

Le gigantesque chantier de consolidation et de rénovation du LHC et de ses injecteurs a pris fin en 2014. Ci-dessus, l'une des dernières soudures pour refermer les lignes abritant les interconnexions entre les aimants supraconducteurs. (CERN-PHOTO-201404-084 – 7)

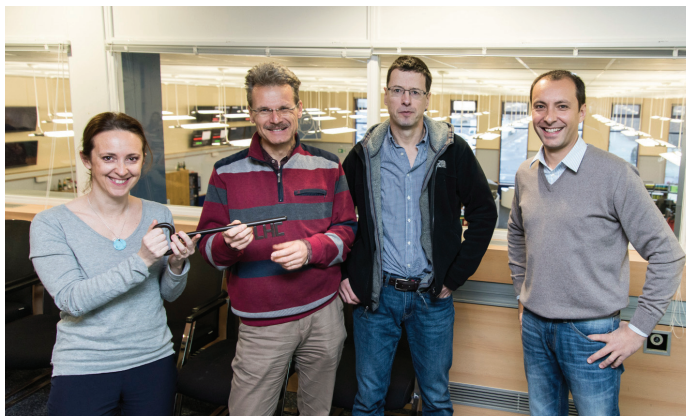
# Accélérateurs

Après 18 mois d'arrêt, le cœur du CERN s'est remis à battre à la fin du printemps. Les accélérateurs se sont tour à tour mis en marche, pulsant à nouveau les particules vers les expériences. Le 2 juin, le faisceau était de retour dans le Linac 2 et dans l'injecteur du Synchrotron à protons, le Booster du PS, les deux premiers maillons de la chaîne des accélérateurs. Deux semaines plus tard, la troisième boucle, le Synchrotron à protons (PS), était alimentée en faisceau. Fin juillet, l'accélérateur livrait ses premières particules à la zone d'expérimentation Est et à l'installation n\_TOF. Le Booster du PS réalimentait l'installation de physique nucléaire ISOLDE. Début août, c'était au tour du Décélérateur d'antiprotons (AD) de reprendre vie. Après plusieurs semaines de mise au point, les expériences sur l'antimatière recevaient leurs premiers antiprotons, et notamment la nouvelle expérience BASE, alimentée par une toute nouvelle ligne de transfert. Mi-septembre, le Supersynchrotron à protons (SPS) entraînait à son tour dans la ronde. À la fin de l'automne, tout était prêt pour la future exploitation du Grand collisionneur de hadrons (LHC) en 2015 et les premiers faisceaux étaient envoyés dans les lignes de transfert jusqu'au LHC.

Le redémarrage des accélérateurs a permis de procéder à des tests d'exploitation. Durant l'été, des ions d'argon ont circulé pour la première fois dans le complexe jusqu'au SPS. Ce nouveau mode d'exploitation est destiné à alimenter l'expérience NA61/SHINE en 2015. L'une des difficultés réside dans la variété des énergies demandées par l'expérience.

## Chasse aux nuages

Plusieurs jours de l'exploitation du SPS ont été consacrés au conditionnement des tubes à vide avec du faisceau (« *beam induced scrubbing* »). Ce procédé vise à atténuer le phénomène des nuages d'électrons qui déstabilise le faisceau. Il consiste à faire circuler suffisamment de protons dans les tubes à vide pour créer une avalanche d'électrons intense qui inhibe la production de nouveaux électrons. Les équipes ont testé des faisceaux à « doublets », formés de paires de paquets espacés de 5 nanosecondes. Au terme d'une semaine à ce régime, les chambres à vide du SPS présentaient de bonnes performances, validant la technique pour l'exploitation du LHC en 2015. Les



Katy Foraz, responsable de la coordination du premier long arrêt technique, remet une clé symbolique du LHC aux équipes d'exploitation de la machine représentées par Jorg Wenninger, Mike Lamont et Mirko Pojet (de gauche à droite). (CERN-PHOTO-201501-002 – 3)



Le 18 juin, la dernière interconnexion entre les aimants supraconducteurs du LHC était refermée, après 14 mois de travaux pour renforcer les jonctions électriques. (CERN-PHOTO-201406-127 – 3)

injecteurs se sont par ailleurs entraînés à produire la nouvelle structure de faisceau pour le LHC, des paquets de protons espacés de 25 nanosecondes, contre 50 auparavant.

