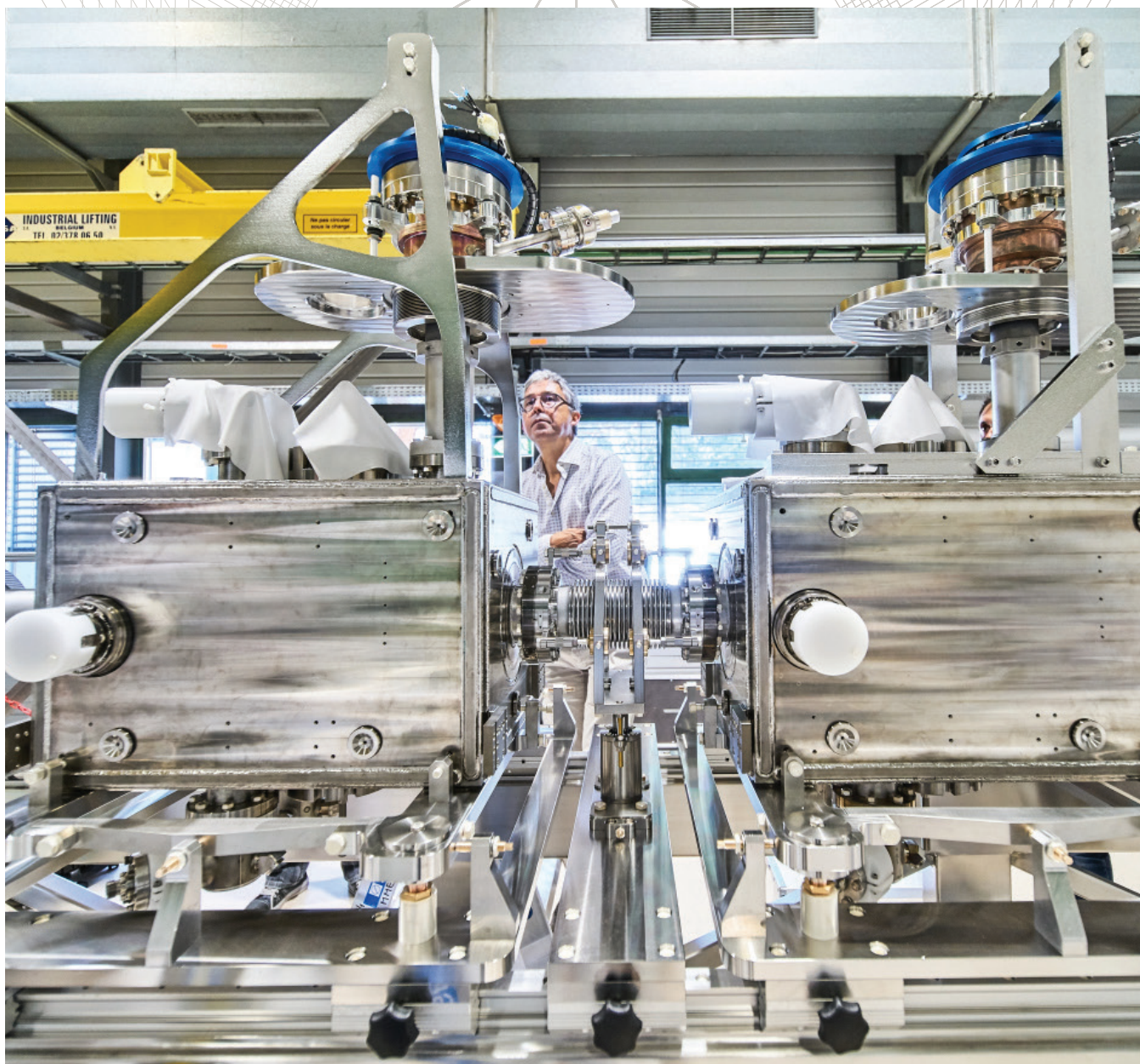


CONSTRUIRE L'AVENIR

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

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





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

LA HAUTE LUMINOSITÉ ACCÉLÈRE

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



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

À LA POINTE DES ESSAIS

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

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



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

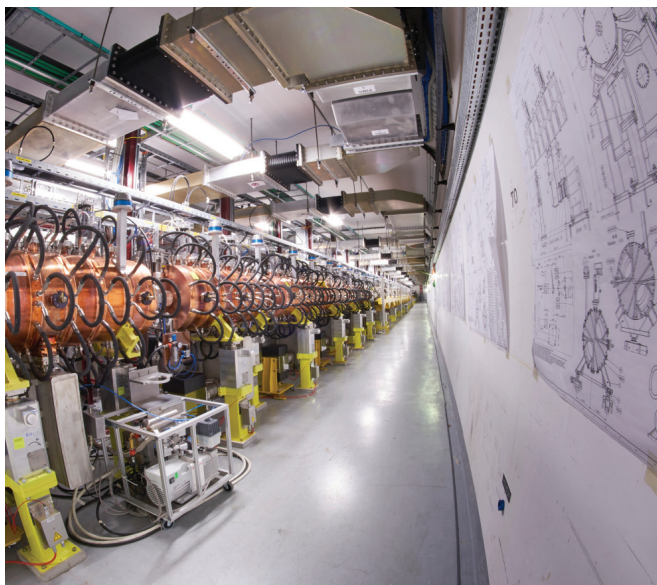
Le hall de test des aimants supraconducteurs, dispositif essentiel pour le LHC à haute luminosité et les accélérateurs du futur, a poursuivi sa rénovation. Un banc de test vertical, capable de délivrer des intensités de courant allant jusqu'à 30 000 ampères, a été mis en service. Un banc horizontal pour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

