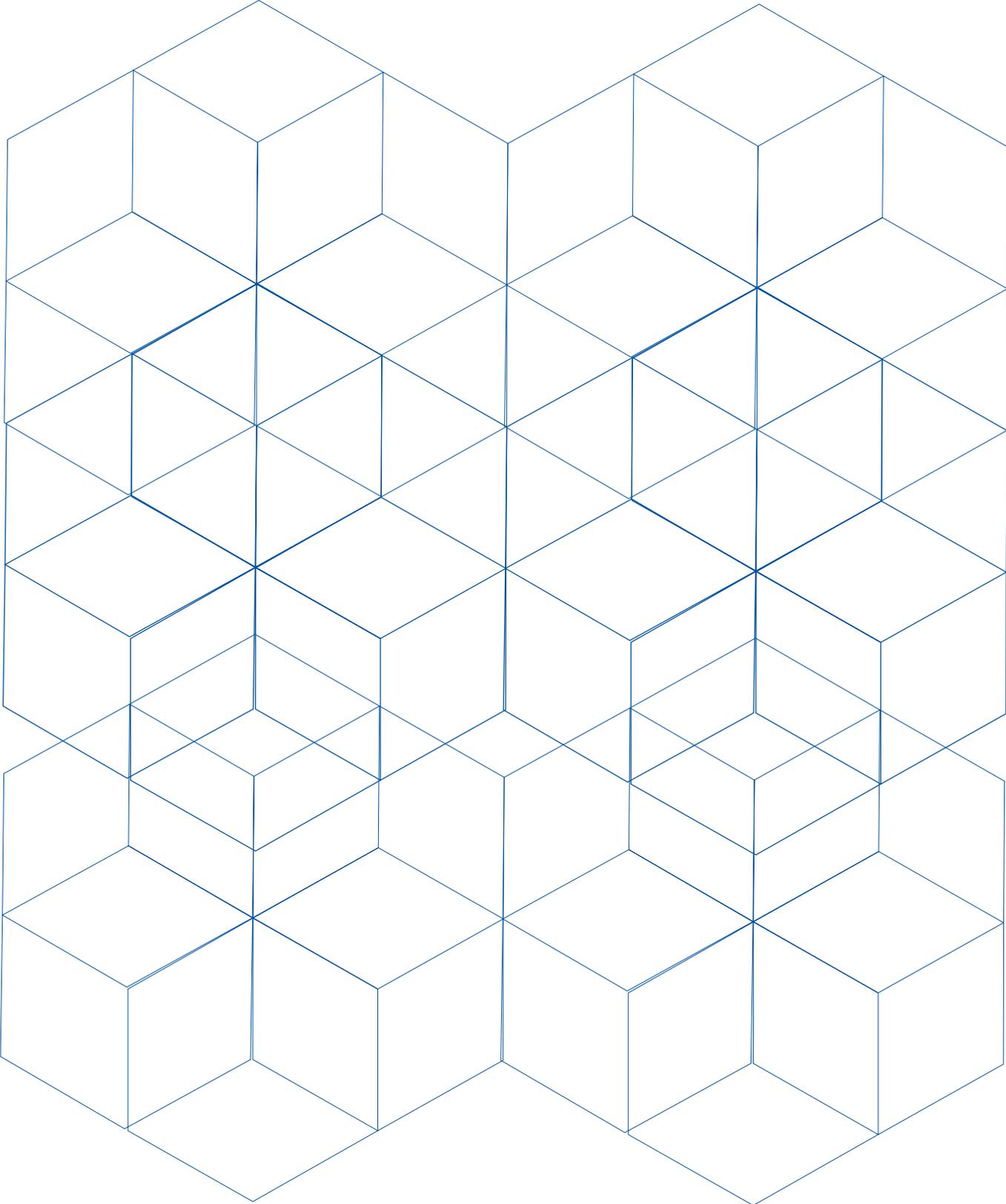


Rapport annuel **2023**

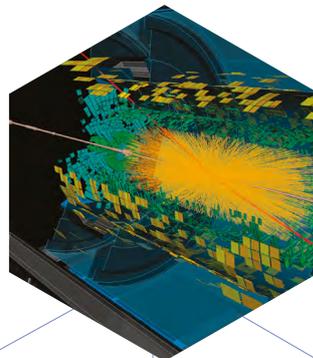




SOMMAIRE

Le CERN, Organisation européenne pour la recherche nucléaire, est le plus grand laboratoire de recherche en physique des particules du monde. Son complexe d'accélérateurs sans égal permet aux scientifiques de mener des recherches de physique fondamentale aux limites des connaissances pour comprendre la matière, l'Univers et son évolution.

Créé en 1954, le CERN compte aujourd'hui 23 États membres. D'autres États contribuent aux activités de l'Organisation et participent à ses programmes de recherche. Le CERN est ainsi devenu un remarquable exemple de collaboration internationale, rassemblant des personnes de nombreux pays dans le but de repousser les limites de la science et de la technologie, dans l'intérêt de tous.



**P4
MESSAGES**

**P6
2023 EN IMAGES**

**P12
UN LABORATOIRE POUR LE MONDE**

**P14
EXPLORER LA NATURE DE L'UNIVERS**

**P22
LES MACHINES DES DÉCOUVERTES**

**P32
REPOUSSER LES FRONTIÈRES
DE LA TECHNOLOGIE**

**P36
SENSIBILISER ET FORMER**

**P40
AGIR POUR UNE RECHERCHE SÛRE
ET RESPONSABLE**

**P42
CONSTRUIRE L'AVENIR**

**P50
GOUVERNANCE**

**P53
LE CERN EN CHIFFRES**



MESSAGE DU PRÉSIDENT DU CONSEIL

En 2023, le Conseil a pu prendre acte d'une multitude de réalisations, dont une partie seulement peut être mise en exergue ici. Tous les États membres du CERN ont manifesté leur engagement à l'égard du programme scientifique d'excellence et de l'avenir à long terme de l'Organisation.

Les fortes turbulences apparues au moment de la pandémie de COVID-19, et qui se sont poursuivies avec la guerre en Europe, ainsi que l'inflation et l'augmentation des coûts de l'énergie qui en ont découlé, ont eu des conséquences financières importantes pour l'Organisation. Celles-ci ont pu être en grande partie atténuées grâce à un immense effort conjoint de la part du Conseil, de la Direction et du personnel. Le Conseil a décidé d'ajouter aux contributions financières annuelles ordinaires une contribution supplémentaire de 74,8 millions de francs suisses, les États membres acceptant de surcroît que la contribution annuelle de l'Ukraine au CERN soit répartie entre eux. La Direction a procédé à des coupes dans les programmes du CERN et les titulaires ont accepté une baisse de leur rémunération pendant un an. Tout a été fait pour limiter le plus possible l'impact de ces mesures sur le programme scientifique du CERN.

Le Grand collisionneur de hadrons (LHC), accélérateur phare du CERN, a tellement bien fonctionné jusqu'ici que l'on oublie souvent les exploits techniques qu'il suppose. Nous en avons eu un exemple durant l'été et le Conseil a beaucoup apprécié le travail acharné des équipes du CERN, qui ont fait preuve d'ingéniosité pour résoudre les problèmes techniques de cette machine complexe. Le Conseil a également pu suivre les avancées impressionnantes du projet de LHC à haute luminosité. Ainsi, les aimants utilisant les supraconducteurs en niobium-étain ont pu être validés par des essais, et leur production est désormais en bonne voie.

Le Conseil a continué à travailler sur sa mission fondamentale, et en particulier à œuvrer pour le futur programme scientifique du CERN. Fin 2023, la Direction du CERN a présenté au Comité des finances et au Comité des directives scientifiques le rapport à mi-parcours sur l'étude de faisabilité du Futur collisionneur circulaire (FCC), ainsi que les rapports du Comité d'examen des coûts et du Comité consultatif scientifique, en vue de leur présentation au Conseil début 2024. Les rapports couvrent des aspects très divers, non seulement scientifiques et technologiques, mais également des aspects environnementaux et de durabilité,

qui sont d'une grande importance pour les relations avec les États hôtes et leurs populations. La venue au CERN en novembre des présidents français et suisse a également aidé à dessiner un avenir pour le CERN.

L'un des enjeux majeurs, s'agissant de planification et de la construction de futures installations de physique des particules, est la préservation d'un savoir-faire de haute qualité, et de l'enthousiasme et de l'optimisme nécessaires sur de longues périodes, alors que se présentent des obstacles pouvant sembler insurmontables. Les décisions à prendre concernant une future installation telle que le FCC, qui entrerait en service dans les années 2040 pour une cinquantaine d'années, reposent sur la motivation et l'engagement de personnes dont la carrière vient de débuter. C'est pourquoi j'ai été très heureux, à l'occasion de l'atelier « *Future Colliders for Early-Career Researchers* », en septembre, de constater l'enthousiasme et la participation active des jeunes présents à l'événement. L'éducation est un pilier essentiel du CERN et le tout nouveau Portail de la science jouera désormais un rôle important en étant une source d'inspiration pour une nouvelle génération de scientifiques.

Enfin, j'ai eu beaucoup de plaisir à travailler avec les nouveaux vice-présidents du Conseil, Konstantinos Fountas et Eric Laenen. Je me suis réjoui de l'arrivée de Hugh Montgomery, nouveau président du Comité des directives scientifiques, et de Laurent Salzarulo, nouveau président du Comité des finances. J'aimerais remercier Ossi Malmberg, président sortant du Conseil d'administration de la Caisse de pensions, Karl Jakobs, président sortant du Comité européen sur les futurs accélérateurs (ECFA), et Barbro Åsman, présidente sortante du Forum tripartite sur les conditions d'emploi (TREF), pour leur engagement et leur dévouement exceptionnels. Je suis convaincu que, en 2024, face aux défis qui nous attendent, le Conseil saura tirer parti des enseignements de 2023 et parvenir au consensus, dans l'intérêt de l'Organisation.

Eliezer Rabinovici



MESSAGE DE LA DIRECTRICE GÉNÉRALE

La physique des particules poursuit sa moisson dans le champ de la précision et les expériences du LHC en ont apporté une illustration remarquable en 2023. Les grandes quantités de données fournies par le LHC depuis le début de son exploitation, les remarquables performances des détecteurs et les techniques novatrices d'analyse de données ont permis aux expériences d'obtenir des résultats qu'il aurait été difficile d'imaginer il y a quelques années. On peut citer des mesures avec une précision inégalée de la masse du quark top et du boson de Higgs dans plusieurs canaux de désintégration, l'intensité de la force forte déterminée à l'échelle de la masse du boson Z avec une incertitude inférieure à 1 %, de nouvelles mesures ultraprécises du comportement différent de la matière et de l'antimatière ou encore l'observation de caractéristiques clés du plasma quarks-gluons.

En dehors des quatre grandes expériences du LHC, la diversité des recherches du CERN s'est illustrée au travers de nombreux autres résultats comme la première observation de neutrinos produits dans un collisionneur de particules ou encore la mesure de l'effet de la gravité sur l'antimatière.

En 2023, le LHC a été perturbé par plusieurs problèmes techniques, qui ont écourté la période d'exploitation avec des protons. Les équipes ont fait preuve d'une réactivité et d'une créativité admirables pour remettre en marche l'accélérateur. L'année s'est conclue par une exploitation avec des ions plomb, la première depuis cinq ans, qui a permis à l'expérience ALICE d'enregistrer 40 fois plus d'événements qu'au cours de toutes les prises de données avec des ions lourds.

La vie du Laboratoire a aussi été rythmée par les avancées significatives des grands projets d'avenir. D'importantes étapes ont été franchies dans la construction du LHC à haute luminosité, amélioration majeure du LHC, notamment des tests concluants sur les nouveaux aimants supraconducteurs niobium-étain pour la focalisation finale. Les projets d'améliorations des détecteurs du LHC ont également accéléré, entrant dans la phase de production. À plus long terme, la stratégie européenne a recommandé une étude de la faisabilité d'un grand collisionneur circulaire, le FCC, considéré comme l'option la plus convaincante du point de vue scientifique pour le futur des recherches du CERN. En

2023, la collaboration FCC a produit la première partie de l'étude de faisabilité, un rapport à mi-parcours détaillant de multiples aspects, allant des objectifs de physique et des caractéristiques techniques du collisionneur aux questions liées à la géologie, à la planification territoriale, au génie civil et à l'environnement. Cette première phase de l'étude a montré qu'il n'y avait pas d'obstacle technique majeur à la réalisation de cet ambitieux projet.

Le programme du CERN est mené en accordant une attention particulière au budget et à l'impact sur l'environnement. En 2023, des mesures budgétaires ont été mises en place pour limiter le déficit lié à l'inflation et aux prix élevés de l'électricité, et j'aimerais remercier les États membres et États membres associés, ainsi que le personnel, pour leurs efforts qui ont été payants. La publication à la fin de l'année du troisième rapport sur l'environnement a permis de faire état des progrès réalisés au cours des deux années précédentes pour améliorer les performances du CERN dans des domaines clés comme les émissions, la biodiversité, l'utilisation des sols ou la gestion des déchets. Le Laboratoire a obtenu la certification ISO 50001, ce qui illustre son engagement pour une gestion efficace de l'énergie et ses efforts pour améliorer son efficacité énergétique.

En fin d'année, le CERN a inauguré le Portail de la science, son grand centre pour l'éducation et la communication grand public. Proposant un contenu éducatif stimulant, ce centre à l'architecture novatrice connaît un succès retentissant, avec près de 72 000 visiteurs enthousiastes en moins de trois mois, qui ont pu découvrir les sciences et les technologies au travers d'expositions interactives, d'ateliers scientifiques, de spectacles et d'événements grand public. En novembre, nous avons eu l'honneur d'y accueillir deux visiteurs de marque, les Présidents de la France et de la Suisse, nos deux États hôtes. Ils ont renouvelé leur confiance dans la science fondamentale et affirmé leur soutien au CERN et à son avenir, notamment au FCC. C'est un message très encourageant pour notre communauté et je leur en suis extrêmement reconnaissante.

Fabiola Gianotti

2023 EN IMAGES

De l'inauguration du Portail de la science à la première observation de neutrinos produits dans un collisionneur, en passant par le retour des collisions d'ions lourds au LHC, nombreux ont été les événements témoignant de l'engagement du Laboratoire en faveur de la science, la collaboration, l'éducation et la communication grand public. Revivez les temps forts de 2023 en images.

20 JANVIER

Le CERN célèbre la fin des travaux de génie civil pour le LHC à haute luminosité, amélioration majeure du LHC, son collisionneur phare.

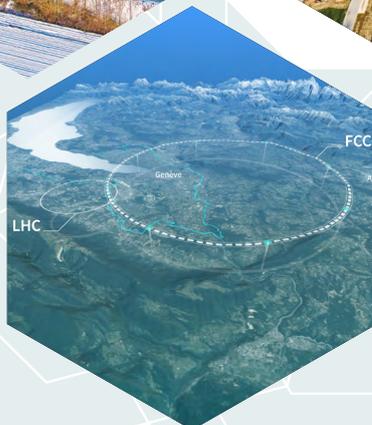
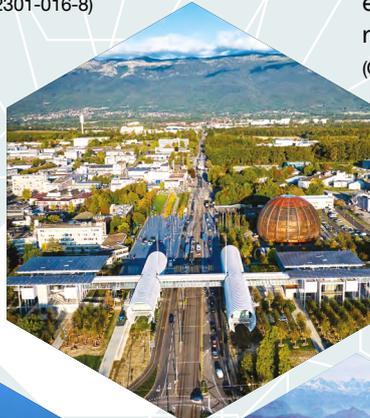
(CERN-PHOTO-202301-016-8)



2 FÉVRIER

Le CERN obtient la certification ISO 50001 pour sa gestion responsable de l'énergie. L'amélioration de sa performance énergétique fait partie de son engagement en faveur d'une recherche écoresponsable.

(CERN-PHOTO-202310-230-9)



21 FÉVRIER

L'étude de faisabilité d'un éventuel Futur collisionneur circulaire (FCC) entre dans sa phase de terrain, qui suppose une importante collecte de données géographiques, géologiques et environnementales.

(CERN-HOMEWEB-PHO-2023-034-3)

24 FÉVRIER

Le CERN et le Comité international de la Croix-Rouge signent un accord de coopération sur les technologies *open source* libres au service de l'action humanitaire.

(CERN-PHOTO-202212-219-1)

3 MARS

CMS mesure la polarisation du lepton tau dans les désintégrations du boson Z.
(CERN-PHOTO-202108-102-1)



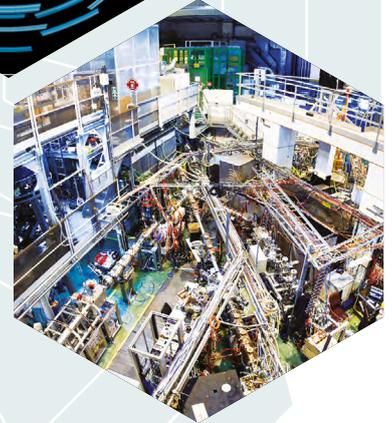
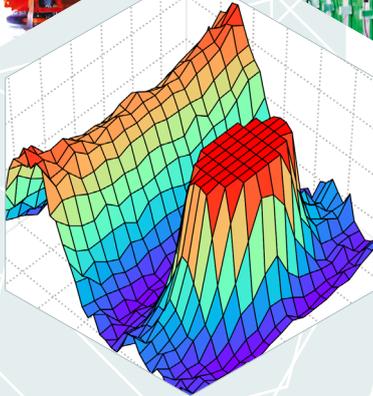
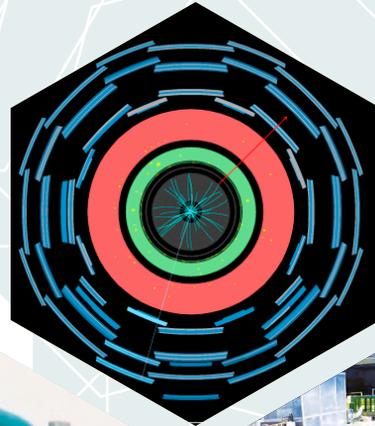
22 MARS

Les expériences FASER et SND@LHC observent pour la première fois des neutrinos produits dans un collisionneur.
(CERN-PHOTO-202302-065-6
CERN-PHOTO-202312-300-6)



23 MARS

ATLAS présente une mesure améliorée de la masse du boson W conforme au Modèle standard de la physique des particules.
(ATLAS-PHOTO-2023-021-1)



31 MARS

ALICE observe une « crête » dans les collisions les plus simples où ce phénomène ait été détecté à ce jour, ce qui pourrait donner des indications sur l'origine de phénomènes collectifs semblables au plasma quarks-gluons dans les petits systèmes de collision.
(ALICE-PHO-GEN-2023-009-6)

22 AVRIL

Le CERN collabore avec SuperNode sur de nouvelles solutions pour améliorer le transport d'énergie et accélérer le passage aux énergies renouvelables.
(CERN-PHOTO-202402-042-1)

24 MAI

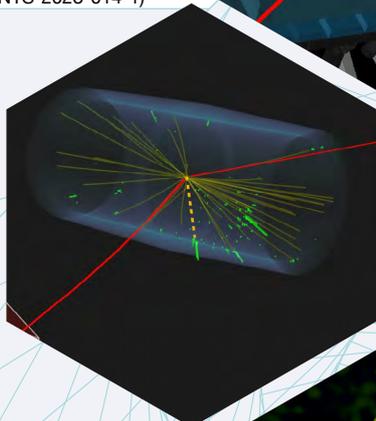
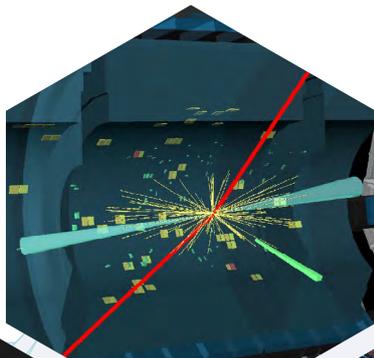
ISOLDE observe la désintégration d'un noyau de thorium-229 dans un système à l'état solide, ouvrant la voie à la réalisation d'une horloge nucléaire qui pourrait supplanter les horloges atomiques actuelles.
(CERN-PHOTO-202106-083-1)

26 MAI

ATLAS et CMS unissent leurs forces pour relever les premiers indices probants d'une désintégration rare du boson de Higgs en un boson Z et un photon.

(ATLAS-PHOTO-2023-040-1)

CMS-PHO-EVENTS-2023-014-1)



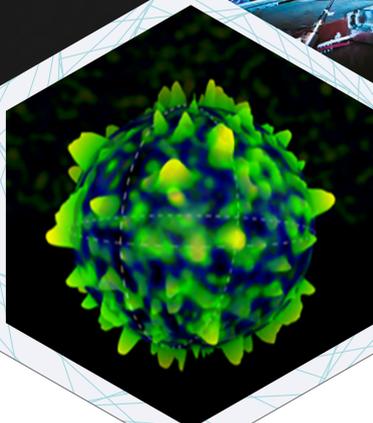
13 JUIN

LHCb réalise les mesures les plus précises jamais obtenues de l'asymétrie matière-antimatière dans les désintégrations de particules beauté.

(CERN-PHOTO-202204-063-2)

21 JUIN

L'artiste néerlandaise Joan Heemskerk, pionnière de l'art en ligne, remporte le prix de la résidence *Collide* à Copenhague. On voit ici son œuvre « Prototype ».



28 JUIN

Trois équipes d'élèves du secondaire venues des Pays-Bas, du Pakistan et des États-Unis remportent la dixième édition du concours *Ligne de faisceau pour les écoles*.

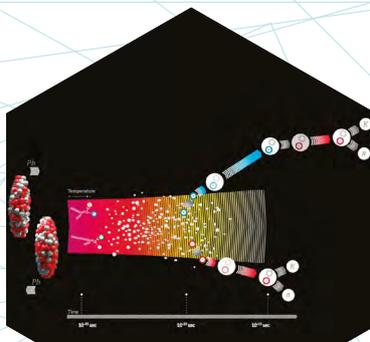
28 JUIN

Le CERN lance son nouveau programme *CERN Venture Connect* pour soutenir les start-ups de la « deep-tech ».

14 JUILLET

Des mesures faites par ALICE permettent de mieux comprendre la dynamique des quarks c et b dans le plasma quarks-gluons, et montrent que les quarks c thermalisent mieux que les quarks b.

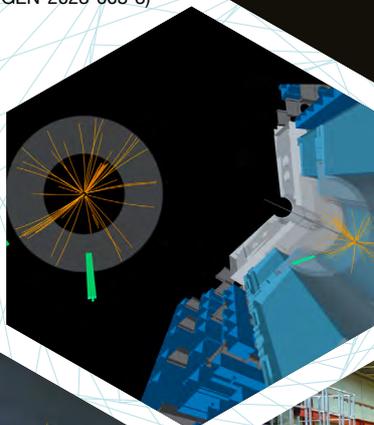
(ALICE-PHO-GEN-2023-008-3)



21 JUILLET

L'expérience ATLAS établit la masse du boson de Higgs avec une précision record de 0,09 %.

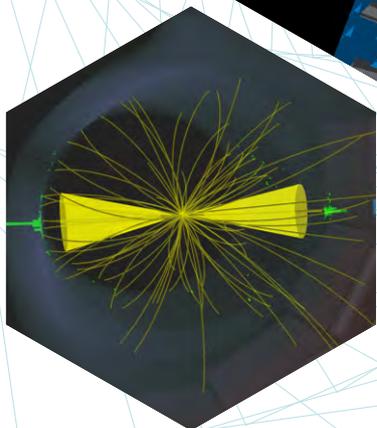
(ATLAS-PHOTO-2023-031-3)



28 JUILLET

À l'occasion de l'Année de la science ouverte, le CERN, la NASA et d'autres institutions scientifiques unissent leurs forces pour une recherche ouverte et accessible à tous.

(CERN-PHOTO-202307-160-11)



2 AOÛT

CMS apporte un éclairage nouveau sur la formation des hadrons en démontrant la transformation des partons en hadrons dans les jets produits au LHC.

(CMS-PHO-EVENTS-2023-021)

21 AOÛT

NA62 (photo) et NA64, expériences de la zone Nord, s'intéressent à plusieurs modèles de matière noire légère.

(CERN-PHOTO-202104-059-8)

23 AOÛT

LHCb observe l'hypertriton, un aspect essentiel pour la modélisation des noyaux d'étoiles à neutrons.

(CERN-PHOTO-201801-025-18)

25 SEPTEMBRE

ATLAS mesure l'intensité de la force forte avec une précision record.

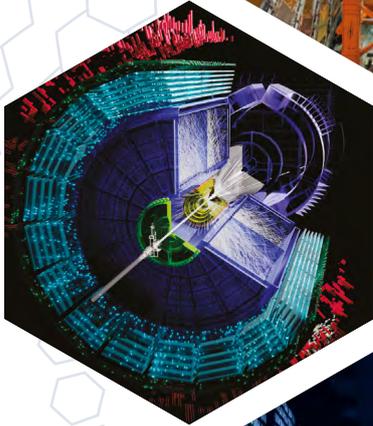
(ATLAS-PHOTO-2024-002-3)



27 SEPTEMBRE

ALPHA observe l'influence de la gravité sur l'antimatière.

(CERN-PHOTO-202103-029-3)



28 SEPTEMBRE

Inauguration de la Bibliothèque et de la librairie, après un an de rénovations.

(CERN-PHOTO-202309-208-1)

28 SEPTEMBRE

Début de la campagne avec des ions plomb : pendant cinq semaines, les expériences du LHC collectent des données pour les programmes de physique des ions lourds.

(CERN-PHOTO-202309-223-1)



29 SEPTEMBRE

La capacité de stockage sur disque du CERN franchit la barre de l'exaoctet, soit un million de téraoctets.

(OPEN-PHO-LIFE-2021-017-11)

7 OCTOBRE

Le CERN inaugure le Portail de la science, son nouveau centre d'éducation scientifique et de communication grand public.