## Fin de chantier

La remise en marche des accélérateurs a été précédée d'une course contre la montre pour terminer le colossal chantier du premier long arrêt technique. Durant 22 mois, le CERN et ses partenaires se sont mobilisés pour entretenir, consolider et améliorer le complexe d'accélérateurs et les infrastructures. Quelque 1600 personnes ont été mobilisées et 3,4 millions d'heures de travail ont été enregistrées, avec un excellent niveau de sécurité. La coordination des dizaines de travaux menés en parallèle, avec une logistique souvent complexe a été minutieusement orchestrée. Malgré des travaux supplémentaires, le long arrêt technique a été terminé dans les temps.

La vague de rénovation a touché tous les injecteurs. Dans le PS, le contrôle d'accès a été changé. Le nouveau système sépare l'accélérateur de la ligne de transfert reliant le Linac 2 au Booster du PS, permettant des interventions dans le PS sans arrêter le Booster. La zone Est, qui accueille des lignes de faisceaux pour des tests sur des détecteurs ou pour des installations d'essai, a été partiellement rénovée. Une partie de l'infrastructure, le contrôle des faisceaux secondaires et certains équipements ont été remplacés ou améliorés. L'expérience DIRAC a été démantelée et l'espace aménagé pour accueillir deux nouvelles installations de tests de radiorésistance, IRRAD et CHARM. Ces installations étudieront l'effet des rayonnements sur des composants de détecteurs et du matériel électronique dans le cadre notamment du projet R2E (*Radiation to Electronics*). IRRAD permet d'exposer directement des équipements aux faisceaux de protons. CHARM peut produire une large gamme de rayonnements et tester des équipements massifs. Son installation a nécessité la mise en place de 16 000 tonnes de matériaux de blindage, ainsi qu'une nouvelle salle de contrôle. Un système de manutention robotisé a été développé pour acheminer les équipements lourds dans la zone de test.

D'importants travaux de génie civil se sont achevés pour réparer le tunnel entre le PS et le SPS, tandis qu'en surface de grands travaux électriques se poursuivaient pour l'alimentation des aimants du SPS. Soixante-huit nouveaux transformateurs de 2,5 mégawatts et de 12 tonnes chacun sont venus remplacer l'ancien parc.

Lors d'une série de vérifications, des défauts ont été décelés sur trois aimants et sur l'absorbeur de faisceau. Ces éléments lourds et encombrants ont été remplacés en l'espace de seulement trois jours, au terme d'une complexe opération de logistique.

En aval de l'accélérateur, les lignes de transfert des faisceaux et leur tunnel vers la zone Nord ont été entièrement rénovés avec le remplacement de composants des lignes de faisceaux, des circuits d'eau pour la ventilation et de l'éclairage, le tout accompagné d'une grande campagne de câblage.

Le Décélérateur d'antimatière était lui aussi en chantier, avec un grand nombre de ses composants rénovés, consolidés ou remplacés. Une réparation d'urgence a été réalisée sur un élément essentiel, la corne magnétique, qui focalise les antiprotons produits par la cible. Le système de transmission de courant, qui transmet à la corne des impulsions électriques de 400 000 ampères, a été remplacé en un temps record après une période de tests sur un banc d'essai spécialement conçu.

## Un cerveau dopé

Les travaux n'ont épargné aucun accélérateur, ni leur cerveau. Dans l'ensemble des injecteurs, 90 % des ordinateurs frontaux pour le contrôle ont été rénovés, dans le cadre d'un programme de cinq ans. Plus de 450 systèmes de contrôle en temps réels ont été changés et l'architecture logicielle et matérielle a été redéfinie. La remise en service des injecteurs, avec ces nouveaux systèmes, a été menée avec succès grâce à de nombreux essais menés entre janvier et août.

