

Rapport annuel 2013





CERN
1211 Genève 23, Suisse
<http://www.cern.ch>

Le Rapport annuel du CERN est publié en un seul volume et vise à présenter les activités du Laboratoire.

Une version électronique se trouve à l'adresse http://publications.cern.ch/annual_report/

La Liste des publications du CERN (un catalogue de toutes les publications connues ayant pour objet des recherches menées au CERN pendant l'année) peut être consultée à l'adresse : http://publications.cern.ch/2013_list.html

Cinquante-neuvième rapport annuel de l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire
Graphisme et production : groupe Communication du CERN
ISSN 0304-2901
© Copyright 2014, CERN

Le CERN, l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire, est le plus éminent laboratoire de recherche en physique des particules du monde. Il se consacre à la physique fondamentale, cherchant à comprendre les constituants et les lois de l'Univers. Fondé en 1954, le CERN compte 21 États membres depuis janvier 2014 et est devenu un exemple éclatant de collaboration internationale. Divers autres pays contribuent et participent aussi à son programme de recherche.

Le CERN est situé de part et d'autre de la frontière franco-suisse, près de Genève. Le Grand collisionneur de hadrons (LHC), le fleuron de ses instruments de recherche, est logé dans un tunnel de 27 kilomètres sous la plaine qui s'étend du Lac de Genève à la chaîne du Jura. La photographie ci-dessus a été prise depuis Le Reculet, dans le Jura. On y voit le Laboratoire au nord de Genève avec les Alpes et le Mont-Blanc en arrière-plan.

Photos CERN, sauf :
Thomas Kubes (pp. 2-3),
Andrzej Zalewska (p. 4),
Iván Martínez/FPA (p. 7, en haut),
Hasse Ferrold (p. 7, en bas),
L P Gaffney et al. 2013 *Nature* **497** 199 (p. 12),
Collaboration Planck (p. 21),
Wigner RCP (p. 23).



Sommaire

Messages d'introduction	4
Une année au CERN	6
Instantanés	9
Physique et expériences	12
Informatique	22
Accélérateurs	25
Un impact sur le monde	31
Un lieu de travail	35
Sécurité et environnement	37
Le Conseil et ses Comités	40
Organisation interne	42
Le CERN en chiffres	44
Glossaire	45

Message de la Présidente du Conseil



« C'est avec le plus grand plaisir que le Conseil a accueilli Israël – premier nouvel État membre depuis 14 ans. »

L'un des moments forts de 2013, non seulement pour le CERN, mais aussi pour la physique en général, a été l'attribution du prix Nobel de physique à François Englert et à Peter Higgs pour leurs travaux sur le mécanisme de Brout-Englert-Higgs. Ce mécanisme, qui contribue à notre compréhension de la masse des particules élémentaires, a été confirmé par la découverte d'un boson de Higgs par les expériences ATLAS et CMS au LHC. Le Conseil du CERN s'est félicité de cette récompense, qui est un signe fort de reconnaissance des efforts fournis par des milliers de scientifiques et d'ingénieurs, dans les États membres et de nombreux autres pays, pour construire le LHC et ses expériences.

Cette année a également vu l'aboutissement du processus de mise à jour de la stratégie européenne pour la physique des particules, entamé par le Conseil en septembre 2011. Le document de la stratégie mise à jour, qui regroupe 17 prises de position, a été élaboré par le Groupe sur la stratégie européenne lors de sa réunion tenue à Erice, en janvier. Le Conseil a examiné ce document lors de sa session de mars et l'a adopté à l'unanimité pendant sa session spéciale du 30 mai, à Bruxelles. Parallèlement à cette session spéciale, accueillie par la Commission européenne, plusieurs manifestations ont été organisées afin de présenter les retombées de la physique des particules pour la société.

Parmi les événements proposés : une exposition du CERN dans le bâtiment Berlaymont de la Commission, une table ronde autour du thème « Ce que nous apporte la recherche fondamentale », une manifestation au Parlement européen et un exposé adressé aux ministres de la recherche et de l'innovation pendant la réunion du Conseil « Compétitivité » de l'Union européenne.

En juin, le Conseil a adopté le plan à moyen terme pour le CERN pour la période 2014-2018, qui prend en compte la stratégie mise à jour, et en particulier la prise de position reconnaissant l'exploitation du LHC à son plein potentiel, notamment par sa transformation en machine de haute luminosité, comme une priorité pour l'Europe.

La première phase d'exploitation du LHC, réussie à tout point de vue, s'est achevée au début de l'année. Le Conseil a félicité la Direction du CERN et tous ceux qui ont participé à l'exploitation du LHC pour les excellents résultats obtenus, puis a rendu hommage aux collaborations du LHC et à tous les acteurs de la Grille de calcul mondiale pour le LHC pour les remarquables analyses réalisées à partir des données de physique. Depuis lors, le Conseil a suivi l'excellente progression des activités du premier long arrêt.

Un autre événement a marqué l'année 2013 : l'adoption à l'unanimité, lors de la session du Conseil de décembre, d'une résolution par laquelle Israël est devenu le 21^e État membre de l'Organisation. Des scientifiques israéliens participent à des programmes du CERN depuis de nombreuses années, et c'est avec le plus grand plaisir que le Conseil a accueilli ce nouvel État membre – premier nouvel État membre depuis 14 ans.

C'est un grand privilège pour moi d'avoir commencé mon mandat de présidente du Conseil du CERN en cette année mémorable. Je suis certaine que l'année 2014, qui marquera le 60^e anniversaire de l'Organisation, nous réserve elle aussi son lot de belles surprises.

Agnieszka Zalewska

Agnieszka Zalewska

Message du Directeur général



« Les réalisations distinguées par ces prix n'auraient pas été possibles sans la persévérance de chacun. »

En 2012, la découverte du boson de Higgs avait été un tel événement qu'il semblait difficile de faire aussi bien en 2013. Pourtant, cette année s'est avérée tout aussi passionnante. Avec la mise à l'arrêt du complexe d'accélérateurs pour des travaux de remise à neuf et d'amélioration, l'analyse des fascinants résultats de la première période d'exploitation du LHC et d'autres expériences menées au CERN, ainsi que les journées portes ouvertes en septembre, 2013 a été bien remplie.

Cette année a aussi été marquée par l'obtention de plusieurs récompenses. L'attribution du prix Nobel de physique 2013 à François Englert et à Peter Higgs a été accueillie avec une joie non dissimulée au CERN, mais aussi par l'ensemble de la communauté de la physique des particules. Le Laboratoire, quant à lui, a reçu le prix Prince des Asturies et la Médaille d'or Niels Bohr de l'UNESCO.

Toutes ces distinctions constituent une formidable récompense pour les milliers de personnes qui ont participé à la construction du LHC, de ses détecteurs et des capacités informatiques nécessaires à leur exploitation depuis l'officialisation du projet de collisionneur, au début des années 80. Les réalisations distinguées par ces prix n'auraient pas été possibles sans la persévérance de chacun, au CERN et dans de nombreux laboratoires et universités du monde entier.

Aujourd'hui, le Laboratoire continue sur sa lancée en écrivant le prochain chapitre de l'histoire du LHC. Depuis le début du premier long arrêt (LS1), le complexe d'accélérateurs est soumis à des travaux de maintenance et de rénovation d'une ampleur inédite. Le LS1 ayant bien progressé en 2013, les accélérateurs devraient être remis en marche un par un à compter de l'été 2014, et ce grâce aux efforts de toutes les équipes concernées, parmi lesquelles de nombreux groupes externes.

Les projets d'amélioration du LHC ont déjà commencé, conformément aux priorités fixées cette année par la stratégie européenne pour la physique des particules mise à jour. Les travaux d'amélioration et de construction d'installations ont également débuté, notamment pour le projet CERN MEDICIS sur la production de radio-isotopes destinés à des applications médicales, le projet ELENA mené au Décélérateur d'antiprotons et la nouvelle zone d'expérimentation de la source de neutrons n_TOF.

Grâce à la reconnaissance croissante dont jouissent la physique des particules et le CERN, ainsi qu'à l'abondance de résultats et d'initiatives novatrices, le Laboratoire a continué de faire les gros titres. En 2013, des milliers de visiteurs, venus des environs du CERN et d'ailleurs, ont pu profiter du LS1 pour se rendre dans les souterrains, notamment à l'occasion des journées portes ouvertes. Une fois encore, cette manifestation a pu être organisée grâce à la mobilisation de tout le personnel de l'Organisation et de la vaste communauté d'utilisateurs qui forment la famille CERN.

En conclusion, cette année restera dans les mémoires. Et ce sera certainement aussi le cas de 2014, qui marquera le 60^e anniversaire du CERN.

Rolf Heuer



Au CERN, un public enthousiaste assiste à la remise du prix Nobel de physique 2013, retransmise en direct.

Une année au CERN

Une fin et un commencement

Le 14 février 2013, à 7 h 24, l'équipe de roulement du Centre de contrôle du CERN a extrait les faisceaux du Grand collisionneur de hadrons (LHC), mettant ainsi fin aux trois premières années d'exploitation de la machine. Durant cette première phase d'exploitation, le LHC a dépassé toutes les attentes en fournissant aux expériences bien plus de données que ce qui était prévu initialement. Cette abondance de données a permis de réaliser de grands progrès de physique : consolidation du Modèle standard de la physique des particules (notamment avec l'observation inédite de désintégrations rares de particules), mesure de propriétés intéressantes de la matière dense et chaude et, en 2012, découverte vivement acclamée d'une particule présentant les caractéristiques d'un boson de Higgs. Durant les premières semaines de 2013, le LHC a été exploité selon un nouveau mode, en faisant entrer en collision des protons et des ions plomb afin de comprendre l'état de la matière juste après le Big Bang. Dans chacune des grandes expériences du LHC, à savoir ALICE, ATLAS, CMS et LHCb, les données collectées ont révélé de nouveaux effets étonnants.

La fin de la période d'exploitation a signé le début du premier long arrêt (LS1), pour le LHC mais aussi pour l'ensemble du complexe d'accélérateurs du CERN, après trois ans d'exploitation quasi continue : une première pour le Laboratoire. Les travaux de préparation du LHC pour une exploitation à une énergie plus élevée, et de maintenance d'autres parties de la chaîne d'accélération, notamment le Synchrotron à protons (PS) et le Supersynchrotron à protons (SPS), ont commencé sans attendre. À la fin de l'année, le programme du LS1 était conforme au calendrier grâce aux efforts fournis par tous les acteurs concernés, notamment de nombreux groupes externes. Des opérations de maintenance et d'installation ont également eu lieu à ISOLDE, à la source de neutrons n_TOF et au Décélérateur d'antiprotons (AD). En parallèle, l'analyse des données collectées en 2012 dans ces installations s'est poursuivie, aboutissant à de fascinants résultats concernant les noyaux et les antiprotons.

La découverte continue

Le nouveau boson découvert en 2012 a continué de capter



Le 25 octobre, François Englert (à gauche) et Peter Higgs (au centre) ont reçu, conjointement avec le CERN, le prix Prince des Asturies pour « la prédiction théorique et la détection expérimentale du boson de Higgs ». La cérémonie s'est déroulée à Oviedo, en présence de Sa Majesté la reine d'Espagne et de Leurs Altesses Royales le prince et la princesse des Asturies. Le Directeur général du CERN, Rolf Heuer (à droite), a accepté ce prix au nom du Laboratoire.



Le 5 décembre, lors d'une cérémonie qui s'est déroulée à Copenhague, l'UNESCO a décerné la médaille d'or Niels Bohr au CERN « en reconnaissance de son action internationale exceptionnelle en faveur de la coopération scientifique entre les nations ». Cette récompense, remise pour la première fois en 1998, honore les acteurs de la physique dont la contribution remarquable à la recherche a ou pourrait avoir des retombées importantes pour le monde.

l'attention en 2013, au CERN et dans le monde entier. Lors de la conférence de Moriond, en mars, les collaborations ATLAS et CMS ont présenté des résultats précisant encore les propriétés de la particule. Après avoir analysé un volume de données deux fois et demi supérieur à celui disponible au moment de l'annonce de la découverte, elles ont pu constater que la nouvelle particule ressemblait bel et bien à un boson de Higgs, la particule liée au mécanisme de Brout-Englert-Higgs qui donne aux particules élémentaires leur masse. Quant à la question de savoir s'il s'agit du boson de Higgs du Modèle standard de la physique des particules, il faudra encore du temps pour y répondre.

Plusieurs prix prestigieux ont récompensé les avancées réalisées dans la compréhension de la nouvelle particule. En mai, la Société européenne de physique a décerné le Prix de physique des particules et des hautes énergies aux collaborations ATLAS et CMS « pour la découverte d'un boson de Higgs correspondant à la prédiction du mécanisme de Brout-Englert-Higgs », et à Michel Della Negra, Peter Jenni et Tejinder Virdee « pour le rôle moteur et novateur qu'ils ont joué dans la réalisation des expériences ATLAS et CMS ». Le 8 octobre,

l'annonce de la remise du prix le plus prestigieux, le prix Nobel de physique 2013, était attendue avec enthousiasme au CERN. Puis la nouvelle est tombée : François Englert et Peter Higgs venaient d'être récompensés pour « la découverte théorique du mécanisme contribuant à notre compréhension de l'origine de la masse des particules subatomiques et récemment confirmée par la découverte, par les expériences ATLAS et CMS auprès du LHC du CERN, de la particule fondamentale prédite par cette théorie ». (Robert Brout, qui a collaboré avec François Englert, est malheureusement décédé en 2011).

Ces événements ont tous permis au CERN de rester sous le feu des projecteurs. Pendant l'année, on a dénombré 181 visites protocolaires et de haut niveau de personnalités de pays tels que l'Autriche, l'Australie, la Turquie ou la Thaïlande. Plus de 1 200 journalistes se sont également rendus au CERN, notamment dans le cadre d'un nouveau programme de visites de pays. Fin septembre, le CERN a ouvert ses portes à quelque 70 000 personnes. Un grand nombre d'entre elles ont profité de l'arrêt de l'accélérateur pour accéder aux souterrains (voir p. 31).

Collaboration internationale

Fin mai, à l'occasion d'une réunion spéciale accueillie par la Commission européenne à Bruxelles, le Conseil du CERN a officiellement adopté une mise à jour de la stratégie européenne pour la physique des particules tenant compte de l'évolution de la physique des particules, en Europe et dans le monde. La stratégie mise à jour recommande que l'Europe et la communauté européenne de la physique des particules exploitent le LHC à son plein potentiel pendant plusieurs années grâce à une série d'améliorations planifiées, parmi lesquelles le projet LHC haute luminosité (voir p. 28). Préserver et développer le modèle européen de recherche transfrontière est également un enjeu important de la nouvelle stratégie. Dans le cadre de la stratégie mise à jour, le CERN, en étroite collaboration avec les institutions de recherche de ses États membres, et sous la direction du Conseil, participera à des projets mondiaux de physique des particules.



De gauche à droite : Eliezer Rabinovici, président du Comité israélien de physique des hautes énergies, Eviatar Manor, ambassadeur d'Israël auprès de l'Office des Nations Unies à Genève, Rolf Heuer, directeur général du CERN, et Giora Mikenberg, de l'Institut Weizmann.

Un nouvel État membre

À la suite d'une résolution adoptée à l'unanimité le 12 décembre, lors de la 169^e session du Conseil du CERN, Israël est devenu le 21^e État membre de l'Organisation.

Israël entretient une relation de longue date avec le CERN dans les domaines de la physique théorique et de la physique expérimentale. Ces liens ont été officialisés en 1991, lorsque le pays s'est vu accorder le statut d'observateur en reconnaissance de l'importante participation d'instituts israéliens à l'expérience OPAL au LEP, et de contributions au fonctionnement de l'accélérateur. Aujourd'hui, Israël participe aux expériences ATLAS, ALPHA et COMPASS, ainsi qu'à des expériences menées à l'installation ISOLDE, et continue de collaborer à la recherche en physique théorique. En outre, l'État contribue au LHC et à l'étude technique sur le CLIC, et fait fonctionner un centre de niveau 2 de la Grille de calcul mondiale pour le LHC.

Instantanés



01/03

Ban Ki-Moon, secrétaire général de l'ONU (à droite), s'est rendu au CERN pour la première fois depuis que l'Organisation a obtenu le statut d'observateur auprès de l'Assemblée générale des Nations Unies, en décembre 2012. Il a visité ATLAS avec Dave Charlton, nouveau porte-parole de l'expérience (à gauche).



05/04

Olga Golodets, vice-premier ministre de la Fédération de Russie, en visite au CERN, a pu voir la zone d'expérimentation souterraine d'ATLAS et le tunnel du LHC. Elle a également rencontré des membres de la communauté russe du CERN.



15/04

Androulla Vassiliou, commissaire européenne chargée de l'Éducation, de la Culture, du Multilinguisme, du Sport, des Médias et de la Jeunesse (au centre, à gauche), s'est rendue au CERN et a rencontré de jeunes chercheurs soutenus par le programme européen de bourses Marie Curie.



03/05

La première conférence TEDxCERN, qui s'est déroulée au Globe de la science et de l'innovation, a été retransmise en direct sur le web dans les instituts participants du monde entier. Pionniers et jeunes scientifiques ont pris la parole lors de cette manifestation, axée autour du thème « Des dimensions multiples », qui a dépassé le cadre de la physique des particules.



04/06

Elio Di Rupo, premier ministre de la Belgique (à gauche), a visité le CERN en compagnie de groupes d'élèves belges. Il a notamment découvert la zone d'expérimentation de CMS aux côtés de François Englert, futur lauréat du prix Nobel (au centre), et de Joe Incandela, porte-parole de la collaboration CMS.



11/06

Heinz Fischer, président de l'Autriche (deuxième en partant de la droite), son épouse Margit Fischer (au centre) et Karlheinz Töchterle, ministre des Sciences et de la Recherche de l'Autriche (à droite), ont visité l'AD avec Michael Doser, porte-parole d'AEGLS.



02/07

À l'approche de son 103^e anniversaire, François de Rose, ambassadeur de France et ancien président du Conseil du CERN, a visité l'expérience ATLAS et s'est dit fier de l'Organisation, qu'il a qualifiée de « grande réussite européenne ».



10/07

Bill Fontana, artiste sonore des États-Unis, a commencé sa résidence au CERN, trouvant l'inspiration dans le tunnel du LHC.



28/10

Al Gore, ancien vice-président des États-Unis, aux côtés de Sergio Bertolucci, directeur de la recherche et de l'informatique au CERN, signe le livre d'or.



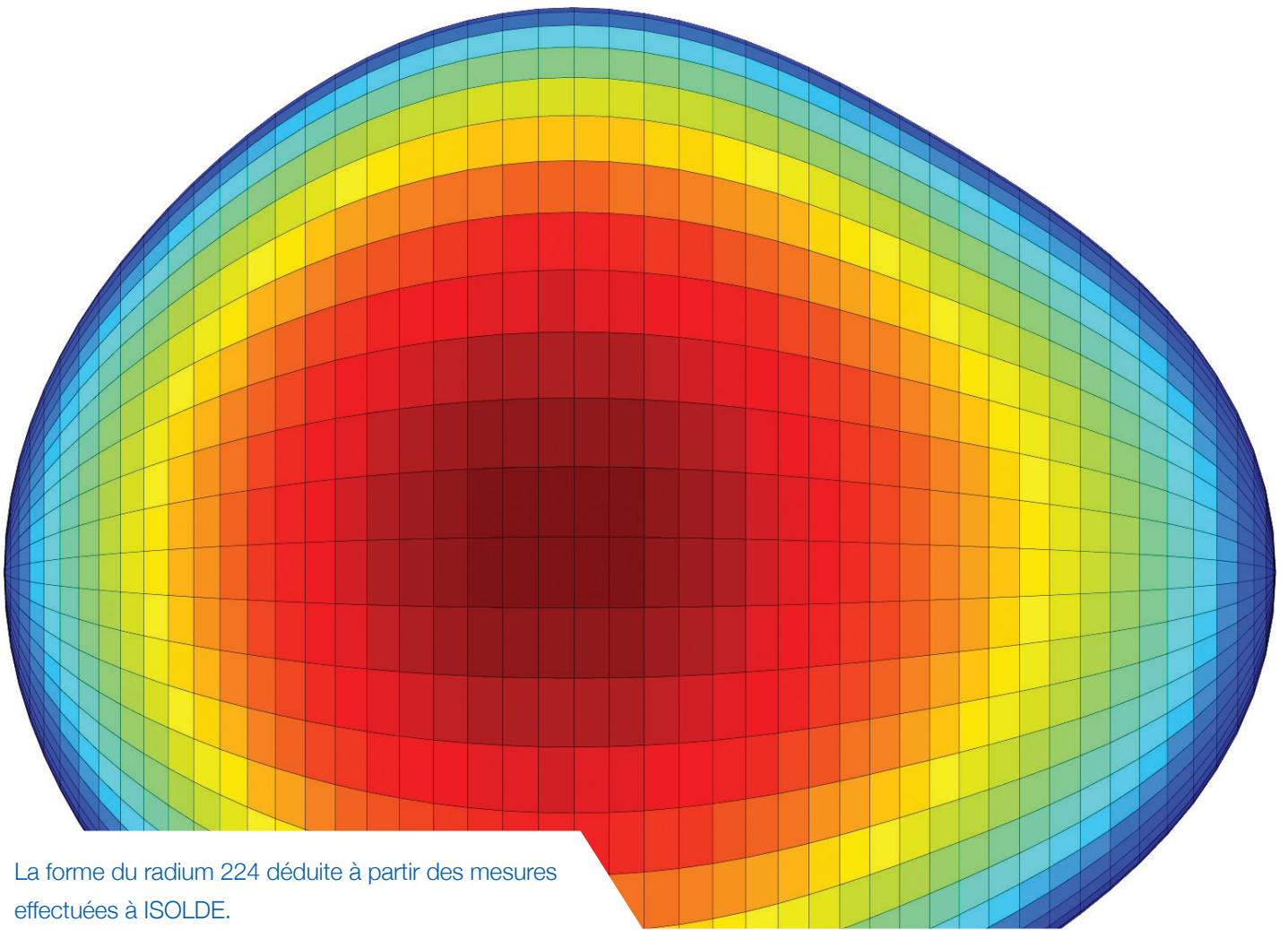
13/12

Le CERN a organisé un colloque pour rendre hommage à la carrière de Steve Myers au terme de son mandat de cinq ans en tant que directeur des accélérateurs et de la technologie.



