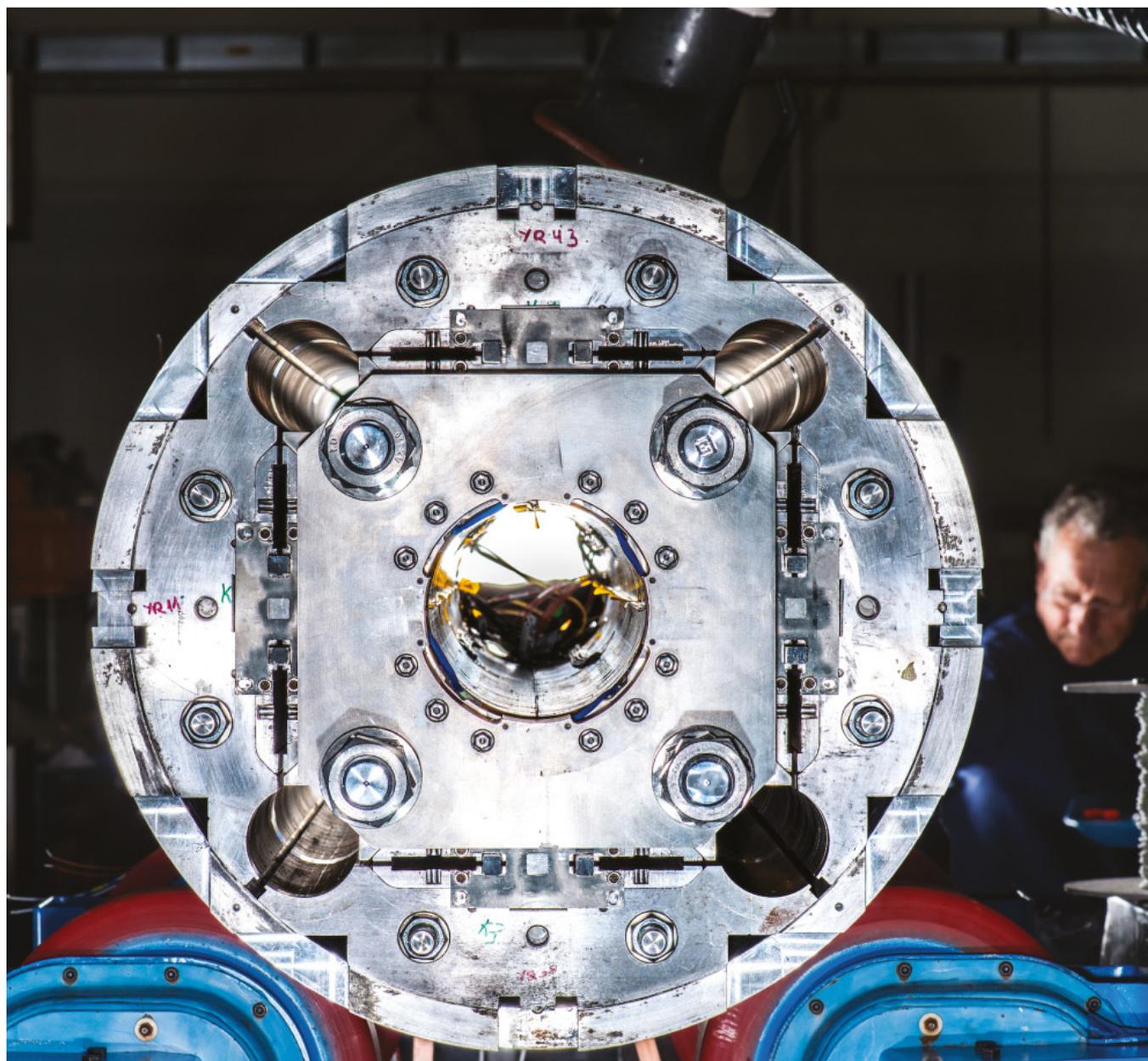


CONSTRUIRE L'AVENIR

Au CERN, physiciens, ingénieurs et techniciens imaginent, conçoivent et construisent les installations qui permettront à la communauté scientifique d'enrichir les connaissances fondamentales. Du LHC à haute luminosité aux accélérateurs des générations futures, en passant par une nouvelle machine pour percer les mystères de l'antimatière, les projets ont bien avancé en 2016.