(CERN-PHOTO-202310-241-29)

16 OCTOBRE

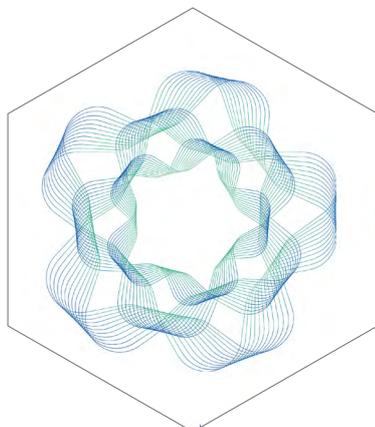
Lancement de l'Institut ouvert de technologie quantique lors du sommet GESDA. Ce programme triennal a pour vocation de rendre largement disponibles les ressources d'informatique quantique et l'expertise technologique associée.



10 NOVEMBRE

CMS présente l'état de sa recherche de nouvelles particules exotiques à vie longue et de la possible production de « photons noirs ».

(CMS-PHO-EVENTS-2023-027-2)



14 NOVEMBRE

Signature d'un mémorandum de coopération avec le Programme alimentaire mondial pour promouvoir l'accès aux innovations informatiques et leur utilisation pour lutter contre la faim dans le monde.



4 DÉCEMBRE

Publication du rapport du CERN sur l'environnement 2021-2022, qui met en évidence les progrès accomplis et les axes de développement futur pour limiter l'empreinte environnementale du Laboratoire.

16 NOVEMBRE

Les présidents des États hôtes, Alain Berset (Suisse) et Emmanuel Macron (France), visitent le CERN.
(CERN-PHOTO-202311-266-21)

UN LABORATOIRE POUR LE MONDE

La collaboration internationale est au cœur de la mission du CERN. Cette année, plus de 17 000 collaborateurs du monde entier ont pris part aux activités du Laboratoire dans l'objectif commun de repousser les frontières de la connaissance. Tout au long de 2023, première année complète de la troisième période d'exploitation du LHC, l'infrastructure et les données collectées au CERN ont été mises à la disposition de plus de 12 000 utilisateurs scientifiques rattachés à 950 instituts dans plus de 80 pays.



(CERN-PHOTO-202304-106-55)

RÉPARTITION DES UTILISATEURS DU CERN SELON LE PAYS DE L'INSTITUT DONT ILS DÉPENDENT, AU 31 DÉCEMBRE 2023

NOMBRE D'UTILISATEURS : 12 370

ÉTATS MEMBRES (7 438)

Allemagne 1 296 – Autriche 86 – Belgique 129 – Bulgarie 46 – Danemark 47 – Espagne 413 – Finlande 88 – France 842 – Grèce 112
Hongrie 80 – Israël 74 – Italie 1 609 – Norvège 77 – Pays-Bas 167 – Pologne 322 – Portugal 105 – Roumanie 113 – Royaume-Uni 950
Serbie 38 – Slovaquie 67 – Suède 106 – Suisse 419 – Tchéquie 252

ÉTATS MEMBRES ASSOCIÉS EN PHASE PRÉALABLE À L'ADHÉSION (69)

Chypre 14 – Estonie 29 – Slovaquie 26

ÉTATS MEMBRES ASSOCIÉS (406)

Croatie 37 – Inde 145 – Lettonie 21 – Lituanie 17 – Pakistan 30 – Turquie 129 – Ukraine 27

OBSERVATEURS (3005)

États-Unis d'Amérique 2 007 – Fédération de Russie 779 (le statut d'observateur de la Fédération de Russie a été suspendu suite à la Résolution du Conseil en date du 8 mars 2022) – Japon 219

AUTRES PAYS ET TERRITOIRES (1 452)

Afrique du Sud 61 – Algérie 2 – Arabie saoudite 6 – Argentine 16 – Arménie 16 – Australie 26 – Azerbaïdjan 3 – Bahreïn 3 – Bélarus 14
Brésil 135 – Canada 206 – Chili 45 – Colombie 24 – Costa Rica 3 – Cuba 3 – Égypte 24 – Émirats arabes unis 10 – Équateur 4 – Géorgie 34
Hong Kong 15 – Islande 3 – Indonésie 7 – Iran 14 – Irlande 4 – Jordanie 3 – Kazakhstan 3 – Koweït 2 – Liban 7 – Madagascar 1 – Malaisie 4
Malte 1 – Maroc 18 – Mexique 56 – Monténégro 3 – Nouvelle Zélande 2 – Nigéria 2 – Oman 1 – Palestine 1 – Pérou 3 – Philippines 1
République de Corée 168 – République populaire de Chine 414 – Sri Lanka 10 – Taïwan 52 – Thaïlande 17 – Tunisie 4 – Vietnam 1

Partout dans le monde, les alumnis du CERN sont de formidables ambassadeurs de l'Organisation. Ils font partie du réseau *CERN Alumni*, qui a fêté son sixième anniversaire en juin. Ce réseau, qui s'est beaucoup développé depuis sa création, comptait fin décembre presque 9 500 membres. De nombreux groupes régionaux d'alumnis ont été créés dans le monde entier et se réunissent régulièrement. De nouveaux groupes ont été créés à Barcelone et à Munich, et ceux de Vienne et de Milan-Turin, qui n'étaient plus actifs suite à la pandémie, ont été relancés.



Au cours de l'année, 138 événements organisés partout dans le monde ont été recensés sur le site web des alumnis. Outre le sixième anniversaire du réseau, une session LinkedIn, coorganisée par le groupe Acquisition de talents, s'est tenue en direct depuis la plateforme neutrino ; à cette occasion, deux alumnis ont présenté les avantages d'une expérience au CERN dans une carrière. Par ailleurs, le réseau a facilité la tenue d'un certain nombre d'événements, notamment des sessions « *Moving out of Academia* » (« Sortir du milieu institutionnel »), axées sur des secteurs tels que le conseil ou le génie logiciel, et un événement collaboratif coorganisé avec la plateforme d'emploi de l'Institut Paul Scherrer intitulé « *From Research to Industry: Selling your Skills to a Future Employer* », axé sur des conseils pour postuler à un emploi. De nombreux salons virtuels d'entreprises ont également été organisés, apportant aux alumnis des possibilités de réseautage et un aperçu des offres d'emploi dans diverses entreprises.



Emmanuel Macron, président de la République française, lors de sa visite d'État en Suisse sur l'invitation d'Alain Berset, président de la Confédération helvétique.

(CERN-PHOTO-202311-266-127)



Le CERN a à cœur de renforcer ses partenariats existants et d'en nouer de nouveaux avec des États, des instituts et des laboratoires dans le monde entier. Fin 2023, il comptait 23 États membres, 3 États membres associés en phase préalable à l'adhésion et 7 États membres associés. La procédure visant à faire du Brésil un État membre associé a bien progressé, et une demande d'accession à ce même statut a été déposée par le Chili en septembre et par l'Irlande en novembre.

En 2023, 170 personnalités de haut rang ont visité le Laboratoire, dont les présidents des États hôtes, Alain Berset et Emmanuel Macron, en novembre, qui ont réitéré le soutien de la Suisse et de la France au Laboratoire.

Les programmes du CERN pour le renforcement des capacités ont suscité beaucoup d'intérêt : le programme des étudiants d'été a accueilli 138 étudiants de 61 pays et un nouveau programme pour les doctorants a été lancé.

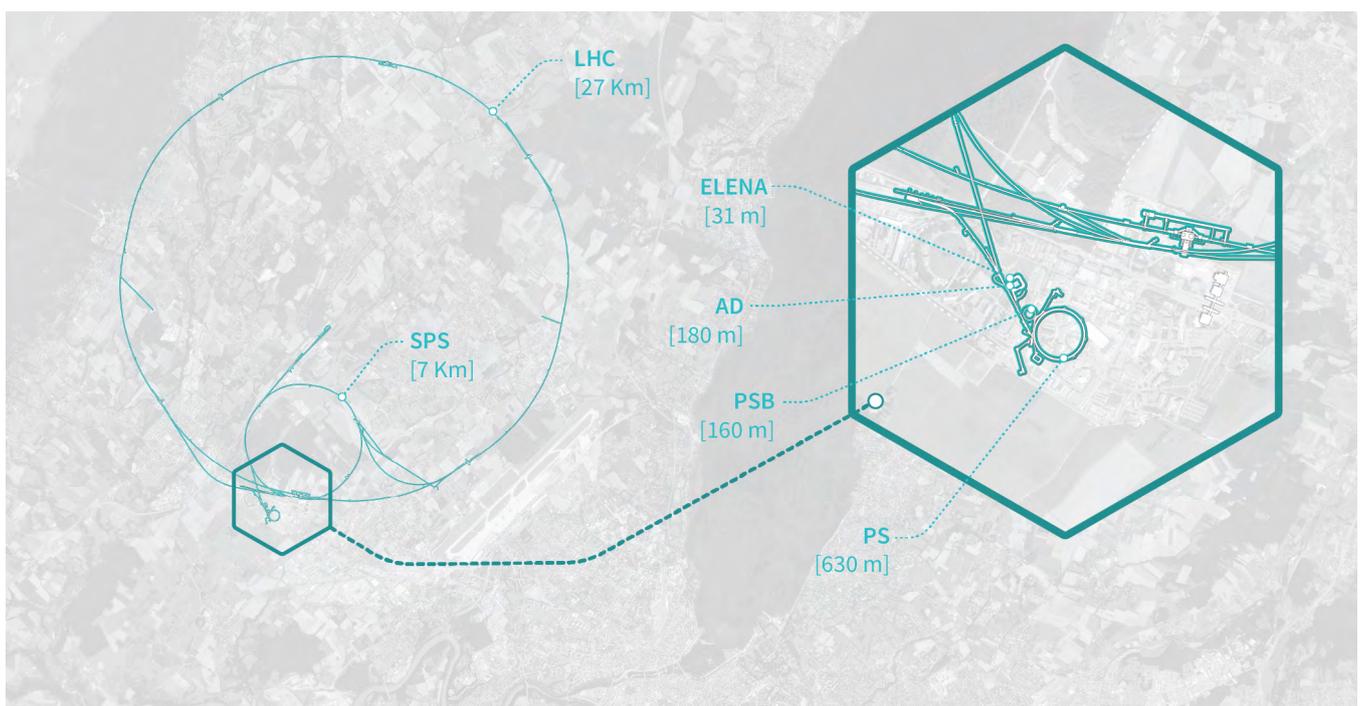
EXPLORER LA NATURE DE L'UNIVERS

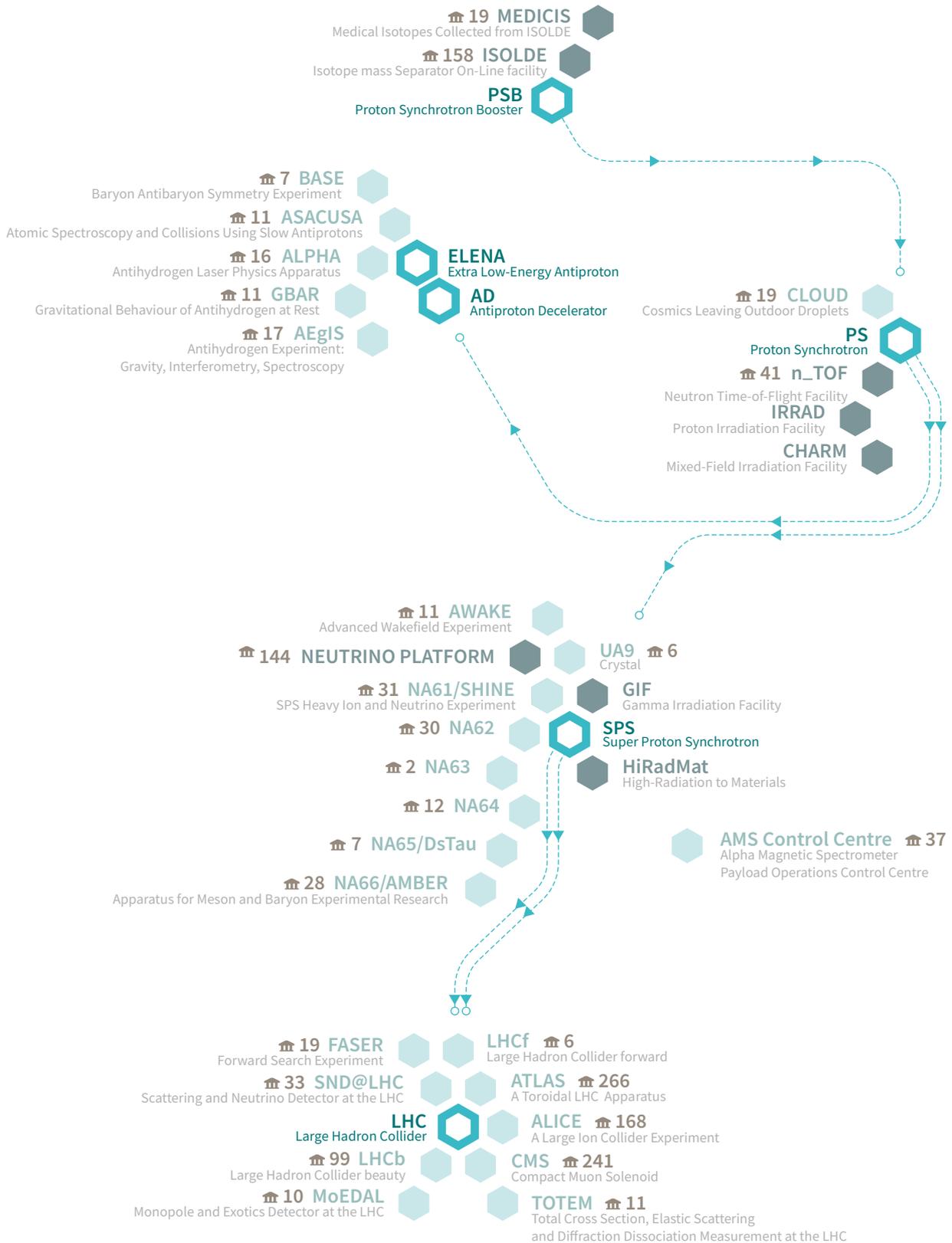
Pour explorer la structure fondamentale de l'Univers, le CERN utilise un complexe d'accélérateurs unique au monde, dans lequel des faisceaux de particules entrent en collision ou percutent des cibles fixes. Les résultats sont enregistrés par des détecteurs géants et analysés par des milliers de physiciens, au CERN et ailleurs dans le monde.

COMPLEXE D'ACCÉLÉRATEURS ET EXPÉRIENCES

Le Grand collisionneur de hadrons (LHC) est l'accélérateur phare du CERN ; il fait entrer en collision des faisceaux de protons et d'autres particules à des énergies jamais atteintes auparavant. Les produits de ces collisions sont enregistrés par les expériences ALICE, ATLAS, CMS, LHCb, LHCf, MoEDAL et TOTEM et, depuis 2022, FASER et SND@LHC. En 2023, la troisième période d'exploitation du LHC s'est poursuivie, à une énergie de 13,6 TeV, et, pour la première fois depuis cinq ans, des faisceaux d'ions lourds ont été accélérés, à une énergie de 5,36 TeV par collision nucléon-nucléon. L'année a aussi été marquée par le 50^e anniversaire de la découverte des courants neutres et le 40^e anniversaire de celle des bosons W et Z, événements

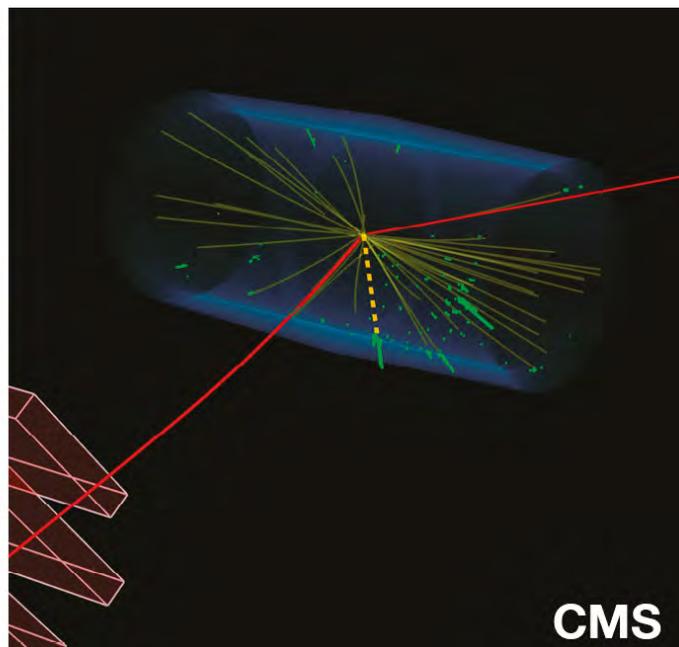
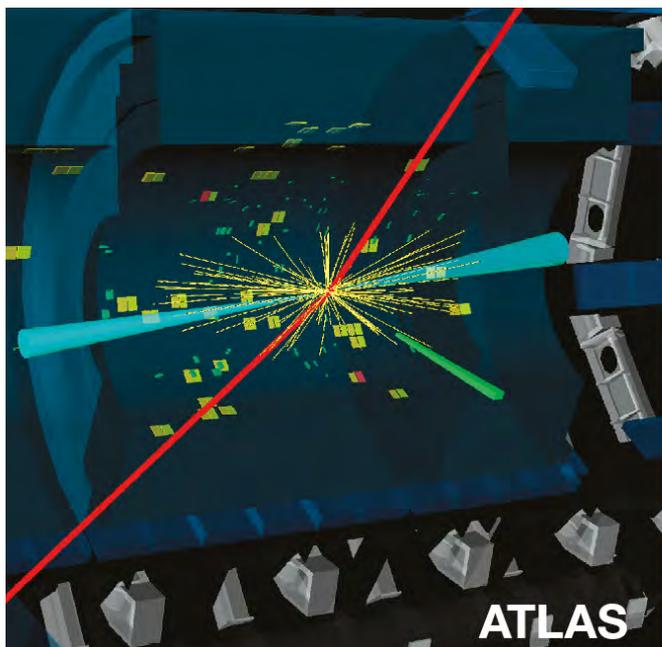
célébrés lors d'un symposium évoquant le passé, le présent et l'avenir de ces domaines de la physique. Tout au long de l'année, des résultats scientifiques de premier ordre se sont succédé, obtenus auprès du LHC et d'autres accélérateurs du Laboratoire. Entre autres, la masse du quark top a été établie avec une précision encore jamais atteinte, grâce à la combinaison de précédentes mesures réalisées par ATLAS et CMS ; des neutrinos produits dans un collisionneur de particules ont été observés pour la première fois par FASER et SND@LHC, et la collaboration ALPHA a démontré, dans la limite de la précision de son expérience, que les atomes d'antihydrogène tombent sur Terre de la même manière que leurs équivalents de matière.





- Accélérateur
- Expérience
- Installation
- Nombre d'instituts participants

Les accélérateurs du CERN alimentent de nombreuses expériences et installations utilisées par des chercheurs du monde entier.



Événements candidats pour la désintégration d'un boson de Higgs en un boson Z et un photon, le boson Z se désintégrant à son tour en une paire de muons (lignes rouges), enregistrés par les expériences ATLAS (à gauche) et CMS (à droite).

(ATLAS-PHOTO-2023-040-1 et CMS-PHO-EVENTS-2023-014-2)

BOSON DE HIGGS

La découverte du boson de Higgs au LHC en 2012 a marqué un tournant dans l'histoire de la physique ; on peut ainsi expliquer comment les particules élémentaires obtiennent leur masse. Depuis, ATLAS et CMS déploient tous leurs efforts pour étudier cette particule unique en son genre et déterminer comment elle est produite et comment elle se désintègre en d'autres particules.

Cette année, ATLAS et CMS ont uni leurs forces pour déceler les premiers indices probants d'un processus rare, la désintégration du boson de Higgs en un boson Z, particule neutre porteuse de la force faible, et un photon, porteur de la force électromagnétique. Cette désintégration du boson de Higgs pourrait constituer un indice indirect de l'existence de particules autres que celles prédites par le Modèle standard de la physique des particules. La désintégration passe par une « boucle » intermédiaire de particules qui surgissent et disparaissent alternativement et ne peuvent être détectées directement. Ces particules virtuelles pourraient comprendre des particules encore inconnues capables d'influer sur le taux de désintégration du boson de Higgs.

ATLAS et CMS ont également mesuré la masse du boson de Higgs avec une précision record. Connaître précisément ce paramètre est essentiel pour pouvoir effectuer des calculs théoriques exacts qui, à leur tour, permettront aux physiciens de confronter leurs mesures des propriétés du boson de Higgs aux prédictions du Modèle standard. La masse du boson de Higgs est également un paramètre crucial lié à la stabilité du vide dans l'Univers. ATLAS a obtenu une masse de 125,11 GeV, avec une incertitude de 0,11 GeV, en combinant une nouvelle mesure découlant d'une analyse de la désintégration de la particule en deux photons de haute énergie et une précédente mesure basée sur une étude de

la désintégration du boson de Higgs en quatre leptons. CMS a obtenu une valeur de 125,08 GeV, avec une incertitude de 0,12 GeV, en utilisant la désintégration de la particule en quatre leptons, ce qui constitue la mesure la plus précise à ce jour obtenue à partir d'un seul canal.

LE MODÈLE STANDARD ET SES EXTENSIONS

Les collaborations LHC continuent d'explorer le Modèle standard et ses extensions. Il est admis que la force faible est à l'origine d'une différence de comportement entre la matière et l'antimatière (ce que l'on appelle la violation de la symétrie CP) dans les désintégrations de particules contenant des quarks. Cependant, ces différences, ou asymétries, sont difficiles à mesurer et ne suffisent pas à expliquer le déséquilibre matière-antimatière observé dans l'Univers actuel. C'est pourquoi les physiciens s'efforcent aussi bien de mesurer avec précision les différences connues que de rechercher des différences inédites. Cette année, la collaboration LHCb a mesuré avec une précision inégalée deux paramètres essentiels déterminant ces asymétries matière-antimatière. Le premier paramètre détermine l'ampleur de la violation de CP dans les désintégrations de mésons beauté neutres, et l'autre dans les désintégrations de mésons beauté contenant des quarks étranges. Ces mesures concordent avec les valeurs prédites par le Modèle standard et aident à la recherche d'effets inconnus.

Lors d'une étude qui a dépassé les objectifs premiers de l'expérience, LHCb a également détecté une centaine d'hypertritons et d'antihypertritons dans des collisions proton-proton au LHC. Ces résultats, qui montrent que le CERN est l'un des rares endroits où de tels hypernoyaux peuvent être étudiés en détail, pourraient ouvrir des perspectives sur les interactions entre particules susceptibles d'avoir lieu dans le cœur des étoiles à neutrons.

L'équipe de LHCb a également découvert un nouvel état à quatre quarks, composé d'un quark c, d'un antiquark c, d'un quark d et d'un antiquark étrange. Ce résultat vient s'ajouter aux plus de 20 nouveaux hadrons exotiques découverts au LHC et, plus généralement, aux plus de 70 nouveaux hadrons découverts au collisionneur. L'étude des hadrons exotiques, qui sont constitués de plus de trois quarks, est un excellent moyen de mieux comprendre la chromodynamique quantique, théorie de la force forte qui lie les quarks ensemble pour former des particules composites.

LHCb a également publié une mesure de la production associée de particules J/ψ et $\psi(2S)$ dans des collisions proton-proton à 13 TeV – une première dans un collisionneur de hadrons. Ce résultat, combiné avec une mesure de la production de J/ψ - J/ψ , comporte de précieuses informations dans la perspective de l'amélioration des calculs de chromodynamique quantique.

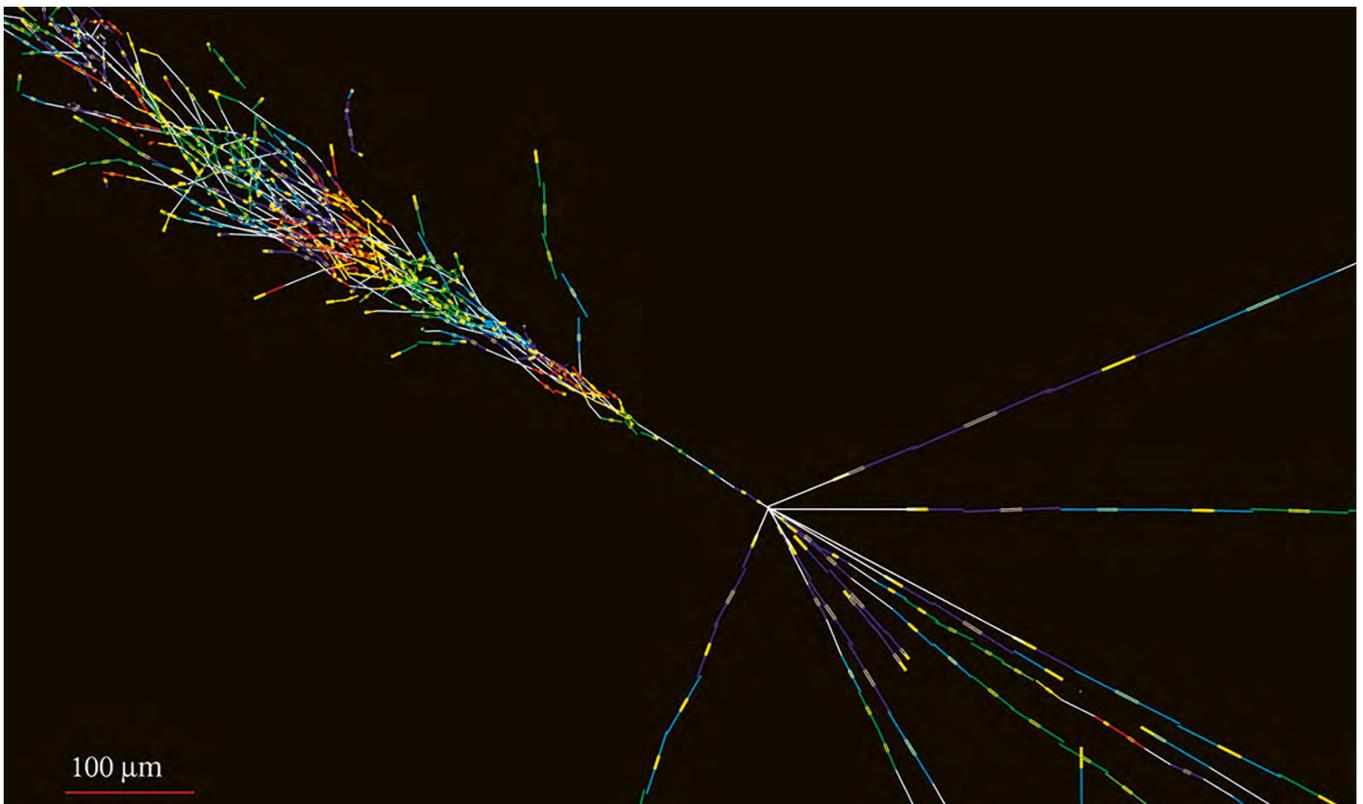
À l'occasion d'autres explorations du Modèle standard et de ses extensions, ATLAS a mesuré, avec une précision record de 0,8 %, l'intensité de la force forte, paramètre du Modèle standard qui n'était jusqu'alors connu qu'avec une précision de l'ordre du pour cent – à titre de comparaison, la force électromagnétique, qui est 15 fois moins intense que la force forte à l'énergie étudiée par le LHC, est connue avec une précision supérieure au milliardième. Ce résultat montre la capacité du LHC de repousser plus loin les limites de la précision et d'améliorer notre compréhension de la nature. Grâce à une nouvelle analyse d'un échantillon de 14 millions de candidats bosons W produits dans des collisions proton-proton, ATLAS a également obtenu une valeur de la masse du boson W de 80 360 MeV, avec une incertitude de 16 MeV

– résultat conforme aux prédictions du Modèle standard et plus précis de 16 % que le précédent résultat obtenu.