20/12

Le CERN a organisé une chasse au trésor virtuelle dont le but était de retrouver à l'aide de Google Street View des figurines LEGO cachées dans le Centre de calcul.



La forme du radium 224 déduite à partir des mesures effectuées à ISOLDE.

Physique et expériences

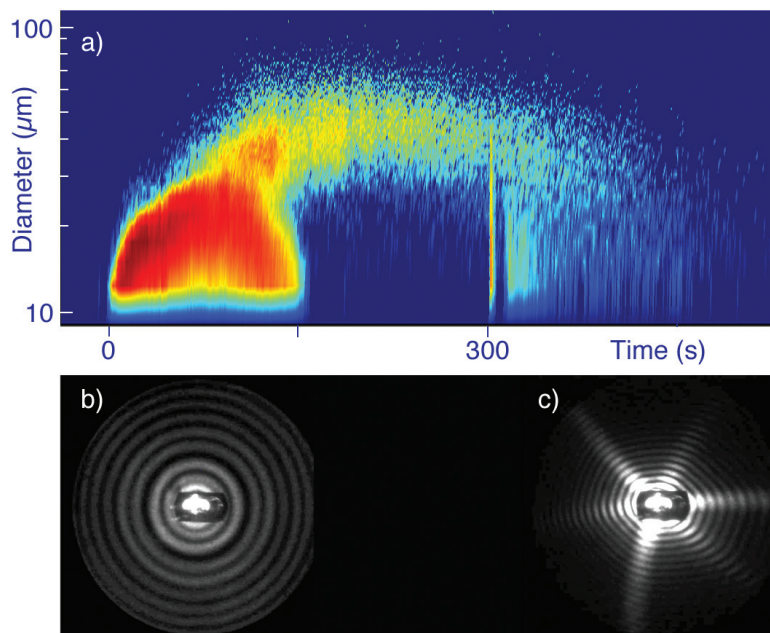
Au complexe d'accélérateurs, l'année a commencé avec un bref cycle d'exploitation proton-plomb au LHC, avant le début du premier long arrêt. Le reste de l'année a été consacré à la rénovation des installations et à l'analyse des données, laquelle a donné des résultats fascinants sur l'ensemble du complexe et pour toutes les gammes d'énergie.

Des nouvelles d'ISOLDE

L'installation ISOLDE, qui fonctionne depuis 1967, produit une large gamme de faisceaux radioactifs pour de nombreuses expériences dans les domaines de la physique nucléaire et atomique, de la physique de la matière condensée et des sciences de la vie. Même si l'installation a connu une réorganisation pendant le long arrêt (voir p. 30), 2013 a toutefois été une belle année pour la physique, avec la publication des

résultats de trois expériences différentes, à quelques semaines d'intervalle, dans la revue *Nature*.

En effet, début mai, la revue *Nature* a publié les résultats d'une étude détaillée sur le spectre des rayons gamma émis par les noyaux atomiques lourds à courte durée de vie, qui ont révélé de nouvelles informations sur leur forme. Si la plupart des noyaux sont de forme sphérique ou ellipsoïdale, la théorie prédit également l'existence de noyaux de forme asymétrique, notamment octupolaire (en forme de poire). Les nouvelles mesures, réalisées grâce au dispositif MINIBALL, montrent que le radium 224 possède un noyau en forme de poire stable, contrairement au radon 220, dont la forme rappelle une poire mais oscille sans se stabiliser. Ces résultats permettent de faire la distinction entre différents modèles de noyaux pour déterminer ceux qui pourraient avoir des moments dipolaires électriques atomiques (mesure de la séparation de la charge



Un nuage dans CLOUD. L'image (a) montre la taille des particules du nuage en fonction du temps durant une expansion adiabatique dans la chambre à brouillard de CLOUD (la densité la plus élevée est représentée en rouge). Les gouttelettes liquides commencent à se former au temps zéro. Environ 100 secondes plus tard, certaines d'entre elles gèlent, puis grossissent rapidement. Les gouttelettes liquides restantes (soit celles d'une taille inférieure à 30 μm) s'évaporent, laissant un nuage de glace pur ; dans la nature, la formation de la glace dans les nuages suit exactement le même processus. À 300 secondes, de l'air est réinjecté dans la chambre, de manière à achever la formation du nuage. Les images (b) et (c) montrent la diffraction optique, à partir du même nuage, d'une gouttelette liquide (b) et d'une lamelle hexagonale de glace (c).

électrique positive et négative) d'une certaine ampleur, comme cela est prédit par les théories au-delà du Modèle standard.

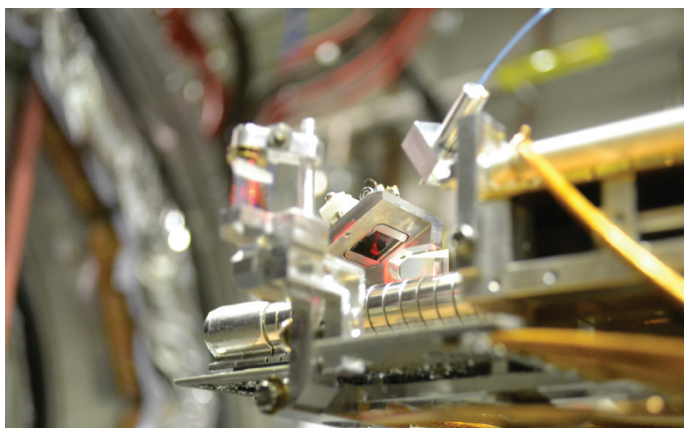
Quelques jours plus tard, une équipe travaillant avec la source d'ions laser à ionisation résonante à ISOLDE a publié, dans la revue en ligne *Nature Communications*, la première mesure du potentiel d'ionisation de l'astate, l'élément le plus rare sur Terre et le dernier élément présent dans la nature pour lequel cette propriété fondamentale restait à ce jour inconnue. Cette découverte est particulièrement intéressante car les isotopes de l'astate sont des candidats pour la création de produits radiopharmaceutiques destinés au traitement du cancer. Elle permettra également de prédire les propriétés de l'élément superlourd 117, l'homologue chimique de l'astate le plus lourd. En juin, c'est la collaboration ISOLTRAP qui, à son tour, a publié des résultats dans la revue *Nature*. La collaboration a en effet mesuré la masse de noyaux de calcium exotiques à l'aide d'un nouveau dispositif de « miroirs » électrostatiques. Dans le modèle en couches des noyaux, les protons et neutrons sont structurés en « couches » qui rappellent celles des électrons dans les atomes. Les nombres dits « magiques » de protons et de neutrons correspondent à des couches pleines, dans lesquelles les constituants sont plus étroitement liés, ce qui se traduit par une plus grande stabilité des noyaux. Ces résultats renforcent l'idée que 32 est un nouveau nombre magique, l'un des rares à avoir été découverts depuis que le modèle en couches du noyau a été proposé, dans les années 1940. Ils permettent également de mieux comprendre comment les noyaux peuvent être décrits du point de vue de la force forte, l'une des forces fondamentales.

Faisceaux du PS

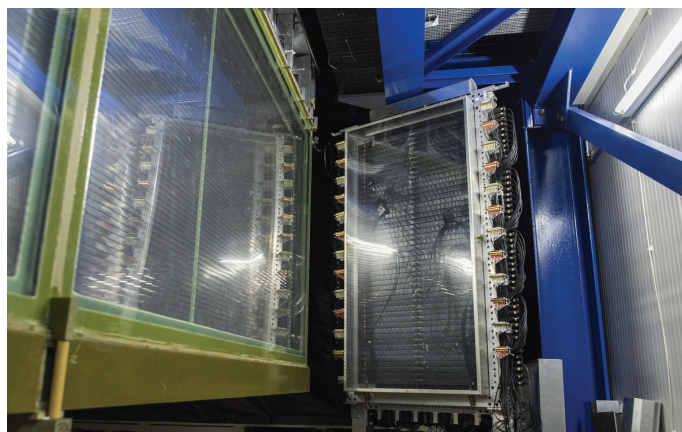
Au PS, l'expérience CLOUD cherche à déterminer si les aérosols atmosphériques et les nuages sont influencés par les rayons cosmiques galactiques. En octobre, la collaboration a expliqué dans un article paru dans la revue *Nature* que les concentrations extrêmement faibles de vapeurs d'amines trouvées dans l'atmosphère (quelques parties par millier de milliards) peuvent,

en combinaison avec de l'acide sulfurique, former des particules d'aérosols extrêmement stables avec des taux de production comparables à ceux observés dans la basse atmosphère. Il s'agit d'une grande avancée, car c'est la première fois que la formation de particules dans l'atmosphère a pu être reproduite avec une connaissance complète des molécules impliquées. Pendant l'arrêt du complexe d'accélérateurs, la collaboration a continué de recueillir des données en utilisant les rayons cosmiques pour étudier les nuages liquides et les nuages de glace dans la chambre à brouillard de CLOUD. L'expérience DIRAC, dont les tests ont été menés au PS entre 2008 et 2012, étudie les « atomes » inhabituels constitués de pions et de kaons, au lieu d'électrons et de protons. Son objectif est de vérifier les prédictions à basse énergie de la chromodynamique quantique pour les quarks légers. L'analyse des données relatives aux atomes πK et aux atomes de pionium ($\pi^+\pi^-$) s'est poursuivie à bonne allure tout au long de 2013. L'expérience a également mesuré la durée de vie des atomes πK afin de vérifier les prédictions théoriques très précises relatives aux quarks étranges. Enfin, DIRAC a peut-être observé les premiers atomes de pionium à vie longue avec une signification statistique de 5 sigma (σ), mais cette observation reste à confirmer.

Concernant l'installation n_TOF, qui utilise des protons du PS pour créer un faisceau de neutrons de haute intensité, 2013 a été une année de transition, avec la construction d'une nouvelle zone d'expérimentation, EAR-2 (voir p. 30). La collaboration a également profité du long arrêt pour terminer des analyses et publier d'importants résultats à partir des données collectées entre 2011 et 2013. La Conférence internationale sur les données nucléaires pour la science et la technologie, organisée tous les trois ans, a été l'occasion de communiquer les derniers résultats obtenus au travers de 18 exposés (un record !) sur les expériences nucléaires menées au CERN. Enfin, la famille n_TOF s'est encore agrandie, avec l'arrivée de nouveaux collaborateurs originaires du Japon, de la Russie et du Royaume-Uni.



Région de production de l'antihydrogène de l'expérience AEGIS.



Chambres de trajectographie pour l'expérience NA61/SHINE

Zoom sur l'antimatière

En 2013, les collaborations qui étudient l'antimatière au Décélérateur d'antiprotons (AD) ont travaillé sur les installations expérimentales pour qu'elles soient prêtes à recevoir le faisceau dans la seconde moitié de 2014. Un des objectifs principaux est de déterminer si les antiatomes se comportent de la même façon que les atomes de la matière ordinaire.

La collaboration ASACUSA a considérablement augmenté le nombre de positons piégés, a amélioré le taux de piégeage des antiprotons et a étudié la faisabilité des faisceaux d'antihydrogène. Des avancées théoriques et techniques récentes ont également ouvert la voie à l'amélioration de la spectroscopie de l'hélium antiprotonique.

La collaboration ATRAP a publié ses derniers résultats concernant le moment magnétique des antiprotons dans la revue *Physical Review Letters*. Avec une incertitude inédite de 4,4 milliardièmes, ce nouveau résultat est 680 fois plus précis que les précédents. L'équipe a également avancé sur la question du piégeage et de l'étude d'un grand nombre d'atomes d'antihydrogène.

L'installation de l'expérience BASE (expérience de symétrie baryon-antibaryon), dernière arrivée au Décélérateur d'antiprotons, a été approuvée en juin ; il s'agit de réaliser, avec une technique différente, des mesures du moment magnétique du proton et de l'antiproton. La collaboration, qui a pour objectif de déterminer cette propriété fondamentale avec une précision d'un milliardième, a commencé l'installation en septembre.

Toujours dans le hall de l'AD, la collaboration ALPHA a mis en service des éléments d'un nouveau dispositif amélioré : ALPHA-2. Celui-ci permet de séparer les processus de piégeage et d'étude des atomes d'antihydrogène, facilitant ainsi l'accès des lasers pour sonder la structure de ces atomes. La collaboration a par ailleurs mené une nouvelle étude sur l'effet de la gravitation sur l'antimatière. En utilisant les données de 2012, l'équipe a cherché à observer la chute libre (ou la montée) des atomes d'antihydrogène libérés du piège, et a obtenu les toutes premières limites des propriétés gravitationnelles de l'antimatière

dans un article paru dans la revue *Nature Communications*.

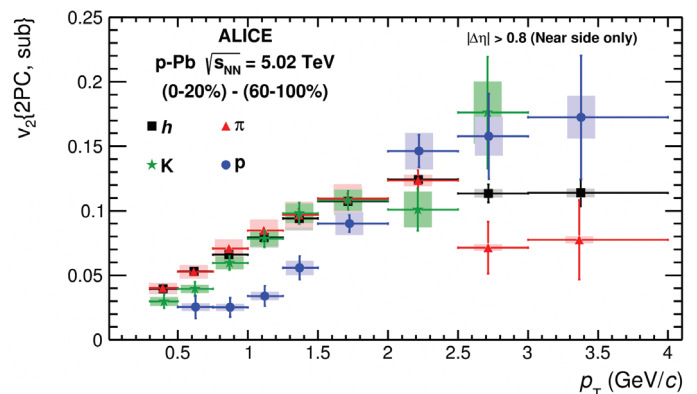
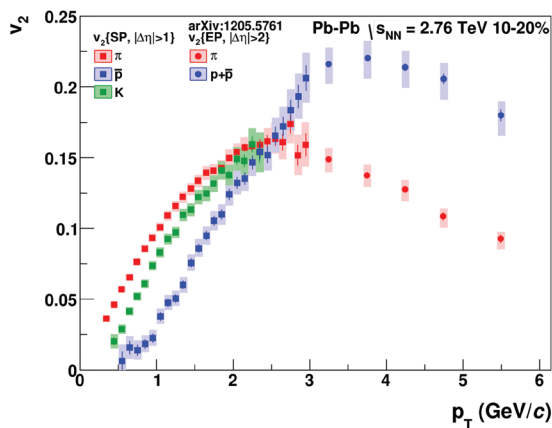
Deux expériences, AEGIS et GBAR, visent à mesurer l'interaction gravitationnelle de l'antimatière. Le dispositif d'AEGIS a été finalisé et amélioré en 2013, avec la mise en service des nombreux éléments nécessaires à la fabrication de l'antihydrogène (pièges, production de positons et de positonium, lasers et détecteurs). L'expérience GBAR sera menée sur la future installation ELENA, au Décélérateur d'antiprotons (voir p. 30).

Faisceaux du SPS

Dans la zone Nord, à Prévessin, le SPS alimente son propre programme de recherche avec divers faisceaux de particules.

L'expérience COMPASS (NA58) a mis en œuvre les modifications de matériel complexes nécessaires à l'acquisition de données en 2015, lorsqu'un faisceau de pions interagira avec des protons polarisés ($p^\uparrow$). La réaction $\pi p^\uparrow \rightarrow \mu^+ \mu^- X$ sera produite par l'impact du faisceau de pions de 190 GeV sur une cible d'ammoniacque polarisée transversalement. L'objectif est de mesurer pour la première fois les effets de la polarisation sur la production de paires de muons ($\mu^+ \mu^-$). Dans cette optique, l'ensemble de la ligne de faisceau est en cours de réaménagement : la plus grande cible de protons polarisés du monde et ses aimants supraconducteurs doivent ainsi être déplacés de deux mètres afin d'installer l'absorbeur composé de tungstène, d'oxyde d'aluminium et de béton, qui ne laissera passer que les muons (et les neutrinos). En parallèle, la collaboration a poursuivi l'analyse du gros volume de données enregistrées en 2008 et 2009 avec des faisceaux de pions et de kaons. La recherche d'états de particules exotiques a révélé un nouvel état étroit d'une masse de 1 420 MeV. Des analyses sont en cours pour en déterminer la nature exacte.

L'expérience NA61/SHINE mène des études sur les ions lourds pour comprendre dans quelles conditions et comment les quarks et les gluons, habituellement confinés dans les protons et les neutrons, peuvent se déplacer librement sous la forme d'un plasma quarks-gluons. En 2013, la collaboration a étudié les



La force du flux elliptique (notée v_2) mesurée par ALICE pour différentes particules identifiées émergeant des collisions Pb-Pb (à gauche) et p-Pb (à droite), en fonction de leur impulsion transversale au faisceau. Leur comportement dépend de manière similaire, dans les deux cas, de la masse des particules émergentes, les pions (π) étant les plus légers et les protons les plus lourds.

collisions d'un faisceau de béryllium (atome au noyau léger) du SPS sur une cible, également en béryllium. Les premiers résultats indiquent que, aux énergies élevées du SPS, le mécanisme de production des hadrons (particules faites de quarks et de gluons) à partir de noyaux de béryllium est différent de celui observé précédemment par NA61/SHINE lors de collisions avec des protons. Ces résultats suggèrent qu'une transition de phase vers le plasma quarks-gluons peut se produire même lors de collisions impliquant des noyaux légers : un phénomène encore jamais observé.

NA61/SHINE étudie également les propriétés des hadrons produits lors de collisions proton-carbone, mesures essentielles pour T2K, l'expérience d'oscillation des neutrinos au Japon. Ce partenariat fructueux a convaincu les physiciens travaillant avec les faisceaux de neutrinos à Fermilab de collaborer avec NA61/SHINE afin d'obtenir des mesures similaires, adaptées à leurs besoins.

En 2013, l'expérience NA-62 a franchi des étapes importantes dans l'amélioration de l'ensemble du dispositif. La collaboration a attribué l'ensemble des contrats de construction de grande ampleur restants, y compris ceux portant sur les interfaces des chambres à dérive et sur l'enceinte du détecteur Tchénkov à focalisation annulaire. L'équipe a également reçu l'innovante puce TDCpix, élément essentiel du trajectographe de faisceau, et a lancé la production complète de l'équipement électronique du calorimètre à krypton liquide, la phase de préproduction ayant été positive. En parallèle, la collaboration a terminé l'analyse des données accumulées lors de l'exploitation technique réalisée fin 2012. Ces données montrent comment exploiter au mieux le nouveau dispositif (détecteurs, faisceau et équipements électroniques).

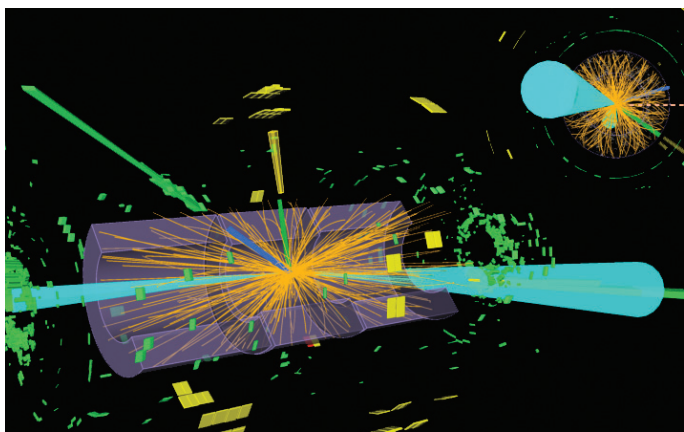
L'expérience NA63 étudie les effets quantiques qui se produisent dans les interactions électromagnétiques lorsqu'un faisceau de particules de haute énergie passe au travers de fines cibles amorphes. En 2013, la collaboration a obtenu des résultats qui ont permis de mieux comprendre le rôle de la diffusion multiple

dans l'émission de radiations à partir de cibles composées de noyaux légers. Les chercheurs ont aussi mesuré le schéma de résonance qui apparaît lorsque la distance de formation du photon est exactement la même que celle qui sépare deux feuilles placées à proximité l'une de l'autre. Étonnamment, cette distance peut être déterminée au moyen de feuilles placées à 0,5 mm l'une de l'autre, même si la longueur d'ondes de la radiation est d'à peine 10 femtomètres, ce qui est environ 100 000 millions fois plus petit.

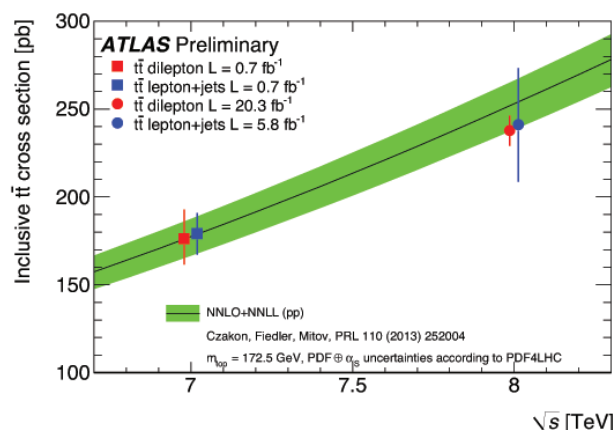
Le projet CNGS (Neutrinos du CERN vers le Gran Sasso), qui consistait à produire un faisceau de neutrinos du muon au SPS, a pris fin en décembre 2012. Il a permis de fournir un grand volume de données aux expériences ICARUS et OPERA, situées au Laboratoire national du Gran Sasso, dans le centre de l'Italie. Les neutrinos interagissent très faiblement avec la matière. Le faisceau a donc traversé facilement l'écorce terrestre, mais il y avait une petite chance pour que, au cours de leur voyage de 730 km, les neutrinos muoniques se transforment en un autre type de neutrino. Ces « oscillations » de neutrinos donnent des informations sur la masse infime de ces particules. Lors de l'analyse qui s'est poursuivie en 2013, la collaboration OPERA a détecté un troisième événement dans lequel un neutrino muonique s'est transformé en un neutrino tauique, indiquant que les neutrinos muoniques semblent bien osciller en neutrinos tauiques. Lors de travaux complémentaires, ICARUS a étudié les oscillations de neutrinos muoniques en un troisième type de neutrino, le neutrino électronique. En 2013, la collaboration a rendu compte de la détection de ces oscillations, mais sans indication des effets anormaux annoncés par d'autres expériences.