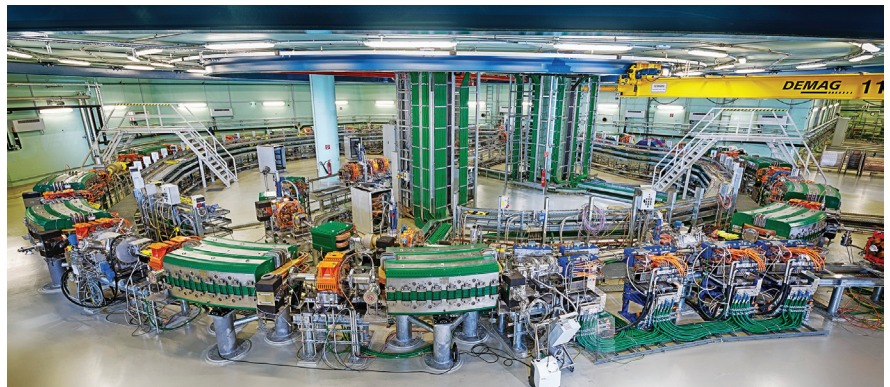
Les données des accélérateurs sont traitées par le centre informatique du Centre de contrôle du CERN (CCC), qui, avec 350 serveurs, est le deuxième centre de calcul du Laboratoire. Pour accroître sa puissance électrique et la capacité de

---

## De nouveaux faisceaux pour la médecine

Depuis près de 25 ans, les équipes des accélérateurs du CERN contribuent au développement d'accélérateurs médicaux. Le projet MedAustron, qui a accéléré ses premiers faisceaux en 2014, est exemplaire des transferts de technologies de la physique fondamentale vers la médecine. MedAustron est un centre de recherche et de thérapie basé sur l'utilisation de faisceaux de hadrons, près de Vienne (Autriche). Il devrait accueillir ses premiers patients pour le traitement de tumeurs début 2016. Le CERN a beaucoup contribué au développement et à la construction du système d'accélération du centre équipé de trois sources d'ions, d'un pré-accélérateur linéaire et d'un synchrotron envoyant des faisceaux dans des chambres d'irradiation. Pendant cinq ans, des spécialistes du CERN ont aidé à mettre en place et formé l'équipe de scientifiques de MedAustron. Ensemble, ils ont conçu l'accélérateur et suivi la fabrication des composants. Les 300 aimants de 30 types différents ont été conçus, puis testés au CERN après leur production dans des sites européens. En 2014, les tout derniers aimants quittaient le CERN pour l'Autriche. Le contrôle des convertisseurs est également issu des technologies du CERN et le système de radiofréquence du synchrotron est le fruit d'un développement conjoint pour MedAustron et l'accélérateur PS Booster. L'ensemble du système d'accélération a été mis en service en 2014. Le 6 novembre, un faisceau de protons de 250 MeV parvenait à l'une des chambres d'irradiation. Un grand succès pour les équipes de MedAustron et du CERN qui poursuivront leur collaboration pour finaliser la mise en service de l'accélérateur médical en 2015.

Le synchrotron du centre de recherche médical et de thérapie MedAustron en Autriche a été développé dans le cadre d'une collaboration avec le CERN. (Thomas Kaestenbauer)



refroidissement, et pour assurer la redondance d'un système qui doit fonctionner sans arrêt, l'électricité et le refroidissement ont été repensés. Le nouveau système de refroidissement est redondant, tout comme la nouvelle sous-station électrique, dédiée à l'alimentation du CCC et de son centre informatique. Elle est dotée d'alimentations sans interruption et de génératrices diesel pour permettre des interventions sans interruption.