Par une revue exhaustive de ses recherches sur des particules supersymétriques à faibles interactions, origine possible de la matière noire, ATLAS a presque totalement exclu certaines régions considérées jusqu'ici comme favorables pour les masses des particules supersymétriques, à savoir celles où la masse d'une particule de matière noire fait environ la moitié de celle du boson Z ou du boson de Higgs. La collaboration a aussi présenté des exemples de modèles « survivants », encore inexplorés, pouvant être utilisés pour optimiser les recherches futures.

Par ailleurs, ATLAS a observé une intrication quantique dans des collisions ayant produit une paire de quarks top. L'intrication est un mécanisme extraordinaire propre à la mécanique quantique : si deux particules sont intriquées, l'état de l'une ne peut être décrit indépendamment de l'autre. Ce phénomène a été observé dans divers systèmes, mais il reste très peu étudié aux énergies élevées atteintes dans les collisionneurs de hadrons. Cette nouvelle observation, parce qu'elle est la première d'une intrication entre deux quarks et qu'elle a été faite à un niveau d'énergie inédit, ouvre de nouvelles perspectives pour le test des propriétés fondamentales de la mécanique quantique.

Parmi les principaux résultats obtenus par CMS, il faut citer ceux des premières recherches d'une nouvelle physique s'appuyant sur des données issues de la troisième période d'exploitation. L'une de ces recherches portait sur la présence de particules à vie longue, appelées photons noirs, dans les désintégrations de bosons de Higgs. Grâce à son algorithme de sélection des données en temps réel



Événement candidat pour une interaction en courant chargé d'un neutrino électronique de haute énergie enregistré par FASERv, avec une gerbe électromagnétique (à gauche) équilibrée par plusieurs traces de particules chargées (à droite).

amélioré, affiné entre la deuxième et la troisième périodes d'exploitation, CMS a pu obtenir un résultat solide avec seulement un tiers de la quantité de données utilisées pour ses précédentes recherches.

CMS a également annoncé l'observation d'une désintégration rare du méson η en quatre muons. Cette désintégration pourrait être sensible à des contributions provenant de nouvelles particules inconnues et elle est importante pour le calcul du moment magnétique anomal du muon, dont l'expérience Muon $g-2$ à Fermilab a fait la mesure la plus précise. L'observation démontre l'efficacité de la technique utilisée (*data scouting*), qui permet de s'affranchir de la limite de la quantité maximale de données pouvant être transférées vers le stockage définitif en n'enregistrant qu'une fraction des informations.

Par ailleurs, la collaboration a présenté l'analyse de la structure interne (sous-structure) des gerbes, ou « jets », de particules, qui a permis non seulement d'apporter un éclairage nouveau sur la manière dont les quarks et les gluons se transforment en hadrons, mais également de mesurer l'intensité de la force forte avec une précision de 4 %. Ce résultat est la mesure la plus précise de ce paramètre par l'étude de la sous-structure de jets. Toujours dans le domaine de la précision, CMS a obtenu une mesure de la polarisation du lepton tau dans les désintégrations du boson Z en une paire de leptons tau qui est presque aussi précise que celles obtenues par une expérience isolée au LEP, le prédécesseur du LHC. Cette mesure montre que les collisions au LHC, bien qu'elles soient beaucoup plus complexes que celles produites au LEP, permettent de déterminer avec précision la polarisation du lepton tau, mesure cruciale pour sonder les propriétés de la symétrie CP dans l'interaction entre le boson de Higgs et le lepton tau. Cette année, les équipes d'ATLAS et de CMS ont combiné 15 mesures effectuées précédemment par l'une ou l'autre

CETTE ANNÉE, LES ÉQUIPES D'ATLAS ET DE CMS ONT COOPÉRÉ POUR OBTENIR LA VALEUR DE LA MASSE DU QUARK TOP LA PLUS PRÉCISE JAMAIS ATTEINTE.

expérience pour obtenir la valeur de la masse du quark top la plus précise jamais atteinte. Ce résultat, qui s'appuie sur des données issues de la première période d'exploitation et dont le degré d'incertitude est inférieur à 0,2 %, illustre le travail méticuleux nécessaire pour analyser les données du LHC, qui peut se poursuivre des années après la collecte de données. Les deux expériences ont aussi observé directement la production simultanée de quatre quarks top. Ce phénomène rare, difficile à détecter, pourrait donner accès à une physique au-delà du Modèle standard.

Concernant les petites expériences du LHC, l'année a été marquée par la première observation de neutrinos produits dans un collisionneur de particules par FASER et SND@LHC, qui ont commencé à être exploitées au début de la troisième période d'exploitation. FASER a reconstitué 153 événements candidats pour une interaction entre neutrinos et antineutrinos du muon, avec une signification statistique de 16 écarts-types, alors que SND@LHC a trouvé huit candidats d'interaction de neutrinos du muon avec une signification statistique de 7 écarts-types. Ces résultats ouvrent la voie à de futures études fondées sur les neutrinos produits par des collisionneurs de haute énergie. Par ailleurs, FASER a présenté les premiers résultats concernant la recherche de photons noirs se désintégrant en une paire électron-positon, permettant ainsi de fixer de nouvelles limites aux photons noirs.

ALICE

Le LHC fait entrer en collision des noyaux pour explorer la théorie de l'interaction forte dans les conditions de température et de densité les plus extrêmes qui soient sur Terre. Ces collisions d'ions lourds créent un plasma quarks-gluons, état de la matière qui aurait prévalu dans les premiers instants de l'Univers. L'une des caractéristiques clés de la formation du plasma quarks-gluons est une correspondance spatiale à longue portée entre les particules créées lors de ces collisions, qui se manifeste sous la forme d'une crête dans les graphiques. Cette année, ALICE, expérience spécialisée dans les ions lourds, a observé cet effet dans le système de collisions le plus simple qui soit – les collisions de protons de « basse multiplicité », où le nombre de particules créées est relativement faible. Cette observation pourrait donner des indications sur l'origine de phénomènes collectifs semblables à celui du plasma quarks-gluons dans les petits systèmes de collision.

ALICE a également publié de nouveaux résultats fondés sur des collisions dites « ultrapériphériques », dans lesquelles

l'un des faisceaux du LHC peut émettre des photons à très haute énergie venant heurter l'autre faisceau. En étudiant ces collisions photon-noyau, la collaboration a pu explorer l'agencement des gluons à l'intérieur des noyaux, en particulier des zones appelées *hotspots* gluoniques dans lesquelles la quantité de gluons ne peut plus augmenter.

Dans les collisions d'ions lourds non frontales, la zone de chevauchement entre les ions présente une forme elliptique qui laisse une empreinte sur le flux d'hadrons. ALICE a publié une nouvelle mesure de ce flux elliptique de mésons D « non prompts », produits non pas juste après les collisions mais plus tard, lors de la désintégration de mésons B, qui contiennent des quarks b. Ces mesures montrent que le flux elliptique des mésons D non prompts est plus faible que celui de leurs équivalents prompts, conformément aux prédictions. Ces résultats apportent un nouvel éclairage à la thermalisation des quarks b dans le plasma quarks-gluons, et ouvrent la voie à de nouvelles mesures à partir des données de la troisième période d'exploitation.

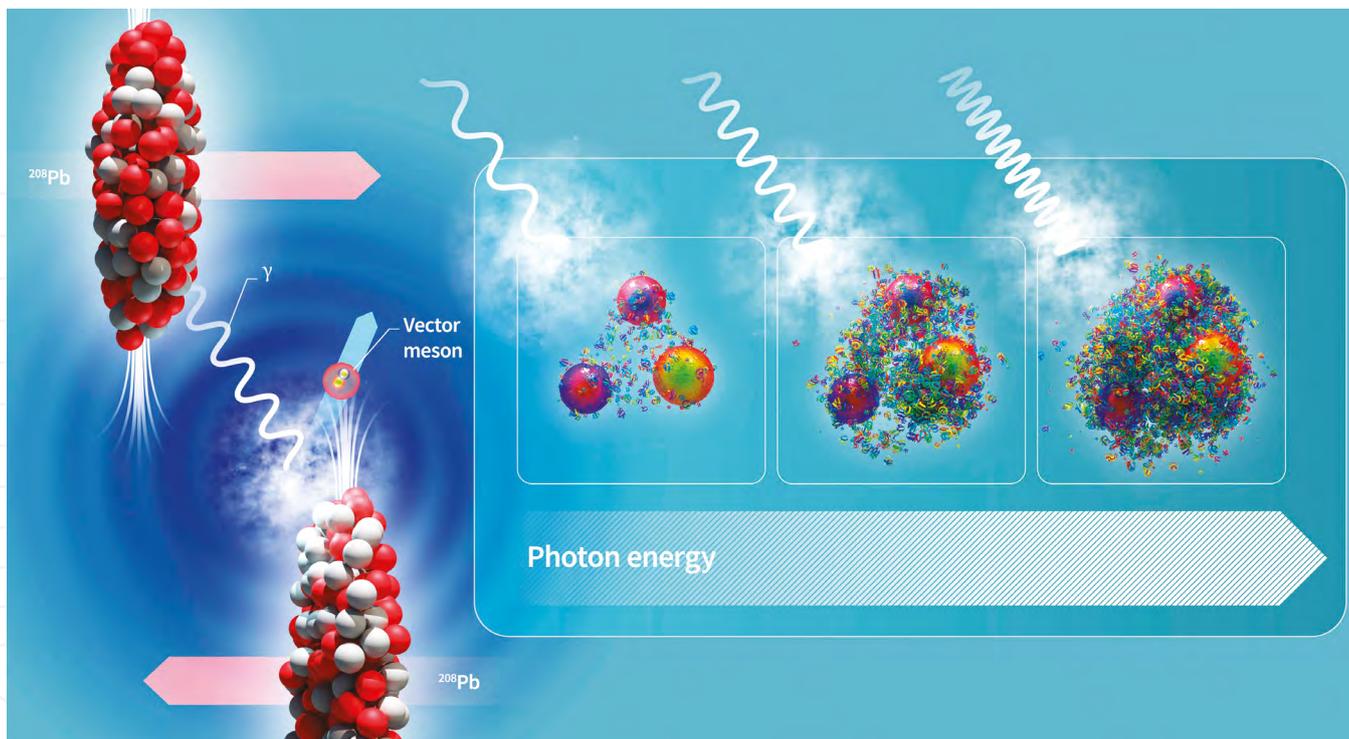


Illustration d'une collision ultrapériphérique où deux faisceaux d'ions plomb au LHC passent à proximité l'un de l'autre sans entrer en collision. Les photons émis par l'un des deux faisceaux heurtent l'autre faisceau, produisant des interactions électromagnétiques. Plus l'énergie des photons est élevée, plus la structure de la matière gluonique est exposée (voir les trois images encadrées).

ALICE a également présenté les premiers résultats obtenus à partir des données collectées avec son détecteur amélioré en 2022, première année de la troisième période d'exploitation. L'un de ces résultats est la mesure des taux de production de deux charmoniums, états liés d'un quark charmé et de son antiquark, dans des collisions proton-proton. Ces résultats montrent la capacité d'ALICE de mesurer des charmoniums à la fois dans la région centrale

et dans les petits angles du détecteur, et ouvrent la voie à des mesures fondées sur les données de l'exploitation avec ions lourds qui a eu lieu au dernier trimestre de 2023, lors de laquelle l'expérience a enregistré environ douze milliards de collisions plomb-plomb, soit 40 fois plus que le total enregistré lors des périodes précédentes de collecte de données de collisions d'ions lourds.

THÉORIE

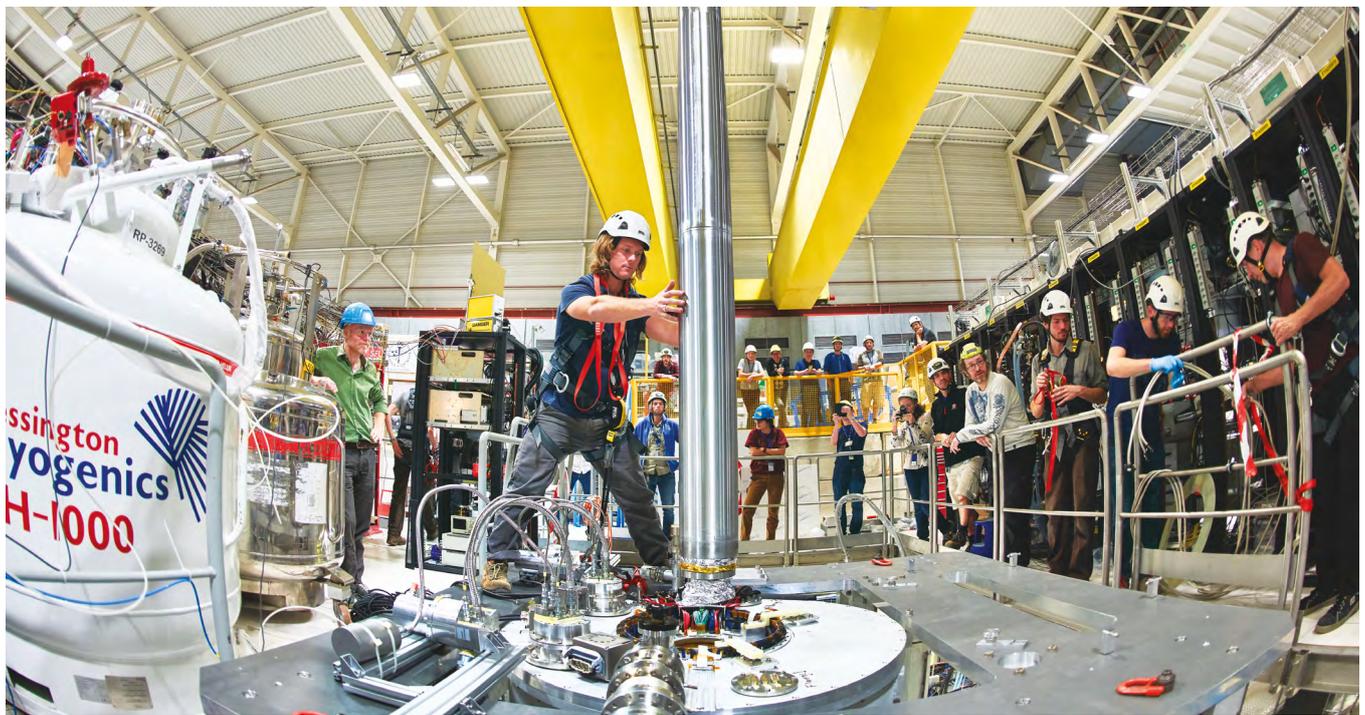
Cette année, le département Physique théorique du CERN a mené des recherches de pointe, apporté un appui aux activités du Laboratoire et servi la communauté internationale de la physique théorique. Quelque 304 articles portant sur de nombreux domaines allant de la théorie des cordes et du champ quantique à la physique des collisionneurs, en passant par la cosmologie et l'astrophysique des particules, ont été déposés sur le serveur arXiv.

Parmi les nombreuses études, on peut citer : des calculs de haut niveau sur des processus prévus par le Modèle standard ; une méthode de préparation d'états du vide aux fins de simulation quantique pour les théories de champs quantiques locaux interagissant fortement ; une estimation du bruit de fond d'ondes gravitationnelles générées dans la bande de fréquence de la sonde spatiale LISA par des paires de trous noirs d'origine stellaire ; la démonstration qu'il est concevable de détecter la nature quantique des rayonnements gravitationnels ; une méthode de calcul

permettant d'obtenir certaines quantités mathématiques appelées « amplitudes de diffusion » dans trois et quatre dimensions spatiotemporelles, et le calcul, grâce aux données issues de l'exploitation du LHC avec ions lourds, de l'épaisseur de la peau neutronique du plomb-208.

Le département a apporté des contributions fondamentales aux groupes de travail sur la physique du LHC, sur le HL-LHC (p. 43), ainsi que sur les futurs collisionneurs proposés – le CLIC, le FCC et un éventuel collisionneur de muons. Il a également joué un rôle de premier plan dans des initiatives de recherche, à la fois dans le cadre de la plateforme neutrino (p. 48) et du programme de physique au-delà des collisionneurs (p. 49), et participé à l'initiative Technologie quantique au CERN (p. 31).

Le département a accueilli 779 chercheurs externes et a organisé sept instituts théoriques, 11 ateliers thématiques et deux écoles de physique.



Installation du dispositif ALPHA-g dans l'usine à antimatière du CERN. (CERN-PHOTO-201810-267-19)

ÉTUDE SUR L'ANTIMATIÈRE

L'usine à antimatière fournit aux expériences des antiprotons de basse énergie, permettant d'étudier les propriétés et le comportement de l'antimatière et de les comparer avec ceux de la matière. Ces comparaisons testent une symétrie fondamentale dans le Modèle standard, l'invariance CPT (charge-parité-temps), et un principe fondamental de la relativité générale connu sous le nom de « principe d'équivalence faible ».

Cette année, des antiprotons de basse énergie de l'anneau ELENA, qui décélère encore plus les antiprotons déjà ralentis par le Décélérateur d'antiprotons, ont été fournis aux expériences ALPHA, AEgIS, ASACUSA, BASE et GBAR. En parallèle, des progrès ont été faits dans la mise au point de l'expérience PUMA et d'une variante de BASE appelée BASE-STEP, qui visent à transporter l'antimatière vers d'autres installations pour des études sur la physique nucléaire et l'antimatière.

Parmi les résultats de physique marquants de l'année, il faut citer la démonstration par ALPHA – dans la limite de la précision permise par ALPHA-g – que les atomes d'antihydrogène (un positon en orbite autour d'un antiproton) tombent sur Terre de la même manière que leurs équivalents dans la matière. Ce résultat constitue une étape importante dans l'étude des propriétés et du comportement de l'antimatière, et ouvre la voie à des mesures de haute précision du comportement gravitationnel de l'antihydrogène.

Il y a eu également des résultats importants dans les expériences AEgIS et GBAR, qui elles aussi s'attachent à mesurer l'accélération de l'antihydrogène dans le champ gravitationnel de la Terre. AEgIS a réussi à refroidir par laser un échantillon de positonium, électron en orbite autour

d'un positon. Ce résultat permettra non seulement à AEgIS d'atteindre son objectif, mais ouvrira également la voie à une toute nouvelle série d'études sur l'antimatière, notamment sur la production d'un condensat de Bose-Einstein constitué de matière et d'antimatière émettant de la lumière gamma de type laser. GBAR a annoncé la production d'une vingtaine d'atomes d'antihydrogène, ce qui a permis de valider la technique de production de l'antihydrogène « en vol » et place l'expérience au sein du club très sélect de celles qui ont réussi à synthétiser des atomes d'antihydrogène.

ISOLDE

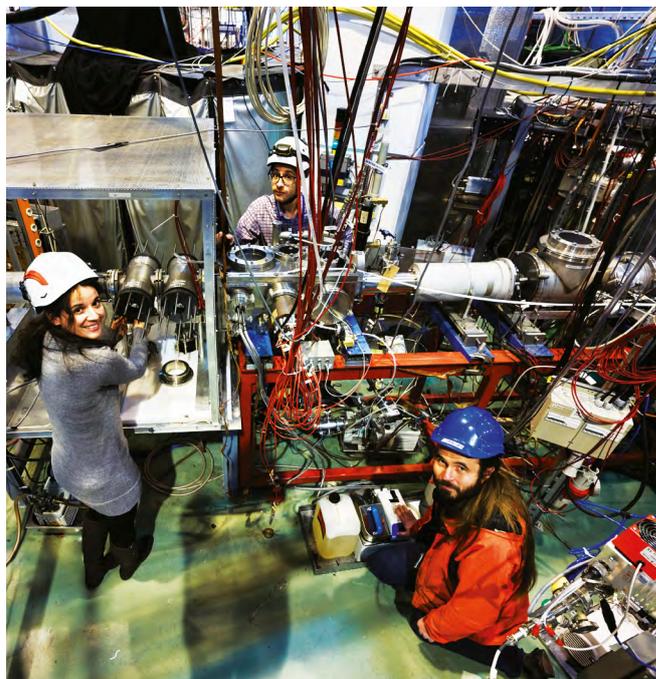
ISOLDE dirige sur une cible un faisceau de protons de 1,4 GeV issu du Booster du PS (p. 23) afin de générer des faisceaux d'isotopes radioactifs exotiques pour des études dans divers domaines. Ces faisceaux peuvent être réaccélérés à l'aide de l'accélérateur linéaire HIE-ISOLDE, à des énergies proches de 10 MeV par nucléon. Entre avril et novembre 2023, l'installation a fourni des faisceaux radioactifs à 59 expériences.

Une étude a révélé que le rayon du noyau exotique d'aluminium ^{26m}Al est beaucoup plus grand qu'attendu. Ce résultat, obtenu par la mesure de la réaction du noyau à la lumière laser dans des expériences réalisées à l'installation ISOLDE au CERN, ainsi qu'au Laboratoire de l'accélérateur de Jyväskylä (Finlande), apporte un éclairage nouveau sur les effets de la force faible sur les quarks. Plus concrètement, il a pour effet d'atténuer la tension apparente – avec la valeur attendue de 1 – dans la somme des probabilités respectives de transformation des quarks d, s et b en quark up.

Il a également été découvert que les noyaux d'or déficients en neutrons changent eux aussi de forme, alternant entre la forme ronde et la forme ovale lorsque des neutrons sont retirés un à un du noyau. Cette découverte a été faite au moyen de trois dispositifs à ISOLDE (RILIS, Windmill et ISOLTRAP). Il s'agit seulement de la troisième observation de ce phénomène, observé pour la première fois, à ISOLDE déjà, dans les noyaux de mercure légers, il y a un demi-siècle, et qui reste un défi de taille pour la théorie nucléaire.

ISOLDE a aussi permis de déterminer l'énergie nécessaire pour amener le noyau atomique de l'indium-99 de son état fondamental à un état excité de longue durée de vie, dit isomère. Ce résultat fait suite à une mesure antérieure de l'indium-99 à l'état fondamental, et ouvre une perspective sur le noyau de l'étain-100 – noyau « doublement magique », aidant ainsi les chercheurs à décrire le noyau à partir des principes premiers.

L'énergie et la durée de vie de l'isomère du thorium-229, qui pourrait servir à créer une horloge nucléaire, ont également été mesurées avec une précision inédite, à la suite de l'observation – faite en 2022 et publiée en 2023 – de la désintégration radiative de l'isomère vers l'état fondamental.



Le dispositif utilisé à ISOLDE pour étudier le noyau exotique d'aluminium. (CERN-PHOTO-201911-394-15)

EXPÉRIENCES AVEC CIBLES FIXES ET AUTRES

Des avancées ont été réalisées cette année par d'autres expériences du CERN, dont beaucoup sont alimentées par des faisceaux du PS et du SPS (p. 23). L'expérience CLOUD, par exemple, étudie la formation et la croissance des aérosols à partir de mélanges de vapeurs dans les conditions atmosphériques, à l'intérieur d'une grande enceinte. Les mesures effectuées par CLOUD ont montré que les oxoacides d'iode augmentent considérablement le taux de formation des particules d'acide sulfurique, ce qui donne à penser que les modèles climatiques sous-estiment considérablement les taux de formation des particules d'aérosols dans les régions marines et polaires.

L'expérience NA61/SHINE a également obtenu de nombreux résultats, notamment l'observation d'une brisure d'une ampleur inattendue d'une symétrie de la nature connue sous le nom de symétrie d'isospin dans la production de kaons chargés et neutres dans des collisions noyau-noyau de haute énergie. Ces résultats nécessitent d'autres mesures et études théoriques afin de déterminer l'origine de ce phénomène.

Parmi les autres résultats notables, il faut citer ceux des dernières recherches de matière noire menées par NA62 et NA64. Recherchant une désintégration rare du kaon et de possibles contributions des bosons noirs à celle-ci, NA62 a fixé des limites parmi les plus strictes sur les bosons noirs et exclu les axions en tant qu'explication possible de l'anomalie détectée par ATOMKI, confirmant

ses précédentes conclusions. La collaboration NA64, qui recherche des particules de matière noire qui interagiraient avec les particules du Modèle standard via un hypothétique photon noir, a fixé les limites les plus étroites à ce jour sur le couplage entre des photons noirs et des photons pour une masse du photon noir inférieure à 0,35 GeV. Enfin, les dernières mesures du processus Drell-Yan effectuées par l'expérience COMPASS, à laquelle l'expérience AMBER a succédé en 2022, ont été publiées. Ces résultats sont importants pour la compréhension de la structure interne des nucléons et ouvrent la voie à de nouvelles expériences visant à réaliser des mesures similaires.