ALICE : la matière la plus chaude

L'expérience ALICE étudie la matière chaude et dense formée au LHC lors des collisions frontales entre des noyaux de plomb, qui contiennent de nombreux nucléons (protons et neutrons), donc un grand nombre de quarks et de gluons. Grâce aux données



Un événement candidat $H \rightarrow \tau\tau$, détecté par ATLAS où un τ se désintègre en un électron (en bleu) et l'autre en un hadron (en vert). La présence de deux jets à petits angles suggère la production par fusion de W et Z.



Mesure obtenue par ATLAS des sections efficaces de production (taux de production) de paires de quarks top en fonction de l'énergie dans le centre de masse.

collectées lors de la première période d'exploitation, ALICE a progressé dans la caractérisation d'un nouvel état de la matière, avec des observations inattendues en comparant les mesures des collisions plomb-plomb (Pb-Pb) à celles des collisions plomb-proton (Pb-p) et proton-proton (p-p).

Les résultats de cette première période renforcent l'hypothèse selon laquelle les collisions Pb-Pb produisent un état de la matière caractérisé par une forte densité de charge de couleur (charge de l'interaction forte liée aux quarks et gluons), dont les propriétés sont celles d'un liquide parfait et qui est opaque aux particules soumises à l'interaction forte (les hadrons). Cette matière subit une expansion collective hydrodynamique (à la manière d'un fluide) qui laisse son empreinte sur les hadrons émergents en fonction de leur masse et de leur impulsion transversale. Cela peut être décrit en fonction de l'expansion radiale du système et de la température au moment de la transition vers les hadrons. Curieusement, la corrélation entre ces deux paramètres semble être très similaire pour les collisions p-p, p-Pb et Pb-Pb. Si plusieurs modèles hydrodynamiques parviennent à décrire assez bien ces effets, aucun modèle unique n'a encore pu décrire l'ensemble des données.

La comparaison entre la fréquence de production pour les baryons (composés de trois quarks) et les mésons (paires quark-antiquark) est également intéressante. Pour les quarks u, d et s aux valeurs d'impulsion transversale intermédiaires, la fréquence de production de baryons est bien plus élevée dans les collisions centrales (frontales) entre ions Pb qu'entre protons. Ce comportement pourrait résulter d'une expansion hydrodynamique, mais pourrait aussi indiquer une nouvelle façon pour les hadrons de se former à partir des quarks dans le plasma quarks-gluons. Là encore, il est étonnant de constater qu'un tel comportement a également été observé dans les collisions p-Pb.

ALICE a par ailleurs poursuivi ses recherches sur la curieuse structure en double crête observée précédemment lors de collisions p-Pb de haute multiplicité, qui indiquait des corrélations angulaires à longue distance entre des paires de particules.

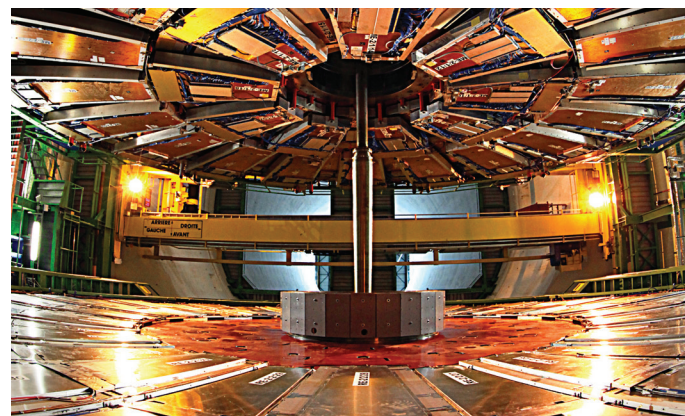
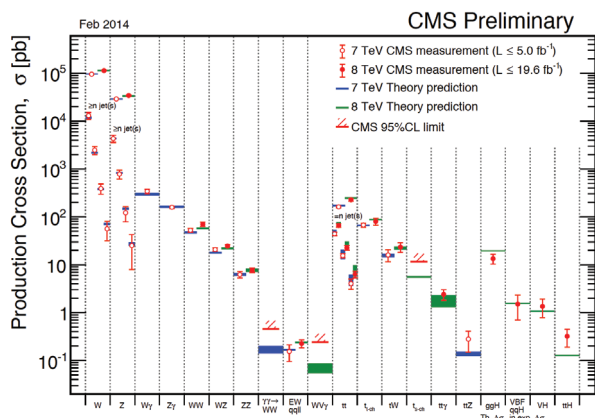
Ces corrélations semblent avoir une dépendance à la masse analogue à celle observée dans les collisions centrales Pb-Pb. Dans ce cas, l'effet était interprété comme la réaction d'un milieu sans frottement à de forts gradients de pression interne. Dans le cas des collisions p-Pb, plusieurs explications sont possibles. La plus communément admise implique des effets cohérents dans l'état initial ou des effets collectifs dans l'état final.

ALICE a également approfondi ses recherches sur le phénomène d'« atténuation des jets », par lequel des jets de particules corrélées produits lors de collisions de quarks et de gluons sont modifiés par la matière nucléaire qu'ils traversent. Les nouvelles études ont permis d'examiner en profondeur des jets de particules dont l'impulsion transversale ne dépasse pas 40 GeV/c. Les résultats montrent une réduction considérable des jets lors de collisions centrales Pb-Pb, sans pour autant que leur structure ait été sensiblement modifiée. En outre, la production de mésons contenant des quarks c a été mesurée lors de collisions Pb-Pb et comparée à celle des collisions p-p. Les résultats indiquent que ces mésons ont subi une importante réduction, tout comme ceux contenant des quarks plus légers, ce qui suggère que les quarks c, dont la diffusion est élevée, sont également réabsorbés par le milieu.

Dans les collisions p-Pb, en revanche, on n'a aucun signe d'atténuation des jets. Ce résultat peut s'expliquer par les effets d'écrantage dans la structure quark-gluon du noyau, un phénomène étudié par ALICE jusqu'à des valeurs faibles de l'impulsion des quarks et des gluons. Il reste à savoir comment interpréter les observations faites lors de collisions p-Pb, qui indiquent un comportement collectif analogue à celui des collisions Pb-Pb, mais sans atténuation des jets.

ATLAS : une riche moisson de données

À l'issue d'une première période d'exploitation du LHC d'une grande intensité, la collaboration ATLAS a profité de 2013 pour faire la synthèse des résultats de physique déjà obtenus et continuer à analyser la multitude de données accumulées



CMS a réalisé des mesures de haute précision des sections efficaces de production de nombreux processus du Modèle standard.

Vu depuis le fond de la caverne : le détecteur CMS est ouvert pour la première fois depuis trois ans.

ces trois dernières années. Un certain nombre d'études ont également été menées sur l'augmentation des capacités de l'expérience en vue d'un LHC à haute luminosité (voir p. 28). Un des principaux objectifs de 2013 était d'en apprendre davantage sur la particule « de type Higgs » découverte en 2012 en étudiant sa désintégration en une paire de photons, de bosons Z ou de bosons W. S'agit-il du seul et unique boson de Higgs du Modèle standard, du premier élément d'une famille d'objets de type Higgs, ou d'une tout autre particule ? Une analyse approfondie sur ces voies de désintégration a révélé qu'il s'agit très probablement d'une particule scalaire à spin nul et à parité positive. De plus, les couplages aux gluons et aux bosons W et Z correspondent à ceux du Higgs du Modèle standard. On a également obtenu des indications probantes de la production du Higgs par la fusion de deux W ou de deux Z, signature correspondant à deux jets de particules de haute énergie aux extrémités du détecteur. Des signes probants de la désintégration du Higgs en deux leptons tau ont aussi été observés (voir illustration p. 16). Ce mode de désintégration est extrêmement important, car il implique un couplage à des particules de matière : les fermions. Jusqu'à présent, toutes les observations concordent avec la description de la particule de Higgs du Modèle standard. Il faudra analyser d'autres données du LHC, produites lors de futures périodes d'exploitation, pour tirer des conclusions définitives, comme la collaboration ATLAS l'a montré en 2013 par des études sur la sensibilité potentielle du futur LHC haute luminosité à une nouvelle physique. La recherche de nouvelles particules ou de nouveaux phénomènes s'est poursuivie sur la base des données complètes de 2012, notamment celles relatives à la production de bosons W ou Z associée à un déséquilibre global dans le bilan d'impulsion de l'événement. Ces événements pourraient indiquer la production de particules « invisibles », constituant par exemple la matière noire. Des recherches sur les désintégrations rares du Higgs, par exemple en un boson Z et un photon, ou en deux muons, ont été menées pour la première fois, de même que sur des quarks top se désintégrant en un Higgs et un quark

plus léger. Le programme global d'ATLAS sur la recherche de la supersymétrie a été élargi à plusieurs points complexes, parmi lesquels la production de particules supersymétriques ayant une énergie très basse ou une durée de vie très longue. Malgré ces efforts, ATLAS n'a trouvé aucun indice significatif d'une nouvelle physique, ce qui limite fortement les modèles théoriques. Ces résultats sont étayés par tout un programme de mesures du Modèle standard. En 2013, ce programme a été élargi, notamment, à l'étude des quarks b et c et des J/ψ associés à des bosons W et Z, ainsi que de la production de jets jusqu'à des énergies de plusieurs TeV. L'étude du quark t, particule la plus lourde du Modèle standard, s'est poursuivie par des mesures précises de son taux de production (voir graphique p. 16), de l'asymétrie de charge, de sa masse et de sa polarisation. La première période d'exploitation du LHC s'est achevée en début d'année sur des collisions p-Pb. Les données collectées ont déjà apporté des éléments très intéressants sur l'effet de la matière nucléaire sur les collisions de particules de haute énergie, et viennent compléter les études en cours sur les collisions Pb-Pb.

CMS : un flot de données de physique

Début 2013, un travail considérable attendait la collaboration CMS, qui disposait des données de la première période d'exploitation, notamment celles des collisions de protons à une énergie de 8 TeV dans le centre de masse et de l'exploitation p-Pb de janvier. Au total, plus de 70 nouveaux résultats ont été publiés en 2013.

Le point tant attendu sur les études menées sur le boson de type Higgs découvert en 2012 a été l'un des faits marquants de l'année. L'ensemble des données à 8 TeV a permis d'accroître nettement le signal observé dans les différents états finals ; le mode de désintégration ZZ est maintenant à lui seul plus significatif que la combinaison utilisée à l'époque de la découverte. Cela permet de déterminer précisément la masse du nouveau boson ($125,8 \pm 0,5$ GeV) et de tester la valeur de son spin et de sa parité.

LS1 : Programme chargé pour ATLAS et CMS

Pendant le premier long arrêt (LS1), la collaboration ATLAS a mis en œuvre un programme intensif de maintenance, de consolidation et d'amélioration de son détecteur. Le détecteur à pixels a été remonté à la surface, réparé et réinstallé pour être équipé de la couche b insérable. Celle-ci améliorera la capacité du détecteur d'« étiqueter » les quarks lourds au sein des jets denses de particules. Un travail de préparation a été réalisé en vue d'exploiter l'intégralité du détecteur à une fréquence de 100 kHz pour le déclencheur de premier niveau, et les capacités de sélection du système de déclenchement dans son ensemble ont été nettement renforcées. Par ailleurs, afin de répondre à l'accroissement du débit de données nécessaire pour exploiter pleinement les augmentations de performance du LHC après le LS1, d'importantes améliorations auront également été apportées aux logiciels d'analyse.

Pour CMS, le LS1 a commencé avec la première ouverture de l'expérience depuis trois ans. Comme prévu, fin 2013, le programme d'amélioration avait été mené à bien sur la moitié du détecteur. Il consistait notamment à préparer le fonctionnement du trajectographe à une température de - 20 °C, à terminer le système pour muons dans la région des bouchons et à réviser l'électronique du détecteur de muons et du calorimètre hadronique. En prévision d'un nouveau trajectographe à pixels en 2016-2017, un tube de faisceau central de diamètre réduit a été fabriqué et préparé en vue de son installation. Enfin, les systèmes de déclenchement et d'acquisition de données ont été révisés sur les plans logiciel et matériel afin d'exploiter au mieux l'augmentation des débits de données prévue lors de la deuxième période d'exploitation.

Grâce à ces études, on peut pratiquement écarter l'hypothèse d'une particule pseudoscalaire (spin nul et parité négative), de même que des modèles simples incluant le cas d'un spin 2. Cela confirme que la nouvelle particule est un boson dont le spin est nul et la parité positive. Parallèlement, les couplages aux bosons W et Z ont été mis à jour, et ils concordent toujours parfaitement avec ceux du Modèle standard. CMS a également découvert des indices de la désintégration du Higgs en deux leptons tau. En combinant ce résultat à des recherches antérieures menées sur l'état final en une paire de quarks b, CMS a obtenu des indices probants concernant l'existence des désintégrations fermioniques du Higgs. Bien que ces mesures et d'autres soient cohérentes avec les valeurs prédites pour un boson de Higgs du Modèle standard, elles ne remplissent pas les conditions de précision requises pour écarter d'autres scénarios plus complexes de physique au-delà du Modèle standard.

Outre le Higgs, CMS a poursuivi sa recherche de nouvelles particules liées aux modèles fondés sur la supersymétrie (SUSY), en particulier pour les scénarios SUSY « naturelle », qui exigent que les analogues supersymétriques des quarks les plus lourds (les « squarks » top et bottom) soient relativement légers. De nombreuses analyses poussées ont montré une parfaite concordance avec le Modèle standard, ce qui a permis d'obtenir de nouvelles limites restrictives concernant les masses des squarks t et b. De nombreuses autres recherches sur de nouveaux phénomènes ont été menées : désintégrations plus exotiques des particules SUSY, matière noire et autres particules nouvelles. En l'absence de signal, des limites significatives ont été déterminées pour les masses et propriétés de ces particules hypothétiques.

Le volume complet de données recueillies lors de la première période d'exploitation a permis à CMS de réaliser plusieurs mesures de haute précision de processus du Modèle standard mettant en jeu les bosons W et Z et le quark t. Le graphique

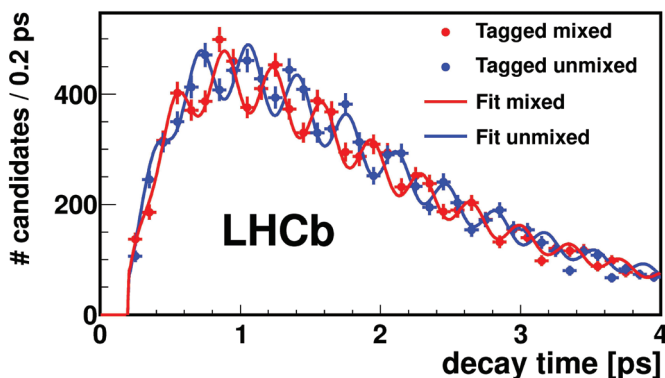
de la p. 17 récapitule toutes les mesures de sections efficaces réalisées à partir de cet ensemble de données. Les valeurs correspondantes recouvrent presque six ordres de grandeur. La production combinée d'un quark t et d'un boson W est un exemple remarquable de processus très rare observé par CMS. Cette observation de l'un des trois modes de production du quark t unique vient compléter le tableau des mécanismes de production observés pour la première fois à Fermilab, aux États-Unis.

Parmi les résultats les plus importants figure l'observation, par les collaborations CMS et LHCb, de la désintégration rare du méson B^0_s en deux muons. Le taux de désintégration, en associant les mesures de LHCb, concorde bien avec les prédictions du Modèle standard.

En parallèle, la collaboration CMS a poursuivi les études sur les performances de physique pour la phase 1 et la phase 2 des travaux d'amélioration du LHC. Le document de travail de Snowmass relatif au potentiel de découverte de CMS pour le projet LHC haute luminosité a été soumis pour évaluation aux États-Unis, et des études réalisées précédemment sur de futurs projets de physique ont été résumées dans le rapport de l'atelier HL-LHC de l'ECFA, ainsi que dans neuf analyses comparatives publiées.

LHCb : beauté rare

L'expérience LHCb réalise des mesures précises de particules contenant des quarks beauté (b) ou charmés (c). Elle se concentre sur les désintégrations rares et sur la violation de CP (différence de comportement entre une particule et son antiparticule), phénomènes qui pourraient ouvrir la voie à une nouvelle physique via des effets quantiques. La poursuite de l'analyse des données sur les collisions p-p recueillies pendant la première période d'exploitation du LHC a donné de nombreux



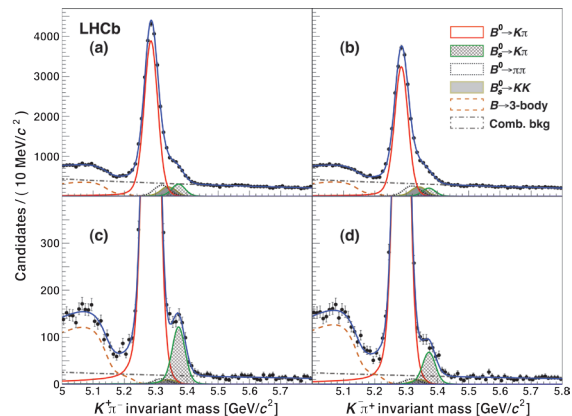
Les mésons neutres tels que le B_s (formé d'un antiquark b et d'un quark s) peuvent spontanément se transformer en $\bar{B}_s$ (formé d'un quark b et d'un antiquark s), leur antiparticule, créant des oscillations entre l'état de la particule et celui de l'antiparticule. LHCb a obtenu les mesures les plus précises du monde pour la fréquence d'oscillation.

résultats en 2013, y compris des « grandes premières ». Si la plupart des résultats ont confirmé les prédictions du Modèle standard, les données ont fait l'objet d'un examen constant à la recherche d'indices d'une nouvelle physique. L'expérience a par ailleurs recueilli ses premières données avec des ions plomb au cours de l'exploitation p-Pb, juste avant le début du premier long arrêt.

La désintégration du méson B_s^0 en deux muons est très rare (un cas sur plusieurs milliards d'après la théorie). Après avoir révélé le premier indice corroborant l'existence de ce canal de désintégration en 2012, la collaboration LHCb, par l'analyse des données de la première période d'exploitation, a obtenu un rapport d'embranchement de $2,9 \pm 1,1 - 1,0 \times 10^{-9}$. Les résultats obtenus par LHCb combinés à ceux de CMS présentent une signification statistique supérieure à 5σ (minimum requis pour valider une observation), faisant de ce phénomène la désintégration la plus rare jamais observée. Ces mesures concordent bien avec les prédictions du Modèle standard.

À signaler également la première observation d'une violation de CP dans la désintégration du méson B_s^0 en un kaon négatif et un pion positif, avec une signification statistique de plus de 5σ . C'est la première violation de CP observée pour le méson B_s^0 , quatrième particule pour laquelle ce phénomène a été constaté. Par ailleurs, LHCb a réalisé les mesures les plus précises à ce jour de la durée de vie du méson B_c^+ , une particule qui possède à la fois beauté et charme. En s'appuyant sur les données collectées en 2012, la collaboration a pu extraire le plus gros échantillon de désintégrations reconstruites de B_c^+ jamais présenté, et a estimé la durée de vie de la particule à 509 ± 15 fs.

La stratégie européenne pour la physique des particules mise à jour place la physique des saveurs, notamment des quarks c et b, parmi ses priorités. L'amélioration de LHCb a été approuvée



Combinaison de charge de $K^+\pi^-$ (colonne de gauche) et de $K^-\pi^+$ (colonne de droite), pour les mésons B^0 (en haut, en rouge) et B_s^0 (en bas, en vert). La hauteur des pics varie, montrant la différence entre le taux de désintégration des particules et celui des antiparticules, caractéristique de la violation de CP.

et sera réalisée au cours du deuxième long arrêt du LHC. Elle permettra d'augmenter d'un ordre de grandeur la capacité d'acquisition de données. La collaboration a choisi en 2013 la technologie pour l'amélioration de son localisateur de vertex : un nouveau détecteur à pixels, qui remplacera l'actuel détecteur à micro-pistes.

LHCf et les rayons cosmiques

L'expérience LHCf a pour but d'étalonner les modèles théoriques qui décrivent les interactions de rayons cosmiques à très haute énergie. Début 2013, la collaboration a recueilli des données lors de collisions p-Pb au LHC. Ces nouvelles données devraient fournir des informations sur les interactions nucléaires qui se produisent lorsque des rayons cosmiques pénètrent dans l'atmosphère terrestre. La collaboration a également construit et testé un nouveau calorimètre moins vulnérable aux rayonnements, en prévision du redémarrage du LHC en 2015.

MoEDAL et les monopôles

Le détecteur MoEDAL (*Monopole and Exotics Detector At the LHC*) est conçu pour rechercher les avatars fortement ionisants de la nouvelle physique, tels que les monopôles magnétiques et d'autres particules chargées massives exotiques à longue durée de vie. En 2013, une équipe de Bologne a analysé un assemblage prototype comprenant 80 m² de détecteurs de traces nucléaires (NTD) en plastique, qui avait été exposé aux faisceaux de protons du LHC l'année précédente. Début 2013, de nouveaux NTD en plastique ont été exposés à des collisions p-Pb au LHC avant d'être retirés pour être analysés. La collaboration MoEDAL a également communiqué des résultats d'essais obtenus avec sa station de piégeage. Elle déploiera son détecteur complet en 2014 et commencera à recueillir des données en 2015.