Vue d'un prototype court d'un aimant quadripôle pour le LHC à haute luminosité. (OPEN-PHO-ACCEL-2017-010-2)





Une scientifique contrôle très précisément la géométrie de la bobine d'un aimant dipôle pour le LHC à haute luminosité.
(OPEN-PHO-ACCEL-2017-010-1)

PLEINE VITESSE POUR LA HAUTE LUMINOSITÉ

La cadence s'accélère pour le Grand collisionneur de hadrons à haute luminosité. Dans les ateliers, en Europe, aux États-Unis ou au Japon, les équipes s'affairent pour développer le LHC de deuxième génération, qui doit entrer en service en 2026. Le LHC à haute luminosité augmentera d'un facteur 5 à 10 le nombre de collisions pour atteindre une luminosité intégrée de 250 femtobarns inverses par an. Avec un nombre de collisions accru, les physiciens pourront étudier en détail les phénomènes découverts par le LHC. Pour réaliser cette amélioration majeure, il faut installer des équipements sur 1,2 kilomètres de l'accélérateur actuel.

Deux fois plus de particules circuleront dans la machine ; elles seront réparties dans des paquets plus denses. De nouveaux aimants de focalisation, plus puissants, seront chargés de resserrer les paquets de particules avant leur croisement au centre des expériences ATLAS et CMS. Vingt-quatre aimants quadripôles de deux longueurs différentes sont ainsi en cours de fabrication.

Ces aimants font appel au niobium-étain pour générer des champs magnétiques de 11,4 teslas, contre 8,3 teslas pour ceux du LHC. La mise en œuvre de ce composé est complexe. Au CERN, la production de câbles de niobium-étain a commencé depuis 3 ans : plus de 21 kilomètres ont été produits. Les procédés délicats utilisés pour former des bobines d'aimants à partir de ces câbles ont été validés.

La mise au point des aimants s'est poursuivie dans le cadre de la collaboration entre le CERN et l'étude LARP (*LHC Accelerator Research Program*), qui réunit plusieurs laboratoires des États-Unis. Alors que des prototypes courts étaient testés avec succès, la production des prototypes à taille réelle était lancée. La première bobine, longue de