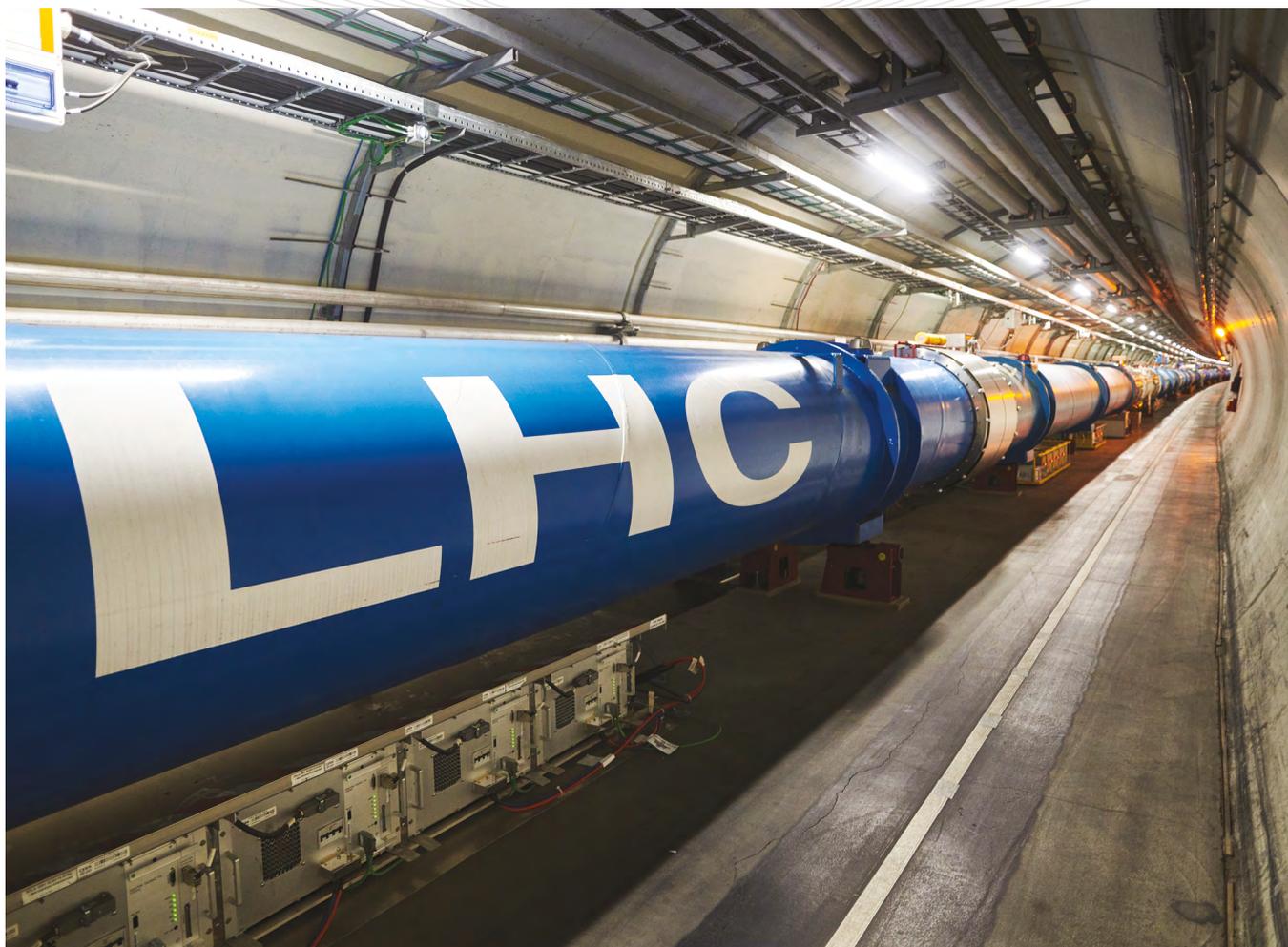
Le hall d'expérimentation où se situent l'expérience NA61/SHINE et d'autres expériences de la zone Nord. (CERN-PHOTO-202104-058-21)

LES MACHINES DES DÉCOUVERTES

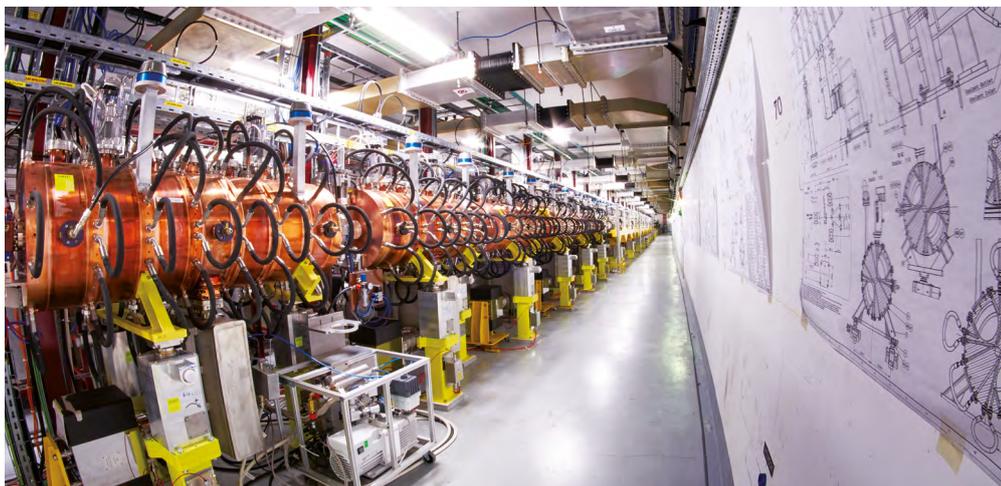
Pour étudier l'infiniment petit, le CERN exploite un complexe d'accélérateurs et d'expériences unique au monde. Les accélérateurs propulsent les particules subatomiques à des vitesses proches de celle de la lumière. Dans le LHC, des faisceaux de particules voyageant en sens inverse produisent des collisions au centre d'énormes détecteurs, qui enregistrent ce qui se passe. Des centaines de physiciens, d'ingénieurs et de techniciens assurent l'exploitation et la maintenance de ces installations sophistiquées.

L'année 2023 fut riche en rebondissements pour le complexe d'accélérateurs du CERN, en particulier pour le Grand collisionneur de hadrons (LHC). Le 21 avril, les premières collisions de protons ont eu lieu au cœur des expériences du LHC à l'énergie de 13,6 TeV. À l'automne, l'exploitation du complexe d'accélérateurs a été consacrée aux ions, offrant ainsi au LHC la première campagne de physique avec des

ions plomb depuis cinq ans. Les injecteurs ont produit des faisceaux répondant aux paramètres du projet d'amélioration des injecteurs (LIU), atteignant même l'intensité et la brillance de faisceau requises pour le LHC à haute luminosité (HL-LHC) (p. 43). Trois défis majeurs ont marqué l'exploitation du LHC. Les équipes impliquées ont déployé des trésors d'ingéniosité pour les relever.



À l'automne, des faisceaux d'ions plomb ont circulé dans le Grand collisionneur de hadrons (LHC) pour la première campagne de physique avec ions plomb de sa troisième période d'exploitation. (CERN-PHOTO-202109-138-6)



Le Linac 4 est le premier maillon de la chaîne d'accélérateurs de protons du CERN.

(CERN-PHOTO-201704-093-11)

DES INJECTEURS TOUJOURS PLUS PERFORMANTS

Après l'arrêt technique hivernal (YETS) 2022/2023, prolongé de deux semaines afin de participer à l'effort de réduction de la consommation d'énergie, les accélérateurs ont tour à tour redémarré. L'accélérateur linéaire 4 (Linac 4), premier maillon de la chaîne d'accélérateurs de protons, a accéléré son premier faisceau d'ions H^- de l'année le 13 février. Lors de l'arrêt hivernal, sa source d'ions a été améliorée, ce qui a permis de porter l'intensité du faisceau de 25 à 35 mA après son passage dans la première structure accélératrice. Des études visant à accroître la performance du Linac 4 et du Booster du Synchrotron à protons (PSB) ont par ailleurs été menées à l'automne (encadré ci-dessous).

Le 3 mars, le faisceau a été injecté dans le **Booster du Synchrotron à protons (PSB)**. Tout au long de l'année, le PSB a joué son rôle avec fiabilité, mais un problème de défaillance des bobines des quadripôles principaux a cependant persisté, problème induit par la corrosion due à la présence de soufre dans l'eau de refroidissement. Des mesures d'atténuation ont été déployées et, à plus long terme, il est prévu de remplacer les bobines.

Le 10 mars, les équipes ont redémarré le **Synchrotron à protons (PS)**. Au cours de l'arrêt hivernal, les lignes de faisceau entre le PS et le Supersynchrotron à protons

(SPS) ont fait l'objet d'améliorations, afin de rendre le transfert de faisceau encore plus efficace. Le PS a répondu aux attentes de l'AD/ELENA, des expériences de la zone Est et des installations d'irradiation, notamment CLOUD, CHARM et IRRAD. L'installation n_TOF a même reçu 14 % de protons de plus que prévu. Tout au long de l'année, le faisceau destiné à la zone Nord a été produit de manière novatrice dans le PS grâce à un nouvel agencement des systèmes radiofréquence des accélérateurs, avec intervalles de stabilisation (*barrier buckets*), testé en 2022, combiné avec l'extraction multi-tours (MTE), opérationnelle depuis plusieurs années. Cela a permis de réduire considérablement les pertes de faisceau au cours de l'extraction du PS. Le faisceau PS destiné au Grand collisionneur de hadrons (LHC) a par ailleurs atteint les spécifications du projet d'amélioration des injecteurs (LIU).

Enfin, le 17 mars, la mise en service avec faisceau a été lancée au **Supersynchrotron à protons (SPS)**. Le SPS a lui aussi fait l'objet d'améliorations au cours de l'arrêt hivernal, en particulier pour son système d'aimants de déflection rapide pour l'injection : quatre modules ont été améliorés de manière à réduire la quantité de chaleur que le faisceau y dépose. Tout au long de l'année, le SPS a très bien

LE LINAC 4 ET LE BOOSTER DU PS REPOUSSENT LEURS LIMITES

Le 30 octobre, des spécialistes ont ajusté les paramètres de la source du Linac 4 et sont parvenus à extraire un faisceau de 48 mA. Les équipes ont également réussi à ajuster les cycles opérationnels utilisés pour fournir des faisceaux au LHC, à l'AD, à n_TOF et à la zone Nord du SPS afin que les faisceaux correspondent à ces nouveaux paramètres de faisceau.

Les équipes ont aussi testé l'intensité pouvant être atteinte avec le cycle servant à envoyer des faisceaux à ISOLDE. L'intensité nominale du faisceau envoyé à ISOLDE,

provenant des quatre anneaux du Booster du PS, est normalement de $3,2 \times 10^{13}$ protons par cycle. Lors du test, les spécialistes ont réussi à doubler l'intensité du faisceau dans trois des quatre anneaux, sans que les pertes de faisceau augmentent de manière sensible. Cette performance a été obtenue pendant un temps relativement court, et sa stabilité sur des périodes plus longues reste à prouver. À l'avenir, avec une telle intensité de faisceau, il devrait toutefois être possible de fournir plus de 6×10^{13} protons par cycle, ce qui serait inédit.



Vue à 360° du hall du Décélérateur d'antiprotons, aussi connu sous le nom d'« usine à antimatière ». (CERN-PHOTO-202004-064-1)

fonctionné, avec une disponibilité globale de 86 %, en nette augmentation par rapport aux années précédentes.

Après une campagne poussée pour l'amélioration des paramètres du faisceau destiné au LHC, une intensité de $2,2 \times 10^{11}$ protons par paquet, très proche de la valeur requise pour le LHC à haute luminosité (HL-LHC), a été atteinte à la fin de la période d'exploitation en 2023.

En plus du LHC, le SPS alimente les expériences à cible fixe de la zone Nord, ainsi que l'expérience AWAKE et l'installation HiRadMat, pour lesquelles la disponibilité des faisceaux a été supérieure à 98 %. Tous les objectifs des expériences ont pu être atteints.

L'installation CLEAR, qui permet de tester des équipements et de mener des recherches avec des faisceaux d'électrons, a fonctionné pendant 39 semaines en 2023. Au total, 21 expériences ont été approuvées et réalisées.

RECORD D'INTENSITÉ POUR LE FAISCEAU D'ANTIPROTONS

La saison de physique des antiprotons a débuté le 30 juin. Le démarrage a été retardé suite à la détection en mars d'une fuite d'eau au niveau d'un quadripôle spécial du Décélérateur d'antiprotons (AD). L'aimant a dû être extrait, réparé dans l'atelier, avant sa réinstallation et remise en service.

Les expériences auprès de la machine ELENA (*Extra Low Energy Antiprotons deceleration ring*) ont bénéficié de 122 jours de faisceau au lieu des 172 prévus. Afin de compenser en partie cette perte, les équipes ont prolongé de 12 jours la période d'exploitation, qui s'est finalement achevée le 13 novembre. L'objectif était d'utiliser au mieux le temps disponible pour les expériences, sans compromettre les nombreuses activités prévues pour l'arrêt technique hivernal.

En octobre, de nouveaux records d'intensité ont été enregistrés pour le faisceau d'antiprotons de l'AD/ELENA. Grâce à l'optimisation des réglages sur les injecteurs en amont, une intensité record de $4,9 \times 10^7$ antiprotons injectés dans l'AD a pu être atteinte. Le faisceau d'antiprotons extrait est passé graduellement de $3,1 \times 10^7$ antiprotons à 4×10^7 antiprotons en septembre. C'est là le résultat d'un travail minutieux mené par l'équipe AD afin de mieux comprendre la dynamique des faisceaux.

Après avoir été décéléré dans l'AD, le faisceau d'antiprotons est injecté dans la machine ELENA, où, après une nouvelle décélération, les antiprotons sont divisés en quatre paquets qui peuvent être extraits séparément et envoyés aux différentes expériences étudiant l'antimatière : ALPHA, AEgIS, ASACUSA, BASE, GBAR, PUMA et BASE-STEP. En septembre, ces expériences ont reçu régulièrement 8×10^6 antiprotons par paquet, et, après les optimisations dans l'AD en octobre, ce chiffre a pu atteindre $9,7 \times 10^6$ antiprotons par paquet, constituant un nouveau record d'intensité pour ELENA.

LA PHYSIQUE NUCLÉAIRE À LA POINTE

Les faisceaux issus du Booster du PS qui entrent en collision avec les cibles d'ISOLDE (*Isotope mass Separator On-Line facility*) produisent des isotopes radioactifs rares de divers éléments du tableau périodique ; certains d'entre eux sont ensuite sélectionnés grâce à une combinaison de lasers et de champs électriques et magnétiques pour produire des faisceaux radioactifs. Ces faisceaux, utilisés à basse énergie ou ré-accélérés avec l'accélérateur linéaire HIE-ISOLDE (*High Intensity and Energy Isotope mass Separator On-Line*), sont acheminés vers plusieurs installations servant des expériences couvrant un large éventail de disciplines : de l'étude de la structure et de la désintégration nucléaires à l'astrophysique, en passant par la physique de la matière condensée et les sciences de la vie.

D'avril à novembre, l'installation ISOLDE a délivré des faisceaux radioactifs à 59 expériences différentes. Dans un article très médiatisé publié en mai, une équipe internationale travaillant auprès d'ISOLDE a annoncé avoir franchi une étape décisive dans la construction d'une horloge nucléaire basée sur la transition périodique entre deux états du noyau de thorium-229 (p. 21).

UNE PÉRIODE D'EXPLOITATION RICHE EN REBONDISSEMENTS

Durant la première partie de l'année, la production de luminosité du LHC a atteint des niveaux exceptionnels. Les équipes en charge de l'exploitation ont fait preuve d'une remarquable flexibilité et d'une grande maîtrise, permettant d'atteindre ces résultats. Cependant, plusieurs imprévus ont impacté la disponibilité des faisceaux.

Le 22 mars, juste avant le lancement des vérifications « à froid » de la machine, un collimateur à cristaux s'est bloqué lors de son déplacement. La réparation a débuté le jour-même : le collimateur a été remplacé temporairement par une chambre à vide. Le collimateur à cristaux, qui n'est nécessaire que pour les exploitations avec ions plomb, a été réparé et remis en place en juin. L'injection de faisceaux a finalement eu lieu le 28 mars, avec seulement un jour de retard par rapport au calendrier initial.

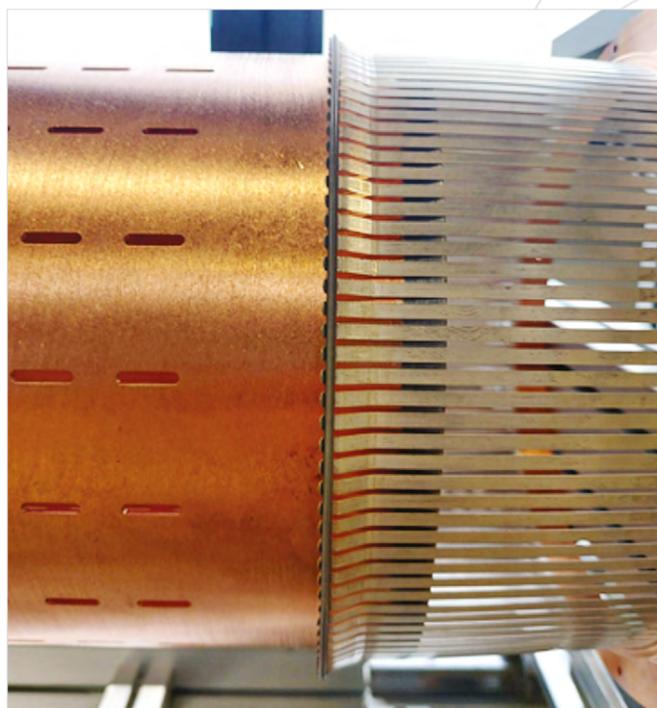
Le 1^{er} avril, une panne d'électricité survenue au point 4 du LHC a brusquement interrompu la mise en service des faisceaux. Deux secteurs, y compris les cavités radiofréquence (RF) situées au point 4, se sont réchauffés. La pression de l'hélium a augmenté dans les cavités. Les soupapes de surpression sont alors entrées en action, limitant la pression dans les cavités. Deux disques de rupture, qui sont des éléments de sécurité supplémentaires, se sont ouverts. Ils ont été rapidement remplacés ; le lendemain matin, les équipes ont rempli à nouveau les cavités d'hélium liquide et le refroidissement a recommencé. La mise en service avec faisceau a pu reprendre dès le 4 avril.

Le 21 avril, avec un jour d'avance, l'ingénieur en charge du LHC a annoncé des « faisceaux stables » à 6,8 TeV, marquant le début de la saison 2023 de prise de données ainsi que la phase de « montée en intensité » du LHC. Le 11 mai, le LHC a effectué sa dernière montée en intensité jusqu'à 2 400 paquets par faisceau.

Le 25 mai, le LHC a été touché par le premier des trois problèmes majeurs de l'année 2023 : à deux reprises, avec deux remplissages consécutifs, le faisceau a été éjecté vers les absorbeurs de faisceaux lors de la phase d'accélération. Ces deux arrêts de faisceau ont été déclenchés par des « pertes localisées lentes » (voir encadré ci-contre) qui se produisaient près du point 1 (expérience ATLAS). Des examens radiographiques et des études des pertes de faisceau ont montré que l'un des modules à doigts RF situé dans une section chaude présentait un échauffement ou un arc électrique, produisant une dégradation du vide à

l'origine des pertes localisées lentes. Plusieurs équipes sont intervenues dans le tunnel du LHC pour remplacer le module défaillant et procéder à un nouveau pompage pour rétablir le vide.

Les « pertes localisées lentes » se produisent lorsque des particules du faisceau s'égarant en certains points de l'anneau, interagissant avec des molécules de gaz présentes dans le vide dégradé. Ce processus prend un peu de temps avant que le seuil déclenchant l'éjection du faisceau soit atteint.



Le module à doigts RF (à droite) assure une connexion électrique de faible impédance (faible résistance) entre les chambres à vide du LHC. Lorsque cette connexion électrique n'est pas adéquate, cela peut affecter le faisceau, qui peut devenir instable, perdre en qualité ou subir des pertes de particules entraînant parfois son éjection. (CERN-HOMEWEB-PHO-2023-078-1)

Dès le 30 mai, des faisceaux ont été injectés et mis en circulation, afin de vérifier les conditions de vide. Par mesure de précaution, l'intensité des faisceaux a cependant été limitée pour le reste de l'année à $1,6 \times 10^{11}$ protons par paquet (au lieu de $1,8 \times 10^{11}$).

Le 19 juin, l'exploitation du LHC a été suspendue pour une semaine, afin de permettre aux équipes techniques d'effectuer des travaux de maintenance préventive et corrective sur la machine et ses sous-systèmes. Après cet arrêt technique, des exploitations spéciales pour la physique ont été réalisées, ainsi qu'une courte phase de montée en intensité du faisceau, afin de valider de nouveau la machine pour la production de luminosité.

Début juillet, la machine a affiché une disponibilité de 76 %, avec plus de la moitié du temps de faisceau passée avec

des faisceaux stables pour la physique. Une énergie de faisceau stockée record de 425 MJ avec 2 464 paquets de $1,6 \times 10^{11}$ protons a été enregistrée.

Le 17 juillet, le deuxième problème majeur de l'année est survenu lorsque les faisceaux du LHC ont été évacués vers les absorbeurs de faisceaux suite à une anomalie électrique

sur le réseau général suisse causée par la chute d'un arbre. S'en est suivie une transition résistive de plusieurs aimants supraconducteurs, qui a conduit à l'apparition d'une fuite d'hélium dans le vide d'isolation entre les masses froides d'un triplet interne. La réparation de cette fuite a nécessité l'arrêt des faisceaux dans le LHC pendant six semaines (voir encadré ci-dessous).

UNE PETITE FUITE AUX CONSÉQUENCES IMPORTANTES

Le 17 juillet, les faisceaux du LHC ont été éjectés vers les absorbeurs de faisceaux en raison d'une anomalie électrique sur le réseau général. Après l'éjection des faisceaux, plusieurs aimants supraconducteurs ont subi une transition résistive, c'est-à-dire qu'ils ont perdu leur état supraconducteur.

Bien que le système de détection des transitions résistives ait permis de faire passer les aimants de l'état supraconducteur à l'état résistif d'une manière contrôlée et homogène, les importantes contraintes mécaniques subies par les aimants ont conduit à l'apparition d'une petite fuite au niveau de l'interconnexion de deux aimants du triplet interne situé à gauche du point 8 (expérience LHCb), entre le circuit cryogénique, qui contient l'hélium liquide, et le vide d'isolation qui sépare l'aimant froid de la paroi du cryostat. L'hélium gazeux a pénétré à l'intérieur du vide d'isolation ; le cryostat s'est ainsi refroidi, ce qui a créé de la condensation et du gel à l'extérieur.

L'équipe de la cryogénie a élaboré un scénario de rétablissement inédit : pour éviter de porter à température ambiante la totalité du secteur, auquel cas il aurait fallu plus de trois mois pour pouvoir ensuite ramener le secteur aux conditions d'exploitation avec faisceau, les équipes ont décidé de le laisser remonter doucement en température, en retirant tout l'hélium liquide des aimants, et en dépressurant toutes les lignes cryogéniques, le but étant une intervention limitée à 10 jours maximum.

Une semaine à peine après l'incident, les équipes chargées des aimants et du vide ont ouvert les grands soufflets au niveau de l'emplacement de la fuite pour remplacer l'élément défectueux – un soufflet – par une pièce de rechange (plus facile à dire qu'à faire, sachant qu'il a fallu concevoir une stratégie entièrement nouvelle de soudage sur site, au fur et à mesure de l'avancement des travaux). Le 28 juillet, l'interconnexion, une fois réparée, a été refermée ; les opérations de refroidissement ont commencé le 1^{er} août, juste à temps pour éviter un réchauffement complet.

Les équipes d'intervention ont ouvert l'interconnexion entre les aimants du triplet interne situé à gauche du point 8. La fuite d'hélium a été localisée sur l'un des soufflets. (CERN-PHOTO-202307-179-46)



(Image centrale) Le soufflet défectueux est remplacé. Les experts insèrent l'instrumentation dans le nouveau soufflet.

(CERN-HOMEWEB-PHO-2023-138-1)

Les équipes sont intervenues avec une réactivité extraordinaire. La fuite a été réparée grâce à des efforts concertés, l'interconnexion est prête à être refermée. (CERN-PHOTO-202307-179-13)



En raison des problèmes techniques rencontrés, la luminosité proton-proton intégrée en 2023 a été de 32 fb^{-1} pour ATLAS et CMS – bien en-deçà de l'objectif de 75 fb^{-1} . Le 30 août, les faisceaux étaient de retour dans le LHC pour le lancement de la campagne de physique avec ions lourds (voir encadré ci-dessous).

Le troisième problème majeur de l'année s'est posé le 31 août : une fuite dans le système de vide a été détectée au point 8 dans un dispositif TDIS (*Target Dump Injection Segmented*), qui absorbe le faisceau en cas de problème pendant le processus d'injection. Le 8 septembre, une autre fuite est survenue dans un composant identique. Dans les deux cas, l'équipe du vide est intervenue rapidement, a identifié les fuites et les a réparées de façon temporaire. Le nombre de paquets par faisceau injecté a cependant dû être réduit.

Les premières collisions d'ions plomb dans le LHC ont ainsi eu lieu le 26 septembre, avec une intensité qui a atteint

1 240 paquets par faisceau le 6 octobre. Malgré ce succès, deux problèmes sont apparus : des pertes de faisceau lors de la dernière phase de l'accélération, entraînant l'éjection du faisceau vers les absorbeurs, et un niveau élevé de bruit de fond dans le détecteur ALICE, dans une zone où le faisceau interagit avec les collimateurs, problème résolu grâce à une étroite collaboration entre des experts de l'expérience ALICE et de la machine LHC.

Pour résoudre le problème des pertes de faisceau, les seuils d'alerte des systèmes de mesure des pertes de faisceau, qui envoient des informations aux systèmes de protection de la machine répartis tout au long de l'anneau du LHC, ont été rehaussés, sans que soient compromises la sécurité et la fiabilité des machines. Grâce à cet ajustement, et à d'autres mesures, les pertes de faisceau pendant l'accélération sont restées en dessous du seuil d'éjection, ce qui a permis de faire entrer en collision des faisceaux à 1 240 paquets.

LES IONS PLOMB SONT DE RETOUR

Le 26 septembre, le complexe d'injecteurs a démarré une campagne de cinq semaines de physique avec ions plomb, sachant que la préparation des sources d'ions (Linac 3 et LEIR) commence des mois avant l'envoi des faisceaux au PS et aux machines en aval.