LA FAMILLE DES ACCÉLÉRATEURS S'AGRANDIT

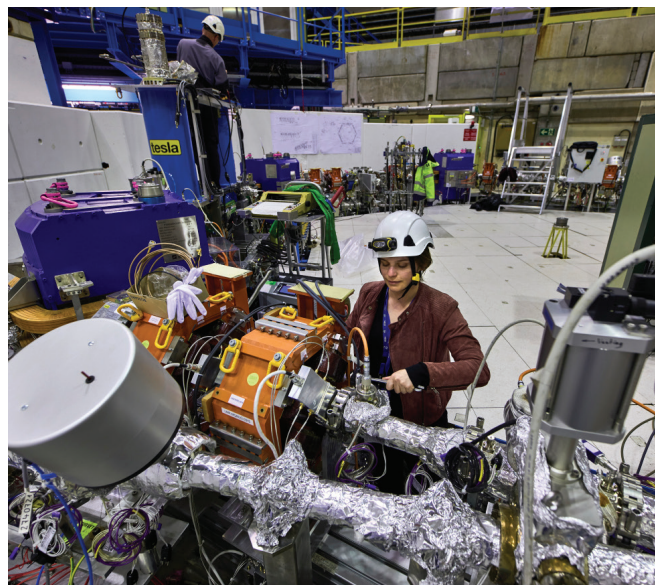
Le 9 mai, la famille des accélérateurs du CERN s'est agrandie avec l'arrivée de son plus jeune membre, l'accélérateur linéaire 4 (Linac 4), le premier accélérateur inauguré depuis le démarrage du LHC en 2008. Il sera raccordé au Booster du PS en 2019, puis remplacera le

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

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



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



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

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

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

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

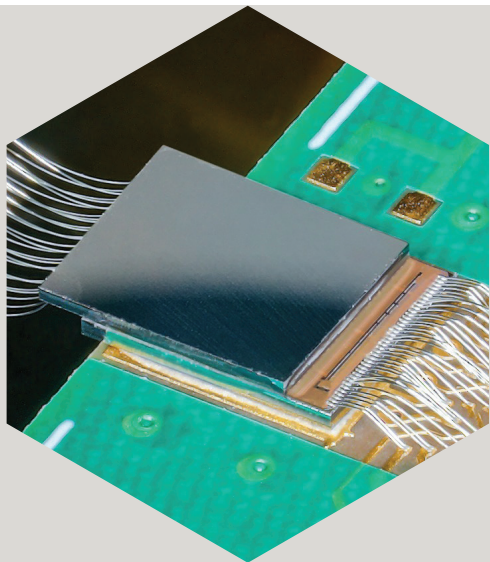
En 2016 et 2017, un grand nombre d'activités durant l'arrêt technique hivernal prolongé ont été consacrées au projet LIU. Une campagne de décâblage d'envergure a été menée au Booster du PS, au PS et au SPS, au cours de laquelle près de 13 000 câbles obsolètes ont été retirés. Au SPS, la campagne pour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

L'ANTIMATIÈRE CIRCULE DANS SON NOUVEAU DÉCÉLÉRATEUR

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

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

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



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

LES COLLISIONNEURS DU FUTUR S'ESQUISSENT

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

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

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

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

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

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

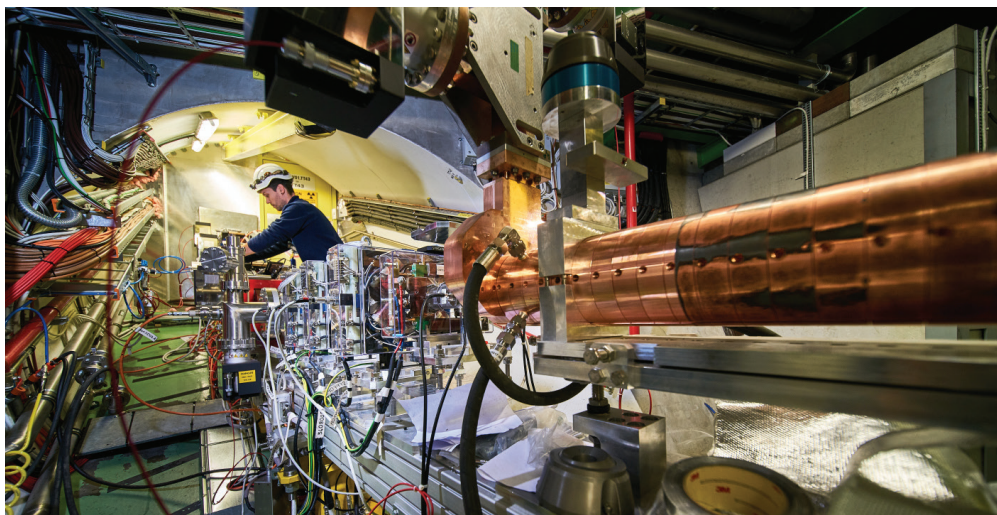
collaboration entre le CERN, LNL (Italie) et STFC (Royaume-Uni) étudie les performances maximales de la technologie niobium-cuivre et s'intéresse à d'autres matériaux, comme le niobium-étain. Des travaux de R&D en collaboration avec les laboratoires JLAB et FNAL (États-Unis) portent sur les techniques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

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

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

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

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



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

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

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

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

VERS UNE RÉVOLUTION DE L'ACCÉLÉRATION

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

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

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

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