### Le bout du tunnel

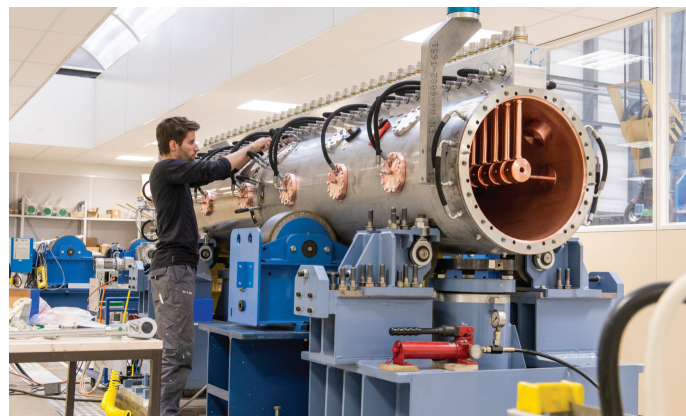
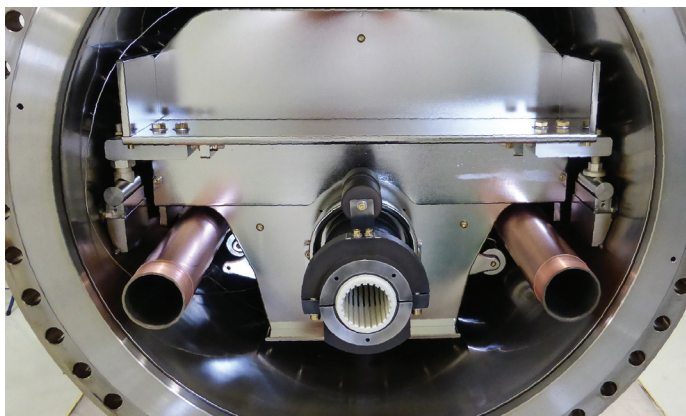
Tandis que les injecteurs se remettaient en marche, un travail de titan s'achevait dans le LHC. Pour faire circuler des faisceaux de 6,5 TeV d'énergie dans l'accélérateur, les 10 170 jonctions électriques entre les aimants doivent être équipées de dérivateurs de courant en cuivre (ou « *shunts* »), qui donnent un chemin de basse résistance au courant en cas de transition résistive. Pas moins de 27 000 *shunts* étaient à installer ! Il fallait en plus reconstruire 3 000 jonctions et installer 5 000 boîtiers isolants renforcés autour de chaque paire de jonctions. Les équipes ont achevé ce vaste chantier le 18 juin, refermant la dernière interconnexion. Près de 300 ingénieurs et techniciens du CERN, des entreprises contractantes et des instituts ont travaillé en deux rotations pendant 14 mois pour parvenir à cet impressionnant résultat. Entre autres statistiques, l'équivalent de 3,3 kilomètres de soudures ont été effectués pour refermer les interconnexions et aucun défaut n'a été relevé. Les travaux ont

été suivis de tests de pression et de tests d'assurance qualité électrique. Fin 2014, cinq des huit secteurs avaient subi ces premiers tests électriques, avant leur mise sous tension et leur qualification à l'énergie de 6,5 TeV.

Outre ces travaux, vingt nouveaux collimateurs, intégrant des moniteurs de position de faisceau, ont été installés. Les collimateurs nettoient le faisceau des particules qui s'éloignent de la trajectoire. Les boîtiers de distribution électrique assurant la transition du courant des câbles résistifs vers les câbles supraconducteurs ont été rénovés. Les huit aimants de déflexion rapide, qui aiguillent le faisceau des lignes de transfert du SPS vers le LHC, ont tous été améliorés et remis en service.

Hors du cœur des accélérateurs, les infrastructures ont aussi connu de grandes transformations, à l'instar du système de refroidissement et de ventilation. De nouvelles tours de refroidissement ont été installées sur trois points du LHC pour prendre le relais des tours principales en cas de maintenance.

Au terme de trois années de développement, le réseau de distribution électrique a été doté d'un tout nouveau système de supervision électrique. Son déploiement s'est apparenté à un travail de fourmi, car il gère 20 000 dispositifs électriques et de supervision, enregistre 250 000 mesures et compte 200 synoptiques. Le nouveau système, redondant, va inclure de nouveaux outils pour la simulation ou l'aide à la gestion des coupures électriques. Une panne inopinée du réseau électrique



Les aimants de déflexion rapide qui transfèrent les faisceaux du SPS vers le LHC ont été améliorés.  
(OPEN-PHO-ACCEL-2014 – 007)

L'une des enceintes DTL (Linac à tubes de glissement) pour le Linac 4 en préparation au CERN, avant son installation.  
(CERN-PHOTO-201404-087 – 1)

en octobre a permis de tester son efficacité. Le système a aidé les opérateurs à comprendre l'origine de la panne et à remettre rapidement le réseau en service, validant du même coup les outils et l'architecture.