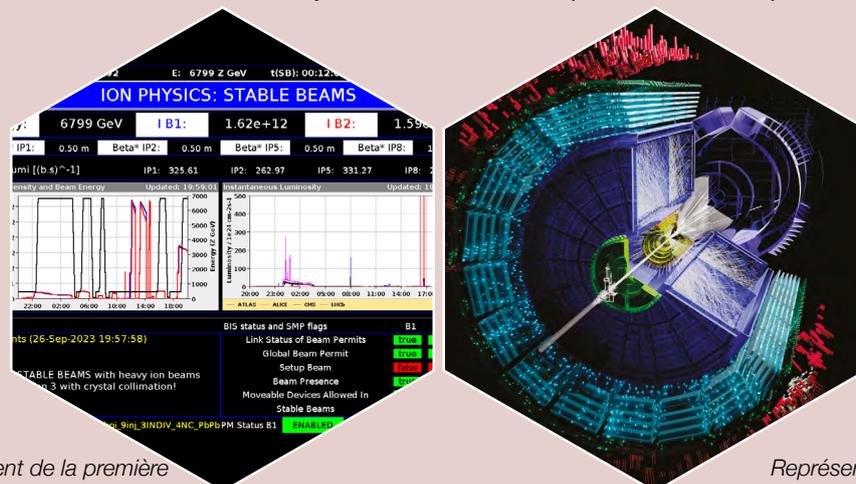
Au SPS, la technique de « superposition par glissement » (*momentum slip-stacking*), qui consiste à utiliser deux lots de quatre paquets d'ions plomb espacés de 100 nanosecondes afin de produire un groupe unique de huit paquets d'ions plomb espacés de 50 nanosecondes, a été utilisée pour la première fois avec succès en mode opérationnel.

Le LHC a ainsi livré, pour la première fois depuis cinq ans (en dehors de l'exploitation pilote de deux jours qui a eu lieu fin 2022), des faisceaux d'ions plomb à ses quatre grandes expériences : ALICE, ATLAS, CMS et LHCb. Les noyaux de

plomb sont entrés en collision à l'énergie accrue de 5,36 TeV par paire de nucléons, contre 5,02 TeV au cours des campagnes précédentes, et le taux de collisions a augmenté d'un facteur 10. Cette campagne a par ailleurs permis de valider la performance des collimateurs à cristaux, qui ont été utilisés de façon opérationnelle pour la première fois, avec succès.

Des faisceaux d'ions plomb ont également été envoyés dans la zone Nord du SPS, en particulier à l'expérience NA61/SHINE, leur principale utilisatrice, avec des paramètres de faisceau optimisés.

Au cours des deux dernières semaines de cette période d'exploitation, le PS a fourni des ions plomb à la zone Est, où l'installation CHIMERA irradie des dispositifs électroniques au moyen d'ions lourds à haute énergie, afin d'étudier les effets du rayonnement cosmique sur l'électronique utilisée dans les accélérateurs et les expériences du CERN, ainsi que pour les missions spatiales et l'avionique.



26 septembre : lancement de la première campagne de physique avec ions plomb de la troisième période d'exploitation du LHC. (CERN-HOMEWEB-PHO-2024-022-1)

Représentation des événements de la première collision plomb-plomb 2023 au cœur de l'expérience ALICE. (ALICE-PHO-GEN-2022-009-2)

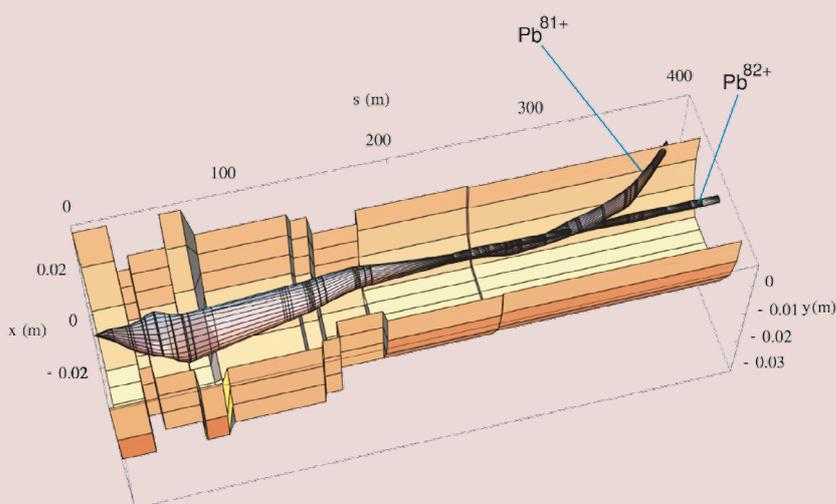
En 2023, ATLAS a fonctionné avec une efficacité de prise de données de 93,7 % pour les collisions proton-proton. Le détecteur a enregistré un taux d'empilement (nombre de collisions par croisement de paquet de protons) allant jusqu'à 60, contre un maximum de 54 en 2022. Des progrès significatifs ont été réalisés dans la mise en service des systèmes installés dans le cadre de la phase 1 des améliorations du détecteur. Du côté de CMS, l'efficacité de prise de données a été de 92 %, avec un taux d'empilement maximum de 61. Dans le spectromètre à muons de CMS, le nouveau système de récupération des gaz a été mis en service, ce qui a permis de réduire les émissions de gaz à effet de serre par rapport à 2022. En 2023, tous les sous-détecteurs de LHCb ont été mis en service, à l'exception du nouveau trajectographe situé en amont (UT), dont la mise en service se poursuivra en 2024. Au début de l'année, un incident sur le localisateur de vertex (VELO) a compromis la prise de données en 2023. La technique de « superposition par glissement » au SPS a permis à l'expérience ALICE d'enregistrer une luminosité maximale record de $6,4 \times 10^{27} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ lors des collisions plomb-plomb. Grâce à la mise à niveau du détecteur effectuée pendant le deuxième long arrêt (LS2), l'expérience a par ailleurs enregistré sa plus grande luminosité intégrée depuis le début du LHC, équivalente à 12×10^9 collisions plomb-plomb.

La campagne d'exploitation 2023 du LHC a pris fin le 30 octobre, avec une transition résistive programmée (voir encadré ci-dessous), marquant le début de l'arrêt technique hivernal (YETS) 2023/2024.

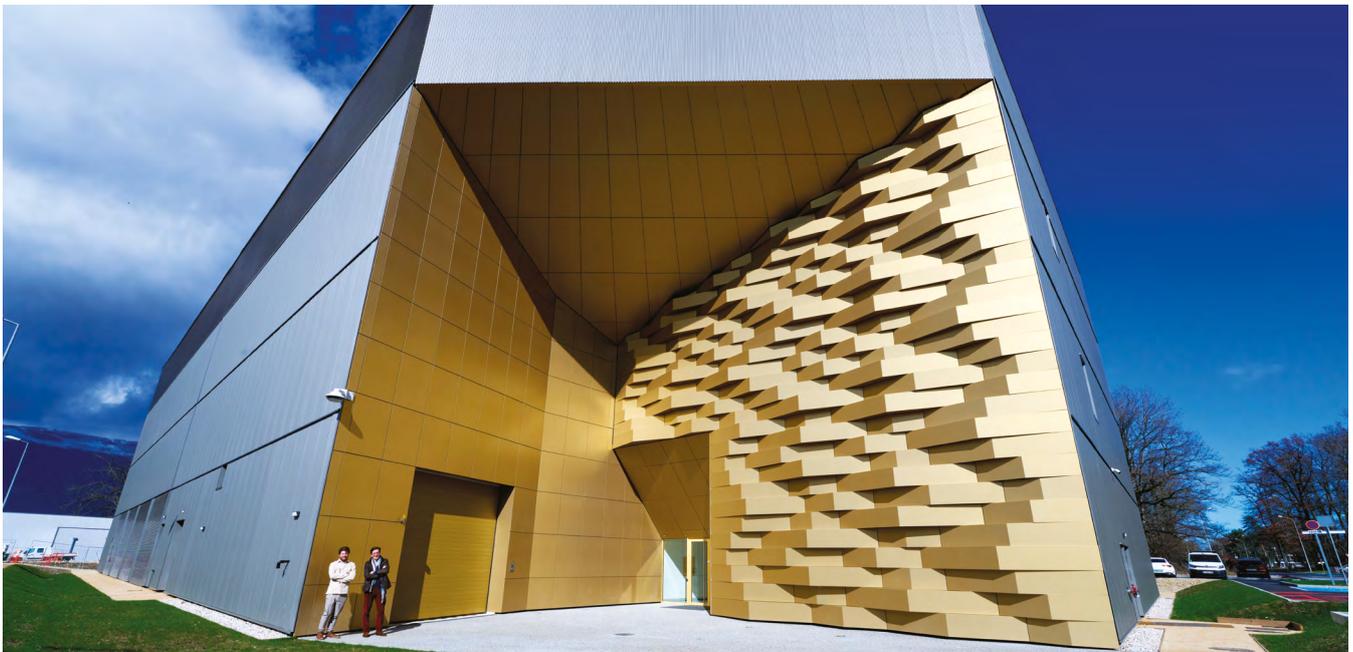
**EN 2023, POUR LA PREMIÈRE FOIS DEPUIS CINQ ANS,
LE LHC A LIVRÉ DES IONS PLOMB À SES QUATRE
GRANDES EXPÉRIENCES.**

L'EXPLOITATION 2023 SE TERMINE PAR UNE TRANSITION RÉSISTIVE

Les derniers faisceaux du LHC pour 2023 ont été éjectés de la machine le 30 octobre... après une transition résistive (aussi appelée « *quench* ») d'un aimant. Cela peut paraître surprenant, car, en temps normal, ces phénomènes ne sont pas prévisibles ; tout est même fait pour éviter qu'ils se produisent lorsque les faisceaux circulent. Mais cette fois, les experts de la machine souhaitent valider expérimentalement la limite de transition des aimants supraconducteurs, c'est-à-dire la quantité d'énergie qu'un aimant supraconducteur peut supporter avant de subir une transition résistive qui lui fait perdre ses propriétés supraconductrices. Ils ont donc provoqué des pertes de faisceau contrôlées dans un aimant supraconducteur. Établir expérimentalement cette limite de transition est un moyen de compléter les nombreuses simulations déjà réalisées et d'améliorer la connaissance de la machine LHC, en vue du doublement de l'énergie stockée dans le faisceau avec l'avènement du HL-LHC.



Représentation du résultat des simulations de transition résistive. À gauche, le point d'interaction, où ont lieu les collisions d'ions plomb. Plus à droite, le faisceau se défocalise en s'éloignant du point d'interaction. Au bout d'environ 300 m, le faisceau secondaire (Pb^{81+}) se sépare nettement du faisceau principal (Pb^{82+}). À 400 m, il est perdu de façon contrôlée et dépose son énergie dans l'aimant supraconducteur. (CERN-HOMEWEB-PHO-2023-126-1)



Le Centre de données de Prévessin, dont la construction s'est achevée en 2023, dans le respect des délais et du budget.
(CERN-PHOTO-202402-041-69)

UNE INFORMATIQUE D'EXCELLENCE, AU CERN ET POUR LE MONDE

Le paysage informatique complexe et en constante évolution du CERN repose sur de multiples activités qui permettent au Laboratoire d'accomplir sa mission au quotidien et de rester à l'avant-garde du progrès technologique. Cette année, le département IT a une nouvelle fois obtenu d'excellents résultats et battu de nouveaux records : la capacité de stockage sur disque du Laboratoire a franchi la barre de l'exaoctet ; la construction du nouveau centre de données s'est achevée ; un nouveau service d'appui aux utilisateurs – IT SOS – s'est ouvert ; le lancement de l'Institut ouvert de technologie quantique (*Open Quantum Institute – OQI*) a été officiellement annoncé, et le nombre d'utilisateurs d'Indico a franchi la barre des 400 000. Si les activités du CERN se déroulent sans fausse note – de la messagerie électronique aux bases de données, en passant par l'informatique en nuage et les milliers d'applications gérées par l'Organisation – c'est grâce au travail quotidien de nombreux spécialistes.

Environ 8 000 utilisateurs se connectent chaque jour à l'une des 10 000 applications disponibles au CERN via le portail d'authentification unique (SSO), un environnement logiciel complexe à gérer.

Les utilisateurs du CERN commencent généralement leur journée en consultant leur messagerie électronique. Cette année, environ 32 000 boîtes de messagerie ont migré vers Exchange Online, et les systèmes Dovecot/OX et Exchange 2010 ont été désinstallés. Le processus dans son ensemble s'est parfaitement déroulé grâce à une planification et une exécution minutieuses.

Le département IT traite un vaste éventail de bases de données utilisées à des fins administratives et de recherche. Plus de 5 Po de données sont stockées et gérées par les services Bases de données du CERN. Fin 2023, après la

migration réussie d'Elasticsearch vers OpenSearch, la dernière version de cette suite *open source* était exécutée sur 87 grappes de serveurs. Par ailleurs, une vaste campagne de mise à niveau de plus de 600 instances de bases de données a concerné le service DBOD (*Database on Demand*), qui permet aux utilisateurs de créer et de gérer des bases de données grâce à une interface web simple et intuitive développée au CERN.

Les services IT du CERN gèrent quelque 11 000 sites web, 1 700 applications PaaS (*Platform-as-a-Service*), 264 applications Java et 500 grappes Kubernetes pour l'informatique en nuage. Cette année, des campagnes de nettoyage ou d'amélioration ont touché une grande partie de ces plateformes – dont Drupal, WordPress et GitLab. Par ailleurs, la communauté des données de science ouverte a fêté la publication par CMS et LHCb de plus de 1 Po de données ouvertes.

Avec plus de 300 serveurs répartis dans 52 pays et quelque 400 000 utilisateurs, Indico est l'outil de gestion d'événements par excellence. En à peine 20 ans, de sa création en tant que fonctionnalité de CDS (*CERN Document Service*) jusqu'à l'outil complet qu'il est aujourd'hui, Indico a évolué pour couvrir tous les aspects de la gestion d'événements pour pas moins de 145 000 événements. La version 3.3, sortie cette année, offre une accessibilité améliorée, notamment pour les personnes malvoyantes qui utilisent des lecteurs d'écran. Enfin, Indico a été adopté par les conférences JACoW, et un nouveau processus de gouvernance a été lancé avec l'Office des Nations Unies à Genève.

Cette année, le système d'archivage pluridisciplinaire Zenodo, développé au CERN il y a dix ans, a obtenu une importante reconnaissance de la part de la Commission européenne. En effet, cette dernière a octroyé au CERN – notamment à une équipe de développeurs du département IT – une subvention spéciale dans le cadre du projet HORIZON-ZEN, qui vise

à rendre les données issues de la recherche européenne faciles à trouver, accessibles, interopérables et réutilisables, conformément aux principes FAIR (*Findable, Accessible, Interoperable and Re-usable*). HORIZON-ZEN s'appuiera sur les fonctionnalités de Zenodo, qui permet aux utilisateurs de partager jusqu'à 50 Go de données, logiciels et ressources numériques liées à la recherche dans tous les formats et à toute étape du cycle de recherche.

Les répertoires d'informations gérés par le département IT, tels que Zenodo, CDS, Indico, CERN Open Data, GitLab ou CodimD, servent à stocker à long terme des données et des documents dans les Centres de données du CERN. Afin de respecter les recommandations en matière de préservation numérique, une nouvelle stratégie a été élaborée en mai, axée sur une plateforme centrale proposant des services de préservation numérique spécialisés aux différents systèmes d'archivage.

UN ENVIRONNEMENT INFORMATIQUE VARIÉ POUR UNE MULTITUDE D'UTILISATEURS

Les besoins en informatique de l'Organisation, tant sur le plan logiciel que sur le plan matériel, sont en constante évolution et les équipes du département IT travaillent sans relâche pour y répondre. L'adoption des méthodologies Agile permet d'accélérer les cycles de développement, en veillant à ce que les logiciels soient non seulement robustes mais aussi adaptables aux nouvelles dynamiques.

Le nuage privé du CERN héberge environ 14 000 machines virtuelles, lesquelles ont migré courant 2023 pour permettre la mise à niveau de l'hyperviseur sous-jacent, qui passe de CERN CentOS à Enterprise Linux 8. L'échéance pour les équipes concernées est fixée à juin 2024, lorsque CentOS 7 sera désinstallé.

Les infrastructures Windows et Mac du Laboratoire évoluent constamment. L'année dernière, une flotte de plus de 10 000 points terminaux et 1 600 serveurs gérés par le département IT a subi des mises à jour logicielles, des migrations de systèmes d'exploitation et des renouvellements ou remplacements de licence. En parallèle, les équipes ont

STOCKAGE DE DONNÉES : DE NOUVEAUX RECORDS

Toute organisation a besoin de disposer d'un système efficace de stockage de données. Depuis toujours, le CERN investit dans des solutions de pointe pour renforcer l'accessibilité et la sécurité de ses données, tout en permettant leur gestion fluide et des coûts opérationnels réduits. Le défi colossal que représente la gestion de plusieurs exaoctets de données nécessite des architectures de stockage garantissant la redondance et la

résilience des données. Ainsi, en cas de défaillance matérielle, l'intégrité des données est préservée et les services continuent de fonctionner, sans perte.

Cette année, la capacité de stockage sur disque du CERN a franchi la barre du million de téraoctets (soit un exaoctet), répartis sur quelque 111 000 dispositifs stockant les données du Laboratoire. Les disques, utilisés principalement pour enregistrer des données de physique, sont coordonnés par le logiciel *open source* EOS, solution développée au CERN pour répondre aux gigantesques

commencé à planifier l'avenir de la gestion des dispositifs au CERN. En octobre, le département IT a lancé une nouvelle permanence appelée IT-SOS. Situé dans une salle du restaurant n° 2, ce service propose un appui aux utilisateurs qui souhaitent résoudre leurs problèmes informatiques en se rendant sur place.

UN CAMPUS CONNECTÉ

Au CERN, les réseaux jouent un rôle essentiel pour les échanges, la collaboration et le partage de données et d'informations en général.

En ce qui concerne la téléphonie, les standards PABX d'Alcatel ont été retirés après 33 ans de bons et loyaux services. Les 5 150 lignes fixes des utilisateurs ont migré durant l'année vers l'application *open source* CERNphone (TONE PABX) et une nouvelle fonction a été créée pour transférer les appels vers le Service Desk, le Centre de contrôle ou le Service de Secours et du Feu. La mise en place du nouveau contrat mobile (avec services 5G et LoRa) s'est parfaitement déroulée. Cette année a également été marquée par l'achèvement d'un projet de modernisation du réseau du campus, qui a consisté à remplacer plus de 800 commutateurs et près de 100 routeurs. En parallèle, l'infrastructure logicielle a été mise à jour pour améliorer la cybersécurité, en permettant la séparation du trafic des utilisateurs finals et celui des systèmes de gestion de la sécurité des bâtiments.

NOUVEAU CENTRE DE DONNÉES

La construction du Centre de données de Prévessin, entamée en 2022, s'est achevée fin 2023, dans le respect des délais et du budget. Ce nouveau centre vient compléter celui de Meyrin et hébergera des dispositifs de traitement, tels que des processeurs et des unités permettant la continuité des activités et la reprise après sinistre, alors que la capacité de stockage restera assurée par le centre de Meyrin. Ce nouveau bâtiment a recours aux technologies de refroidissement les plus modernes et récupérera l'énergie thermique pour chauffer d'autres bâtiments du domaine.

besoins informatiques du LHC. La vitesse de lecture de données a également atteint un niveau record, dépassant le seuil d'un téraoctet par seconde (1 To/s).

Cette année a également été marquée par le lancement du projet ALICE O2. Pendant l'exploitation du LHC avec ions plomb, 40 Po de données ont été collectées et le système de stockage est resté disponible à 100 %. Il ne s'agit pas seulement d'une performance record, mais bien d'une preuve que le service de stockage est robuste et prêt pour les futures exploitations du LHC.



La Grille de calcul mondiale pour le LHC relie quelque 160 centres de données répartis dans 40 pays.

Les services de surveillance interne des centres de données de Meyrin et de Prévessin ont été simplifiés, si bien que le service des opérateurs de la console pourra être suspendu fin mars 2024.

LES MEILLEURS OUTILS POUR LA COMMUNAUTÉ SCIENTIFIQUE MONDIALE

La Grille de calcul mondiale pour le LHC (« la Grille ») a relevé les défis liés à la prise de données de la troisième période d'exploitation. Toutes les expériences LHC ont pu bénéficier des formidables ressources informatiques fournies par la collaboration. Les quelque 160 centres de données répartis dans 40 pays ont permis aux expériences d'utiliser plus d'un million de cœurs d'ordinateur et environ 3 Eo de stockage. En décembre, la Serbie a signé un mémorandum d'accord avec la Grille, étape décisive avant que le pays ne devienne le huitième centre de niveau 1.

Conçu pour permettre aux chercheurs du CERN de mettre au point des technologies informatiques innovantes visant à répondre aux défis futurs, CERN openlab a continué d'accompagner des projets allant de l'évaluation de nouveaux supports de stockage numérique à long terme à la création de jumeaux numériques à des fins scientifiques. CERN openlab est aujourd'hui prêt à entamer la prochaine phase, qui débutera en 2024.

Cette année, BioDynaMo, un des projets suivis par CERN openlab, a reçu le *Best Artifact Award*. Ce prix récompense l'impact et la qualité exceptionnelle de la plateforme de simulation, sur laquelle des simulations complexes peuvent être effectuées, en particulier en biologie et en médecine. Ce modèle de calcul innovant permet par exemple de simuler la croissance d'une tumeur vasculaire d'un volume de 400 mm³ en utilisant un total de 92,4 millions d'agents. Son développement se poursuivra en 2024.

UN IMPACT POSITIF SUR LA SOCIÉTÉ

Dans le cadre de ses efforts continus pour renforcer les synergies avec d'autres organisations internationales, le

CERN a signé cette année un mémorandum de coopération avec le Programme alimentaire mondial (PAM) qui ouvre la voie à des initiatives conjointes tirant parti des technologies de pointe développées au CERN, notamment dans les domaines de l'intelligence artificielle et de l'informatique quantique, pour appuyer les efforts du PAM dans sa lutte contre la faim dans le monde.

L'informatique quantique étant considérée de plus en plus comme une technologie transformatrice, l'initiative Technologie quantique (QTI) du CERN continue d'explorer ses applications possibles pour résoudre les problèmes complexes auxquels la communauté scientifique est confrontée. La première phase de l'initiative QTI s'est achevée cette année, et sera suivie d'une deuxième phase qui démarrera en 2024.

Cette année a également été marquée par l'annonce du lancement de l'Institut ouvert de technologie quantique (OQI), programme triennal basé au CERN qui a pour vocation de mettre les ressources d'informatique quantique et l'expertise technologique associée au service de projets destinés à soutenir les objectifs de développement durable des Nations Unies (ODD). Hébergé par le CERN et coordonné par le département IT, l'OQI a été créé à l'initiative de la Fondation GESDA (*Geneva Science and Diplomacy Anticipator*), en collaboration avec quelque 130 experts, et est financé par UBS en tant que partenaire principal.

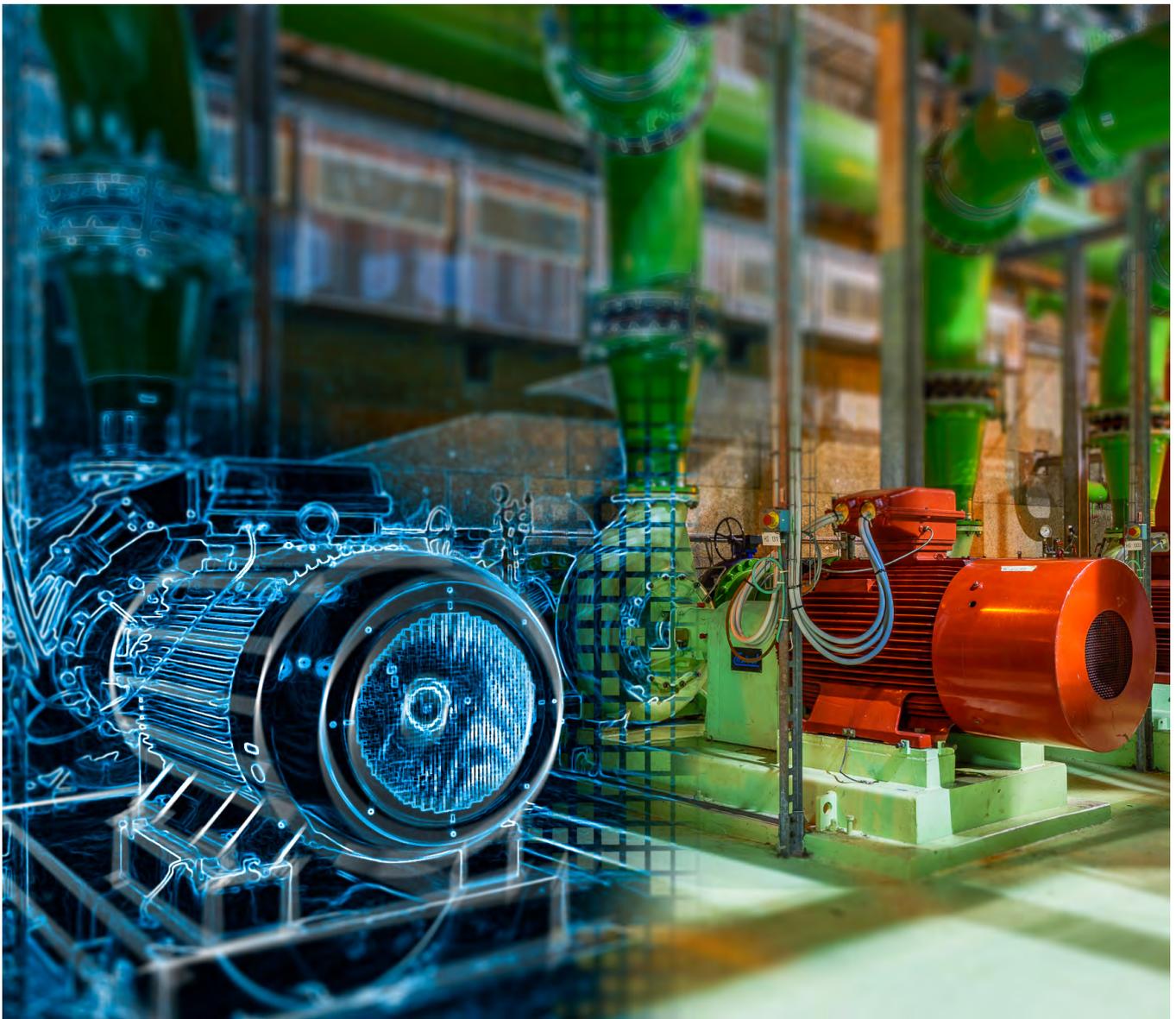
FORMER LES TALENTS DE DEMAIN

Les cours et formations dispensés dans l'environnement informatique d'avant-garde du CERN permettent aux jeunes d'acquérir les compétences et les connaissances nécessaires pour tirer pleinement parti du monde numérique d'aujourd'hui. Pour la première fois, quatre Écoles d'informatique du CERN (CSC) ont eu lieu la même année. En mars, l'École d'informatique « inversée » du CERN a proposé un riche programme présenté par d'anciens étudiants de CSC dans des domaines divers, attirant plus de 200 participants. Pendant l'été, 132 étudiants ont pris part à la CSC principale et à deux écoles thématiques, tenues à Tartu (Estonie) et à Split (Croatie), dont les programmes ont notamment porté sur l'informatique pour la physique, le génie logiciel, les technologies des données, la sécurité des infrastructures informatiques pour la recherche et les architectures hétérogènes.