TOTEM : les bases

Située comme CMS au point 5 du LHC, l'expérience TOTEM a pour mission de réaliser, au plus près des faisceaux du LHC, des mesures précises de particules produites à très petits angles lors des collisions. Elle peut notamment mesurer la probabilité totale des collisions de protons : la section efficace p-p totale. TOTEM étudie également les processus diffractifs inélastiques, d'une grande importance pour les recherches en chromodynamique quantique (la théorie de la force forte), où la configuration des gluons échangés lors d'une collision permet aux protons d'y survivre sans se casser. En 2013, la collaboration a publié de nouvelles mesures, parmi lesquelles la section efficace pour une double diffraction.

Par ailleurs, grâce à une configuration particulière des aimants du LHC, TOTEM a pu explorer la diffusion élastique entre protons dans la région où l'intensité de la force de Coulomb est du même ordre que celle de la force forte (hadronique). Ces résultats ont permis à la collaboration d'annoncer la première observation de l'interférence entre la force de Coulomb et la force hadronique dans la diffusion élastique p-p à une énergie de 8 TeV.

Détecteurs pour le collisionneur linéaire

Le CERN participe à un projet international sur les détecteurs dans la perspective d'un futur collisionneur électron-positon. Le projet Détecteurs pour le collisionneur linéaire (LCD), mené au CERN, englobe des études sur les performances de physique et sur l'optimisation des détecteurs, ainsi que la R&D sur les équipements de détection.

L'une des options possibles pour le collisionneur linéaire est examinée dans l'étude CLIC (Collisionneur linéaire compact). La machine pourrait permettre de porter l'énergie de chaque faisceau de particules à 1,5 TeV, contre 250 GeV environ dans le projet ILC (Collisionneur linéaire international). Fin 2012, un nouveau cadre de coopération a été mis en place pour les expériences au CLIC. Fin 2013, l'étude sur les détecteurs et la physique au CLIC (*CLIC Detector and Physics study*), accueillie au CERN, comptait la participation de 20 instituts de 16 pays.

Au cours de l'année, d'importants efforts ont été déployés pour simuler des analyses sur le Higgs au CLIC pour différents modes de production et de désintégration, sur toute une gamme d'énergies dans le centre de masse. Les études ont confirmé le haut degré de précision qui peut être atteint lors de collisions électron-positon, en particulier lorsque les données prises à différentes énergies dans le centre de masse sont combinées.

Des progrès ont été réalisés dans la mise au point du détecteur à pixels, avec la production et l'essai d'une puce de lecture à pixels de forme carrée de 25 μm de côté. Plusieurs tests de faisceaux ont été effectués avec des capteurs extrêmement fins (50 μm). D'autres études ont montré que la distribution de puissance par impulsion limitant l'échauffement permet de répondre à la nécessité d'obtenir un bruit de fond atténué et de réduire la masse des équipements. Des mesures sont actuellement effectuées sur un nouveau dispositif pour examiner le refroidissement du détecteur à pixels par ventilation.

Des résultats, obtenus à partir des mesures d'un calorimètre hadronique à grain fin composé de plaques d'absorbeur en tungstène et effectuées avec un faisceau d'essai, ont été publiés. Ils donnent des détails inédits sur les gerbes hadroniques dans le tungstène et permettent de valider le logiciel de simulation Geant4.

Astrophysique des particules

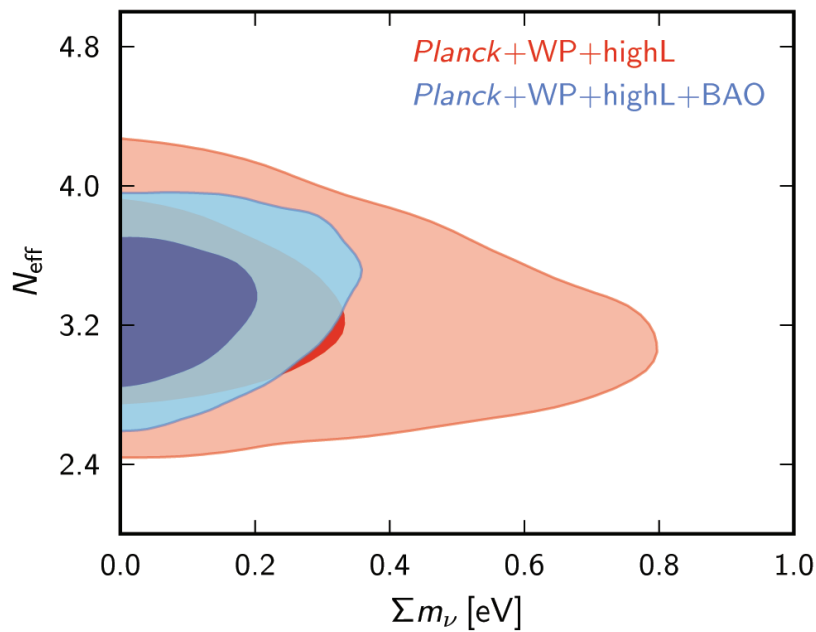
La nature de la matière noire de l'Univers reste l'un des plus grands mystères de la physique. Les expériences CAST et OSQAR utilisent les puissants aimants dipolaires du LHC pour rechercher des particules hypothétiques de faible masse candidates à la matière noire, telles que les axions ou les WISP, ces particules à interaction faible d'une masse inférieure à un électronvolt. L'expérience OSQAR consiste en quelque sorte à « faire passer la lumière à travers un mur », en traquant les oscillations quantiques entre les photons issus d'un rayonnement laser continu de 15 W et les WISP, qui pourraient être provoquées par un puissant champ magnétique transversal. L'expérience CAST scrute le Soleil à la recherche de WISP produites par l'astre.

En 2013, les tubes de l'aimant de CAST ont fonctionné sous vide, et l'expérience a utilisé des détecteurs de photons Micromégas avec des bruits de fond considérablement réduits pour améliorer la sensibilité aux WISP les plus légères. La collaboration a également installé un nouveau détecteur au silicium afin d'explorer la gamme d'énergies des photons en-deçà de 1 keV à la recherche des particules « caméléons », qui pourraient permettre de comprendre l'énergie noire.

En théorie

L'unité Théorie (TH) mène des recherches de pointe dans tous les domaines de la physique théorique. Elle assure un appui au programme de physique du LHC et contribue à l'interprétation des résultats en collaboration avec les groupes des expériences, dans le cadre du Centre de physique du LHC du CERN (LPCC). En moyenne, le groupe a publié un article par jour. En 2013, un travail considérable a été accompli dans le but de comprendre les conséquences de la découverte d'un boson de Higgs et des mesures correspondantes sur la validité du Modèle standard et de ses extensions, dont la supersymétrie. Les travaux liés au LHC ont aussi porté sur l'étude des contraintes découlant des résultats de physique des saveurs et de recherches directes, sur la proposition d'études et de mesures nouvelles, ainsi que sur le développement d'outils permettant de prédire et d'analyser les résultats des collisions.

Outre la physique du Modèle standard et au-delà, le large programme de recherche de l'unité englobe l'astrophysique et la cosmologie, la théorie des champs sur réseau, la physique des ions lourds et, sur un plan plus formel, différents aspects de la théorie des cordes, la supergravité et la dynamique de jauge non perturbative, ainsi que la théorie des champs conformes (CFT). En 2013, en particulier, les équipes de TH ont progressé dans l'étude de l'évaporation des trous noirs dans le contexte de la correspondance anti-de Sitter/CFT.



En cosmologie, certains membres du groupe ont collaboré avec les expériences de Planck, la mission de l'Agence spatiale européenne, et contribué à l'interprétation et l'analyse des données sur le rayonnement cosmologique diffus. Par ailleurs, la rafale de données publiées en mars 2013 a confirmé les modèles cosmologiques standard et limité les paramètres cosmologiques avec une précision inédite.

L'unité TH est également un centre d'excellence pour la communauté internationale de physique théorique. En 2013, elle a accueilli 60 boursiers, 41 étudiants doctorants, 28 attachés scientifiques, trois professeurs invités par le Directeur général et environ 800 visiteurs, et a bénéficié de neuf subventions européennes. Elle a également participé à des actions de communication grand public et de formation au CERN et ailleurs, en organisant deux écoles au Laboratoire, ainsi que plusieurs ateliers et quatre instituts de théorie.

Enfin, le groupe contribue aux efforts tendant à orienter la recherche dans la discipline. Pour 2013, il s'agissait notamment de l'étude du potentiel de physique d'un LHC à haute luminosité, du CLIC et des collisionneurs linéaires, et aussi du début de la réflexion sur les futurs collisionneurs circulaires (voir p. 29).

Graphique tiré des données publiées en mars 2013 par la collaboration Planck montrant les intervalles d'incertitude conjoints relatifs à la somme des masses des neutrinos, Σm_ν , et la densité des particules fossiles très légères ou sans masse présentes dans l'Univers, N_{eff} . Dans le modèle cosmologique standard, N_{eff} est égal à 3 environ, d'après les trois familles de neutrinos. La zone en rouge définit les limites déduites par Planck, compte tenu des données complémentaires relatives au rayonnement cosmologique diffus. La région en bleu est compatible à la fois avec les données Planck et les données astrophysiques sur l'échelle des oscillations acoustiques baryoniques. Ce graphique montre qu'il n'existe aucun indice de l'existence de fossiles ultralégers autres que les neutrinos déjà connus, et que la limite supérieure sur la somme des masses des neutrinos se rapproche de 0,06 eV, la limite inférieure définie par les expériences sur l'oscillation des neutrinos. Des données supplémentaires, notamment des mesures directes de la constante de Hubble à l'aide de supernovas, ou les récentes observations de la polarisation du rayonnement cosmologique diffus par BICEP2 semblent privilégier des valeurs de N_{eff} légèrement plus élevées.



Les bandes magnétiques, gérées par des robots, sont utilisées pour le stockage à long terme.

Informatique

Le seuil des 100 Po

Le 14 février, dernier jour de la première période d'exploitation de trois ans du LHC, la quantité de données enregistrées dans les systèmes de mémoire de masse du CERN a franchi le seuil remarquable des 100 pétaoctets (Po), soit 100 millions de gigaoctets, de données de physique. Le stockage de ces 100 Po, équivalant à 700 ans de films en haute définition full HD, représente un défi de taille. L'essentiel des données est stocké sur plus de 50 000 bandes magnétiques, tandis que le reste est conservé via un système de gestion de disques permettant un accès rapide et simultané par un grand nombre d'utilisateurs. Pour optimiser l'espace de stockage, les archives complètes sont régulièrement copiées sur des bandes de dernière génération ayant une plus grande capacité. En cas de défaillance d'un disque, son clone est automatiquement créé à partir de l'une des nombreuses autres copies coexistant dans le système assurant leur gestion. Un catalogue efficace permet par ailleurs un accès rapide et simultané à des millions de fichiers.

Préparer le futur

Le Centre de calcul du CERN et la Grille de calcul mondiale pour le LHC (WLCG) ont poursuivi leurs activités pendant le premier long arrêt du complexe d'accélérateurs. Ils ont continué à analyser le volume considérable de données collectées par le LHC et préparé son redémarrage qui générera un flux de données supérieur. La rénovation du Centre de calcul du CERN et l'inauguration de son extension à Budapest sont les deux temps forts du plan d'amélioration mené à bien en 2013.

La rénovation et l'amélioration du Centre de calcul visaient à sécuriser les systèmes informatiques critiques. En cas de coupure de courant, leur fonctionnement est maintenant garanti. L'essentiel des travaux a été achevé au cours de la première moitié de l'année. Une pièce de 200 m², équipée de racks passifs refroidis à l'eau, a été construite pour accueillir les serveurs critiques. L'alimentation électrique du Centre de calcul dans son ensemble a été améliorée grâce à la création de nouvelles salles contenant des systèmes d'alimentation sans coupure (UPS) et leurs 500 batteries. En cas de coupure

Rolf Heuer, directeur général du CERN, József Pálincás, président de l'Académie des sciences de Hongrie, et Viktor Orbán, premier ministre de la Hongrie, inaugurent la nouvelle installation au centre Wigner, aux côtés de Péter József Lévai (tout à droite), son directeur général.



de courant, ces batteries fournissent aux opérateurs 10 minutes de courant supplémentaires permettant de procéder à l'arrêt correct des serveurs. Ce laps de temps est nécessaire pour éviter la perte de données ou l'altération de services essentiels, tels que la Grille WLCG, au cœur de laquelle se trouve le Centre de calcul du CERN. Des groupes électrogènes diesel assurent une alimentation électrique de secours supplémentaire pour les systèmes critiques. Les travaux d'amélioration ont permis, non seulement de sécuriser les systèmes informatiques critiques, mais aussi d'assurer la redondance des systèmes et de porter la capacité de calcul du centre de 2,9 MW à 3,5 MW.

Le 13 juin, le CERN et le Centre de recherche Wigner pour la physique de Budapest ont inauguré le centre de calcul hongrois qui accueille l'extension du centre de calcul de niveau 0 situé à Meyrin, rajoutant ainsi 2,5 MW de capacité supplémentaires. Les liaisons dédiées et redondantes de 100 Gbit/s reliant les deux sites sont fonctionnelles depuis février, et quelque 20 000 cœurs

de processeurs, 500 serveurs et 5,5 Po de capacité de stockage étaient déjà opérationnels au moment de l'inauguration. Cette nouvelle installation permet d'accroître notablement les capacités du centre de calcul de niveau 0 de la Grille WLCG et de mieux assurer la continuité des activités du Laboratoire. Les serveurs sont gérés à distance depuis le CERN et monteront en puissance au fil des années.

Le Centre de calcul de Meyrin héberge 10 000 serveurs, qui sont renouvelés tous les quatre à cinq ans, lorsqu'ils sont considérés comme dépassés pour les recherches du CERN. Ces machines restent toutefois adaptées à des applications moins exigeantes. En octobre, 196 serveurs et 10 routeurs ont été donnés à l'Égypte et installés dans les locaux de l'Académie de la recherche scientifique et de la technologie, au Caire, où ils analysent les données des expériences ALICE et CMS. L'Égypte est le cinquième pays à bénéficier de tels dons après le Maroc, le Ghana, la Bulgarie et la Serbie.

Dans les nuages avec OpenStack

OpenStack est un projet open source destiné à fournir un système d'exploitation en nuage extrêmement modulaire. Lancé en 2010 par Rackspace et la NASA, il compte aujourd'hui 1 300 développeurs dans 200 entreprises, qui produisent des millions de lignes de code dans le cadre d'une licence Apache. Cette licence open source permet une utilisation flexible par les entreprises et les chercheurs. Le CERN a largement contribué au projet en produisant du code, en participant à des actions de communication ainsi qu'à la gouvernance du projet. Le CERN a été l'une des dix principales organisations contribuant au développement de Keystone, un service d'OpenStack utilisé pour l'authentification des utilisateurs. Fonctionnant comme une plateforme en nuage, OpenStack contrôle et automatise des ensembles de ressources de calcul, de stockage et réseau, transformant de l'équipement informatique classique en un puissant environnement en nuage. Avec la généralisation de l'informatique en nuage, un projet open source comme OpenStack joue un rôle essentiel en permettant au CERN d'adapter ses ressources informatiques de manière plus souple. Aujourd'hui, la communauté du CERN utilise plusieurs nuages OpenStack pour réaliser des simulations et des analyses de physique.

Stimuler la collaboration

L'année 2013 a vu le lancement d'un nouveau service destiné aux chercheurs, visant à simplifier la citation et le partage de publications, des données correspondantes et des logiciels permettant leur analyse. Ce répertoire, nommé Zenodo, est basé sur la technologie Invenio, et favorise le libre accès aux données et la collaboration. Il a été conçu pour aider les scientifiques à partager, sous différents formats, les résultats de leurs travaux, quels que soient la taille de leurs instituts ou leurs domaines de recherche. Hébergé par le CERN, Zenodo a été créé dans le cadre du projet OpenAIREplus, financé par le 7^e programme-cadre de la Commission européenne (7^e PC). OpenAIREplus a débuté à la fin de 2011 en prenant la suite du projet OpenAIRE, également financé par le 7^e PC.

CERN openlab, le partenariat public-privé entre le CERN et des entreprises leaders du secteur informatique, a entamé en 2013 la deuxième année de sa quatrième phase de trois ans. Dans ce cadre, plusieurs initiatives conjointes ont été menées avec un nouveau contributeur, Rackspace, pour mettre en place une architecture de référence et un modèle opérationnel pour des services en nuage fédérés entre le nuage privé de Rackspace, son nuage public et les nuages du CERN gérés via OpenStack. Yandex, grâce à son moteur de recherche russe, est devenu le premier membre associé de CERN openlab, un statut créé récemment pour les activités ne nécessitant pas une présence sur le site du CERN. Les chercheurs de Yandex ont mis au point des logiciels d'indexation et de filtrage pour permettre

aux scientifiques du CERN d'accroître la qualité et la rapidité de l'analyse des événements. Dans un premier temps, ce travail a porté sur les données de LHCb. En 2013, Huawei, contributeur depuis 2012, est devenu un partenaire de CERN openlab.

Le programme ICE-DIP (*Intel-CERN European Doctorate Industrial Programme*), lancé en février dans le cadre des initiatives Marie Curie financées par le 7^e PC, s'appuie sur la relation de longue date entre le CERN et Intel au travers de CERN openlab. Pour ce programme, le CERN s'est associé à Intel et Xena Networks pour assurer la formation de cinq jeunes chercheurs. Ces derniers bénéficient d'un financement de la Commission européenne et se sont vu attribuer un contrat de boursier CERN tout en poursuivant un doctorat dans l'une des deux universités partenaires, l'Université DCU de Dublin et l'Université nationale d'Irlande Maynooth. Au cours de leur programme de formation de trois ans, ils sont détachés pendant plusieurs mois sur des sites de laboratoires d'Intel en Europe et aux États-Unis. Ce projet vise à développer des solutions uniques dans le domaine de l'acquisition de données en ligne à haut débit et à faible latence, établissant ainsi une base solide pour la mise au point de technologies de pointe en matière de traitement des données, ce qui présente un intérêt significatif pour nombre d'industries. Les sujets de recherche du programme ICE-DIP sont essentiels pour garantir des avancées durables dans le domaine de la physique des hautes énergies ainsi que dans de nombreuses autres disciplines scientifiques et technologiques.

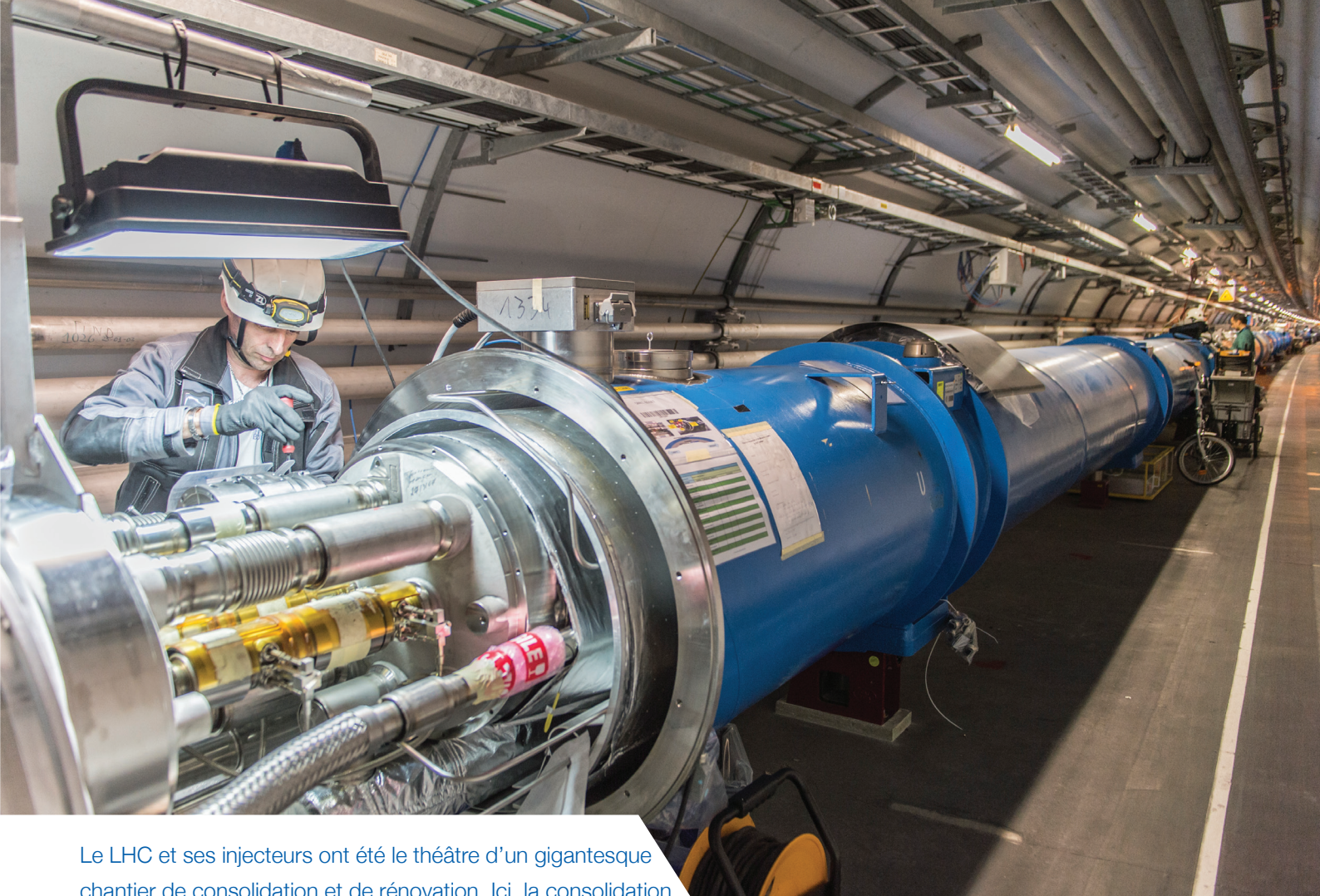
Analyse d'images satellite au CERN

Le département IT accueille UNOSAT, le programme des applications satellitaires opérationnelles de l'Institut des Nations Unies pour la formation et la recherche (UNITAR). Ce partenariat, qui met à la disposition d'UNOSAT l'infrastructure informatique du CERN lorsque la situation l'exige, permet à l'ONU d'être à la pointe de l'analyse d'images satellitaires. Des spécialistes des systèmes d'information géographiques et de l'analyse des données satellitaires, appuyés par des ingénieurs informatiques et divers experts, sont au service des communautés internationales de l'aide humanitaire et du développement 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7.