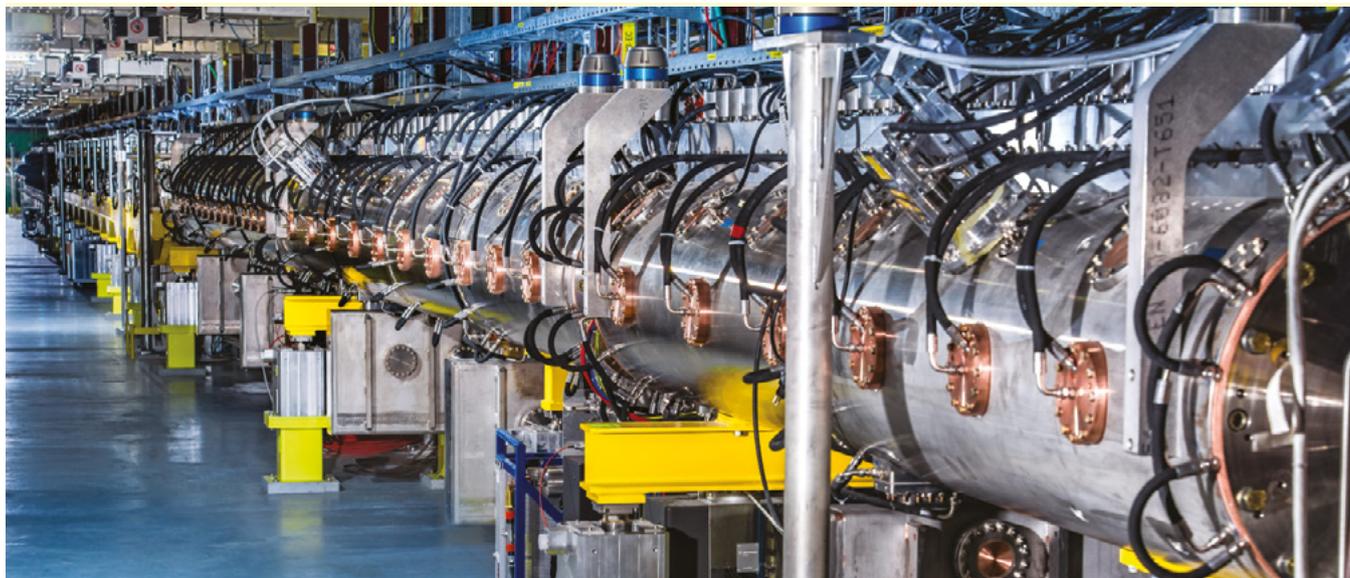
7,5 mètres, a été fabriquée au CERN, et quatre autres, de 4,5 mètres, étaient en cours d'assemblage aux États-Unis. Par ailleurs, des aimants de courbures (dipôles), plus courts et plus puissants que ceux du LHC, également à base de niobium-étain, sont en développement. Au CERN, la fabrication du prototype à taille réelle a été lancée. Par ailleurs, en janvier, le premier aimant correcteur était prêt, ouvrant la voie à la fabrication de 35 autres aimants correcteurs du même type.

Pour tester et qualifier les aimants, le hall de test des aimants a été entièrement rénové. De nouveaux bancs d'essai ont été mis en service, permettant d'accueillir des aimants de plus grands diamètres et délivrant des intensités de courant allant jusqu'à 20 000 et 30 000 ampères.

Les cavités dites « crabes » figurent parmi les innovations majeures du futur collisionneur. Elles donneront une impulsion transversale aux paquets pour les orienter avant la collision : leur utilisation permettra de tripler la luminosité instantanée. Deux prototypes ont été construits, au CERN et aux États-Unis, et un prototype de cryostat en titane pour ces cavités a été testé avec succès.

Avec plus de particules en circulation, la protection de la machine doit être renforcée. Cette protection repose sur des collimateurs chargés d'absorber les particules qui s'éloignent de la trajectoire. Le choix de nouveaux collimateurs a été validé après des tests concluants.

Les options retenues pour le projet LHC à haute luminosité – notamment les grands ouvrages souterrains autour des expériences ATLAS et CMS, et une configuration nouvelle des équipements – ont été validées par un groupe d'experts internationaux. L'étude sur les coûts et le calendrier réalisée par ce groupe a été publiée en 2016.



Vue de l'accélérateur Linac 4 de 86 mètres de long. En 2016, le Linac 4 a atteint son énergie nominale de 160 MeV. Il deviendra le premier maillon de la chaîne d'accélération du LHC après 2020. (OPEN-PHO-ACCEL-2017-011-3)

LE NOUVEL ACCÉLÉRATEUR LINÉAIRE ATTEINT SON OBJECTIF D'ÉNERGIE

Le nouvel accélérateur linéaire du CERN est désormais opérationnel. Le 25 octobre, le Linac 4 a accéléré un faisceau jusqu'à son énergie nominale, soit 160 MeV. Après neuf ans de développement, cette performance marque une étape importante.