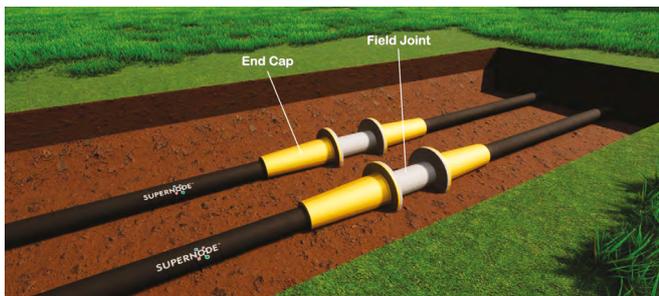
À la belle saison, les étudiants d'été de CERN openlab se sont immergés dans un environnement de travail stimulant et collaboratif pendant neuf semaines. Sur les 2 400 candidatures reçues, une trentaine d'étudiants d'environ 20 pays ont été sélectionnés pour participer à ce programme, qui a inclus un cycle de conférences assuré par 19 intervenants, ainsi que des visites. Les étudiants ont été accompagnés dans leur travail par leurs superviseurs. À la fin de leur séjour, ils ont résumé leurs projets lors d'une série de présentations éclair.

REPOUSSER LES FRONTIÈRES DE LA TECHNOLOGIE

Pour percer les mystères de l'Univers, le CERN développe en permanence des technologies de pointe, qui profitent ensuite à la société dans son ensemble grâce à des partenariats avec l'industrie et d'autres instituts. Ces partenariats, noués dans les États membres et les États membres associés, peuvent prendre diverses formes : transfert des connaissances du Laboratoire à des entreprises et instituts de recherche, participation à des projets de l'UE et achat d'équipements et de services.



La collaboration entre le CERN et ABB Motion visait à réduire la consommation d'énergie des systèmes de refroidissement et de ventilation du Laboratoire. (OPEN-PHO-MISC-2023-007-2)



Dans le cadre de CIPEA, le CERN et l'entreprise SuperNode ont entamé une collaboration qui pourrait améliorer considérablement le transport d'énergie et accélérer la transition vers les énergies renouvelables.

NOUVELLE PHASE POUR LE PROGRAMME CIPEA

En 2023, le programme Innovation en matière d'applications environnementales du CERN (CIPEA), qui consiste à imaginer des applications environnementales basées sur le savoir-faire du CERN et à les convertir en projets à fort impact, a été productif. Huit nouveaux projets ont été lancés – dont cinq ont abouti à des contrats avec des partenaires extérieurs – et commencent à produire des résultats.

NOUVELLES PERSPECTIVES POUR LE TRAITEMENT DU CANCER

En 2019, deux anciens physiciens du CERN s'étaient lancés dans l'aventure TERAPET pour révolutionner la protonthérapie. Aujourd'hui, cette start-up dans le domaine des technologies médicales compte un effectif de 15 personnes, a levé 11 MCHF et a fêté la réussite des essais cliniques menés sur Qualyscan, son premier dispositif. Grâce à l'aide d'un troisième co-fondateur, de fonds extérieurs et d'une collaboration avec le CERN dans le domaine de la R&D financée pour trois ans (2020-2023) par l'agence Innosuisse, TERAPET a progressé dans la mise au point de dispositifs médicaux innovants fondés sur le savoir-faire du CERN en matière de cristaux scintillants.

DU CERN À JUPITER

En avril, la sonde spatiale JUICE (*Jupiter Icy Moons Explorer*) de l'ESA a entamé un voyage de huit ans vers Jupiter. Ce périple s'achèvera avec un défi technique dû à l'intensité exceptionnelle du champ magnétique de la planète de gaz géante, qui piège des flux d'électrons de très haute énergie et peut causer d'importants dégâts aux systèmes électroniques. Avant le lancement de JUICE, certains de ses composants essentiels ont été testés au CERN, dans la seule structure au monde capable de reproduire l'environnement radiatif exigeant de Jupiter, pour vérifier leur résistance à de telles conditions.



La construction du bunker de l'installation FLASH a débuté au CHUV à la fin de l'année ; il hébergera l'accélérateur et la salle de traitement.

CONSTRUCTION DE L'INSTALLATION FLASH AU CENTRE HOSPITALIER UNIVERSITAIRE VAUDOIS

Cette année a été marquée par le lancement de la construction d'une installation de radiothérapie révolutionnaire, fruit d'une collaboration entre le CERN, le Centre hospitalier universitaire vaudois (CHUV) et THERYQ, société de technologie médicale qui, grâce à ce projet, a recruté 20 nouveaux spécialistes. L'objectif est de révolutionner le traitement du cancer par radiothérapie en accélérant les faisceaux d'électrons jusqu'à 100-200 MeV et en administrant une dose précise en moins de 100 millisecondes. Cette technique, appelée FLASH, permet de traiter des tumeurs jusqu'à 20 cm de profondeur, avec moins d'effets secondaires sur les tissus sains.

ÉCONOMIES D'ÉNERGIE POUR LES SYSTÈMES DE REFROIDISSEMENT ET DE VENTILATION

Dans le cadre d'un projet de recherche, l'entreprise ABB Motion et le CERN ont défini une feuille de route pour un projet de réduction – au moyen d'audits d'efficacité énergétique basés sur des données – de la consommation d'énergie des systèmes de refroidissement et de ventilation du CERN utilisés pour le complexe d'accélérateurs, les expériences et les centres de données. Cette feuille de route a permis d'identifier un potentiel d'économies de 17,4 % sur un total de 800 moteurs.



JUICE, la sonde interplanétaire de l'ESA, a quitté le Port spatial de l'Europe à bord d'une fusée Ariane 5 pour entamer un voyage de huit ans vers Jupiter.

LE CERN REJOINT LE QUIC

En juin, le CERN est devenu membre associé du QuIC (*European Quantum Industry Consortium*), visant à stimuler la compétitivité et la croissance économique du secteur des technologies quantiques en Europe.

PROGRAMME CERN VENTURE CONNECT



Pour réunir les personnes, les technologies et les fonds nécessaires, et faire en sorte que les idées se concrétisent, le processus d'innovation doit être facilité. C'est tout l'objet du nouveau programme *CERN Venture Connect* (CVC), qui met en relation des entrepreneurs et leur offre un accès privilégié à une sélection de technologies de pointe du CERN, ainsi qu'à un réseau d'investisseurs et d'incubateurs. Lancé en juillet, ce programme bénéficie du soutien de 24 partenaires industriels européens.

Pour d'autres exemples d'activités de transfert de connaissances du CERN, voir :

<https://report2023-kt.web.cern.ch>



INNOVER AVEC LES PROJETS EUROPÉENS

En tant qu'organisation européenne de premier plan, le CERN participe à des projets cofinancés par l'UE, ou en coordonne, au titre de ses programmes-cadres pour la recherche et l'innovation. Cette année, il a pris part à 60 projets européens (hors programmes de bourse MCSA H2020 et bourses MCSA postdoctorales Horizon Europe) et en a coordonné 18 ; la contribution correspondante de l'UE s'est élevée à environ 41 millions d'euros. En outre, sept projets axés sur le transfert de connaissances (AIDInnova, ATTRACT1B, ATTRACT2, HEARTS, I.FAST, PRISMAP et RADNEXT) sont coordonnés par le CERN. Le financement total de l'UE pour ces projets s'élève à environ 73 millions d'euros, répartis entre les entreprises et instituts participants.

LANCEMENT DE LA COLLABORATION WHITE RABBIT

La technologie White Rabbit a vu le jour au CERN il y a plus de dix ans, afin de permettre la synchronisation des accélérateurs avec une précision de l'ordre de la picoseconde. Depuis, cette solution *open source*, nommée ainsi en référence à un personnage d'*Alice au pays des merveilles*, a fait ses preuves dans de nombreux domaines en tant qu'outil de référence pour la synchronisation haute précision.

Ses applications vont bien au-delà de la physique des hautes énergies, puisqu'on l'utilise tant dans le monde de la recherche que dans le secteur commercial. En fin d'année, le CERN a lancé la collaboration White Rabbit, communauté mondiale dont l'objectif est de répondre aux besoins des utilisateurs et de faciliter l'adoption de la technologie par l'industrie.

PREMIER PAS VERS L'AVIATION À FAIBLE ÉMISSION DE CARBONE

La collaboration entre le CERN et Airbus UpNext a franchi une nouvelle étape avec l'assemblage et les tests au Laboratoire du démonstrateur SCALE (*Super-Conductors for Aviation with Low Emissions*), basé sur des lignes d'alimentation supraconductrices. Il a été établi que l'utilisation de matériaux supraconducteurs permettrait de diviser par plus de 10 le poids du système de distribution électrique d'un avion. Ainsi, grâce à ce démonstrateur, on pourra évaluer le potentiel d'allègement de la supraconductivité en vue de la décarbonation des futurs avions.

Ce projet associe le savoir-faire du CERN en matière de technologies supraconductrices et les capacités d'Airbus en matière de conception d'avions innovants.

UN LOGICIEL DU CERN AU CŒUR DE LA RECHERCHE EUROPÉENNE

Depuis plus de dix ans, Zenodo, système d'archivage de données créé au CERN, se développe pour stocker les données scientifiques de communautés de recherche toujours plus nombreuses et s'adapter aux besoins d'un nombre croissant de disciplines scientifiques. Aujourd'hui utilisé par plus de 8 000 organismes de recherche dans le monde, il enregistre plus de 53 millions de connexions par an. Avec le projet HORIZON-ZEN, Zenodo va passer à la vitesse supérieure. Initié en juin, ce projet du programme Horizon Europe financé par l'UE vise à faire de Zenodo le principal système d'archivage des données de la recherche européenne (p. 29).

INNOVER POUR GARANTIR L'ACCÈS DE L'EUROPE À L'ESPACE

L'espace est un environnement extrême où le rayonnement cosmique peut sérieusement endommager les composants électroniques de pointe, tels que ceux qu'on trouve dans les satellites. Cette année, le CERN a rejoint le projet HEARTS, rassemblant des acteurs des milieux universitaire et industriel, dont l'objectif est de permettre l'accès à des installations de test de radiorésistance aux ions lourds de haute énergie pour étudier les effets des rayonnements sur l'électronique, le blindage et la radiobiologie. Deux installations de test situées au CERN et au GSI (Allemagne) seront adaptées et des acteurs des industries spatiales et du monde universitaire pourront y accéder selon un calendrier préétabli. Ce projet jouera un rôle essentiel pour garantir l'accès de l'Europe à l'espace.



Le projet HEARTS équipera l'installation à ions lourds CHARM, située au CERN, pour répondre aux besoins des spécialistes de l'espace souhaitant tester les effets des rayonnements sur les composants et systèmes électroniques. (CERN-PHOTO-202101-002-2)

ATTRACT SÉLECTIONNÉ POUR LE NOUVEAU PROGRAMME EUROPÉEN D'INNOVATION

Lors du dernier atelier sur les écosystèmes de l'innovation, tenu à Bruxelles, le projet ATTRACT a été sélectionné parmi les cinq initiatives les plus pertinentes pour le nouveau programme européen d'innovation (*New European Innovation Agenda*). L'un des atouts soulignés

par la Commission européenne est l'Académie ATTRACT, qui permet à plus de 700 jeunes innovateurs européens de concevoir et gérer leurs propres projets grâce à des solutions high-tech durables.

LES ENTREPRISES ET LE CERN

Cette année, les dépenses de l'Organisation liées aux commandes et contrats ont considérablement augmenté, atteignant 573 MCHF, soit une hausse de 20 % par rapport à 2022. Cette augmentation reflète une hausse des investissements dans les principaux secteurs : commodités, fournitures, services et dépenses pour les expériences LHC.

Deux accords d'achat d'énergie solaire ont été conclus et seront signés en 2024. Reflétant l'approche stratégique du CERN en matière de gestion de l'énergie, ils couvriront 10 % de la consommation d'électricité pendant les périodes de fonctionnement du LHC et 30 % pendant les périodes d'arrêt, ce qui permettra d'acheter une partie de l'électricité à un prix fixe et réduira l'impact de la volatilité du marché. Par ailleurs, le Directoire élargi a avalisé la Politique du CERN relative à des achats respectueux de l'environnement (CERP), concrétisant une volonté d'intégrer la responsabilité environnementale dans toutes les phases du processus d'achat. Cette décision stratégique est en phase avec l'engagement du CERN en faveur de pratiques durables et d'une gestion responsable de l'énergie, lequel a été renforcé par l'obtention de la certification ISO 50001 pour une période de trois ans. Cette certification témoigne de l'engagement du CERN pour l'excellence et la durabilité de ses opérations (p. 40).

Divers contrats ont été attribués dans le cadre du programme concernant la consolidation des sites et les nouvelles constructions, dont un pour la prestation de



Le forum de génie civil du CERN a rassemblé 92 entreprises des États membres et États membres associés. (CERN-HOMEWEB-PHO-2023-096-1)

services de conseil et la supervision des travaux relatifs à la construction du nouveau bâtiment 777, et d'autres pour la rénovation du bâtiment 60 et des travaux de construction ou de rénovation sur le domaine du CERN.

Une nouvelle série d'événements consacrés aux entreprises a été créée pour remplacer les événements par pays. Dans ce cadre, le Service des achats a organisé deux événements thématiques sur le génie civil et la fabrication de matériel électronique, dont le CERN aura bientôt besoin en grandes quantités. Les sessions plénières de ces deux événements ont rassemblé environ 150 participants.

En tout, le CERN a émis 25 500 commandes diverses, en plus des 29 500 commandes passées pour les magasins du CERN et des 300 contrats signés, dont 53 accords de collaboration pour des travaux de R&D.

SENSIBILISER ET FORMER

Informer et amener des personnes de tous âges à s'intéresser à la science et aux technologies qui sous-tendent ses recherches et à leurs retombées sur la vie quotidienne, mais aussi susciter des vocations chez les jeunes, reste l'un des piliers de la mission du CERN.

Le 8 octobre, le Portail de la science, nouveau centre d'éducation et de communication grand public, a ouvert ses portes aux visiteurs du monde entier. Fin décembre, il avait déjà accueilli près de 72 000 visiteurs.



- 1) CERN-PHOTO-202309-218-10
- 2) CERN-PHOTO-202310-241-31
- 3) CERN-PHOTO-202312-294-249
- 4) CERN-PHOTO-202310-256-18
- 5) CERN-PHOTO-202310-244-114
- 6) OPEN-PHO-LIFE-2023-085-4

PORTAIL DE LA SCIENCE DU CERN

Entre l'ouverture au public, le 8 octobre, et la fin de l'année, près de 72 000 visiteurs venus de plus de 120 pays ont pu profiter de l'incroyable offre d'activités proposées par le nouveau centre phare du CERN pour l'éducation et la communication grand public.

Après trois ans de travaux et de création de contenus, le Portail de la science a été inauguré, le 7 octobre, en présence du Président de la Confédération suisse, de ministres et autres représentants de haut rang des États membres et États membres associés du CERN, des donateurs, ainsi que des partenaires du Laboratoire dans les domaines de la recherche, de l'éducation et de la communication grand public. Le projet, d'un montant de 100 MCHF, a été entièrement financé par des dons.

Au travers des expositions, les visiteurs découvrent trois univers dans lesquels 54 expériences pratiques, 125 vidéos, 50 objets issus du Laboratoire et quatre œuvres d'art donnent vie aux recherches, aux technologies et à la communauté du CERN. Les expositions sont accessibles à tous : rampes d'accès pour les personnes en fauteuil, sous-titres, contenus tactiles et en audiodescription pour les personnes aveugles ou malvoyantes.

Très demandés par les groupes de scolaires, mais également par les familles, 270 ateliers pratiques en labo ont attiré plus de 5 200 participants. Au total, dix ateliers ont été imaginés et proposés pour les visiteurs, dès cinq ans.

Des spectacles scientifiques, conçus sous forme de pièces de théâtre, sont également au programme et ciblent des publics divers. À la fin de l'année, on comptait 40 spectacles pour plus de 2 500 spectateurs.

Les emblématiques visites guidées du CERN débutent dorénavant au Portail de la science et se poursuivent avec les autres sites. Cette année, près de 183 000 personnes ont pris part à ces visites, empruntant notamment le nouvel itinéraire au bâtiment SM18. Les visites en ligne, quant à elles, ont attiré quelque 3 700 personnes (107 visites pour les scolaires et le grand public).

Plus de 3 000 personnes ont pris part à 12 événements spécialement conçus pour le grand public, au Portail de la science ou au Globe de la science et de l'innovation. Qu'il s'agisse d'ateliers, de conférences, de pièces de théâtre ou de performances artistiques, les événements publics du CERN permettent d'engager un dialogue sur la recherche fondamentale et les défis sociétaux.

FORMATION DES ENSEIGNANTS ET DES ÉLÈVES

En 25 années d'existence, les programmes du CERN destinés aux enseignants ont profité à 14 600 enseignants de 107 pays. En 2023, 801 enseignants de 55 pays ont participé à 27 programmes nationaux et internationaux, un niveau quasi similaire à celui d'avant la pandémie. Le programme destiné aux enseignants ukrainiens, resté accessible en ligne, a été suivi par 70 enseignants.

Le concours *Ligne de faisceau pour les écoles* a fêté sa dixième édition, enregistrant un nouveau record de participation : 379 propositions d'équipes de 68 pays. Comme lors des trois dernières éditions, deux des équipes lauréates (États-Unis et Pakistan) ont mis en application leur proposition au CERN, et une troisième équipe (Pays-Bas) a été invitée à DESY, en Allemagne.

Le programme éducatif CERN-Solvay, coorganisé par le Laboratoire et l'entreprise Solvay, a mis en ligne 12 nouvelles vidéos, qui ont recueilli 2,2 millions de vues. L'une des composantes essentielles de ce programme est le camp étudiant annuel : cette année, plus de 600 candidatures de plus de 60 pays ont été reçues, dont 30 ont été retenues pour le premier camp organisé en octobre.

Le projet *La physique en pratique*, conçu en collaboration avec l'un des donateurs du Portail de la science, inclut dans sa phase pilote la création d'un kit pratique pour les élèves italiens. Cette année, 750 kits ont été produits et distribués à plus de 650 enseignants, qui ont tous été formés à leur utilisation.



Ligne de faisceau pour les écoles est un concours de physique ouvert aux élèves du secondaire du monde entier. Pour la dixième édition, les équipes lauréates ont mis en pratique leur proposition au CERN et à DESY (Allemagne). (CERN-PHOTO-202309-229-5)



À l'occasion de la Journée internationale des femmes et des filles de science, des femmes du CERN, de l'EPFL, du LAPP et de l'Université de Genève sont intervenues auprès de 5 000 élèves de la région. (OPEN-PHO-LIFE-2023-008-8)

PARTIES PRENANTES ET COMMUNAUTÉS

Sensibiliser ses voisins à ses activités a toujours été un volet important de la communication du CERN. À l'occasion de la *Journée internationale des femmes et des filles de science*, environ 100 chercheuses et ingénieures du CERN, de l'EPFL, de l'Université de Genève et du Laboratoire d'Annecy de physique des particules (LAPP), sont intervenues dans plus de 200 classes de la région pour présenter leur métier à quelque 5 100 élèves.

Une lettre d'information consacrée à l'étude de faisabilité du FCC (p. 46) a été diffusée, avec des mises à jour régulières sur l'étude et ses liens avec les communautés situées dans la zone de l'éventuel futur tunnel.

Les expositions itinérantes du CERN se sont installées dans trois villes d'Allemagne, attirant près de 53 000 visiteurs.

Le programme *Arts at CERN* continue de tisser des liens entre art et science, au travers de résidences artistiques, de commandes et d'expositions. Des œuvres créées par les anciens artistes en résidence ont été rassemblées lors de l'exposition *Time. From Dürer to Bonvicini* au *Kunsthaus Zürich*. L'exposition *Dark Matters*, à la *Science Gallery*



L'œuvre *Chroma VII* de Yunchul Kim dans l'exposition *Explorer l'inconnu du Portail de la science*. (CERN-PHOTO-202310-305-8)

Melbourne, est le fruit d'une collaboration entre la galerie, le Centre d'excellence ARC pour la physique des particules de matière noire et *Arts at CERN*. Des œuvres issues du programme du CERN y ont été présentées pour la première fois au public australien.

Le *CERN Courier*, magazine de référence pour la communauté de la physique des hautes énergies, a publié six numéros, dont un numéro spécial consacré à l'éducation et à la communication grand public et un autre sur les technologies catalyseuses. Avec plus de 23 000 abonnés dans le monde entier, il est suivi par plus de 11 000 personnes sur X et 3 500 sur LinkedIn.

La communication avec la communauté du CERN et sa mobilisation sont importantes pour le développement communautaire. En plus du *Bulletin du CERN* (20 000 abonnés à l'édition électronique), la nouvelle application CampusApp, co-créée par plusieurs départements du CERN, permet à la communauté de se tenir informée des dernières nouvelles.

Les visites de décideurs des États membres, États membres associés et autres sont essentielles pour que le CERN continue de bénéficier d'un appui à long terme. Au total, cette année, 170 délégations de haut rang sont venues au CERN.

PARTICIPATION NUMÉRIQUE

La forte présence numérique du CERN s'est maintenue, avec environ 3,5 millions de visiteurs uniques sur le site web principal, donnant un total de 13,7 millions de visites (chiffres obtenus par extrapolation des données).

La communauté des abonnés du CERN sur les réseaux sociaux a augmenté pour atteindre 4,7 millions de personnes, certaines publications ayant été vues 117 millions de fois.

Parce qu'ils sont plus que de simples lecteurs, les utilisateurs des réseaux sociaux interagissent avec les publications du CERN. Quelque 3,7 millions de réactions, dont des mentions « J'aime » et des partages, ont été enregistrées.

INTÉRÊT MÉDIATIQUE INTERNATIONAL

L'intérêt des médias pour le CERN a dépassé le niveau d'avant la pandémie de COVID-19 : 123 visites de presse ont été organisées pour 662 journalistes, et plus de 190 000 coupures de presse ont été recensées. L'inauguration du Portail de la science a particulièrement attiré l'attention des médias : 83 journalistes de 58 médias y ont pris part, et la couverture médiatique de l'événement a généré plus de 2 000 coupures de presse partout dans le monde.

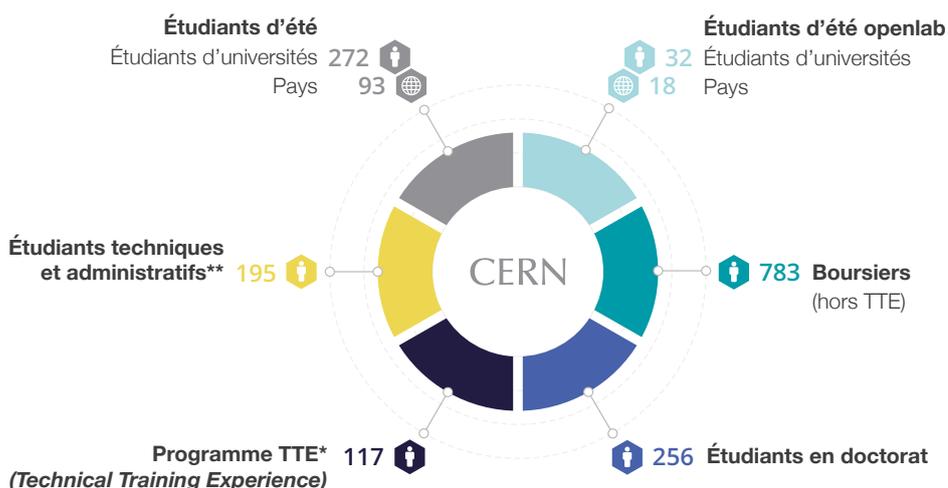
Les visites de journalistes des États membres du CERN nourrissent l'intérêt et le soutien du public pour l'Organisation. Deux visites virtuelles ont été organisées pour 12 journalistes de huit médias hongrois et 12 journalistes de 12 médias allemands.

FORMER LES JEUNES CHERCHEURS

Le CERN offre aux étudiants et nouveaux diplômés un environnement de formation unique ; ses États membres et États membres associés bénéficient ainsi d'un flux de professionnels et d'universitaires très qualifiés, jouissant d'excellentes compétences techniques et d'une expérience internationale. Cette année, 1 002 nouveaux diplômés et boursiers, 465 doctorants et étudiants administratifs et techniques et plus de 270 stagiaires ont profité de ces multiples occasions d'apprendre et de travailler. En mars 2022, une initiative ciblant les ressortissants ukrainiens a été lancée, ce qui a permis à neuf étudiants et boursiers ukrainiens de venir travailler au CERN sur des postes réservés. En outre, le CERN a accueilli plus de 300 étudiants d'été de plus de 90 pays ; une trentaine d'entre eux ont pris part au programme pour les étudiants d'été openlab (p. 31). Les étudiants d'été ukrainiens n'ayant pas pu venir au CERN ont pu suivre ce programme en ligne dans son intégralité. Par ailleurs, un programme de stage à distance spécifiquement destiné aux étudiants ukrainiens a été lancé à la fin de l'année.