Dans différents cas d'urgence, l'UNOSAT a bénéficié en 2013 des ressources informatiques du CERN pour établir des cartes destinées aux premiers secours, par exemple lorsque le typhon Haiyan a frappé les Philippines au mois de novembre. Les cartes d'UNOSAT sont également utilisées pour soutenir le développement des capacités au niveau national et régional, des actions de formation et réduire les risques liés aux catastrophes, ainsi que pour fournir un appui technique en Amérique centrale, en Asie et en Afrique.

Ban Ki-moon, secrétaire général des Nations Unies, s'est rendu dans les locaux d'UNOSAT lors de sa visite au CERN. Il a rappelé l'utilité pour l'ONU des cartes et des analyses d'UNOSAT.





Le LHC et ses injecteurs ont été le théâtre d'un gigantesque chantier de consolidation et de rénovation. Ici, la consolidation de l'une des 10 170 jonctions électriques entre les aimants.

Accélérateurs

Dans l'aube froide de ce jeudi 14 février, une poignée de protons effectue un dernier tour de piste du plus grand collisionneur du monde. Il est 7 h 24, les protons terminent leur vertigineux voyage et le rideau tombe sur trois années d'exploitation du Grand collisionneur de hadrons (LHC). Quatre jours plus tôt, les dernières collisions entre des ions plomb et des protons imprimaient leurs traces dans les détecteurs du LHC. Les trois semaines de cette exploitation inédite protons-ions ont permis de fournir 30 nanobarns inverses de données à ALICE, ATLAS et CMS, et 2,1 nanobarns inverses à LHCb. Testée brièvement en 2012, cette exploitation représentait une gageure. Juste après l'arrêt de fin d'année, le complexe d'accélérateurs avait été remis en service en un temps record. Les premiers faisceaux stables ont été obtenus le 20 janvier, avec 13 paquets par faisceau, pour atteindre quelques jours plus tard 338 paquets par faisceau. Faire se percuter des particules de masses aussi différentes que des ions plomb et des protons nécessite une gymnastique compliquée du système de radiofréquence. Les deux faisceaux sont accélérés à des fréquences différentes, puis, à l'énergie maximale, les fréquences sont recalées afin

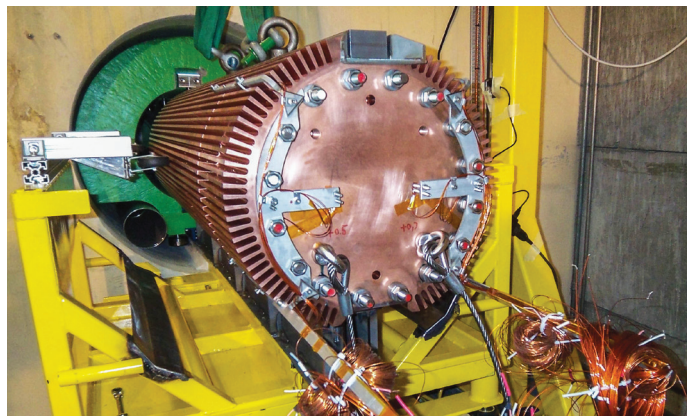
de produire les collisions dans les expériences. L'excellente performance des injecteurs a permis de produire des paquets d'ions avec une intensité et une brillance supérieures aux prévisions. Parallèlement, le Supersynchrotron à protons (SPS) réalisait des prouesses pour livrer des ions plomb à l'expérience NA61/Shine, à des énergies extrêmement faibles, de 29, 18 et 12 GeV par nucléon. A ces énergies, les plus faibles jamais utilisées au SPS, les faisceaux sont difficiles à maîtriser, c'est un peu comme si on demandait à un champion cycliste de suivre un escargot.

Gigantesque chantier

Tandis que les particules quittaient la scène, les équipes s'affairaient en coulisses pour préparer le premier long arrêt technique du LHC et de ses injecteurs. Durant près de deux années, le LHC et ses injecteurs doivent subir d'importants travaux pour les préparer à atteindre l'énergie de collision de 14 téraélectronvolts (TeV) dans le LHC. Cependant, le LHC redémarrera en 2015 à une énergie de collision de 13 TeV,



Un contrôle électrique et qualité sur l'une des 10 170 jonctions renforcées.



Le nouvel absorbeur de faisceau du Booster du PS au cours de son installation.

contre 8 TeV jusqu'à présent, de manière à limiter la phase « d'entraînement » des aimants. L'analyse de la mise en service des aimants en 2014, puis l'exploitation à 13 TeV en 2015, permettront de décider d'une augmentation éventuelle de l'énergie à 14 TeV.

Le premier long arrêt technique, gigantesque chantier de maintenance, consolidation et amélioration, a fait l'objet d'une préparation de plusieurs années, complétée par des tests de vide et électriques juste après l'arrêt des accélérateurs. La très longue liste de travaux a nécessité une planification minutieuse, centralisée par une équipe. Ces chefs d'orchestre de l'arrêt technique ont programmé des dizaines de chantiers en parallèle, occupant jusqu'à 1 600 personnes du CERN, des instituts et des entreprises contractantes. La quantité de travaux a nécessité le travail en deux et parfois trois rotations.

Trois chantiers majeurs sont menés en parallèle, l'amélioration du LHC, dont l'important projet de consolidation des aimants et des circuits supraconducteurs (SMACC), la maintenance et la consolidation des injecteurs et des infrastructures, et les travaux de protection de l'électronique contre les radiations (voir p. 30).

Interconnexions renforcées

Une condition sine qua non pour redémarrer le LHC à 13 TeV est le renforcement de toutes les jonctions électriques des circuits alimentant les aimants supraconducteurs. Des courants d'environ 12 000 ampères circuleront dans ces circuits après le redémarrage. Pour soutenir de telles intensités, les 10 170 jonctions électriques entre les aimants doivent être équipées de dérivateurs de courant en cuivre (ou « shunts »), qui évacuent le courant en cas de transition résistive. Pas moins de 27 000 shunts sont à installer ! Des mesures très précises de résistances des interconnexions ont révélé qu'en plus de ces renforcements il fallait reconstruire 3 000 jonctions. De surcroît, 5 000 boîtiers isolants renforcés doivent être mis en place autour de chaque paire de jonctions. L'équipe SMACC, qui avait passé les six derniers mois de 2012 à s'entraîner sur des maquettes, est donc partie à l'assaut du chantier.

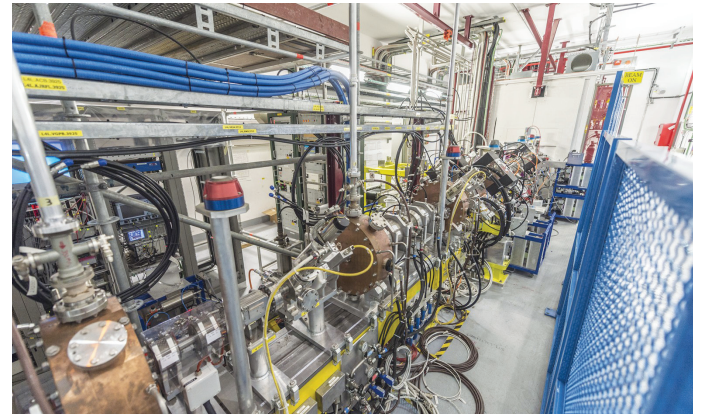
Ce sont de véritables « trains » d'équipes qui se sont répartis le travail, chaque équipe « wagon » de ce train effectuant une séquence des travaux. Le wagon de tête ouvre les interconnexions, le deuxième découpe les lignes contenant les connexions électriques, les suivants reconstruisent les jonctions, installent les shunts, les boîtiers d'isolation et effectuent les soudures, et ceux de queue referment les interconnexions. Cette chaîne d'opérations est entrecoupée de multiples contrôles électriques, géométriques, visuels, d'étanchéité et autres. Près de 300 collaborateurs du CERN, des entreprises contractantes et des instituts ont travaillé en deux rotations pour assurer les travaux. Même les opérateurs du LHC, qui pilotent habituellement la machine depuis le centre de contrôle, ont été mis à contribution, arpétant le tunnel pour réaliser les contrôles qualité. Fin 2013, 2 500 jonctions avaient été reconstruites, 19 000 shunts et 3 400 boîtiers d'isolation installés, 5 400 soudures effectuées et plus de 200 000 mesures de résistance, 10 000 tests d'assurance qualité électrique et 4 500 tests de fuite réalisés. Outre ce travail à la chaîne, les équipes ont remplacé 18 aimants et installé 612 soupapes de sécurité supplémentaires. À la fin de l'année, un des huit secteurs de l'accélérateur avait été fermé, prêt à être testé. Par ailleurs, le projet SMACC a démarré la rénovation des boîtiers de distribution électrique, les imposants équipements qui font passer le courant de câbles résistifs aux câbles supraconducteurs. Quatre de ces équipements étaient consolidés fin 2013.

Les installations de cryogénie du LHC et de ses détecteurs ont également fait l'objet d'opérations de maintenance. Un peu moins d'une centaine de compresseurs et leur moteur, éléments essentiels des stations de cryogénie, ont été démontés et expédiés chez les fournisseurs pour révision : les trois quarts étaient en cours de réinstallation fin 2013. À l'intérieur de la ligne de distribution cryogénique, 16 des plus de 2 000 compensateurs qui absorbent les contractions et dilatations thermiques ont été changés. La difficulté d'accès à la ligne cryogénique a rendu ce travail particulièrement ardu.

Le système de protection du LHC a été renforcé avec de nouveaux collimateurs : ces équipements sont formés de



L'une des stations du nouveau système de ventilation du PS est amenée dans l'accélérateur.



Le 14 novembre, un faisceau a pour la première fois circulé dans une section du nouvel accélérateur Linac 4, installé dans son tunnel.

mâchoires qui se resserrent autour du faisceau et absorbent les particules qui s'éloignent de la trajectoire. Vingt-trois nouveaux collimateurs, intégrant des moniteurs de position de faisceau, ont été développés pour être installés de part et d'autre des expériences et au point 6 du LHC, où se trouve l'absorbeur de faisceau. Avec cette instrumentation intégrée, le réglage des collimateurs sera optimisé, réduisant le temps de remplissage de la machine.

Cure de jouvence pour les injecteurs

Les cinq accélérateurs, qui constituent le complexe d'injecteurs du LHC, ont eux aussi fait l'objet d'importants travaux de rénovation et d'amélioration, notamment dans le cadre du projet LIU (Amélioration des injecteurs du LHC).

Une opération délicate s'est déroulée dans l'injecteur du synchrotron à protons (Booster du PS-PSB). Le vieil absorbeur de faisceau, installé en 1972, a été remplacé par un absorbeur flamboyant neuf pour préparer l'augmentation d'intensité et d'énergie de l'accélérateur. L'énergie du PSB, initialement de 800 MeV, est actuellement de 1,4 GeV. Lorsque le PSB sera connecté au nouvel accélérateur linéaire Linac 4, après le deuxième long arrêt technique (voir p. 29), son énergie augmentera encore pour passer à 2 GeV. La délicate opération de remplacement dans un milieu radioactif a duré plusieurs semaines pendant l'été 2013.

Des modules supplémentaires ont été ajoutés au prototype de cavité accélératrice utilisant la technologie FineMet, plus performante aux énergies du PSB. Les essais avec faisceau de cette technologie, développée avec le laboratoire japonais J-PARC, se poursuivront pendant la prochaine période d'exploitation en vue d'un remplacement de toutes les cavités au cours du second grand arrêt du LHC et de ses injecteurs. Une nouvelle version d'électronique radiofréquence bas niveau de contrôle du faisceau a par ailleurs été installée sur les quatre anneaux de l'accélérateur.

Nouveau souffle

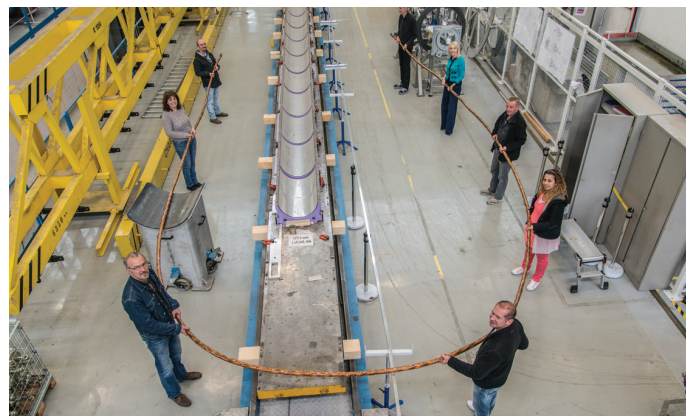
Quelques mètres plus loin, le plus vieil accélérateur du CERN encore en service, le Synchrotron à protons (PS), subissait également une cure de rajeunissement. La technologie FineMet y est utilisée pour un nouveau système de stabilisation du faisceau qui sera installé avant le redémarrage. La ventilation du PS a été remplacée par un système de conception totalement nouvelle. Le démantèlement de l'ancien système, datant de 1957, et l'installation du nouveau se sont avérés particulièrement délicats du fait notamment de l'exiguïté des locaux : il a fallu trois mois pour extraire les 80 tonnes de matériel et plus de six mois pour installer le nouveau système formé de 22 unités. La ventilation est pilotée par un système électronique flamboyant neuf, placé au centre de l'anneau du vénérable accélérateur. Les accès ont été dotés de sas avec contrôle biométrique, comme ceux du LHC. A l'extérieur de l'accélérateur, d'importants travaux de génie civil se déroulaient pour améliorer le blindage de l'accélérateur.

Les nuages se dissipent

Dans le Supersynchrotron à protons (SPS), un revêtement de carbone amorphe a été déposé sur la face interne des chambres à vide de seize aimants. Cette opération est destinée à atténuer le phénomène des nuages d'électrons qui déstabilisent le faisceau. Initialement produits par ionisation des molécules d'air résiduelles, des électrons risquent de générer d'autres électrons en bombardant les parois de la chambre à vide. Ce phénomène survient si le matériau de la chambre présente un coefficient élevé d'émission d'électrons secondaires et il est d'autant plus intense et rapide que les paquets de particules sont rapprochés et denses. Le carbone amorphe apporte une solution avec un coefficient d'émission secondaire très faible ; sa tenue dans le temps devra être testée lors de la prochaine période d'exploitation. Un nouveau prototype de détecteur à fil à balayage rapide, une instrumentation utilisée pour mesurer la dimension transversale des faisceaux, a été installé pour être testé avec faisceau. En surface, la structure des tours de refroidissement a été entièrement renouvelée, et de



Travaux pour le remplacement du réseau de distribution électrique de l'accélérateur SPS.



Le nouveau câble supraconducteur à haute température, capable de porter 20 000 ampères sur 20 mètres.

nombreuses vannes du système de refroidissement ont été remplacées. Enfin, l'accélérateur se prépare à un doublement de sa puissance radiofréquence lors du prochain long arrêt technique pour doubler l'intensité du faisceau. La conception des amplificateurs et autres équipements radiofréquence a progressé et la construction d'un nouveau bâtiment destiné à les accueillir a été approuvée.

Outre ces travaux spécifiques à chaque injecteur, plusieurs chantiers se sont déroulés dans tout le complexe. De nombreux aimants ont été remplacés ou rénovés. Au cœur des accélérateurs, l'électronique de contrôle a subi une cure de jouvence avec le remplacement des systèmes de contrôle en temps réel. Formés de cartes d'acquisition électronique au plus près des machines, ces systèmes pilotent tous les équipements des accélérateurs. Près de 500 systèmes ont été remplacés dans les injecteurs ainsi que dans le décélérateur de protons (AD) et l'installation de physique nucléaire REX-ISOLDE. La plateforme logicielle de contrôle a également été entièrement changée.

Au-delà des injecteurs, la vague de rénovation a touché les systèmes de contrôle et de supervision de l'ensemble des infrastructures. Les systèmes de contrôle de protection des machines, du vide, de la cryogénie, des systèmes de gaz pour les expériences, du refroidissement et de la ventilation ont été rénovés ou mis à jour. Un nouveau système de supervision, de contrôle et d'acquisition de données du réseau de distribution électrique a été développé et installé.

Réseau vital

Les grands travaux électriques, démarrés en 2012, se sont poursuivis avec notamment le remplacement du réseau de distribution électrique de 18 kilovolts du SPS, vieux de 40 ans, formé de 90 kilomètres de câbles. Deux importantes sous-stations électriques ont par ailleurs été construites pour fiabiliser le réseau électrique du CERN : elles assurent notamment une alimentation redondante du Centre de contrôle des accélérateurs, une distribution de secours sur le site de Prévessin et une seconde alimentation sur le site de Meyrin. Ces

nouveaux équipements ont permis de séparer les réseaux des accélérateurs de ceux alimentant les services généraux sur le site de Meyrin. Le parc d'onduleurs du LHC a entièrement été changé.

Ces grands travaux ont généré une activité de câblage sans précédent, que ce soit sur le réseau de câbles de cuivre ou celui de fibres optiques. Au fil des années, l'évolution des accélérateurs a généré une accumulation de câbles dont certains, devenus inutiles, doivent être enlevés. A cela s'ajoutent les nouveaux câbles à installer ou à déplacer comme dans le cadre du projet R2E (voir encadré p. 30). La fiabilité de ce réseau complexe est vitale pour le fonctionnement des machines. Au cours de l'arrêt technique, pas moins de 1 000 kilomètres de câbles en cuivre et de fibres optiques (10 000 liaisons environ) sont soit remplacés, soit nouvellement installés, dans le cadre de 37 grandes campagnes. En 2013, les équipes de câblage ont par exemple remplacé 100 kilomètres de câbles irradiés dans le SPS. Toujours dans cet accélérateur, un nouveau réseau de fibres optiques a été déployé. Un travail d'identification des câbles inutilisés dans le PSB, trop encombré, a également commencé. Les rénovations ont touché les autres accélérateurs du CERN. La zone cible de l'installation de physique nucléaire ISOLDE est en cours de rénovation avec notamment l'installation d'un nouveau robot pour effectuer le changement des cibles.

Feu vert pour la haute luminosité

Si la plupart des équipes sont focalisées sur le redémarrage de 2015, certaines planchent sur l'avenir des accélérateurs. Ce futur se dessine dans le cadre de la Stratégie européenne pour la physique des particules, dont une mise à jour a été approuvée par le Conseil du CERN en mai. Le document pose les bases d'un programme à moyen et long terme, jusqu'à 2035, et à très long terme, au-delà de 2035 (voir p. 29). Pour la période 2015-2035, un programme du LHC et de ses injecteurs a été approuvé fin 2013, avec des phases d'exploitation de trois ans entrecoupées de longs arrêts techniques. L'objectif majeur est d'exploiter le LHC à son potentiel maximal. C'est pourquoi le feu

Des pistes pour les accélérateurs du futur

A quoi ressemblera la physique fondamentale dans 20 ans ? Quels outils utiliseront les chercheurs de demain ? Ces questions peuvent paraître spéculatives. Elles intéressent pourtant les experts du domaine qui se projettent dans un futur lointain, à l'instar des visionnaires du LHC qui ont imaginé cette machine plus de 25 ans avant sa mise en service. En mai 2013, la réunion sur la stratégie européenne pour la physique des particules a donné le feu vert à des études de faisabilité pour deux projets à très long terme : le CLIC, collisionneur linéaire électron-positon à l'étude au CERN, et le FCC (Futur collisionneur circulaire), un collisionneur de hadrons d'une centaine de kilomètres de circonférence pouvant atteindre une énergie de 100 TeV. Cette dernière étude intégrera également la possibilité d'un collisionneur de leptons comme étape intermédiaire ainsi qu'une option de collisionneur lepton-hadron.

L'étude CLIC d'un collisionneur linéaire compact s'appuie sur une technologie novatrice d'accélération à deux faisceaux dont la faisabilité a été documentée dans un rapport préliminaire de conception en 2012. Au cours de l'année écoulée, l'installation d'essais CTF3 a réalisé de nouvelles mesures, confortant le principe d'accélération à deux faisceaux. Une première installation de tests des klystrons a été mise en service. Des essais sur l'alignement et l'émission du faisceau ont été menés au laboratoire SLAC aux États-Unis. Un premier module complet d'accélération a été fabriqué. La collaboration a accueilli de nouveaux instituts partenaires et compte maintenant 70 instituts de 30 pays. La coopération avec l'étude du Collisionneur linéaire international ILC se poursuit. Enfin, le CLIC ouvre la voie à d'autres applications : des études ont porté sur l'utilisation possible de ses techniques d'accélération pour des accélérateurs compacts pour lasers à électrons libres destinés notamment aux applications médicales.

vert a été donné au projet de LHC à haute luminosité, qui vise à augmenter le nombre de collisions d'un facteur 5 à 10 pour atteindre une luminosité de 250 fb^{-1} par an après 2025.

Pour marquer le passage de ce cap, une réunion de lancement du projet de LHC à haute luminosité rassemblant 160 scientifiques de tous les pays a été organisée lors des rencontres annuelles de l'étude *HiLumi LHC Design Study*, partiellement financée par le 7^e programme cadre de la Commission européenne, et de l'étude *LHC Accelerator Research Program* (LARP), collaboration entre les laboratoires américains et le CERN sur le sujet. Le projet repose sur le développement de nouveaux aimants quadripôles plus puissants pour les triplets internes (les aimants installés juste avant les points de collision), d'aimants dipôles plus courts et plus puissants – à 11 teslas contre 8 pour les aimants actuels du LHC – de cavités radiofréquence dites « en crabe » pour orienter le faisceau avant la collision, d'un système de collimation amélioré et de liaisons supraconductrices de 300 mètres de long.