Après le long arrêt prévu en 2019-2020, le Linac 4 remplacera le Linac 2. Il deviendra ainsi le premier maillon de la chaîne des accélérateurs et portera l'énergie de 50 MeV à 160 MeV. Sa mise en service est une étape cruciale du projet d'amélioration des injecteurs, qui vise à préparer les injecteurs du LHC à l'exploitation à haute luminosité.

Le Linac 4 enverra des ions hydrogène négatifs (soit un atome d'hydrogène et un électron supplémentaire) vers le Booster du PS, deuxième accélérateur de la chaîne d'injection. L'utilisation d'ions hydrogène, une première au CERN, contribuera à augmenter la luminosité du LHC en vue du projet LHC à haute luminosité, en permettant la production de faisceaux haute brillance.

Le Linac 4, long de 86 mètres, comprend quatre types de structures qui accélèrent les particules en les faisant passer par différents seuils. Les cavités accélératrices des deux derniers seuils, mises en service en 2016, ont porté le faisceau d'essai à 100 MeV en juillet, puis à 160 MeV quelques mois plus tard.

Une fois les paramètres des faisceaux optimisés, un moyen innovant de transférer les particules du Linac 4 vers le Booster du PS a été testé : le faisceau d'ions hydrogène de 160 MeV est envoyé sur une feuille de carbone très mince, qui dépouille les ions de leurs deux électrons. En 2017, le Linac 4 entrera dans une phase de tests, qui durera un an.

LES EXPÉRIENCES SUR LA VOIE DU PERFECTIONNEMENT

Lorsque le LHC fonctionnera à haute luminosité, les expériences devront être capables d'enregistrer cinq à dix fois plus de données : 140 à 200 collisions de protons se produiront à chaque croisement. Les collaborations LHC travaillent à des améliorations majeures de leur détecteur, qui entreront progressivement en fonction d'ici à 2025. L'objectif est d'augmenter l'efficacité des systèmes de déclenchement et d'acquisition, d'améliorer la granularité des trajectographes et de renforcer la résistance des parties les plus exposées aux radiations.

LHCb prépare une métamorphose complète pour la troisième période d'exploitation, en 2021. Quasiment tous les trajectographes seront remplacés et l'électronique de lecture de tous les sous-détecteurs sera renouvelée. L'expérience passera ainsi d'une fréquence de lecture de 1 à 40 MHz. Les études de conception ont été finalisées en 2016 et les prototypes sont en cours de développement. LHCb va également remplacer son système de déclenchement matériel par un système uniquement formé de logiciels fonctionnant dans une nouvelle ferme de processeurs.

ALICE se prépare aussi à une grande transformation. La construction d'un nouveau trajectographe interne a démarré : d'une surface de 10 m², il est composé de nouveaux capteurs à pixels offrant une excellente résolution pour un coût modique. La chambre à projection temporelle, le grand trajectographe entourant le détecteur interne, sera dotée de détecteurs à gaz GEM (*Gas Electron Multiplier*) pour augmenter sa vitesse de prise de données. La construction de l'électronique de lecture a commencé. ALICE développe également un système de lecture et de reconstruction des événements en ligne, sans déclenchement préalable, sur une ferme de processeurs.



En 2016, CMS a terminé l'assemblage de son nouveau détecteur à pixels. Il améliorera la reconstruction des traces des particules chargées au plus près des collisions. (CERN-PHOTO-201609-239-6)