Tous ces travaux ont nécessité un important effort de logistique et de manutention. En 2014, plus de 25 000 opérations ont été effectuées pour transporter et déplacer environ 200 000 tonnes de matériel, alors que les équipements de manutention étaient eux-mêmes rénovés. Le CERN compte, entre autres, 350 ponts roulants. Dix-huit d'entre eux ont été remplacés ou rénovés, et quatre nouveaux ponts roulants sont venus compléter le parc.

Alors que les faisceaux tournaient dans les injecteurs, la remise en service du LHC démarrait avec le refroidissement de l'accélérateur. Il faut 10 000 tonnes d'azote et 135 tonnes d'hélium pour refroidir à 1,9 kelvins (-271°C) les 36 000 tonnes de métal de l'accélérateur. C'est comme si on refroidissait cinq Tours Eiffel ! Au cours d'une impressionnante opération de logistique, 520 camions se sont relayés pour livrer l'azote et l'hélium. Les secteurs ont été d'abord refroidis à la température de 20 kelvins, puis maintenus à cette température quatre semaines pour permettre les nouveaux tests sur les circuits des aimants (voir encadré p. 20), avant d'entamer la plongée vers les 1,9 kelvins. Fin 2014, les huit secteurs étaient refroidis.

## Qualifiés pour la haute énergie

Une fois les secteurs froids, la qualification pour une exploitation du LHC à 6,5 TeV pouvait débuter. Pour que l'accélérateur fonctionne à cette énergie, les courants circulant dans les aimants dipôles atteindront 11 080 ampères (contre 6 800 ampères lors de la première période d'exploitation). Comme des athlètes, les aimants dipôles sont « entraînés » à ces intensités : on augmente progressivement le courant dans les bobines des aimants. Les forces générées peuvent causer d'infimes déplacements, qui parfois provoquent des transitions résistives : les aimants passent alors subitement à l'état conducteur. Cette opération est répétée plusieurs fois dans chaque secteur jusqu'à ce qu'on ait atteint le courant nominal. Fin 2014, un

premier secteur était qualifié à 6,5 TeV, après 20 transitions résistives d'entraînement, l'estimation étant de 150 transitions résistives pour les huit secteurs du LHC. Pour tous les autres circuits alimentant à différents niveaux de courant les aimants de focalisation et de correction, ou l'instrumentation, la remise en service a commencé. Ce sont 1 600 circuits qu'il faut vérifier et réalimenter.

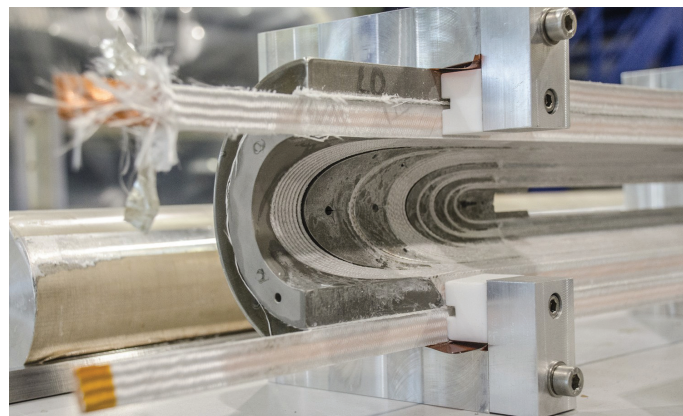
Un autre accélérateur fêtait le retour du faisceau en 2014. Le 5 août, le nouvel accélérateur linéaire Linac 4 portait un faisceau à une énergie de 12 MeV, qualifiant ainsi le troisième élément de sa chaîne d'accélération. Le Linac 4, qui prendra le relais de l'actuel Linac 2 en 2020, compte quatre types de structures accélératrices. Il délivrera des faisceaux à une énergie de 160 MeV, contre 50 MeV actuellement. Après avoir mis en place les deux premiers éléments de la ligne d'accélération en 2013, les équipes ont installé une enceinte DTL (*Drift tube Linac*, Linac à tubes de glissement) et la plupart des structures CCDTL (*Cell-Coupled Drift Tube Linac*, Linac à tubes de glissement à cavités couplées). La qualification, dès les premiers essais, de la première enceinte DTL, le 5 août, a été accueillie avec enthousiasme car ces structures reposent sur une conception novatrice. Par ailleurs, la nouvelle source d'ions a été testée au courant requis. Des composants de la ligne qui transférera les ions vers le Booster du PS ont été installés. La difficulté de mise au point de ces équipements tient au fait que le Linac 4 accélérera des ions hydrogène négatifs (un proton entouré de deux électrons) à la place des protons. Les dernières structures accélératrices (PIMS, structures Pi-Mode) sont en construction. L'objectif est de mettre en service le Linac 4 avec du faisceau en 2016, avant de le connecter à la chaîne d'accélération en 2018. Pour que le PS Booster puisse recevoir les nouveaux faisceaux, de nouveaux équipements d'injection sont en préparation.