LE CERN A ACCUEILLI PLUS DE 300 ÉTUDIANTS D'ÉTÉ DE PLUS DE 90 PAYS.

Les programmes de formation du CERN



* au 31.12.2023

Le CERN offre diverses possibilités de formation, scientifique ou technique, dans un cadre international. En parallèle de leurs projets scientifiques et technologiques, les étudiants assistent à une série de conférences et de visites.

AGIR POUR UNE RECHERCHE SÛRE ET RESPONSABLE

Le CERN s'efforce de protéger la santé et veille à la sécurité de toutes les personnes qui prennent part à ses activités, sont présentes sur son domaine ou vivent à proximité de ses installations. Il fait également en sorte de limiter son impact sur l'environnement.

UNE RECHERCHE RESPECTUEUSE DE L'ENVIRONNEMENT

Le troisième rapport du CERN sur l'environnement, publié le 4 décembre 2023, présente les progrès réalisés dans des domaines clés (biodiversité, utilisation des sols, déchets et bruit) en 2021–2022. Il détaille les mesures prises par l'Organisation pour atteindre ses objectifs prioritaires, à savoir réduire ses émissions de gaz à effet de serre et limiter l'augmentation de sa consommation d'eau et d'électricité.

Dans le cadre de son engagement pour une recherche durable, le CERN a déposé une demande de certification ISO 50001, qu'il a obtenue en février. Cette norme définit les conditions d'amélioration continue de la performance énergétique des systèmes et des processus.

OBJECTIFS DE SÉCURITÉ

La Politique de sécurité du CERN – qui recouvre tous les domaines de la santé et de la sécurité au travail, la protection de l'environnement, la radioprotection et la sûreté de fonctionnement des installations – fixe son engagement à améliorer de manière continue la sécurité.

Le CERN définit régulièrement des objectifs de sécurité, d'une année à l'autre, et à plus long terme ; ils concernent notamment la préparation du prochain long arrêt du complexe d'accélérateurs (amélioration de la sécurité électrique, entre autres), la sensibilisation du personnel aux gestes qui sauvent, la réduction de la production de déchets radioactifs et le renforcement de la préparation aux situations d'urgence. S'agissant de la protection de l'environnement, des objectifs annuels de limitation du bruit et d'amélioration de la qualité des effluents rejetés dans les cours d'eau environnants complètent les objectifs à long terme fixés dans le Rapport sur l'environnement.



We all share the same roads: it's all about respect.
Le partage de la route, une question de respect.

 HSE
Occupational Health & Safety
and Environmental Protection unit

Campagne de sensibilisation à la sécurité routière.

PROJET HOR

Le projet HOR (*HSE Operational Response*), qui concerne la période 2022–2025, vise à établir un cadre clair et efficace pour les services de l'unité Santé et sécurité au travail et protection de l'environnement (HSE), comprenant des moyens de communication complets avec les parties prenantes internes et externes. Il inclut plusieurs lots de travaux.

Des progrès ont été faits concernant le plan de gestion de la santé au travail, avec la refonte du cadre de la médecine du travail, axé sur les risques et personnalisable. Le Service médical a réussi à rattraper le retard pris dans les visites périodiques des membres du personnel employés, dû en partie à la pandémie de COVID-19 ; il pourra ainsi assurer un suivi optimal et continu du personnel en 2024.

Le lot de travaux portant sur les procédures d'urgence met l'accent sur les situations susceptibles de nuire à l'environnement. Des informations concernant les sources de risques environnementaux et les dispositifs de prévention ou de protection correspondants ont été intégrées au système d'information géographique du CERN, à partir duquel les plans d'évacuation peuvent dorénavant être générés. Le Service de Secours et du Feu et le groupe Protection de l'environnement de l'unité HSE ont conjointement élaboré une procédure d'intervention et dressé l'inventaire des moyens techniques permettant de répondre aux situations présentant un risque environnemental.

Enfin, les inspections et bilans de sécurité ont porté sur la réévaluation du rôle des délégués à la sécurité territoriale, afin qu'ils soient équipés et soutenus de manière appropriée.

FORMATIONS À LA SÉCURITÉ



Un nouveau programme, intitulé « *Safety Matters for Supervisors* », sera dispensé en 2024 dans le cadre de l'offre de formation et d'évolution de carrière destinée aux superviseurs. Il traite des obligations et des ressources des superviseurs en matière de santé et de sécurité au travail, des risques psychosociaux et de la protection de l'environnement. Afin de renforcer la sensibilisation à la sécurité, les personnes fraîchement arrivées au Laboratoire reçoivent dorénavant un dépliant ; une vidéo a aussi été produite pour la communauté du CERN, afin d'accompagner les différentes communications.

96 300 cours de sécurité suivis en ligne

920 cours de formation à la sécurité dispensés à

6 000 personnes

4 950 tickets du Service Desk résolus

EN FÉVRIER 2023, LE CERN A REÇU

LA CERTIFICATION ISO 50001 POUR

LA GESTION DE L'ÉNERGIE.



Extraction du tritium présent dans les équipements et autres matériaux.

PROJET MAST

L'interaction avec les faisceaux de particules peut conduire à l'activation des équipements présents dans le complexe d'accélérateurs. Quand ces équipements sont enlevés, lors d'opérations de maintenance et de consolidation des installations, ils deviennent des déchets radioactifs. Il s'agit principalement de gros éléments en métal, de câbles et de filtres de ventilation, qui sont éliminés dans des installations spécialisées, en France et en Suisse.

Les déchets radioactifs sont classés en trois catégories selon leur niveau d'activité : « candidats à la libération » (CL), « déchets de très faible activité » (TFA) et « déchets de faible et moyenne activité » (FMA). Environ 90 % des déchets de catégorie FMA sont métalliques. Pour ce type de déchets, la fusion est la technique de traitement la plus prometteuse : elle permet une réduction optimale du volume de déchets, une caractérisation radiologique précise et la détritiation des déchets, et limite les manipulations.

Le projet MAST (*Melting of Activated Steel*), lancé en 2019, consiste à mener une campagne pilote de traitement et d'élimination par fusion des déchets métalliques du CERN de catégorie FMA. Suite à la fusion réussie des lots pilotes fin 2022, les lingots produits ont été acheminés vers le site de stockage définitif en France jusqu'au 15 juin 2023. Ce projet a contribué à la création, en France, d'une filière capable d'éliminer un volume annuel de déchets métalliques de type FMA de 16 m³.

CONSTRUIRE L'AVENIR

Au CERN, physiciens, ingénieurs et techniciens imaginent, conçoivent et construisent des accélérateurs et des détecteurs pour poursuivre la quête de nouvelles connaissances fondamentales. La priorité à court terme est donnée au LHC à haute luminosité, dont les différents systèmes complexes sont en phase de production. En parallèle, les scientifiques esquissent des machines novatrices qui façonneront le paysage scientifique à plus long terme.

Test d'un aimant quadripôle à base de niobium-étain, fabriqué au CERN. Les tests de ces aimants ont été concluants – une étape clé pour le projet LHC à haute luminosité en 2023. (CERN-PHOTO-202311-263-32)



Le premier prototype d'aimant dipôle de séparation et de recombinaison D2, fabriqué en Italie sous la direction de l'institut italien de physique des particules INFN, a été testé au CERN.

(CERN-PHOTO-202303-078-8)



L'avenir de la physique des particules en Europe se dessine au travers de la stratégie européenne pour la physique des particules mise à jour en 2020. La priorité est la mise en service du LHC à haute luminosité à partir de 2029. À plus long terme, le texte préconise l'étude d'un collisionneur circulaire électron-positon dans un nouveau tunnel, qui fonctionnerait comme une usine à Higgs. Outre ces deux collisionneurs, de nombreux projets enrichissent le programme de recherches et de technologies du CERN et en assurent la diversité.

LE LHC À HAUTE LUMINOSITÉ

Le projet LHC à haute luminosité (HL-LHC) vise à augmenter d'un facteur dix la luminosité intégrée par rapport à l'objectif initial du LHC, la luminosité intégrée designant le nombre de collisions produites durant une période d'exploitation donnée. Le HL-LHC fait appel à des technologies innovantes qui ont nécessité plusieurs années de développement et de prototypage. Les nouveaux équipements sont pour la plupart entrés dans la phase de production en série en 2023. Certains sont déjà prêts à être installés.

L'augmentation de luminosité repose entre autres sur un système magnétique novateur. Vingt-quatre aimants quadripôles, dits « triplets », focaliseront plus fortement les faisceaux de particules avant qu'ils se croisent au cœur des expériences ATLAS et CMS. Ces aimants sont fabriqués à partir de niobium-étain (Nb_3Sn), un matériau utilisé pour la première fois dans un accélérateur de particules. Ce supraconducteur permet d'atteindre des champs magnétiques plus élevés, mais sa mise en œuvre est très délicate.

Les aimants triplets sont de deux types : des versions courtes (4,2 mètres), en construction aux États-Unis, et des versions longues (7,2 mètres), fabriquées au CERN. Un cryomodule contenant deux aimants quadripôles courts

a été testé et validé aux États-Unis, avant d'être livré en fin d'année. Au CERN, des améliorations du procédé de fabrication ont permis de fabriquer un troisième prototype long, qui a été testé avec succès, suivi de deux aimants de série, qui ont également atteint la performance nominale. C'est une étape clé pour valider la technologie Nb_3Sn . Forte de cette réussite, la production en série des aimants quadripôles longs bat son plein. La production des aimants correcteurs associés a bien progressé : certains, comme ceux réalisés par le laboratoire LASA de l'INFN (Italie), ayant même été intégralement validés et livrés.

Des aimants dipôles spécifiques guideront les faisceaux circulant en sens opposés pour les faire entrer en collision aux points d'interaction, puis les séparer. Ces dipôles de séparation et de recombinaison D1 et D2 sont fabriqués respectivement au Japon et en Italie. Les deux premiers prototypes D1 et D2 ont passé les tests à froid avec succès au CERN et le premier aimant de présérie D2 a été livré.

DES TESTS CONCLUANTS VALIDENT

LA TECHNOLOGIE NIOBIUM-ÉTAIN

POUR LES AIMANTS.

Les cavités-crabe sont un autre élément crucial pour augmenter la luminosité. Elles orienteront les paquets pour augmenter la zone de chevauchement entre les faisceaux lorsqu'ils se croisent. Deux types de cavités-crabe sont en construction : RFD (*Radiofrequency Dipole*) et DQW (*Double-Quarter Wave*). La première cavité DQW de série a été testée à froid au CERN, dépassant largement les critères d'acceptation. Sa production en série suit son cours en Allemagne. Un cryomodule comprenant deux cavités RFD assemblées au Royaume-Uni a également été livré et testé. Toutefois, le cryomodule doit subir



Installation d'un nouveau collimateur à cristaux dans le LHC pour réaliser des tests *in situ* durant l'exploitation avec des ions plomb.
(CERN-PHOTO-202302-036-4)

des réparations avant une installation pour des tests avec des faisceaux de l'accélérateur SPS en 2025. Avec l'augmentation de la luminosité, notamment du fait d'un plus grand nombre de particules en circulation, le système de protection de la machine doit être renforcé : plus de 80 nouveaux collimateurs et absorbeurs passifs doivent être installés ou modifiés. Ces appareils absorbent les particules qui s'éloignent de la trajectoire du faisceau et pourraient endommager les équipements. Seize collimateurs

supplémentaires ont été installés au cours du second long arrêt technique et des prototypes de nouveaux collimateurs ont été développés au CERN. En particulier, des collimateurs dotés de cristaux ont été installés dans le LHC et utilisés lors de l'exploitation avec des ions plomb en 2023. Le test a montré que cette technique permet d'améliorer considérablement le nettoyage du faisceau, validant son utilisation pour l'exploitation avec des ions à haute luminosité.

Des liaisons supraconductrices haute température, utilisant le diborure de magnésium comme supraconducteur, transporteront des courants pouvant atteindre 120 000 ampères, sur des distances allant jusqu'à 100 mètres, pour alimenter les nouveaux aimants. Les câbles sont logés dans un cryostat flexible qui maintient une température en dessous de 25 kelvins. Une liaison complète avec 19 câbles et ses systèmes de raccordement a été fabriquée et sera installée en 2024 sur la ligne de test des triplets.

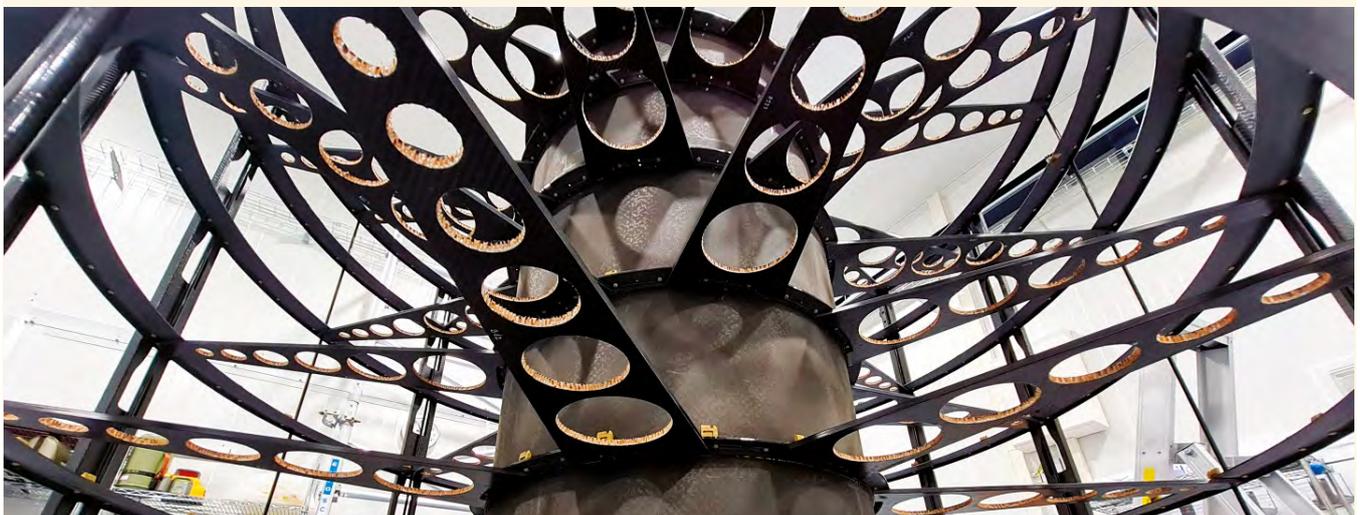
L'installation de cette ligne d'essai de 90 mètres de long, dénommée « *IT String* », a débuté dans le hall de test des aimants SM18. Elle permettra de tester en conditions réelles les nouveaux équipements de part et d'autre des détecteurs ATLAS et CMS, et de valider l'intégration, l'interconnexion et le fonctionnement des éléments, ainsi que le système global. Toute l'infrastructure technique a été mise en place, y compris les convertisseurs de puissance et la ligne de distribution cryogénique à 1,9 kelvin qui a été mise en service. La ligne est prête à accueillir les aimants et autres composants du LHC à haute luminosité en 2024.

LES EXPÉRIENCES ET LA HAUTE LUMINOSITÉ

La haute luminosité signifie un empilement de collisions inédit au cœur des détecteurs ATLAS et CMS : de 140 à 200 collisions par croisement de faisceau contre environ 60 actuellement. Les collaborations ATLAS et CMS ont un ambitieux programme d'amélioration de leur détecteur, l'objectif étant d'augmenter le taux de transfert de données et la granularité des sous-détecteurs, ainsi que la résistance

aux radiations. Les collaborations ALICE et LHCb ont également démarré depuis plusieurs années un programme de remplacement et d'amélioration de leurs sous-détecteurs.

ATLAS développe un système de déclenchement dix fois plus rapide et prépare le remplacement de l'électronique de lecture de plusieurs sous-détecteurs. Un prototype de l'élément complexe, le « *Global Trigger* », qui devra combiner les informations de chaque système de déclenchement avec les informations à haute résolution des calorimètres,



Construction de la délicate structure en carbone des bouchons du trajectographe interne d'ATLAS au NIKHEF (Pays-Bas).
(ATLAS-PHOTO-2024-007-34)



Maquette pour tester l'assemblage des modules d'une tranche du calorimètre à haute granularité de CMS.

(CERN-PHOTO-202402-055-23)

a été fabriqué. Des prototypes de cartes de lecture pour le calorimètre électromagnétique ont été testés, démontrant de bonnes performances. Pour différencier les événements se produisant simultanément, un détecteur temporel à haute granularité est en cours de développement. Les premiers modules hybrides ont été testés avec faisceaux, démontrant une résolution en temps de 70 picosecondes, compatible avec l'objectif final de moins de 50 picosecondes.

Le remplacement du trajectographe interne par un détecteur entièrement en silicium, formé de neuf couches de pixels et rubans de silicium, est un projet phare. La production des pixels et des rubans de silicium a progressé. La phase de préproduction des puces de lecture ASIC a été lancée avec des validations lors de tests avec faisceau. La fabrication des délicates et complexes structures de support en carbone, système de refroidissement inclus, a bien avancé.

CMS va remplacer ses calorimètres bouchons par un calorimètre à haute granularité (HGCal), et son trajectographe. L'examen d'ingénierie (*Engineering Design Review*) des deux nouveaux détecteurs a été effectué. Leurs différents capteurs ont également été qualifiés. Le calorimètre à haute granularité sera constitué de 6,4 millions de canaux, soit 100 fois plus que le calorimètre actuel. Les premiers absorbeurs ont été fabriqués et validés. Un prototype comprenant les différents capteurs et la chaîne électronique complète (déclenchement et acquisition) a été testé sur une ligne de faisceau du SPS. La partie tonneau du calorimètre sera équipée d'une nouvelle électronique : les prototypes des nouvelles cartes

électroniques ont été testés avec succès, notamment en situation réelle sur un supermodule soumis à un faisceau.

Le nouveau trajectographe comprendra 2 milliards de micro-pixels pour la partie interne et 42 millions de bandes de silicium pour la partie externe. Les différents capteurs sont en production ou prêts à l'être, et les tests d'intégration ont bien avancé. Les capteurs du nouveau détecteur de mesure de temps ultra-précis (*MIP Timing detector – MIP-DT*), pour la partie tonneau, ont été fabriqués. Le nouveau système de déclenchement a passé avec succès des tests d'intégration en étant connecté à différents sous-détecteurs.

ALICE prévoit deux améliorations majeures pour la quatrième période d'exploitation : un nouveau trajectographe interne et l'ajout d'un calorimètre à petits angles. Un détecteur de vertex (ITS3), plus proche du point de collision et plus précis, remplacera les premières couches du trajectographe actuel. Il fait appel à des capteurs pixels actifs monolithiques. Les capteurs et leur système de lecture sont imprimés sur le même substrat qui peut être incurvé pour suivre la géométrie cylindrique du détecteur. Un prototype, faisant appel à des capteurs de la dimension d'un wafer de silicium, a été fabriqué pour tester la technologie. Le calorimètre à petits angles (FoCal) comprend une partie électromagnétique à haute granularité, qui alterne des plaques de tungstène et de silicium, et une partie hadronique formée de fibres scintillantes insérées dans des tubes de cuivre. Des prototypes ont été testés avec des faisceaux du SPS. Les rapports de conception technique des deux détecteurs ont été soumis au Comité des expériences LHC. La R&D pour ALICE3, un détecteur entièrement renouvelé pour les cinquième et sixième périodes d'exploitation, est en cours.

Une grande partie des améliorations du détecteur **LHCb** en vue de la haute luminosité ont été apportées durant le deuxième long arrêt technique, avec notamment l'installation d'un nouveau détecteur de vertex, le VELO, qui a la particularité de resserrer ses capteurs au plus proche du point de collision. Installé en 2022, le détecteur a subi un incident début 2023 : le conteneur en aluminium du détecteur, qui l'isole du vide primaire du LHC, a été déformé, entraînant un fonctionnement dégradé durant toute la prise de données. L'opération de remplacement a pu avoir lieu durant l'arrêt technique hivernal fin 2023 début 2024. Les rapports de conception technique pour l'amélioration des détecteurs Tchénkov (RICH) et du calorimètre électromagnétique ont été soumis au Comité des expériences LHC en septembre.



Le nouveau détecteur de vertex d'ALICE fait appel à des capteurs pixels qui peuvent être incurvés pour s'adapter à la géométrie cylindrique du détecteur.

(ALICE-PHO-GEN-004-21)



Représentation artistique du Futur collisionneur circulaire électron-positon (FCC-ee). (OPEN-PHO-CIVIL-2024-001-21)

L'ÉTUDE DE FAISABILITÉ DU FUTUR COLLISIONNEUR CIRCULAIRE

Le projet Futur collisionneur circulaire (FCC) envisage la construction d'un très grand collisionneur électron-positon circulaire (FCC-ee) à l'horizon 2045. Le tunnel pourrait être utilisé dans un deuxième temps pour un collisionneur d'hadrons (FCC-hh). La collaboration compte 130 instituts dans 31 pays. En 2023, un rapport a été soumis au Conseil du CERN et à ses comités pour l'évaluation à mi-parcours de l'étude de faisabilité. Ce rapport de 700 pages détaille les caractéristiques techniques des deux collisionneurs et de leur infrastructure, les objectifs de physique avec les détecteurs envisagés, les études de génie civil, d'implantation, d'environnement, et présente une analyse des coûts et du financement ainsi qu'une analyse des bénéfices socio-économiques pour la région.

UN EMPLACEMENT OPTIMISÉ

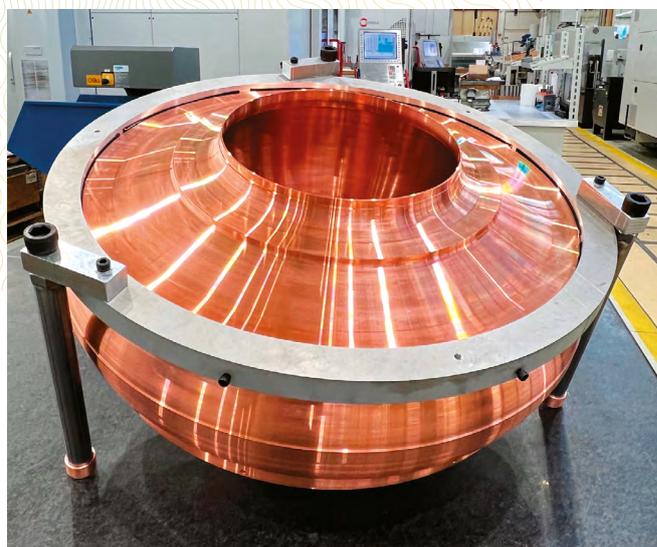
Des études poussées ont permis de définir un emplacement optimal dans la région franco-genevoise parmi une centaine de variantes. Ce scénario, élaboré en collaboration avec les autorités françaises et suisses et des experts locaux, prévoit un tunnel souterrain de 90,7 km, jalonné de huit halls souterrains, dont quatre pour les expériences, reliés aux sites de surface par douze puits d'accès. Il prend en compte la géologie, le raccordement au réseau électrique et aux infrastructures routières, l'intégration dans le tissu urbain et l'environnement. Des études de terrain ont été menées, notamment pour documenter l'environnement, ainsi que de nombreuses réunions avec les 41 municipalités en France et en Suisse concernées par le tracé de l'accélérateur.

L'étude de génie civil s'appuie sur un modèle géologique en 3D finalisé en 2023. Elle sera complétée par une campagne

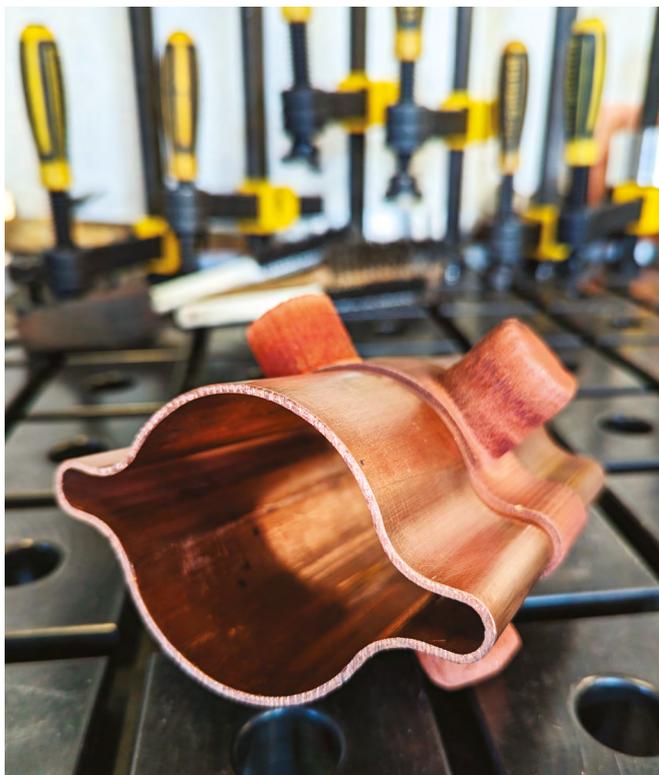
d'études géophysique et de sondages géologiques planifiée avec les deux États hôtes. La réutilisation des matériaux excavés, principalement de la molasse, est une préoccupation importante. Les résultats d'un concours international pour imaginer des moyens innovants de réutiliser ces matériaux ont été dévoilés en 2023. L'une des propositions envisage la transformation de la molasse en sol fertile pour l'agriculture ou la sylviculture. Un terrain a été alloué au point 5 du LHC pour tester la réalisation d'un tel sol dans le cadre du projet *OpenSky Laboratory*.

REPOUSSER LES LIMITES TECHNOLOGIQUES

La construction d'une machine aussi ambitieuse que le FCC implique des ruptures technologiques. Le développement de ces technologies novatrices peut être utile à de nombreux projets d'accélérateurs et au-delà.