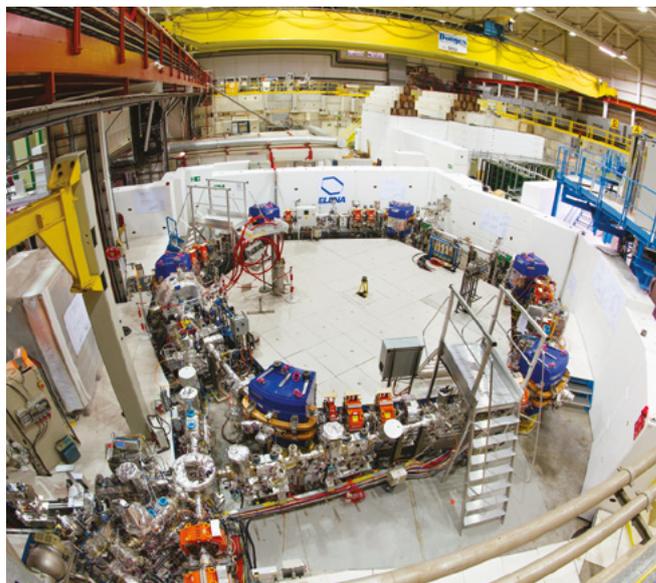
CMS a terminé l'assemblage de son nouveau détecteur à pixels qui entrera en service en 2017 : il est doté de 124 millions de pixels contre 66 pour son prédécesseur. La couche interne est plus proche du point de collision et la quantité de matière est réduite pour une meilleure précision des mesures.

Pour le LHC à haute luminosité, CMS va ajouter des détecteurs à gaz GEM sur le système de détection des muons, dans les régions à petits angles, pour améliorer la reconstruction des trajectoires. Quelques prototypes de chambres GEM ont été installés sur le détecteur et seront testés en 2017.

Durant le troisième long arrêt technique, après 2023, CMS va également remplacer le trajectographe et les bouchons du calorimètre électromagnétique. Les capteurs au silicium, qui composeront le futur détecteur, sont en cours de développement.

Le détecteur ATLAS sera équipé de deux nouveaux détecteurs à muons en forme de roue pour les particules émises à angles modérés par rapport à la ligne de faisceau. Les modules de ces roues sont formés d'un assemblage de détecteurs à gaz Micromegas et TGC (*Thin Gap Chambers*), contribuant à la mesure de la trajectoire des muons ainsi qu'au déclenchement. Un module de Micromegas a été assemblé et testé au CERN. Les premières cartes électroniques ont été produites et la fabrication de la structure mécanique des roues a débuté.

Les équipes d'ATLAS conçoivent également un nouveau trajectographe interne. Un nouveau système de déclenchement, combinant les informations des chambres à muons et des calorimètres pour une sélection des événements plus élaborée, a été développé pour être installé et mis en service en 2017.



Vue de l'anneau ELENA de 30 mètres de circonférence. Le nouveau décélérateur d'antimatière a démarré les tests avec faisceau en novembre 2016. (CERN-PHOTO-201611-300-2)

UN NOUVEL ANNEAU POUR RALENTIR L'ANTIMATIÈRE

Avec ses 30 mètres de circonférence, on dirait un accélérateur miniature. Contrairement à la plupart des accélérateurs du CERN, ELENA se laisse embrasser du regard. Mais la grande différence est que cette machine n'accélère pas, mais décélère les particules. Après cinq ans de développement, l'anneau de décélération ELENA (*Extra Low ENergy Antiproton*) a effectué en novembre ses premiers tests avec faisceau.

La mission d'ELENA est de ralentir encore davantage les antiprotons déjà décélérés par le Décélérateur d'antiprotons (AD), installation qui envoie des antiprotons aux expériences étudiant l'antimatière. ELENA réduira leur énergie d'un facteur 50, de 5,3 MeV à seulement 0,1 MeV. Plus les antiprotons sont lents, plus il est facile pour les expériences de les piéger. ELENA recevra ses premiers antiprotons de l'AD en 2017. En attendant, les premiers essais ont été menés au moyen d'une source d'ions indépendante.

Décélérer des faisceaux est aussi compliqué que les accélérer. À basse énergie, les faisceaux sont plus sensibles aux perturbations extérieures, ce qui les rend plus difficiles à contrôler. C'est pourquoi ELENA est doté d'aimants optimisés pour fonctionner à des niveaux de champ très faibles. La construction d'ELENA prendra fin en 2017, avec l'installation du système de refroidissement par électrons. Ce dispositif permettra d'augmenter la densité des faisceaux ; avec des faisceaux plus lents et plus denses, les expériences pourront piéger de 10 à 100 fois plus d'antiprotons, ce qui contribuera au progrès des études sur les propriétés de l'antimatière. Six expériences ont été retenues pour recevoir les antiprotons d'ELENA, dont la première, GBAR, démarrera son installation en 2017.