## Les projets se matérialisent

À quelques mètres de là, ELENA (*Extra Low ENergy Antiproton ring*), sort de terre. Cet anneau de décélération de 30 mètres de circonférence sera mis en service en 2016 et exploité pour



L'assemblage des premières cavités supraconductrices de HIE-ISOLDE a commencé dans une toute nouvelle salle blanche. (OPEN-PHO-ACCEL-2015 – 004)



Un bobinage niobium-étain pour un prototype d'aimant dipôle à 11 teslas pour le projet de LHC à haute luminosité. (CERN-GE-1310248 – 02)

la physique en 2017. Il améliorera l'efficacité du Décélérateur d'antiprotons (AD) en ralentissant encore davantage les antiprotons pour les expériences sur l'antimatière. Le nouveau bâtiment a été achevé. Les générateurs des « kickers » de l'AD y ont été déplacés de manière à libérer de l'espace dans le hall qui abritera le futur décélérateur. Le rapport de conception technique a été publié au printemps. De nombreuses améliorations techniques ont été apportées pour optimiser la machine et les performances. Les travaux sur les lignes d'extraction de l'AD ont démarré, avec le remplacement des quadripôles. La construction des équipements d'ELENA a été lancée.

L'installation de physique nucléaire ISOLDE du CERN produira bientôt des ions radioactifs à de plus hautes énergies. Le nouvel accélérateur HIE-ISOLDE (ISOLDE à haute énergie et haute luminosité) portera à terme l'énergie des faisceaux de 3 MeV par nucléon à 10 à 15 MeV par nucléon et quadruplera leur intensité. Les travaux d'installation de cet accélérateur linéaire supraconducteur de 16 mètres de long ont progressé. La station de cryogénie, en partie héritée d'une ancienne expérience, a été rénovée puis installée. L'accélérateur sera formé à terme de six cryomodules contenant chacun cinq cavités supraconductrices. Douze cavités ont été produites et sont en cours d'assemblage dans une nouvelle salle blanche. Le premier tronçon de la ligne de transfert vers les expériences a été testé. HIE-ISOLDE sera mis en service en plusieurs phases. Au cours de la première, prévue fin 2015, un cryomodule accélérera les faisceaux jusqu'à une énergie de 4,3 MeV par nucléon.

Les travaux de génie civil ont débuté pour le projet AWAKE (*Advanced Wakefield Experiment*), qui doit recevoir ses premiers faisceaux du SPS en 2016. AWAKE étudiera le principe d'accélération à l'aide de champs de sillage dans des cellules de plasma. Ce principe, déjà établi avec des électrons, sera testé avec des protons, le but étant de parvenir à des gradients accélérateurs des centaines de fois plus élevés que ceux des cavités radiofréquence actuelles. AWAKE sera installé dans le tunnel qui abritait l'installation pour les neutrinos CNGS. Les derniers 100 mètres de la ligne de faisceau de CNGS ont été enlevés et un mur de blindage a été construit. Deux tunnels

ont été excavés, l'un pour contenir le faisceau laser (qui ionise le plasma), et l'autre pour accueillir la source et le faisceau d'électrons (le « faisceau témoin » qui sera accéléré par le plasma). Les études sur les lignes d'électrons, de protons et du laser ont bien avancé. Un prototype de cellule plasma de 3 mètres est à l'étude à l'Institut Max Planck de Munich.

