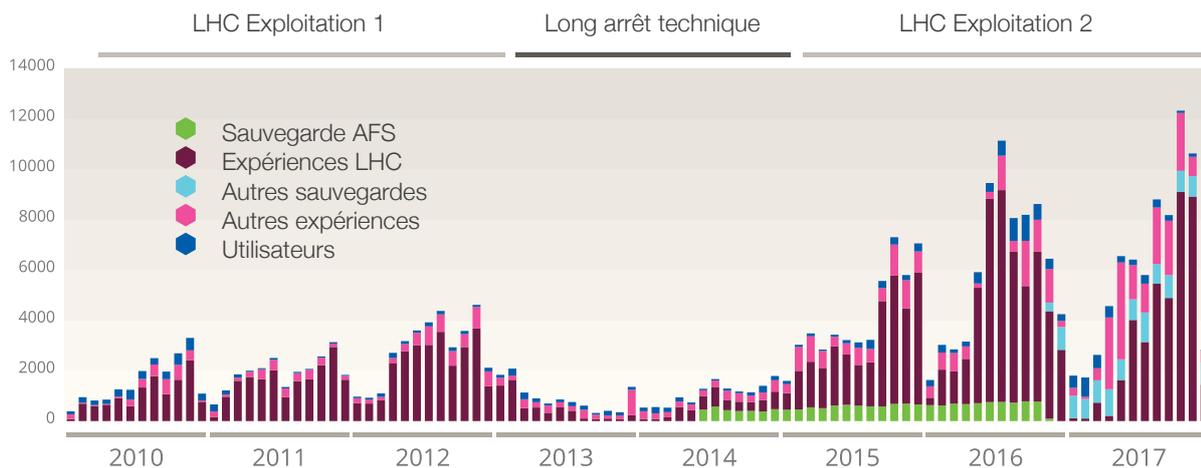
Cette année encore, l'infrastructure informatique du CERN a fait face à un déluge de données du LHC et a su le gérer avec succès. En effet, bien que les expériences aient globalement fait des progrès considérables pour réduire le nombre de fichiers dérivés sauvegardés sur bandes, plusieurs records de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

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

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

## LA GRILLE TOURNÉE VERS L'AVENIR

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



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

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

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

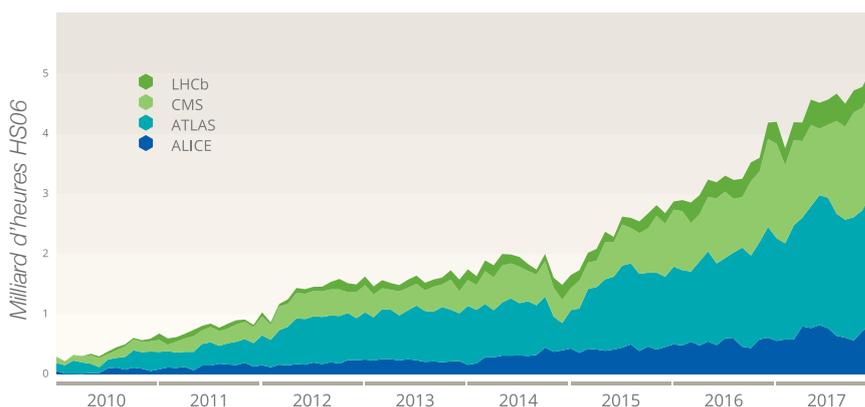
En ce qui concerne l'avenir, les besoins informatiques prévisionnels pour le LHC à haute luminosité excèdent de très loin ceux mobilisés pour l'actuelle seconde phase

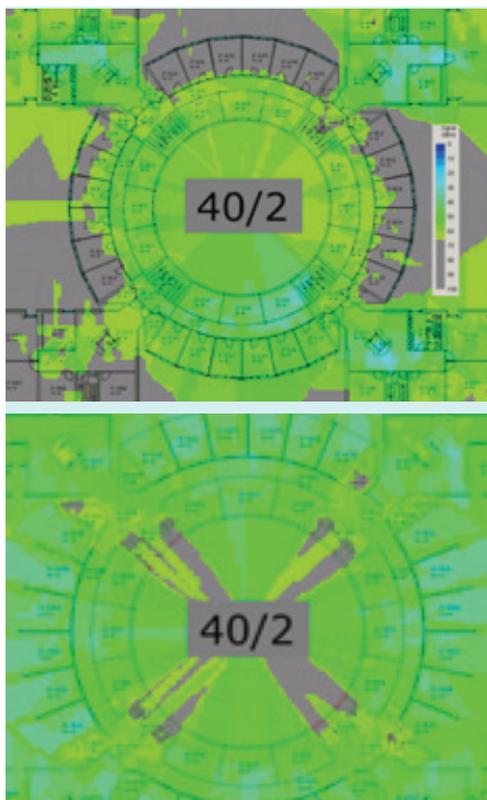
d'exploitation et ceux prévus pour la troisième phase d'exploitation. Les besoins en capacité de stockage et de calcul seront supérieurs de plusieurs ordres de grandeur à ce que, à budget constant, les projections en termes de progrès technologiques permettent d'espérer. Pour remédier à ce problème,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

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

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

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





## Le déploiement du wi-fi franchit des étapes importantes

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

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

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

## LA SCIENCE DANS LES NUAGES

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

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

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

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

## ÉDUCER ET PARTAGER

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

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



## Le CERN inaugure son second hub réseau

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

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

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

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

## STIMULER LA COLLABORATION

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

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