QUEL ACCÉLÉRATEUR POUR LE FUTUR ?

Les physiciens esquissent l'avenir de la physique des hautes énergies au-delà de 2035. Deux options de collisionneur, circulaire ou linéaire, sont envisagées. L'objectif est de présenter une étude préliminaire en 2018, pour la mise à jour de la stratégie européenne pour la physique des particules en 2019, qui définira les grandes orientations.

La collaboration **FCC (Future Circular Collider)**, qui réunit plus d'une centaine d'instituts et une dizaine d'entreprises de 32 pays, étudie la possibilité d'un collisionneur circulaire d'environ 100 kilomètres de circonférence. Il ferait entrer en collision des hadrons (comme le LHC, mais à une énergie sept fois plus élevée, soit 100 TeV) ou des leptons. L'étude porte également sur un LHC à plus haute énergie dans le tunnel existant.

En 2016, l'intérêt pour la physique des deux scénarios, électron-positon et proton-proton, a été démontré. L'étude de l'optique (manière dont les faisceaux sont orientés et concentrés) s'est achevée. L'emplacement du tunnel dans le bassin genevois a été étudié et la configuration des tunnels, cavernes d'expérimentation et constructions de surface, ébauchée. Ces études montrent la faisabilité de l'infrastructure, mais aussi la compatibilité d'un tunnel de 100 km de long avec la géologie du bassin genevois.

Côté matériel, le premier prototype a vu le jour ; il s'agit d'un écran de faisceau. Placé à l'intérieur du tube de faisceau, il contribue à maintenir l'ultra-vide sans lequel les particules ne pourraient pas circuler. La machine repose sur une technologie clé : des aimants à champs très élevés de 16 teslas - le double de celui des aimants du LHC. Ces aimants du futur, utilisant des matériaux supraconducteurs novateurs, sont développés dans le cadre du projet européen EuroCirCol, avec l'institut suisse Paul Scherrer, et en collaboration avec le programme américain de développement des aimants US-MDP. Quatre géométries de bobines sont à l'étude et une nouvelle bobine de démonstration a été définie pour une fabrication en 2017. Le développement de brins supraconducteurs en niobium-étain a été lancé, en collaboration avec plusieurs partenaires. La fabrication de l'aimant FRESCA2, qui permettra de tester les câbles, a été terminée. Des aimants utilisant des supraconducteurs haute température sont également à l'étude pour des utilisations très spécifiques.

Un outil de modélisation et de simulation pour l'exploitation d'un système large comme le FCC est en cours de développement dans le cadre d'un projet de R&D avec un partenaire industriel. Cet outil pourra aider des entreprises à améliorer leur efficacité énergétique.

Le projet **CLIC (Compact Linear Collider)** étudie la faisabilité d'un collisionneur linéaire électron-positon basé sur un concept novateur d'accélération à deux faisceaux, permettant d'atteindre des gradients d'accélération très élevés. Le projet a été redéfini avec une construction et une exploitation en trois étapes, à une énergie de collision