## Haute luminosité assurée

Le CERN donne un coup d'accélérateur à son grand projet pour les 20 ans à venir, le LHC à haute luminosité (HL-LHC). Déclaré projet prioritaire en 2013 dans la stratégie européenne pour la physique des particules, il a été inscrit dans le plan à moyen terme du Laboratoire. Cette nouvelle machine, qui devrait entrer en service après 2025, augmentera le nombre de collisions d'un facteur 5 à 10 pour atteindre une luminosité de 250 femtobarns inverses ( $\text{fb}^{-1}$ ) par an. Pour cela, de nouveaux équipements seront installés dans l'accélérateur. Le projet, lancé en 2011 dans le cadre d'un programme financé entre autres par l'Union européenne et des instituts d'Europe, des États-Unis, de la Fédération de Russie et du Japon, repose sur le développement d'aimants quadripôles plus puissants pour concentrer les faisceaux avant les collisions et de cavités radiofréquence dites « en crabe » pour les orienter, d'aimants dipôles plus courts et puissants, d'un système de collimation amélioré et de liaisons électriques supraconductrices.

Les nouveaux aimants supraconducteurs, formés d'un composé niobium-étain, sont développés dans le cadre d'une collaboration entre le CERN et l'étude *US LHC Accelerator Research Program* (LARP), rassemblant quatre laboratoires des États-Unis. Une étape importante a été franchie par le partenariat LARP avec un aimant quadripôle à large ouverture qui a démontré un champ magnétique supérieur à 12 teslas. Deux prototypes courts d'aimant supraconducteur dipôle ont atteint 11 teslas à Fermilab et au CERN. Un groupe d'experts internationaux a porté son choix sur deux prototypes de cavités en crabe. L'architecture des systèmes de collimation a été finalisée. Avec l'augmentation de la luminosité, certains

convertisseurs de puissance seront repositionnés en surface et reliés par des câbles supraconducteurs de plusieurs dizaines de mètres de long. Un nouveau record de courant a été battu grâce à un câble supraconducteur formé de diborure de magnésium et fonctionnant à 24 kelvins. Un courant supérieur à 20 000 ampères a été transporté sur 20 mètres.

Le succès du LHC à haute luminosité dépend aussi de la chaîne d'injecteurs. Le projet LIU (Amélioration des injecteurs du LHC) a pour objectif de préparer les injecteurs à l'exploitation du LHC à haute luminosité. Le projet LIU et le projet HL-LHC ont défini de concert les paramètres des faisceaux de tous les accélérateurs. Cinq cavités accélératrices radiofréquence supplémentaires utilisant la technologie FineMet®, plus performante aux hautes intensités, ont été installées dans le Booster du PS et sont testées depuis le retour du faisceau. La technologie FineMet® fait appel à un matériau composite magnétique à la place des ferrites utilisées traditionnellement et présente l'avantage d'offrir une large bande passante. Ces essais permettront de décider du remplacement complet du système RF du Booster du PS par cette technologie. Une cavité FineMet® a également été installée dans le PS pour évaluer sa capacité à stabiliser les faisceaux. L'accélérateur a par ailleurs fait l'objet d'études sur les effets de « charge d'espace » : à basse énergie les particules de même charge électrique ont tendance à se repousser, limitant la densité du faisceau et donc la luminosité. Des études ont été menées dans le SPS sur le phénomène de nuages d'électrons (voir p. 15) mais également sur les composants des tubes à vide susceptibles de rendre le faisceau instable. Un groupe de travail a été mis en place pour étudier une amélioration de leur conception. La construction de nouveaux équipements a commencé, notamment de nouveaux outils d'instrumentation de faisceau pour le PS et de nouveaux amplificateurs de puissance pour le système radiofréquence du SPS, qui seront installés dans le tout nouveau bâtiment situé sur le site de Prévessin.