En 2013, plusieurs essais ont été réalisés sur des prototypes d'aimants supraconducteurs à 11 teslas, utilisant un nouvel alliage supraconducteur niobium-étain. Un aimant dipôle de 1 mètre, développé avec Fermilab, a démontré un champ record de 11,7 teslas au printemps. Une bobine courte, développée pour qualifier le câble, a atteint un champ de 13,5 teslas au CERN à l'automne. Les recherches sur les cavités supraconductrices, dites « en crabe », chargées d'orienter les faisceaux avant la collision, ont également avancé. Trois cavités, avec des conceptions différentes, ont vu le jour. L'une, développée à l'Université de Lancaster et l'Institut Crockcroft au Royaume-Uni, a été testée au CERN. Les deux autres ont été développées et testées dans les laboratoires J-LAB et BNL aux

États-Unis. Les trois cavités ont largement dépassé l'objectif d'un gradient d'accélération de 3,4 mégavolts, démontrant la faisabilité de cette technologie.

Avec l'augmentation de la luminosité, certains convertisseurs de puissance, sensibles aux radiations, devront être repositionnés en surface et reliés à l'accélérateur par des câbles supraconducteurs de 300 mètres de long. Le CERN, en coopération avec l'industrie, a développé des fils supraconducteurs haute température à base de diborure de magnésium (MgB_2). Les premiers prototypes de câbles fabriqués avec de tels fils ont été testés : un câble a ainsi porté un courant de 30 000 ampères sur 2,5 mètres, mais à 4,5 kelvins (- 268°C). Un autre câble, capable de faire transiter un courant 20 000 ampères sur 20 mètres et à 20 kelvins (- 253°C), a été fabriqué pour un essai en 2014. Enfin, des collimateurs formés de molybdène graphite sont à l'étude : ce matériau perturberait moins le faisceau que ceux actuellement utilisés.

Faisceau au berceau

La chaîne d'injecteurs doit également se préparer à ce lumineux avenir. Une analyse des différents scénarios pour l'amélioration des injecteurs a été menée à l'automne afin d'optimiser les choix en fonction des coûts et des performances. Un rapport technique, décrivant l'ensemble des travaux prévus dans le cadre du projet LIU, sera publié en 2014. L'accélérateur linéaire Linac 4, qui doit prendre le relai de l'actuel Linac 2 après le deuxième long arrêt technique du LHC, constituera le premier rouage de cette chaîne d'injecteurs rénovés. En cours de construction, le Linac 4 a donné ses premiers signes de vie. Pour la première fois, un faisceau a été accéléré dans une section de l'accélérateur, dans une zone de test au printemps, puis dans le tunnel de

l'accélérateur à l'automne. Les trois premiers éléments de la chaîne – la source d'ions, le quadripôle radiofréquence (RFQ), et la ligne chopper – ont ainsi été mis en service à une énergie de 3 MeV. Une source d'ions plus performante a été finalisée en décembre. Les structures accélératrices radiofréquence, qui portent le faisceau à 100 MeV, ont été fabriquées, testées pour la plupart, et seront progressivement mises en place. La pré-série des dernières structures accélératrices, portant le faisceau à 160 MeV, a été livrée et les autres structures sont en fabrication. Le Linac 4 sera mis en service à partir de 2015, puis testé avant d'être relié au PSB au cours du second long arrêt technique des accélérateurs.

Pour maintenir la diversité du programme de physique du CERN, d'autres machines sont en gestation. Les études ont progressé pour ELENA (*Extra Low ENergy Antiproton Ring*), projet qui vise à améliorer l'efficacité du Décélérateur d'antiprotons (AD) en ralentissant davantage les antiprotons destinés aux expériences sur l'antimatière. Les études détaillées ont progressé et la machine a été présentée à un comité d'examen international. Le rapport de conception détaillé sera publié au printemps 2014. La construction d'un nouveau bâtiment, annexe à celui de l'AD et destiné à reloger des équipements occupant l'emplacement prévu pour ELENA, a débuté en juin et a bien avancé.

Quelques jours plus tôt, les pelleteuses s'attaquaient à un autre chantier, celui de la nouvelle zone d'expérimentation (EAR-2) de n_TOF, la source de neutrons du CERN. Cette nouvelle installation, qui devrait recevoir ses premiers faisceaux dès l'été 2014, fournira un flux plus important de neutrons à la communauté scientifique. Les interactions avec les neutrons permettent de mener des études dans de nombreux domaines de science fondamentale ou appliquée, de l'astrophysique

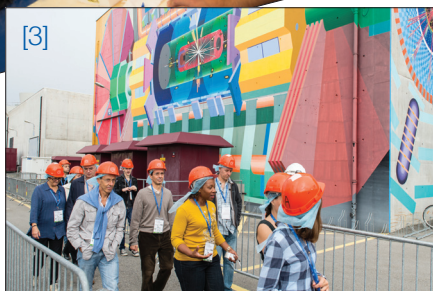
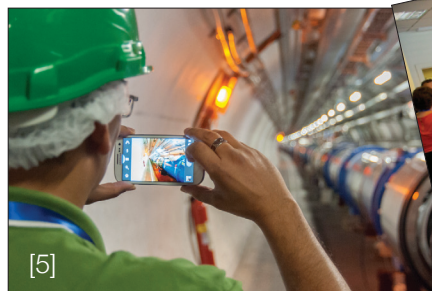
aux applications médicales en passant par la technologie de transmutation des déchets nucléaires. Avec des capacités améliorées EAR-2 pourra étudier de nouveaux processus et isotopes, de surcroît avec une précision jamais atteinte.

Toujours dans le domaine de la physique nucléaire, le nouvel accélérateur linéaire supraconducteur HIE-ISOLDE (ISOLDE à haute énergie et haute intensité) poursuit son développement. Cet accélérateur de 16 mètres de long augmentera l'énergie des faisceaux de l'installation ISOLDE (de 3 à 10 MeV par nucléon) et quadruplera leur intensité. Le hall d'ISOLDE a été en partie transformé pour accueillir le nouvel accélérateur. Deux cavités accélératrices ont démontré des performances au-delà des spécifications. La fabrication des équipements de radiofréquence, des aimants, des convertisseurs de puissance et de l'instrumentation a été lancée. Enfin, une salle blanche pour l'assemblage des composants a été installée.

Le dernier-né des projets hors LHC est l'expérience AWAKE, une étude R&D sur les accélérateurs approuvée mi-2013 pour une mise en service prévue fin 2016. Cette expérience, qui va recevoir des faisceaux du SPS, étudiera l'utilisation des plasmas pour l'accélération (accélération par champ de sillage plasma). Ce principe a déjà été démontré par d'autres laboratoires avec des systèmes d'accélération d'électrons et des lasers. AWAKE (accélération par champ de sillage plasma entraînée par des protons) vise à démontrer pour la première fois le principe avec des protons. L'objectif est d'atteindre des gradients d'accélération de plusieurs gigavolts par mètre, bien supérieurs aux gradients d'environ 100 mégavolts par mètre atteints avec les cavités radiofréquence actuelles. Des études comme AWAKE ouvrent de nouvelles perspectives pour les accélérateurs.

Projet R2E : l'électronique fait de la résistance

Une particule égarée dans un accélérateur, c'est loin d'être anodin. Les particules isolées qui percutent des cartes électroniques sont à l'origine de nombreux arrêts des accélérateurs. En 2011, quelque 70 défaillances électroniques ont été attribuées à ces particules baladeuses, incidents nommés « effets des particules isolées » (*Single event effects* – SEE). Le problème, identifié depuis plusieurs années, est à l'origine d'une grande campagne de blindage et de relocalisation de l'électronique, mais aussi de tests et de développement de cartes plus résistantes aux radiations. La première campagne de blindage et de relocalisation en 2011 a permis de réduire d'un facteur quatre les pannes. L'objectif est de réduire encore d'un facteur six les incidents pour qu'ils ne soient à l'origine que d'un arrêt de faisceau pour 2 femtobarns inverses (fb^{-1}) de données enregistrées. Au cours du long arrêt technique, une centaine de racks électroniques sont déplacés en cinq points de la machine et des convertisseurs de puissance sont éloignés des lignes de faisceaux. Au point 7 par exemple, l'électronique de contrôle du vide, de la cryogénie, de la protection de la machine et des convertisseurs de puissance sont transférés dans le tunnel de service, qui a dû subir d'importants travaux de génie civil. Le blindage de quatre cavernes de service aux point 1 et 5 est renforcé par d'épais murs de fer, plus performants que le béton. Parallèlement, de nouveaux moniteurs de radiations ont été installés dans le LHC, qui compte désormais près de 400 de ces appareils de mesure, tandis que la chaîne d'injecteurs est également équipée. De nouvelles cartes électroniques plus résistantes aux radiations sont en cours de développement, notamment les cartes de contrôle des convertisseurs de puissance dont les prototypes ont été développés en 2013. Une nouvelle installation de test de résistance aux radiations, CHARM, unique au monde, sera mise en service en 2014 pour ces cartes électroniques. Elle pourra également servir à d'autres applications, comme l'électronique pour l'aéronautique soumise aux radiations des rayons cosmiques.



Pendant les journées portes ouvertes.

[1] Dans la « Fun zone ! », les enfants ont exploré le monde des sciences et technologies, joué avec des robots et construit un mini-LHC. [2] Un bénévole du CERN fait une démonstration de lévitation à l'aide d'aimants supraconducteurs refroidis à l'azote liquide. [3] Des visiteurs passent devant la fresque d'ATLAS avant de se rendre dans la caverne d'expérimentation. [4] Dans la caverne de CMS, des visiteurs s'émerveillent devant l'impressionnant

détecteur. [5] Un visiteur photographie le tunnel du LHC avec son smartphone. [6] Le Centre de contrôle du CERN, salle de contrôle des accélérateurs et des installations techniques, était aussi ouvert aux visiteurs. [7] Dans la salle de contrôle aménagée pour les journées portes ouvertes, les services du CERN ont travaillé main dans la main avec les autorités françaises et suisses afin que la manifestation se déroule sans accroc.

Un impact sur le monde

Le CERN ouvre ses portes

Plus de 70 000 personnes sont venues aux journées portes ouvertes du CERN, les 28 et 29 septembre. Parmi elles, 20 000 ont pu visiter sous terre les accélérateurs et les détecteurs. Une équipe de 2 300 bénévoles a aidé et guidé les visiteurs, en souterrain comme en surface, sur les sites de Meyrin et de Préveressin, où plus de 40 activités étaient proposées.

Le week-end des journées portes ouvertes a été précédé et suivi d'autres manifestations. Le 27 septembre, le CERN a accueilli des représentants locaux et des partenaires industriels venus de l'ensemble de ses États membres pour une visite privée du Laboratoire. À cette même date, à l'occasion d'une « visite tweetup » au CERN, 12 journalistes d'un jour ont donné sur Twitter un avant-goût des journées portes ouvertes. Dans la soirée, pour la Nuit européenne des chercheurs, le CERN et l'Institut italien d'astrophysique ont organisé un événement exceptionnel, *Origins 2013*, qui s'est déroulé simultanément à Genève, Paris et Bologne, avec la participation de l'UNESCO,

de l'ESA, de l'ESO et de l'INFN. Le 30 septembre, pour clore les journées portes ouvertes, la soirée *Bosons and More* a été donnée à l'intention du personnel du CERN.

Tout au long de l'année, le CERN a accueilli de nombreux autres événements ouverts au public, de Passeport Big Bang (voir p. 33) à TEDxCERN (voir p. 10), en passant par FameLab et LHComedy.

Les deux premiers lauréats du programme de résidence artistique du CERN ont remporté le prestigieux prix récompensant les arts de la scène de la fondation Hermès, le *New Settings Award*, pour leur collaboration *Quantum*. Associant une chorégraphie de Gilles Jobin et une installation luminocinétique de Julius von Bismark, *Quantum* a été présenté pour la première fois à CMS pendant les journées portes ouvertes, en partenariat avec le Forum de Meyrin. Grâce à la bourse Hermès, le spectacle a entamé une tournée mondiale, avec Paris comme point de départ. En 2013, le CERN a accueilli en résidence l'artiste sonore Bill Fontana (voir p. 11), lauréat du prix Ars Electronica



Origins 2013, événement cofinancé par le 7^e programme-cadre de la Commission européenne, a été l'occasion de célébrer les résultats scientifiques du satellite Planck et des expériences du LHC. Des organisations internationales ont pu y participer grâce à une retransmission sur le web.

Collide@CERN et le cinéaste Jan Peters, lauréat du prix Collide@CERN-Genève. Cette année a également vu le lancement du programme Accelerate@CERN, qui consiste pour deux pays mécènes, la Grèce et la Suisse pour cette première édition, à financer un séjour d'un mois au CERN pour un artiste national.

Transfert de connaissances et collaboration

Les partenariats potentiels et les accords de transferts de technologies signés affichent une augmentation. Cette tendance positive, le groupe Transfert de connaissances (KT) l'attribue en partie à la journée BE-KT, initiative organisée conjointement avec le département Faisceaux (BE) en juin pour promouvoir les idées innovantes susceptibles de faire l'objet d'un transfert de technologies. Le CERN continue de réinvestir une partie des produits tirés du transfert de connaissances dans de nouveaux projets, grâce au Fonds pour le transfert de connaissances. Sur les 14 propositions reçues, sept ont bénéficié d'un soutien en 2013, du système de tomographie par émission de positons au logiciel open-source de conception de cartes de circuits imprimés, en passant par la technique de fabrication additive (impression 3D).

Suite à sa création en 2012 au Royaume-Uni, le centre d'incubation d'entreprises STFC-CERN (STFC-CERN BIC) a sélectionné les trois premières entreprises qui bénéficieront d'un accompagnement. Des discussions poussées sont en cours pour créer des centres d'incubation dans d'autres États membres, l'objectif étant de permettre à de petites entreprises dans des secteurs de pointe d'accéder au savoir-faire et aux technologies du CERN afin de créer une passerelle entre la science fondamentale et l'industrie. Par ailleurs, le CERN a contribué à la création d'une entreprise dérivée d'Invenio, logiciel de bibliothèque numérique du Laboratoire, et a accueilli en novembre le premier atelier EIROforum consacré aux matériaux et surfaces avancés.

Dans le domaine des sciences de la vie, le Réseau européen de recherche sur la thérapie hadronique par les ions légers



Participants au programme destiné aux enseignants du secondaire en 2013. Ce cours approfondi, donné en anglais, offre la possibilité de participer à des groupes de travail parallèles et à des rencontres avec des scientifiques afin de mieux faire connaître les recherches menées au CERN.

(ENLIGHT) continue de promouvoir l'hadronthérapie en Europe, et le CERN joue un rôle essentiel dans ses projets. En 2013, la Commission européenne a choisi le projet ENTVISION pour illustrer la bonne utilisation des fonds de l'Union européenne destinés à la recherche et servir de projet phare à sa campagne sur le nouveau programme Horizon 2020. Concernant les jeunes chercheurs de PARTNER, réseau de formation initiale Marie Curie financé par la Commission européenne qui s'est achevé en 2012, la plupart travaillent aujourd'hui dans des centres médicaux de différents pays.

Décembre a marqué la fin du 7^e programme-cadre de l'UE (7^e PC), qui avait commencé en 2007. Au titre du 7^e PC, le CERN a participé à 87 projets européens et en a coordonné 36, se classant parmi les 50 participants ayant reçu le plus de fonds européens sur plus de 15 000. Le CERN se concentre à présent sur les propositions pour Horizon 2020, le plus grand programme européen de financement de la recherche jamais mis en place, qui s'articule autour de trois principaux volets : l'excellence scientifique, la primauté industrielle et les enjeux de société.

Inspiration et éducation

En 2013, le CERN a accueilli environ 90 000 visiteurs de 63 pays, dont 40 % d'élèves du secondaire, pour des visites guidées de plusieurs installations, notamment des détecteurs du LHC. Les points les plus visités, à savoir la station d'essai cryogénique (SM18), le Centre de contrôle du CERN et le Centre de calcul, ont été équipés de dispositifs interactifs de pointe afin d'améliorer la qualité des visites. Les expositions permanentes, Univers de particules et Microcosm, ont attiré 65 000 visiteurs. Les expositions du CERN ont également voyagé en Espagne, en Grèce et en Norvège, et la grande exposition Accélérateur de science a été présentée au Centre scientifique Copernic à Varsovie (Pologne). Cette année a également marqué le début de la construction d'un nouvel espace pédagogique destiné aux scolaires, qui s'achèvera en 2014.

Le Passeport Big Bang

Le 2 juin, en collaboration avec des communes suisses et françaises, le CERN a inauguré le Passeport Big Bang, un nouveau parcours touristique et scientifique comportant 54 km d'itinéraires balisés reliant dix plateformes situées en surface, à différents points du LHC. Pour la journée d'inauguration, un rallye VTT et la visite d'installations situées en surface ont été proposés, de même que de nombreuses animations pour les familles.



Les cours du CERN destinés aux enseignants de physique, qui jouent un rôle déterminant pour donner aux élèves l'envie de poursuivre des études scientifiques, rencontrent toujours autant de succès. Plus de 1 000 enseignants de 21 pays ont participé à 26 cours d'une durée d'une semaine, dispensés dans leur langue maternelle. En juillet 2013, le cours international de trois semaines a attiré 51 participants de 30 pays. L'un des temps forts du programme 2013 a été la rencontre des participants avec Peter Higgs (voir p. 7). Une collaboration avec l'UNESCO et la fondation Paul Allen a permis à des enseignants d'Afrique subsaharienne d'assister à des cours, et la République dominicaine a financé la participation de 20 formateurs.

En cette année qui a marqué le 20^e anniversaire de l'école européenne de physique des hautes énergies (ESHEP), le CERN a continué d'organiser ses « écoles d'excellence » en physique et en ingénierie. Outre l'ESHEP, qui s'est tenue en Hongrie, des écoles sur les accélérateurs ont été organisées en Italie, en Norvège et en Suisse, l'école CERN-Amérique latine de physique des hautes énergies s'est déroulée au Pérou, et l'École d'informatique a eu lieu à Chypre.

Un accès libre et facilité

Fin 2013, des partenaires issus de 24 pays ont signé des mémorandums d'accord permettant le lancement, au 1er janvier 2014, de l'initiative SCOAP³ sur la publication en libre accès.

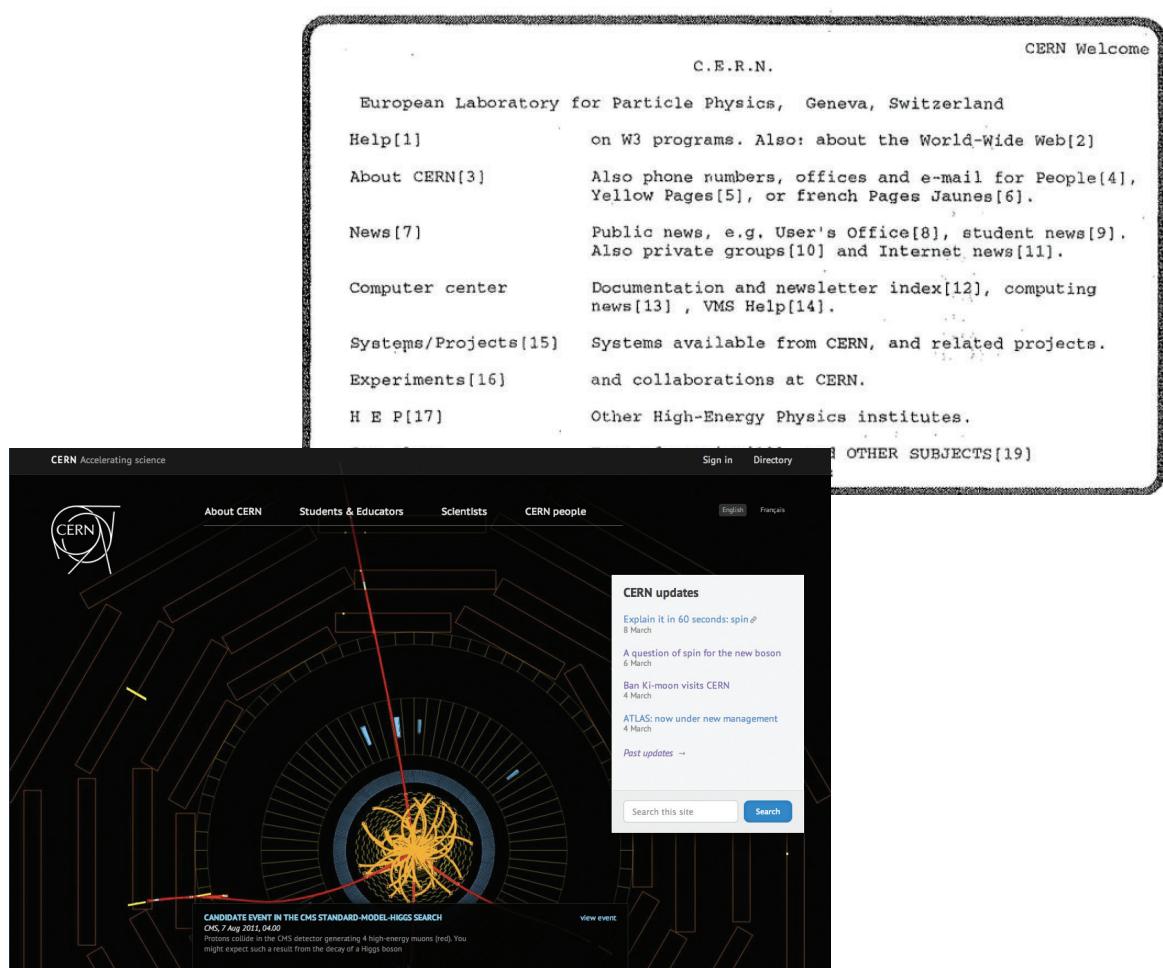
Un grand nombre d'articles scientifiques dans le domaine de la physique des hautes énergies seront en libre accès dans 10 revues scientifiques de premier plan, sans frais pour l'auteur : ils pourront être lus par tous ; les auteurs conserveront le droit d'auteur sur le contenu et les conditions de réutilisation seront généreuses. Dans un monde où tout (ou presque) peut être téléchargé à partir du web, les services de bibliothèque restent néanmoins indispensables pour les scientifiques du CERN, et les salles de lecture sont toujours bien fréquentées. Cela étant, l'intérêt se porte désormais clairement sur les services numériques. La version électronique d'ouvrages de référence en mathématiques et en physique étant maintenant disponible, environ 130 000 chapitres de livres numériques ont été consultés par des utilisateurs de la bibliothèque du CERN en 2013. INSPIRE, la base de données permettant d'accéder à des prétrages et à des articles sur la physique des hautes énergies, est consultée toutes les demi-secondes par des physiciens du monde entier.