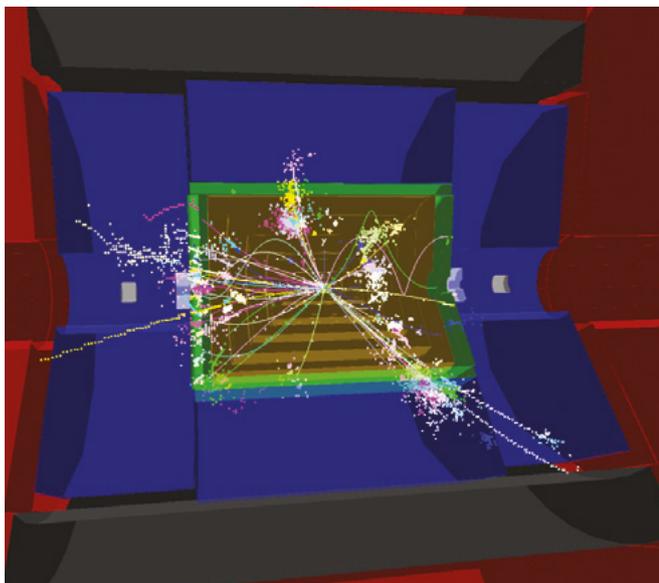
Le premier prototype du FCC, un écran de faisceau plus efficace pour dissiper la chaleur et maintenir l'ultra-vide. (CERN-PHOTO-201604-074-2)

de 380 GeV au démarrage, puis 1,5 TeV et enfin 3 TeV. Une nouvelle installation d'essai a été conçue, CLEAR (CERN Linear Electron Accelerator for Research), pour succéder à l'installation CTF3 qui a conclu ses travaux en 2016.

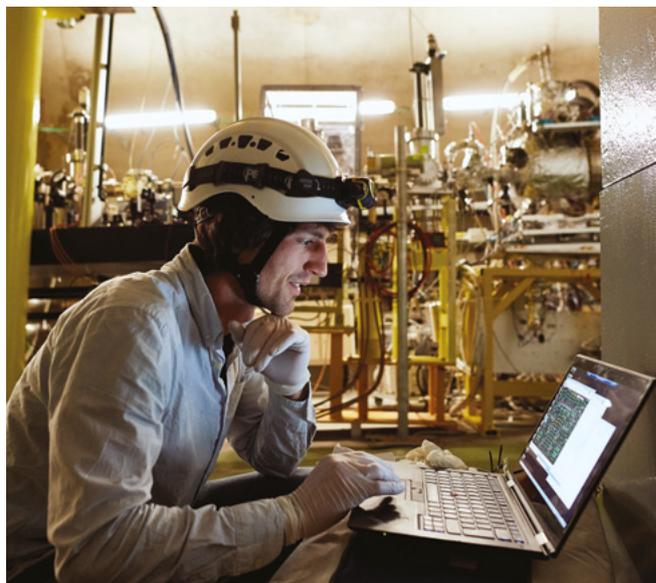
La réussite de CLIC suppose le développement de structures accélératrices très performantes pour atteindre des champs accélérateurs d'une centaine de mégavolts par mètre. Le développement de ces structures de très hautes fréquences s'est poursuivi, en intégrant notamment la mise en service en trois étapes. Les capacités de test ont été triplées. Le développement des klystrons utilisés pour fournir la puissance radiofréquence avec une grande efficacité s'est également poursuivi.

Les cavités accélératrices novatrices du CLIC peuvent intéresser d'autres domaines, notamment les lasers à électrons libres pilotés par un accélérateur. Ces installations fournissent une lumière laser particulière pour l'étude de matériaux, d'échantillons biologiques ou de processus moléculaires. Le CERN participe à une initiative européenne sur le sujet, qui soumettra une étude de conception en 2017. La collaboration CLIC, qui compte 75 instituts dans 28 pays, travaille de concert avec le projet cousin ILC (*International Linear Collider*) dans de nombreux domaines.

Qui dit nouveau collisionneur, dit **nouveaux détecteurs**. Une équipe au CERN planche sur les objectifs de physique et les expériences du futur. Un document présentant les études de physique possibles sur le boson de Higgs aux trois énergies du CLIC a été publié. Un trajectographe au silicium, servant à reconstituer la trajectoire des particules chargées, est à l'étude : une nouvelle architecture a été définie et des composants de silicium ont été testés avec un faisceau du SPS. Les travaux sur les détecteurs adaptés à un collisionneur circulaire définis par l'étude FCC ont également démarré.