## L'avenir s'esquisse

Au-delà du LHC à haute luminosité, le CERN ouvre les pistes pour l'avenir à très long terme de la physique des particules. L'étude sur un futur collisionneur circulaire (étude FCC) a été officiellement lancée en 2014. Elle concerne un collisionneur

de hadrons d'une énergie de collision de 100 TeV qui serait installé dans un nouveau tunnel de 80 à 100 kilomètres de circonférence. L'étude inclurait la possibilité d'un collisionneur de leptons comme étape intermédiaire, ainsi qu'une option de collisionneur lepton-hadron. Elle porterait également sur un LHC à haute énergie nécessitant l'installation d'aimants générant des champs magnétiques de 16 à 20 teslas dans le tunnel actuel. En février, la conférence de lancement de l'étude FCC a attiré environ 350 participants de 127 instituts, universités et entreprises de 23 pays. La gouvernance du projet a été mise en place avec la création d'un groupe de coordination d'experts internationaux et la constitution d'un comité international de collaboration. Fin 2014, la collaboration FCC comptait 43 instituts dans 19 pays, d'autres accords étant en préparation. Les premières études sur le potentiel de physique et les paramètres techniques ont démarré et les technologies-clés ont été identifiées. Une étude de la géologie de la région lémanique a démarré, utilisant notamment un nouveau logiciel qui permet de définir l'emplacement optimal d'un tunnel. Un programme de recherche et développement est en cours de préparation. L'objectif est de publier une étude de conception en 2018.

L'étude FCC est complémentaire de celle sur le CLIC, qui constitue une autre option pour un accélérateur du futur. Le CLIC (Collisionneur linéaire compact) est basé sur un concept novateur d'accélération à deux faisceaux. La collaboration CLIC compte 50 instituts dans 25 pays. En 2014, les études se sont poursuivies pour optimiser les coûts et les performances, en se focalisant sur une construction en trois étapes pour atteindre des énergies de collision de 380 GeV au cours de la première, puis 1,5 TeV et enfin 3 TeV. Le premier module complet d'accélération, mesurant 2 mètres, a été installé pour démarrer des essais en 2015. Fin 2014, trois installations de tests des klystrons étaient opérationnelles. Les travaux se sont poursuivis dans les instituts partenaires sur l'instrumentation, les aimants, les études de vide, les systèmes de contrôle, d'alignement et de stabilisation. CLIC commence par ailleurs à essayer en dehors de la physique des particules : les structures d'accélération à haut gradient intéressent des partenaires pour des accélérateurs compacts pour lasers à électrons libres.

---

## La protection du LHC à l'épreuve du courant

Une machine plus puissante et sûre. Suivant cette maxime, les équipes du LHC ont réalisé de nombreux essais dès la fin des travaux. Un test innovant a été développé pour qualifier le système de protection contre les transitions résistives. Lorsqu'un aimant du LHC, qui transporte des courants d'intensités jusqu'à 11 080 ampères, perd son état supraconducteur, à cause d'une instabilité par exemple, le courant est immédiatement dévié vers un circuit parallèle, évitant un échauffement dévastateur dans l'aimant. Ce circuit est formé de diodes de puissance et de dérivateurs de courant nouvellement installés sur les jonctions électriques entre les aimants pour permettre au LHC de fonctionner à 6,5 TeV. Le nouveau test consiste à mettre à l'épreuve tous les circuits parallèles. Pour y parvenir, la température de l'hélium est maintenue à 20 kelvins afin que les câbles perdent leur état supraconducteur. Des courants d'intensités croissantes sont envoyés dans les circuits. Ils empruntent naturellement le réseau secondaire, testant la fiabilité des dérivateurs en cuivre et des diodes de protection des aimants. Si la moindre résistance est décelée dans ce circuit parallèle, le courant est immédiatement coupé. Fin 2014, tous les circuits des dipôles avaient passé les tests avec succès.