Le web pour tous

En 1993, le CERN publiait une déclaration autorisant l'utilisation gratuite de la technologie du World Wide Web et, ainsi, le développement du web. Pour célébrer ce 20^e anniversaire, le CERN a lancé un projet visant à rétablir le premier site web (<http://info.cern.ch>) et à préserver les « biens numériques » associés à la naissance du web, notamment en recréant le navigateur en mode ligne.

Cette année a également vu la mise en ligne du nouveau site web du CERN, projet qui a mobilisé plusieurs départements. Plus fonctionnel que l'ancien et compatible avec des dispositifs mobiles, il a attiré en un an quelque 3 millions de visiteurs uniques du monde entier. Par ailleurs, le CERN a publié une première série de photos sous une licence Creative Commons (CC-BY-SA) afin qu'elles soient partagées plus largement et utilisées de manière plus cohérente, par exemple sur Wikipedia.

L'externalisation ouverte, ou crowdsourcing, et les projets scientifiques d'initiative citoyenne ont été au cœur d'une application prototype mise au point pour l'expérience AEgIS, qui porte sur l'antimatière (voir p. 14). Cette application permet à plusieurs centaines de physiciens amateurs d'analyser les données de l'expérience. Depuis son lancement il y a deux ans, la plateforme Test4theory du projet LHC@home a simulé plus d'un million de millions de collisions de particules.



En haut: Capture d'écran de l'interface du navigateur en mode ligne montrant le site web du CERN en 1993. Des chiffres entre crochets sont positionnés à côté d'hyperliens, que l'on pouvait suivre en tapant le chiffre en question, puis en pressant la touche entrée. En bas: La nouvelle version du site web du CERN, lancée en 2013.



Le *Service Desk* traite environ 400 demandes par jour. En 2013, la barre des 300 000 demandes depuis la création du service a été franchie.

Un lieu de travail

Pour faire fonctionner les installations et l'infrastructure, et soutenir les programmes de recherche, le CERN, qui compte quelque 11 000 visiteurs scientifiques, emploie environ 2 500 titulaires et accueille plus de 1 200 boursiers, attachés, étudiants et apprentis (voir p. 44).

Le département Services généraux d'infrastructure (GS) est responsable de la fourniture et de la maintenance de la plupart des infrastructures du domaine du CERN, dont les systèmes d'information technique et administrative, ainsi que des services visant à garantir la santé et la sécurité de chacun.

Si le vaste Laboratoire implanté sur deux sites – Meyrin et Prévessin – peut fonctionner sans heurts, au service de ses nombreux utilisateurs, c'est en partie grâce au Portail de services du CERN et au *Service Desk*. Ensemble, ils forment un guichet unique pour les nombreux services fournis au CERN, de la fabrication de clés à la résolution de problèmes de messagerie électronique, en passant par la réparation d'une fuite dans le toit. Le *Service Desk* traite les demandes reçues pendant les heures de travail ; le reste du temps, l'interface web du Portail de services, disponible 24 h/24, fournit des informations sur

de nombreux services. Mis en place par les départements GS et IT en 2011, le Portail de services s'appuie sur un logiciel du commerce utilisé de manière innovante. Son succès a été tel qu'en 2013 des représentants de plusieurs grandes entreprises et d'autres centres de recherche se sont rendus au CERN pour étudier le système.

Pour rester à l'avant-garde de la recherche, le CERN doit rénover ses installations existantes et en créer de nouvelles. Sur le site de Meyrin, les travaux de consolidation des façades du bâtiment 30 et de rénovation de l'amphithéâtre IT se sont achevés. Un agrandissement de l'installation d'antimatière du CERN pour le projet ELENA (voir p. 30) a été entrepris. Sur le site de Prévessin, la construction du bâtiment 774, destiné au groupe Contrôle du département Faisceaux, a bien progressé.

Côté complexe d'accélérateurs, le projet d'amélioration des systèmes d'accès et de sûreté mené sur les premiers maillons de la chaîne d'accélérateurs du LHC était en phase d'achèvement fin 2013. Ces systèmes de protection automatisée du personnel limitent l'accès aux zones à risques, où personne ne doit être présent lorsque l'accélérateur est en fonctionnement. Dix-neuf



Le 28 février, la cérémonie de pose de la première pierre du bâtiment 774 s'est déroulée en présence du sous-préfet de Gex, S. Donnot, des architectes, O. Mestre et F. Soppelsa, et du Directeur de l'administration et de l'infrastructure générale, S. Lettow.

nouveaux points d'entrée ont été mis en place dans plusieurs zones : au niveau des injecteurs du LHC, notamment du PS, ainsi que de l'AD, d'ISOLDE et de n_TOF.

Une culture ouverte à la diversité

Le département Ressources humaines (HR) s'occupe de nombreuses questions concernant le personnel : recrutement, formation et développement, services sociaux, protection sociale.

Le CERN, à qui sa convention constitutive assigne une mission de formation, offre un environnement unique en la matière. En 2013, face aux difficultés de recrutement international de techniciens de haut niveau, le département HR a mis en place un programme pilote permettant à des techniciens de postuler pour une première expérience professionnelle. Ce programme, qui a permis l'embauche de cinq personnes dans sa phase initiale, a été prolongé, et a abouti au recrutement d'un total de 23 techniciens originaires de sept États membres. Par ailleurs, 2013 a vu le lancement du site web *Careers at CERN*, qui s'appuie sur les réseaux sociaux et dont l'objectif est d'attirer des candidats très divers.

Le Bureau de la diversité du CERN, établi en 2012, axe ses activités sur le recrutement, l'évolution de carrière et l'environnement de travail. Il a pour objectifs stratégiques de rééquilibrer la répartition par nationalité, d'améliorer la parité hommes-femmes dans le recrutement et de proposer un environnement de travail favorable. Le programme de sensibilisation à la diversité a rencontré un grand succès et s'est révélé être un bon outil. Il y a eu également des conférences sur la créativité professionnelle, le genre et le handicap, et des actions menées pour faire du CERN un lieu de travail plus favorable, par exemple pour rendre les bâtiments nouveaux ou rénovés accessibles aux handicapés. En outre, une crèche, gérée par l'Association du personnel et pleinement intégrée au jardin d'enfants existant, a été ouverte en septembre. Elle complète la structure d'accueil, désormais ouverte aux enfants âgés de 3 mois à 6 ans.



Des annonces attrayantes sur des réseaux sociaux, accompagnées souvent de codes Quick Response (en haut), sont un nouveau moyen d'atteindre des candidats potentiels.

Le CERN a participé à des salons de l'emploi en Allemagne, en Autriche, en Norvège, aux Pays-Bas et en Suisse. L'Organisation a également pris part à des manifestations visant à promouvoir la place des femmes dans les sciences. Ainsi, Rolf Heuer, directeur général du CERN, a participé à une table ronde organisée par l'UNESCO au Palais des Nations à Genève.

Le CERN met en œuvre des mesures favorisant une meilleure répartition hommes-femmes depuis le lancement de sa politique d'égalité des chances en 1996. Avec la création du Bureau de la diversité, cette politique a été poursuivie, avec des mesures proactives axées sur les phases de prospection et de présélection du recrutement, et également sur les pratiques en matière de sélection. Ces mesures ont permis d'infléchir positivement la tendance dans toutes les catégories professionnelles : parité atteinte pour les cadres administratifs (51 % de femmes en 2012, contre 18 % de femmes en 1996). L'évolution est encourageante dans les catégories des chercheurs physiciens, des physiciens (physique appliquée), des ingénieurs et des techniciens, (10 % de femmes en 2012, contre 2 % en 1996).

Contrôle

Le Service d'audit interne du CERN exerce une activité indépendante et objective qui donne à l'Organisation une assurance sur le degré de maîtrise de ses opérations, lui apporte ses conseils pour les améliorer et contribue à créer de la valeur ajoutée. Le service est placé sous l'autorité directe du Directeur général, et son chef est le secrétaire du Comité consultatif permanent sur les audits (SACA). Le service apporte en outre une assistance aux commissaires aux comptes nommés par le Conseil du CERN pour certifier les comptes du CERN et de la Caisse de pensions. Les commissaires aux comptes actuels, dont le mandat a débuté le 1^{er} janvier 2013, sont des représentants de la Cour des comptes de Pologne (Najwyższa Izba Kontroli).



Formation à la manipulation d'un extincteur au Centre de formation Sécurité

Sécurité et environnement

Au CERN, la sécurité est assurée en plusieurs étapes : prévention des accidents et préparation aux situations d'urgence, intervention, rétablissement, et amélioration à partir des enseignements tirés des accidents. La sensibilisation à la sécurité occupe une place de premier plan dans la prévention, et une bonne préparation aide à réduire les conséquences d'un accident. La phase de rétablissement consiste à analyser les incidents et à en tirer des enseignements qui seront pris en compte dans les efforts de prévention et de préparation. Chaque année, les mesures d'amélioration de la sécurité au CERN portent sur une ou plusieurs de ces étapes.

Sensibiliser

Sécurité, qualité, calendrier : tels sont les mots d'ordre du LS1, débuté en février, qui représente le cadre principal des activités de 2013. Avec le LS1 a débuté une nouvelle ère

d'arrêts ne durant plus quelques mois, mais 1 à 2 ans. Dès le début, l'objectif était d'atteindre pour le LS1 le plus haut niveau de sécurité possible. Pour cela, il a été nécessaire de mettre davantage l'accent sur la sensibilisation et d'adapter le niveau de formation. L'augmentation significative du budget alloué à la formation sur la sécurité a permis d'organiser des cours supplémentaires tout au long de l'année pour les personnes effectuant des travaux de maintenance et d'amélioration sur le domaine du CERN, que ce soit en surface ou en souterrain. Le LS1 a entraîné une augmentation du nombre de demandes de formation, en particulier de la part des personnes devant intervenir sur le LHC.

Pour faire face à cette hausse importante du niveau d'activité tout en continuant à offrir un service de haute qualité, l'Unité HSE a augmenté le nombre de formateurs et de sessions. Les formations incluent des cours obligatoires relatifs à l'accès aux



Formation à l'utilisation du masque autosauveteur dans la nouvelle installation reproduisant les conditions du LHC.



L'une des nouvelles bornes de lecture automatique des dosimètres opérationnels.

zones souterraines, notamment à l'utilisation des masques autosauveteurs, et des cours de radioprotection adaptés à la zone radiologique concernée. Le programme de formation à la sécurité offre environ 50 cours en groupe et 17 cours en ligne. Il a été mis en place un nouveau cours en ligne visant à donner des informations de sécurité précises à toutes les personnes participant aux activités du LS1. En 2013, 6 800 personnes ont suivi une formation en groupe (contre 4 500 en 2012) et environ 10 000 cours en ligne ont été effectués, dont 4 271 pour la nouvelle formation sur le LS1.

Les formations en groupe sont devenues encore plus pratiques au Centre de formations sécurité, sur le site de Prévessin. En 2013, grâce aux contributions en nature des départements TE, GS, BE et EN, le centre a construit une maquette du LHC recréant les conditions de travail et de sécurité dans le tunnel. Cette installation a grandement amélioré la qualité des diverses formations, notamment celle sur l'utilisation du masque autosauveteur. Le centre s'est également équipé d'une nouvelle salle spécialement conçue pour les cours sur la radioprotection, qui a ouvert le 16 octobre.

Se préparer

En 2012, les départements GS, IT et PH ont travaillé conjointement à l'installation de TETRA, un nouveau système de communication par radio numérique. Conçu pour répondre aux besoins spécifiques des communications d'urgence, il est utilisé depuis janvier 2013 par le service Secours et feu du CERN, ainsi que par plusieurs centaines de membres du personnel de l'Organisation et du personnel d'entreprise travaillant dans les tunnels. TETRA a déjà prouvé son utilité, notamment grâce à l'application DATI (dispositif d'alarme pour travailleur isolé), qui signale au central des pompiers toute position horizontale prolongée ou tout choc important. Ainsi, en 2013, le service Secours et feu a pu secourir une personne qui avait perdu connaissance.

Dans le souci constant d'assurer le respect des règles et des meilleures pratiques en matière de radioprotection, 50 bornes de lecture automatique des dosimètres opérationnels ont été installées en mars par le groupe Radioprotection autour du complexe des accélérateurs. Les dosimètres opérationnels sont portés en complément des dosimètres « passifs » et sont indispensables pour accéder aux zones sous contrôle et surveillance radiologiques du Laboratoire. Chaque demande d'accès est faite via l'outil logiciel IMPACT et soumise au groupe Radioprotection qui, en fonction du travail à effectuer, de la dose estimée et des expositions précédentes de l'opérateur, fixe une dose maximale. Si cette dose est atteinte durant l'opération en cours, le dosimètre émet une alarme indiquant au porteur qu'il doit cesser son activité et quitter la zone. De plus, ces relevés d'exposition étant automatiquement enregistrés dans une base de données, l'information est rapidement disponible. Ces données sont également reliées aux activités déclarées dans IMPACT, ce qui permet une analyse plus fine des doses au moyen de statistiques plus précises.

S'attachant à garantir la sûreté de ses installations, le CERN a mis au point un plan de gestion de crise rigoureux. Pour le mettre à l'essai, le Laboratoire a organisé, respectivement les 11 octobre et 14 novembre, deux exercices réalistes et méticuleusement préparés, pilotés par les spécialistes qui ont travaillé avec l'équipe de gestion de crise à l'établissement du plan. Ces exercices, auxquels ont participé des membres du personnel de l'Organisation, étaient destinés à tester les procédures stratégiques de réaction du CERN en cas de crise. L'expérience a aussi permis aux participants de vivre de manière réaliste la gestion d'une situation de crise. Il est prévu d'organiser de tels exercices chaque année.

Tous concernés !

Le 18 avril, l'unité Sécurité du département BE, l'unité HSE, le Service médical et les pompiers ont organisé, pour la troisième année consécutive, un événement à l'occasion de la Journée



Des casques et des gilets réfléchissants ont été distribués lors de la campagne sur la sécurité à vélo.



Plus de la moitié des 650 hectares du domaine du CERN sont des espaces naturels – un environnement qui, grâce à une politique de préservation de la nature, est caractérisé par une biodiversité remarquable. On peut même croiser des daims sur le site de Prévessin.

mondiale sur la sécurité et la santé au travail. Des stands d'information sur le thème du stress et du mal de dos ont été tenus dans chacun des trois restaurants du CERN. Parmi les questions abordées : auto-évaluation du stress, techniques anti-stress et conseils pour éviter et gérer les maux de dos. Par ailleurs, la sécurité à vélo a été au centre d'une campagne menée entre le 3 et le 17 juin par l'unité HSE, en collaboration avec le service Accueil et contrôle d'accès du département GS. En échange d'un bon remis par les agents de gardiennage, 195 personnes ont participé à un sondage visant à évaluer leur pratique du vélo et leurs connaissances sur quelques règles de sécurité à vélo. Elles ont ensuite reçu un casque et un gilet réfléchissant, ainsi qu'une documentation sur la sécurité à vélo. Enfin, en décembre, l'unité HSE a insisté sur le risque de chute lié aux conditions hivernales.

La sécurité pour tous

Au CERN, la sécurité ne concerne pas seulement les personnes qui travaillent dans les installations, mais également celles qui les visitent. La sécurité a été au cœur de l'organisation des trois événements majeurs de 2013 : le Passeport Big Bang, les journées portes ouvertes et la soirée *Bosons and More*. Des centaines d'heures de travail ont été nécessaires pour inspecter et sécuriser les sites concernés, qui étaient au nombre de 40 lors des journées portes ouvertes. Grâce à cet important travail de prévention, le bilan en matière de sécurité a été excellent. Les journées portes ouvertes ont également été l'occasion de sensibiliser le public à la protection de l'environnement et de présenter les mesures adoptées par le CERN pour limiter l'impact de ses activités sur l'environnement.



Conseil du CERN

Présidente du Conseil : professeur A. Zalewska (Pologne)

Vice-présidents : professeur D.O. Riska (Finlande) ; Mme C. Cesarsky (France) depuis le 1^{er} juillet 2013 ;
professeur W. Van Doninck (Belgique)

États membres

Allemagne

Professeur S. Bethke
Mme B. Vierkorn-Rudolph

Autriche

S.E. M. T. Hajnoczi
M. D. Weselka

Belgique

Mme V. Halloin
Professeur W. Van Doninck

Bulgarie

Professeur D. Tonev
Professeur L. Litov

Danemark

Professeur J.J. Gaardhøje
M. A. Kjaer

Espagne

S.E. Mme Ana María Menéndez-Pérez
M. L. Ruiz

Finlande

Professeur P. Pulkkinen
Professeur D. O. Riska

France

S.E. M. N. Niemtchinow
Mme C. Cesarsky

Grèce

S.E. M. A. Alexandris
Professeur D. Nanopoulos

République de Hongrie

M. L. Korányi
Professeur P. Lévai

Italie

S.E. M. M.E. Serra
Professeur F. Ferroni

Norvège

M. K. Størmark
Professeur E. Osnes

Pays-Bas

Professeur S. De Jong
M. J.T.M. Rokx

Pologne

Professeur J. Królikowski
Professeur M. Waligorski

Portugal

S.E. Mme G. Andresen Guimarães
Professeur G. Barreira

République slovaque

S.E. M. F. Rosocha
Professeur B. Sitár

République tchèque

S.E. Mme K. Sequensová
M. R. Leitner

Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord

Professeur J. Womersley
M. G. Reid

Suède

M. M. Johnsson
Professeur B. Åsman

Suisse

M. B. Moor
Professeur O. Schneider

Candidat à l'adhésion

Roumanie

Professeur N. Zamfir
Mme R. Predescu

État membre associé en phase préalable à l'adhésion

Israël

S.E. M. E. Manor
Professeur E. Rabinovici

Serbie

S.E. M V. Mladenović
Professeur P. Adzić

Observateurs

État-Unis d'Amérique, Fédération de Russie, Inde, Japon, Turquie, Commission européenne, UNESCO

Comités du Conseil

Comité des directives scientifiques

Président

Professeur F. Zwirner (Italie)

Membres

Professeur J. Äystö
Professeur M. Diemoz
Professeur K. Ellis
Professeur M. Harrison
Professeur F. Le Diberder
Professeur H. Murayama
Professeur K. Redlich
Professeur L. Rivkin
Professeur T. Rodrigo
Professeur N. Roe
Professeur C. Spiering
Professeur G. 't Hooft
Professeur K. Tokushuku
Professeur D. Wark
Professeur T. Wyatt

Membres ès qualités

Président du Comité des expériences LHC

Professeur E. Elsen

Président du Comité des expériences SPS et PS

Professeur C. Vallée

Président du Comité des expériences ISOLDE et n_TOF

Professeur K. Blaum

Président du Comité européen sur les futurs accélérateurs

Professeur M. Krammer

Également présents

Présidente du Conseil

Professeur A. Zalewska (Pologne)

Président du Comité des finances

M. B. Jacobsen (Norvège)

Directeur général

Professeur R.-D. Heuer

Comité des finances

Président

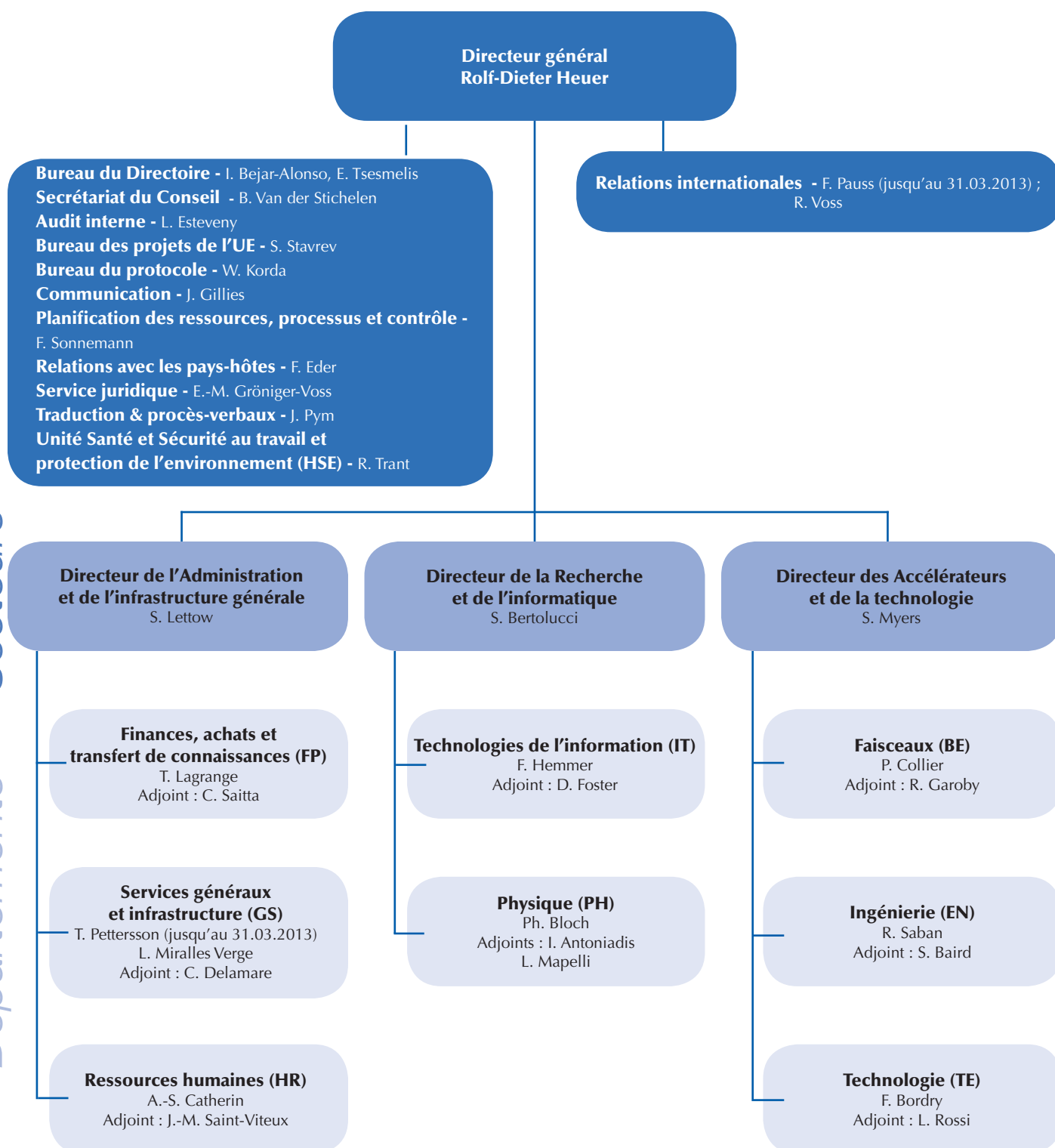
M. B. Jacobsen (Norvège)