Simulation d'une collision dans un concept de détecteur pour CLIC, projet de futur collisionneur linéaire électron-positon à l'étude. (OPEN-PHO-ACCEL-2017-009-3)



Un membre de la collaboration AWAKE effectue des tests dans le tunnel souterrain de l'expérience. AWAKE étudie l'utilisation du plasma pour accélérer les particules. (CERN-PHOTO-201612-314-9)

LA PHYSIQUE AU-DELÀ DES COLLISIONNEURS

La kyrielle d'expériences utilisant les accélérateurs du CERN illustre la diversité du programme de physique du Laboratoire (voir p. 13). Un groupe d'étude sur la physique au-delà des collisionneurs a été créé en 2016 pour explorer les possibilités de nouvelles expériences qui pourraient être menées auprès du complexe d'accélérateurs et des installations du CERN, et qui complèteraient l'actuel programme de physique avec collisionneur.

L'étude a été lancée en septembre 2016 lors d'un atelier qui a réuni plus de 300 physiciens de divers domaines. Elle a pour objectif de déterminer quelles expériences hors collisionneur pourraient être menées jusqu'en 2040 environ, c'est-à-dire pendant la durée d'exploitation prévue du LHC à haute luminosité, soit au CERN, soit éventuellement ailleurs, pour autant que le CERN puisse contribuer utilement. Le groupe d'étude devra communiquer des éléments lors de la prochaine mise à jour de la stratégie européenne pour la physique des particules, en 2019.

LA TECHNIQUE D'ACCÉLÉRATION QUI FAIT DES VAGUES

Une nouvelle technologie, qui permettrait aux accélérateurs d'atteindre des énergies plus élevées, est actuellement étudiée au CERN par l'expérience AWAKE (*Advanced Proton Driven Plasma Wakefield Acceleration Experiment*). Trois ans après l'approbation du projet, AWAKE a recueilli en décembre ses premières données.

AWAKE, une expérience de démonstration de principe, utilise des champs de sillage plasma pour accélérer des particules

chargées. L'accélération par champ de sillage plasma avec un faisceau laser et des électrons est une technologie éprouvée ; AWAKE va cependant tester cette technique avec des protons. Bien plus massifs, les protons pourraient créer une accélération plus puissante, sur une distance plus longue. AWAKE injecte un « paquet de protons pilote » provenant du Supersynchrotron à protons (SPS) dans une chambre à plasma, le plasma étant créé par ionisation d'un gaz avec un laser. Lorsque ce paquet de protons interagit avec le plasma, il se divise en plusieurs petits paquets (processus appelé automodulation). En traversant le plasma, ces paquets plus courts produisent un fort champ de sillage électrique. Un « faisceau témoin » d'électrons est injecté juste après le faisceau de protons. Il est alors accéléré par le champ de sillage des protons, à la manière d'un surfeur glissant sur une vague.

En 2016, la plupart des pièces de l'expérience ont été installées dont la chambre à plasma de dix mètres de long. Un premier faisceau d'essai l'a traversée en juin. Après plusieurs mois de mise en service et d'essais, la collaboration a pu observer pour la première fois l'automodulation de paquets de protons de haute énergie dans le plasma, signe de la création de forts champs électriques. Ce premier succès, étape majeure pour AWAKE, prouve que des champs de sillage peuvent être créés à partir de protons.

Le prochain défi de la collaboration est d'étudier l'accélération des électrons dans le sillage des paquets de protons. Si elle est validée, la technologie testée par AWAKE permettrait de produire des accélérations plusieurs centaines de fois plus puissantes que celles obtenues avec les cavités radiofréquence actuelles.

Avec la technologie des champs de sillage plasma, il pourrait être possible d'atteindre des énergies plus élevées et de produire des accélérateurs compacts, voire miniatures.