Membres

Un ou plusieurs délégués par État membre

Organisation interne

Secteurs
Départements



Départements et groupes

S DIR Secteur du bureau du Directeur général

DG	Directeur général
DG-AS	Support administratif
DG-CO	Communication
DG-CS	Secrétariat du Conseil
DG-DG	Bureau du Directeur général
DG-DI	Bureau du Directoire
DG-EU	Bureau des projets de l'UE
DG-IA	Service d'audit interne
DG-IR	Relations internationales
DG-LS	Service juridique
DG-PRT	Bureau du protocole
DG-RH	Relations avec les pays-hôtes
DG-RPC	Planification des ressources, processus et contrôle
DG-TM	Traduction et procès-verbaux
DGS	Unité Santé et Sécurité au travail et protection de l'environnement
DGS-DI	Bureau du chef de l'Unité HSE
DGS-RP	Groupe Radioprotection
DG-SEE	Groupe Ingénierie de sécurité et environnement

S AI Secteur de l'administration et de l'infrastructure générale

FP Département des finances, achats et transfert de connaissances

FP-DI	Bureau du chef de département
FP-FAS	Services financiers et comptables
FP-KT	Transfert de connaissances
FP-PI	Approvisionnements et services industriels

GS Département des services généraux et de l'infrastructure

GS-AIS	Systèmes d'information avancés
GS-ASE	Accès, sécurité et outils d'ingénierie
GS-DI	Bureau du chef de département
GS-FB	Secours et feu
GS-IS	Services intégrés
GS-ME	Service médical
GS-SE	Ingénierie site
GS-SIS	Service d'Information Scientifique
GS-SMS	Support gestion des Services

HR Département des ressources humaines

HR-CB	Rémunération et prestations
HR-DHO	Bureau du chef de département
HR-LD	Formation et développement
HR-SA	Secrétariat de l'Association du personnel (administrativement rattaché à HR)
HR-TA	Acquisition de talents

S AT Secteur des accélérateurs et de la technologie

BE Département des faisceaux

BE-ABP	Physique des accélérateurs et faisceaux
BE-ASR	Administration, sécurité et ressources
BE-BI	Instrumentation de faisceaux
BE-CO	Contrôles
BE-HDO	Bureau du chef de département
BE-OP	Opération
BE-RF	Radio-fréquence

EN Département Ingénierie

EN-CV	Refroidissement et ventilation
EN-EL	Ingénierie électrique
EN-GMS	Gestion générale et secrétariats
EN-HDO	Bureau du chef de département
EN-HE	Ingénierie manutention
EN-ICE	Contrôles industriels et ingénierie
EN-MEF	Infrastructures machines et zones expérimentales

EN-MME	Ingénierie mécanique et matériaux
EN-STI	Sources, cibles et interactions

TE Département Technologie

TE-ABT	Transfert de faisceaux
TE-CRG	Cryogénie
TE-EPC	Convertisseurs de puissance électrique
TE-HDO	Bureau du chef de département
TE-MPE	Protection des machines et intégrité électrique
TE-MSD	Aimants, supraconducteurs et cryostats
TE-RPA	Ressources, planification et administration
TE-VSC	Vide, couches et surfaces

S RC Secteur de la recherche et de l'informatique

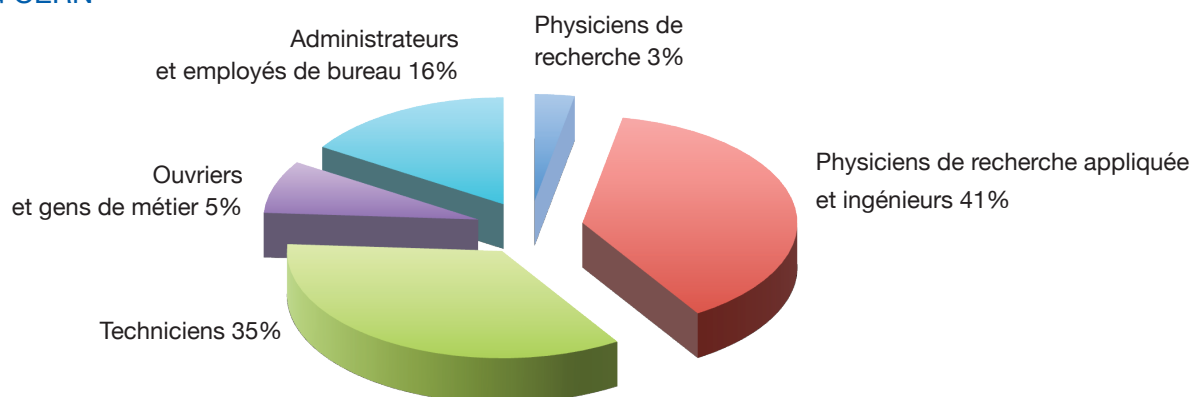
IT Département des technologies de l'information

IT-CF	Gestion des équipements informatiques
IT-CIS	Services de collaboration et d'information
IT-CS	Systèmes de communication
IT-DB	Services de bases de données
IT-DI	Infrastructure du département
IT-DSS	Services de données et de stockage
IT-OIS	Systèmes d'exploitation et services d'infrastructure
IT-PES	Plateformes et services d'ingénierie
IT-SDC	Support à l'informatique distribuée
PH	Département de physique
PH-ADE	Systèmes expérimentaux d'ATLAS

PH-ADO	Exploitation du détecteur d'ATLAS
PH-ADP	Traitement de données d'ATLAS
PH-ADT	Acquisition de données et déclenchement d'ATLAS
PH-AGS	Administration et services généraux
PH-AID	Détecteurs et systèmes d'ALICE
PH-AIO	Coordination et gestion d'ALICE
PH-AIP	Informatique et physique d'ALICE
PH-CMD	Acquisition de données et déclenchement de CMS
PH-CMG	Physique, logiciels et matériel de calcul de CMS
PH-CMO	Organisation de CMS
PH-CMX	Systèmes expérimentaux de CMS
PH-DI	Bureau du chef de département
PH-DT	Technologie des détecteurs
PH-EDU	Éducation et visites
PH-ESE	Systèmes électroniques pour les expériences
PH-LBC	Informatique de LHCb
PH-LBD	Détecteurs de LHCb
PH-LBO	Coordination de LHCb
PH-LCD	Détecteurs pour les collisionneurs linéaires
PH-SFT	Logiciels pour les expériences
PH-SME	Petites et moyennes expériences
PH-TH	Physique théorique
PH-TOT	Expérience TOTEM
PH-UAD	Utilisateurs antiprotons
PH-UAI	Utilisateurs ALICE
PH-UAT	Utilisateurs ATLAS
PH-UC3	Utilisateurs CTF3
PH-UCM	Utilisateurs CMS
PH-UFT	Utilisateurs cibles fixes
PH-UGC	Utilisateurs collaboration générale
PH-UHC	Utilisateurs LHC autres
PH-UIS	Utilisateurs ISOLDE
PH-ULB	Utilisateurs LHCb
PH-ULD	Utilisateurs détecteurs des collisionneurs linéaires
PH-ULE	Utilisateurs LEP
PH-UNT	Utilisateurs n_TOF
PH-UOP	Utilisateurs autre physique
PH-URD	Utilisateurs R&D
PF	Caisse de pensions
PFMU	Unité de gestion de la Caisse de pensions
PF-BA	Prestations et comptabilité
PF-AAR	Allocation d'actifs et gestion de risque
PF-IPM	Gestion interne de portefeuille
PF-MO	Middle Office
PF-GMS	Administration générale

Le CERN en chiffres

Personnel du CERN



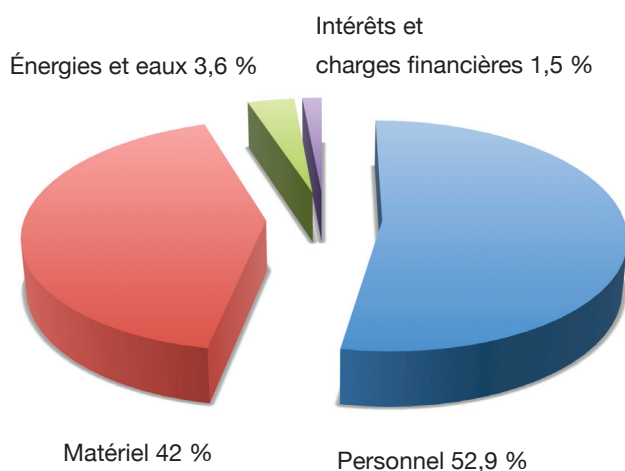
Évolution des effectifs de membres du personnel titulaires *Postes à financement externe inclus*

2010	2427
2011	2424
2012	2512
2013	2513

Évolution des effectifs de boursiers, attachés, étudiants, utilisateurs et apprentis *Stagiaires, visiteurs scientifiques et professeurs invités inclus à compter du 1 janvier 2013*

2010	11 025
2011	11 449
2012	12 080
2013	12 313

Dépenses du CERN



Total des dépenses 1139,7 MCHF

Personnel	603,2
Matériel	479
Marchandises, consommables et fournitures	248,6
Autres charges de matériel	230,4
Énergies et eaux	40,9
Intérêts et charges financières	16,6

Glossaire

Accélérateur

Machine qui accélère des faisceaux de particules et les porte à des énergies élevées. On utilise des champs électriques pour accélérer les particules et des aimants pour les guider et les focaliser. Les faisceaux peuvent entrer en collision entre eux ou avec une cible fixe.

- Un collisionneur est un accélérateur circulaire dans lequel deux faisceaux, accélérés en sens inverse, interagissent en des points de collision déterminés.
- Un accélérateur linéaire (linac) sert souvent de premier maillon dans la chaîne d'accélération.
- Un synchrotron est un accélérateur dans lequel le champ magnétique courbant les orbites des particules augmente avec l'énergie de ces dernières, ce qui permet d'obtenir des orbites circulaires.

AD (Décélérateur d'antiprotons)

Installation de recherche du CERN produisant des antiprotons de basse énergie pour les expériences ACE, AEGIS, ALPHA, ASACUSA et ATRAP.

ALICE (A Large Ion Collider Experiment)

Une des quatre grandes expériences qui étudient les collisions au LHC.

Antimatière

À toute particule de matière correspond une antiparticule. Les antiparticules chargées portent une charge électrique opposée à celle de leur partenaire de matière. Bien que les antiparticules soient excessivement rares dans l'Univers aujourd'hui, on pense que matière et antimatière ont été créées en quantités égales lors du Big Bang.

ATLAS

Une des quatre grandes expériences qui étudient les collisions au LHC.

Boson

Nom générique donné aux particules qui véhiculent les forces entre les particules de matière. (Voir particules.)

Boson de Higgs

La particule liée au mécanisme de Brout-Englert-Higgs qui donne aux particules élémentaires leur masse.

Calorimètre

Instrument servant à mesurer la quantité d'énergie que possède une particule. Le calorimètre électromagnétique mesure l'énergie des électrons et des photons, alors que le calorimètre hadronique détermine l'énergie des hadrons (particules telles que les protons, neutrons, pions et kaons).

Cavité accélératrice

Dispositif produisant le champ électrique qui sert à accélérer les particules dans un accélérateur. La fréquence d'oscillation du champ électrique correspondant à celle des ondes radio, ces dispositifs sont également appelés « cavités radiofréquence ».

Chambre à muons

Dispositif qui identifie les muons et qui, associé à un système magnétique, forme un spectromètre à muons pour mesurer leurs impulsions.

Chromodynamique quantique (QCD)

Théorie de l'interaction forte, similaire à l'électrodynamique quantique.

CLIC (Collisionneur linéaire compact)

Étude de faisabilité non limitée à un site ayant pour but de développer, à un prix abordable, une technologie réaliste pour construire un collisionneur linéaire électron-positon (de plusieurs TeV) pour la physique des hautes énergies.

CMS (Compact Muon Solenoid)

Une des quatre grandes expériences qui étudient les collisions au LHC.

Cryostat

Enceinte servant à maintenir des températures extrêmement basses.

Déclenchement

Dispositif électronique permettant de sélectionner les interactions susceptibles d'être intéressantes dans un détecteur de particules, puis d'activer le système de lecture du détecteur pour qu'il enregistre les données de la collision.

Détecteur

Dispositif servant à mesurer certaines propriétés des particules. Certains détecteurs mesurent les traces laissées par les particules, d'autres leur énergie. Le terme désigne aussi d'immenses installations composites formées de multiples éléments de détection plus petits. Dans les grands détecteurs du LHC, chaque couche d'instruments a une tâche propre.

Dipôle

Aimant possédant deux pôles, comme les pôles nord et sud d'un aimant permanent en fer à cheval. Dans les accélérateurs de particules, les dipôles servent à maintenir celles-ci sur une orbite circulaire. Le LHC compte 1 232 dipôles de 15 m de longueur.

Électrodynamique quantique (QED)

Théorie de l'interaction électromagnétique.

Électronvolt (eV)

Unité d'énergie ou de masse utilisée en

physique des particules. Un eV étant extrêmement petit, ses multiples, le MeV (million d'électronvolts) et le GeV (milliard d'électronvolts), sont d'usage plus courant. La toute dernière génération d'accélérateurs de particules atteint des énergies de plusieurs milliers de milliards d'électronvolts (de l'ordre du TeV). Un TeV représente à peu près l'énergie cinétique d'un moustique en vol.

Faisceau

Dans un accélérateur, les particules sont rassemblées en un faisceau. Les faisceaux peuvent contenir des milliards de particules et peuvent être divisés en paquets. Chaque paquet mesure ordinairement plusieurs centimètres de long, mais seulement quelques micromètres de large.

Forces

Quatre forces fondamentales agissent dans la nature. La plus connue, la gravitation, est aussi la plus faible. La force à laquelle nous devons les orages et qui véhicule l'électricité est la force électromagnétique. Les deux autres forces, la force forte et la force faible, sont confinées dans le noyau atomique. La force forte assure la cohésion du noyau, tandis que la force faible provoque la dissociation de certains noyaux. La force faible joue un rôle important dans la production d'énergie au cœur des étoiles, notamment le Soleil. Les physiciens cherchent une théorie permettant d'expliquer toutes ces forces. Un grand pas a été fait dans les années 1960 avec la théorie unifiée des forces électromagnétique et faible, dite électrofaible. Celle-ci a par la suite été confirmée par une expérience au CERN récompensée par un prix Nobel.

GeV

Voir électronvolt.

Hadron

Particule subatomique contenant des quarks, des antiquarks et des gluons et qui est donc soumise à la force forte. (Voir particules.)

Injecteur

Système qui fournit des particules à un accélérateur. La chaîne d'injection du LHC est constituée de plusieurs accélérateurs successifs.

Ion

Atome auquel on a enlevé (ion positif) ou ajouté (ion négatif) un ou plusieurs électrons.

ISOLDE

Installation à faisceau d'ions radioactifs qui dirige un faisceau de protons du PS Booster du PS sur des cibles spéciales afin de produire plus de 1 000 isotopes différents pour un large éventail de recherches, notamment

dans le domaine des sciences de la vie. (Voir également isotope.)

Isotope

Forme légèrement différente d'un même élément chimique. Les isotopes se distinguent les uns des autres par le nombre de neutrons contenus dans leur noyau, le nombre de protons étant identique.

Kelvin

Unité de température. Un kelvin est égal à un degré Celsius. L'échelle des kelvins commence au zéro absolu, la température la plus basse possible ($-273,15^{\circ}$ Celsius).

Lepton

Classe de particules élémentaires qui comprend l'électron. Particules de matière insensibles à la force forte. (Voir particules).

LHC (*Large Hadron Collider*)

Grand collisionneur de hadrons ; le plus grand accélérateur du CERN.

LHCb (*Large Hadron Collider beauty*)

Une des quatre grandes expériences qui étudient les collisions au LHC.

Ligne de transfert

Ligne transportant un faisceau de particules, par exemple de protons, d'un accélérateur à un autre en le guidant à l'aide d'aimants.

Linac

Voir accélérateur.

Luminosité

En physique des particules, la luminosité mesure combien de particules passent à travers une surface donnée en un temps donné. Plus la luminosité produite par le LHC est élevée, plus les expériences reçoivent de données. Une plus grande luminosité signifie donc des résultats plus précis et une possibilité accrue d'observer les phénomènes les plus rares.

Matière noire

Seule 4% de la matière de l'Univers est visible. Le reste se trouve sous forme de matière noire (26%) et d'énergie sombre (70%). Découvrir la nature de la matière noire est l'un des grands objectifs de la science moderne.

Modèle standard

Ensemble de théories rassemblant les connaissances actuelles sur les propriétés des particules fondamentales.

Muon

Particule semblable à l'électron, mais de masse environ 200 fois supérieure. (Voir particules).

Neutrino

Particule neutre qui n'interagit que très faiblement. Les neutrinos, très courants, pourraient permettre de répondre à de nombreuses interrogations des physiciens. (Voir particules).

n_TOF

Installation qui utilise des protons du PS pour créer un faisceau de neutrons de haute intensité afin d'étudier les réactions induites par les neutrons sur une plage d'énergies très large.

Nucléon

Nom générique donné aux protons et aux neutrons.

Particules

Les particules élémentaires se répartissent en deux groupes : les quarks et les leptons. Les différents quarks sont les quarks u et d, les quarks c (charmés) et s (étranges), et les quarks t (top) et b (beauté). La catégorie des leptons regroupe l'électron et le neutrino électronique, le muon et le neutrino muonique, le tau et le neutrino tauique. Les quarks et les leptons, qui sont des particules de matière, sont désignés collectivement sous le terme de « fermions ». Quatre forces, ou interactions, fondamentales assurent la cohésion des particules. Elles sont portées par des particules appelées bosons. La force électromagnétique est portée par le photon ; la force faible par les bosons W, chargés, et par le boson Z, neutre ; la force forte par le gluon ; enfin, la gravité est probablement portée par le graviton, qui n'a pas encore été découvert. Les hadrons sont des particules sensibles à la force forte. Ils comprennent les mésons, particules formées d'une paire quark-antiquark, et les baryons, particules formées de trois quarks. Le pion et le kaon sont deux types de mésons. Les neutrons et les protons (constituants la matière ordinaire) sont des baryons ; les neutrons contiennent un quark u et deux quarks d ; les protons contiennent deux quarks u et un quark d.

Plasma quarks-gluons (QGP)

État de la matière dans lequel les protons et les neutrons se dissocient en leurs parties constitutives. Il aurait existé immédiatement après le Big Bang.

Positon

L'antiparticule de l'électron. (Voir antimatière).

PS (*Proton Synchrotron*)

Synchrotron à protons, clé de voûte du complexe d'accélérateurs du CERN.

Quadripôle

Aimant à quatre pôles servant à focaliser les faisceaux de particules, à l'instar d'une lentille en verre focalisant la lumière.

Rayon cosmique

Particule de haute énergie provenant de l'espace qui, lorsqu'elle frappe l'atmosphère terrestre, produit de nombreuses particules secondaires également appelées rayons cosmiques.

Sextupôle

Aimant à six pôles servant à corriger les faisceaux de particules. Au LHC, des aimants à huit et dix pôles seront aussi utilisés à cette fin.

Sigma

Représentation d'un écart-type (marge d'erreur sur une mesure), 5 sigmas étant la probabilité que la mesure soit correcte à 99,99994 %.

Spectromètre

En physique des particules, système de détection contenant un champ magnétique et servant à mesurer l'impulsion de particules.

SPS (*Super Proton Synchrotron*)

Supersynchrotron à protons. Accélérateur fournissant les faisceaux pour les expériences du CERN, et préparant également ceux du LHC.

Supersymétrie

Théorie prédisant l'existence de « superpartenaires » lourds pour toutes les particules connues, dont la validité sera vérifiée au LHC.

Supraconductivité

Propriété de certains matériaux, habituellement à très basse température, de conduire l'électricité sans résistance. Un courant électrique émis dans un circuit supraconducteur y circulera éternellement, pour autant que le circuit reste suffisamment froid.

Transfert de technologies

Promotion et diffusion de technologies développées, par exemple au CERN, afin d'en transmettre les bénéfices socio-économiques et culturels.

TeV

Voir électronvolt.

Vide

Espace qui ne contient sensiblement aucune matière et où la pression gazeuse est par conséquent très inférieure à la pression atmosphérique habituelle.

Violation de CP

Effet subtil observé lors de la désintégration de certaines particules, qui révèle la « préférence » de la nature pour la matière au détriment de l'antimatière.

WLCG (*Grille de calcul pour le LHC*)

Grille dont le but est d'établir une infrastructure de stockage et d'analyse de données pour tous les chercheurs en physique des hautes énergies qui utiliseront le LHC.