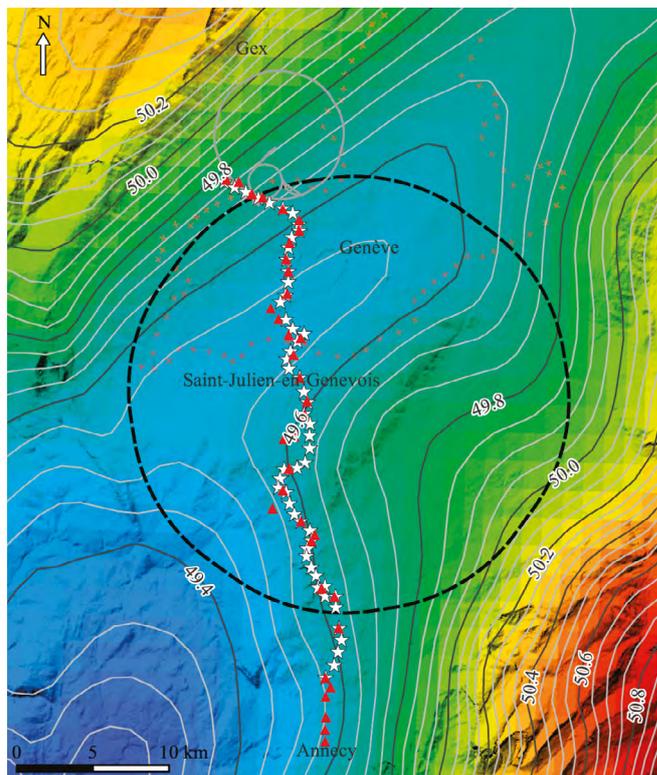
Cavité radiofréquence taille réelle usinée dans la masse dans l'atelier principal du CERN. (OPEN-PHO-ACCEL-2024-010)



Prototype d'un segment de chambre à vide doté de mini-blocs réalisés par pulvérisation métallique à froid. Ces mini-blocs sont destinés à abriter des détecteurs de position du faisceau. (OPEN-PHO-ACCEL-2024-011)

Le programme du FCC-ee dans sa version complète nécessite un très grand nombre de cavités radiofréquence supraconductrices. Des développements sont en cours dans le cadre du programme SRF (*Superconducting radiofrequency*), qui vise à améliorer l'efficacité des cavités et à réduire leur consommation électrique. La fabrication de cavités dans la masse, par hydroformage ou usinage, évite par exemple les imperfections autour des soudures et permet d'optimiser la surface pour obtenir un revêtement supraconducteur en niobium de meilleure qualité. Des prototypes de cavités de format réduit (1,3 GHz) ont été réalisés par hydroformage dans le cadre d'une coopération avec le laboratoire japonais KEK. Les tests de revêtement en niobium réalisés sur de petites cavités de 1,3 GHz, usinées dans la masse dans l'atelier du CERN, ont montré d'excellentes performances. Ce résultat est prometteur pour atteindre les spécifications très exigeantes du FCC. Une première cavité en cuivre de taille réelle, à 400 MHz, a été usinée dans la masse au CERN.

Les chambres à vide et les composants qui les équiperont, notamment l'instrumentation et les absorbeurs de rayonnements synchrotron, font l'objet d'importants développements. Le rayonnement synchrotron constitue en effet une limite pour les machines à électrons. Des essais concluants de pulvérisation métallique à froid ont été menés pour fabriquer les mini-blocs abritant les détecteurs de position du faisceau. Ce système permet une meilleure précision et une meilleure répétabilité de la fabrication. Il s'agit d'un atout important sachant que le collisionneur devrait être doté de quelque 7 000 détecteurs de position de faisceau.



Carte montrant les mesures du champ de gravité (triangles rouges et étoiles blanches) dans la région du FCC (matérialisé par les pointillés noirs). Ces mesures permettent d'affiner le système de référence géodésique existant. (OPEN-PHO-CIVIL-2024-002-1)

Côté géodésie, les défis sont à l'échelle de la machine. Le développement d'une infrastructure géodésique pour la région franco-suisse a été démarré en 2023. Permettant d'étendre et d'affiner les systèmes de référence existants, elle contient les données topographiques et géologiques, ainsi que les variations du champ de gravité. Elle est développée en partenariat avec l'Office fédéral de topographie (Suisse), l'Institut national de l'information géographique et forestière (France), et les instituts ETH Zürich et HEIG-VD.

DES AIMANTS PLUS PERFORMANTS

La version hadronique du FCC (FCC-hh) fera appel à des aimants capables de produire des champs magnétiques avec des intensités inégalées. Lancé en 2021, le programme d'aimants à champ élevé HFM (*High-Field Magnets*) prend de l'ampleur. Son objectif principal est de faire progresser la technologie niobium-étain (Nb_3Sn), pour produire des aimants de courbure de 14 teslas, et de promouvoir rapidement la recherche sur les aimants supraconducteurs à haute température (HTS). Les aimants HTS permettraient d'atteindre des champs magnétiques plus élevés et de réduire l'énergie nécessaire au refroidissement. En 2023, le programme a élargi la collaboration à de nouveaux instituts. Plusieurs laboratoires nationaux (CEA, CIEMAT, INFN, PSI) ont mis en place des installations de R&D de pointe où des bobines Nb_3Sn et HTS sont en cours de fabrication. De nouvelles installations de recherche sur les matériaux supraconducteurs ont été mises en service au CNR-SPIN



Fabrication d'une bobine prototype au CEA (France), dans le cadre d'une collaboration CERN-CEA sur le développement des aimants à champ élevé à base de supraconducteur niobium-étain.

(Italie), pour étudier le potentiel des supraconducteurs à base de fer, et à l'institut KIT (Allemagne), pour étudier les moyens d'optimiser les conducteurs revêtus de ReBCO – seul conducteur HTS disponible dans l'industrie pour les champs élevés – en vue d'une utilisation dans les aimants d'accélérateurs. Ces développements sont entrepris en étroite collaboration avec le CERN, qui fournit des conseils, une expertise technique et un soutien matériel.

LES COLLISIONNEURS LINÉAIRES

L'étude CLIC (*Compact Linear Collider*), qui porte sur un collisionneur linéaire électron-positon à haute luminosité en trois étapes, de 380 GeV à 3 TeV, a poursuivi les travaux sur les structures accélératrices en bande X et la technologie des nano-faisceaux. Des prototypes de structures accélératrices ont été testés. Ces technologies ont des applications industrielles et médicales importantes, comme en témoigne la collaboration avec le Centre hospitalier universitaire vaudois (CHUV) et l'industrie française pour développer une nouvelle technologie de radiothérapie (voir p. 33).

Le projet de Collisionneur international linéaire (ILC) s'est poursuivi avec le démarrage du réseau des technologies ILC (ITN). Un accord à ce sujet a été signé entre le CERN et le laboratoire KEK (Japon). Le projet EAJADE, financé dans le cadre du programme européen Marie Skłodowska-Curie, a été lancé pour favoriser les échanges d'experts des accélérateurs entre l'Europe, les États-Unis et le Japon sur le thème des usines à Higgs.

LE COLLISIONNEUR DE MUONS

Un projet de collisionneur de muons est à l'étude dans le cadre de la collaboration IMCC. Des collisions de muons permettraient d'atteindre des énergies dans le centre de masse jusqu'à 10 TeV, bien plus élevées que celles obtenues avec des électrons. Des défis technologiques majeurs doivent toutefois être relevés, notamment du fait de la très courte durée de vie des muons. La collaboration a lancé en 2023 le projet MuCol, co-financé par l'Union européenne, pour intensifier les efforts de recherche et développement de cavités radiofréquence, d'aimants et de systèmes de refroidissement des muons. Les études sur la production et la dynamique du faisceau de muons se sont poursuivies. Fin 2023, le Comité P5, chargé de définir les orientations stratégiques de la physique des particules aux États-Unis, a identifié le collisionneur à muons comme un projet important de R&D et recommandé la participation des instituts américains à l'IMCC.

LA RECHERCHE SUR LES NEUTRINOS

Le CERN contribue aux recherches mondiales sur les neutrinos au travers de la plateforme neutrino, qui mène des études théoriques et développe des détecteurs pour des projets aux États-Unis et au Japon. Le projet LBNF/DUNE aux États-Unis prévoit l'envoi d'un faisceau de neutrinos du laboratoire Fermilab, dans l'Illinois, vers le détecteur géant de l'expérience DUNE (*Deep Underground Neutrino Experiment*)



Une chambre à dérive verticale a été installée dans un cryostat des prototypes de DUNE. (CERN-PHOTO-202308-195-28)

dans le Dakota du Sud, distant de 1 300 km. Le CERN fabrique et teste les prototypes du détecteur et fournit les cryostats. En 2023, la structure du premier cryostat taille réelle pour les États-Unis a été fabriquée en Espagne. L'installation des deux détecteurs prototypes pour DUNE a été finalisée dans les immenses cryostats de la plateforme neutrino du CERN. Le premier est une chambre à dérive verticale, utilisant des plans de lecture de charge (*Charge Readout Plane - CRP*), de grands circuits imprimés. Le premier module de chambre à dérive verticale a été installé avec quatre prototypes de plaques CRP qui ont été testés. Le deuxième est une chambre à dérive horizontale, constituée de plaques d'anodes planes assemblées (*Anode Plane Assembly - APA*), des plans de fils avec différentes orientations. Un prototype formé de quatre anodes planes a été installé dans le cryostat. Les détecteurs seront testés en 2024.

La plateforme neutrino contribue également à l'installation T2K, opérationnelle au Japon, qui envoie un faisceau de neutrinos sur 295 km du laboratoire J-PARC au laboratoire Super-Kamiokande. L'équipe du CERN améliore le détecteur proche ND280, situé à 280 mètres de la cible produisant les neutrinos. Une première chambre à projection temporelle (TPC) et un nouveau système de gaz ont été installés. La seconde TPC a été assemblée et sera installée en 2024.

LA PHYSIQUE AU-DELÀ DES COLLISIONNEURS

Lancé en 2016, le programme Physique au-delà des collisionneurs a encouragé de nombreuses initiatives pour des expériences complémentaires à celles avec collisionneur. Plusieurs projets portent sur de nouvelles expériences dans la zone Nord, alimentée par les lignes de faisceaux du Supersynchrotron à protons (SPS). Deux propositions concurrentes ont été soumises pour l'exploitation future du hall souterrain ECN3 (*Experimental Cavern North 3*) : BDF/SHiP (*Beam Dump Facility/Search for Hidden Particles*) pour la recherche d'hypothétiques

particules à très faible interaction, candidates à la matière noire, et la combinaison des expériences HIKE (*High Intensity Kaon Experiment*) et SHADOWS (*Search for Hidden And Dark Objects With the SPS*), la première poursuivant les recherches actuelles sur les désintégrations rares des kaons, et la seconde ayant des objectifs similaires à ceux de BDF/SHiP. Ces deux projets requièrent un faisceau de haute intensité. Un travail important a été mené pour évaluer les deux propositions, leur potentiel pour la physique et leur faisabilité technique. Plusieurs autres expériences sont à l'étude dans la zone Nord, notamment avec différentes espèces d'ions, en tenant compte de la complémentarité avec les autres programmes utilisant des ions.

Le projet de physique des petits angles (*Forward Physics Facility*) propose d'installer plusieurs expériences dans un hall souterrain à environ 600 mètres du point d'interaction d'ATLAS. Ces détecteurs pourraient intercepter des particules interagissant faiblement et des neutrinos issus des collisions du LHC à haute luminosité. L'étude de faisabilité de cette nouvelle installation a bien avancé en 2023, avec l'étude de la conception des détecteurs et de leur intégration, ainsi que des sondages géologiques. Les études des effets des vibrations attendues lors des travaux de génie civil ont montré que l'excavation pourrait avoir lieu parallèlement à l'exploitation du LHC à haute luminosité.

Un autre projet envisage d'utiliser les particules du halo du faisceau LHC, c'est-à-dire celles qui s'éloignent de la trajectoire. Ces particules pourraient être défléchies et interagir avec des cristaux pour des études sur le moment dipolaire électrique et magnétique de particules charmées à brève durée de vie. Des essais avec des cristaux ont été réalisés avec un faisceau du SPS en 2023 et un prototype est en cours de développement. Une étude conceptuelle de faisabilité a été menée pour le projet AION-100 visant à installer un interféromètre atomique de 100 mètres dans un puits au point 4 du LHC pour la recherche de matière noire et d'ondes gravitationnelles à des fréquences actuellement inaccessibles.

L'ACCÉLÉRATION PAR CHAMPS DE SILLAGE

L'expérience AWAKE teste la technique d'accélération d'électrons par champs de sillage dans du plasma générés par des faisceaux de protons. Cette technologie permettrait d'obtenir des gradients d'accélération des centaines de fois plus élevés qu'avec les cavités traditionnelles. AWAKE a installé et testé une nouvelle source de plasma à vapeur de rubidium qui génère des champs de sillage plus intenses que l'ancienne, comme l'ont montré les résultats préliminaires. Un prototype de source de plasma à décharge a également été testé. Cette technologie modulaire devrait permettre le développement de sources de plasma évolutives.



La nouvelle source de plasma à vapeur de rubidium de l'expérience AWAKE.
(CERN-PHOTO-202307-176-35)

CONSEIL DU CERN

Composition au 31 décembre 2023

Président du Conseil : M. E. Rabinovici (Israël)

Vice-présidents : M. K. Fountas (Grèce), M. E. Laenen (Pays-Bas)

ÉTATS MEMBRES

Allemagne

M. K. Desch
M. V. Dietz

Autriche

M. J. Schieck
S.E. M^{me} D. Schweitzer

Belgique

M^{me} V. Halloin
M. D. Ryckbosch

Bulgarie

M. L. Litov
S.E. M. Y. Sterk

Danemark

M. J. J. Gaardhøje
M. B. S. Kaspersen

Espagne

S.E. M^{me} A. Díaz-Rato
Revuelta
M^{me} I. Figueroa Rojas

Finlande

M^{me} K. Huitu
M^{me} U. Jakobsson

France

S.E. M. J. Bonnafont
M. F. Jacq

Grèce

M. K. Fountas
S.E. M. I. Ghikas

Hongrie

M. L. Lengyel
M. P. Lévai

Israël

S.E. M^{me} M. Eilon Shahr
M. M. Karliner

Italie

S.E. M. V. Grassi
M. A. Zoccoli

Norvège

M^{me} L. Furuberg
M. E. Osnes

Pays-Bas

M. E. Laenen
M^{me} M. Lieshout-Vijverberg

Pologne

M. D. Drewniak
M. T. Lesiak

Portugal

S.E. M. R. Macieira
M. M. Pimenta

Roumanie

M. F. Buzatu
M^{me} A. Ghinescu

Royaume-Uni

M^{me} S. Haque
M. M. Thomson

Serbie

M. P. Adžić
S.E. M. D. Zlatanović

Slovaquie

S.E. M. D. Matulay
M. S. Tokár

Suède

M. R. Brenner
M. M. Hamberg

Suisse

M^{me} F. Canelli
S.E. M. M. Gerber

Tchéquie

S.E. M. V. Bálek
M. R. Leitner

ÉTATS MEMBRES ASSOCIÉS EN PHASE PRÉALABLE À L'ADHÉSION

Chypre

S.E. M^{me} O. Neocleous
M. P. Razis

Estonie

M. M. Kadastik
M^{me} K. Otto

Slovénie

M. J. Gašparič
M. D. Zavrtanik

ÉTATS MEMBRES ASSOCIÉS

Croatie

M. V. Brigljević
M. H. Meštrić

Inde

M. S. Ganju
M. A. Mohanty

Lettonie

S.E. M. B. Hasans
M. J. Paiders

Lituanie

M. R. Aleksiejūnas
S.E. M. D. Staniulis

Pakistan

S.E. M. K. Hasmi
M. R. A. Raza Anwar

Türkiye

M. A. Baliçki
M. A. S. Işlak

Ukraine

M. B. Grinyov
M. Y. Kudriavets

OBSERVATEURS

États-Unis d'Amérique,
Fédération de Russie*,
Japon, JINR**,
UNESCO, Union
européenne

*statut suspendu depuis
le 8 mars 2022

**statut suspendu
depuis le 25 mars 2022

COMITÉS DU CONSEIL

COMITÉ DES DIRECTIVES SCIENTIFIQUES

Président

M. H. Montgomery
(États-Unis d'Amérique)

Membres

M. H. Aihara
M. K. Blaum
M. P. Burrows
M. R. Cousins
M. N. Glover
M^{me} P. Hernandez
M. G. Isidori
M. M. Kado
M. M. Lindroos
M. F. Maltoni
M^{me} J. Monroe
M^{me} K. Scholberg
M^{me} M.-H. Schune
M. J. P. Wessels
M. A. Yamamoto

Membres ès qualités

Président du Comité des expériences ISOLDE et n_TOF
M. M. Pfützner

Président du Comité des expériences SPS et PS
M. J. Nash

Président du Comité des expériences LHC
M. F. Simon

Président du Comité consultatif sur les machines du CERN
M. M. Seidel

Président du Comité consultatif scientifique pour l'étude de faisabilité du FCC
M. A. Parker

Président du Comité européen sur les futurs accélérateurs
M. K. Jakobs

Président du Groupe des grands laboratoires de physique des particules (LDG)
M. D. Newbold

Également présents
Président du Conseil
M. E. Rabinovici
(Israël)

Président du Comité des finances
M. L. Salzarulo
(Suisse)

Directrice générale
M^{me} F. Gianotti

COMITÉ DES FINANCES

Président

M. L. Salzarulo
(Suisse)

Membres

Un ou deux représentants par État membre, et deux représentants au plus par État membre associé et État membre associé en phase préalable à l'adhésion

TREF (FORUM TRIPARTITE SUR LES CONDITIONS D'EMPLOI)

Présidente

M^{me} B. Åsman
(Suède)

Membres

Un représentant par État membre

COMITÉ D'AUDIT

Président

M. J. Schieck
(Autriche)

Membres

Au moins un délégué du Conseil, nommé par le Conseil
Au moins deux membres experts externes, nommés par le Conseil

ORGANISATION INTERNE

Directrice générale

Services de l'unité Direction générale (DG) : Traduction, procès-verbaux et appui au Conseil, Audit interne, Service juridique
Unité Santé et sécurité au travail et protection de l'environnement (HSE)

Fabiola Gianotti

Benoît Delille

Directeur des accélérateurs et de la technologie

Directrice adjointe des accélérateurs et de la technologie

Faisceaux (BE)
Ingénierie (EN)
Systèmes d'accélérateurs (SY)
Technologie (TE)

Mike Lamont

Malika Meddahi

Rhodri Jones
Katy Foraz
Brennan Goddard
José Miguel Jiménez

Directeur des finances et des ressources humaines

Finances et processus administratifs (FAP)
Ressources humaines (HR)
Industrie, achats et transfert de connaissances (IPT)
Site et génie civil (SCE)

Raphaël Bello

Florian Sonnemann
James Purvis
Christopher Hartley
Mar Capeans

Directrice des relations internationales

Relations diplomatiques et relations extérieures (IR-DS)
Éducation, communication et activités grand public (IR-ECO)

Charlotte Warakaulle

Charlotte Warakaulle
Ana Godinho

Directeur de la recherche et de l'informatique

Directrice adjointe de la recherche et de l'informatique

Service d'information scientifique (RCS-SIS)
Physique expérimentale (EP)
Technologies de l'information (IT)
Physique théorique (TH)

Joachim Mnich

Pippa Wells

Manfred Krammer
Enrica Porcari
Gian Giudice

Direction de projets

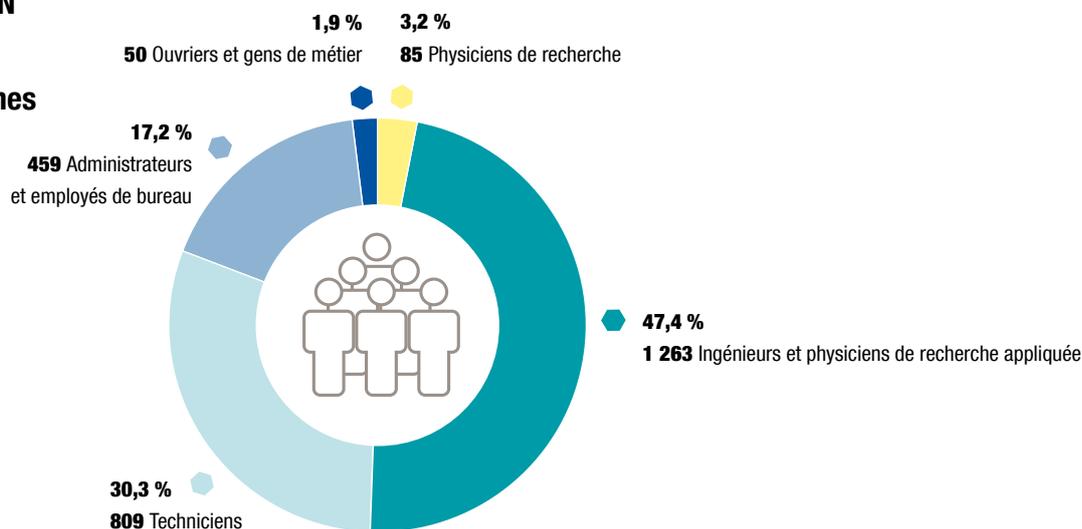
Advanced Wakefield Experiment (AWAKE)
CERN Neutrino Platform
Future Circular Collider (FCC) Feasibility Study
High-Field Magnets R&D Programme (HFM)
High-Luminosity LHC (HL-LHC)
Linear Collider Studies (CLIC et LCS)
Muon Colliders
Physics Beyond Colliders (PBC)
Science Gateway
Worldwide LHC Computing Grid (WLCG)

Edda Gschwendtner
Francesco Lanni
Michael Benedikt
Andrzej Siemko
Oliver Brüning
Steinar Stapnes
Daniel Schulte
Gianluigi Arduini
Patrick Geeraert
Simone Campana

LE CERN EN CHIFFRES

PERSONNEL DU CERN

Total : 2 666 personnes



ÉVOLUTION DES EFFECTIFS DES MEMBRES DU PERSONNEL TITULAIRES

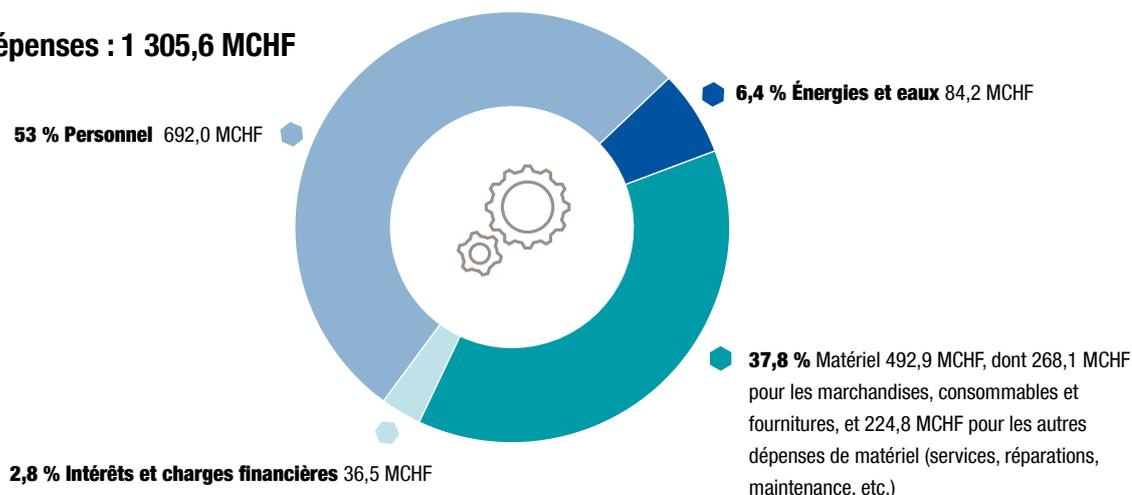
2019	2 660
2020	2 635
2021	2 676
2022	2 658
2023	2 666

En plus des membres du personnel titulaires, en 2023, le CERN a employé 1 002 boursiers et diplômés (dont 68 techniciens TTE*), formé 776 étudiants et accueilli 990 attachés. L'infrastructure et les services du CERN sont utilisés par une grande communauté scientifique, qui, en 2023, comptait 12 370 utilisateurs.

*Le programme TTE (*Technical Training Experience*), arrivé à son terme, a été intégré dans les programmes à l'intention des nouveaux diplômés.

DÉPENSES DU CERN

Total des dépenses : 1 305,6 MCHF



En 2023, 35,7 % du budget du CERN a été dépensé dans l'industrie au travers d'achats de matériels et de services. Le CERN s'efforce d'équilibrer le retour industriel entre ses États membres.

CERN
Esplanade des Particules 1
Case postale 1211
Genève 23
Suisse
home.cern/fr

Soixante-neuvième rapport annuel de l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire.

Le Rapport annuel du CERN présente les faits marquants et les principales activités du Laboratoire. Une version électronique est disponible à l'adresse :
<http://library.cern/annual-reports>

En plus de cette publication, un bilan d'activités annuel détaille les avancements et les dépenses par activité par rapport aux objectifs approuvés par le Conseil du CERN. Ce rapport est disponible à l'adresse : <http://cern.ch/go/annual-progress-reports>

La Rapport biennal sur l'environnement 2021-2022 est disponible à l'adresse :

https://e-publishing.cern.ch/index.php/CERN_Environment_Report

Le Rapport annuel 2023 sur le transfert de connaissances au CERN (en anglais) est disponible à l'adresse : <http://kt.cern/annual-report>

Le Rapport annuel CERN & Society 2023 (en anglais) est disponible à l'adresse : <https://cernandsocietyfoundation.cern/page/annual-reviews>

La liste des publications du CERN (un catalogue de toutes les publications connues sur les recherches menées au CERN pendant l'année) peut être consultée à l'adresse :

<https://library.cern/search-and-read/online-resources/annual-lists-cern-authored-publications>

Un glossaire des termes utiles est disponible à l'adresse : <http://cern.ch/go/glossary>

Images :

Joan Heemskerk : p. 8 (au milieu)

GESDA/von Loebell : p. 11 (en haut)

Programme alimentaire mondial :
p. 11 (au milieu, à droite)

Réseau *CERN Alumni* : p. 13 (en haut)

Collaboration FASER : p. 17 (en bas)

Collaboration ALICE : p. 19 (en haut)

SuperNode : p. 33 (en haut, à gauche)

Centre hospitalier universitaire Vaudois :
p. 33 (en haut, à droite)

ESA : p. 33 (en bas)

Cyclife France : p. 41 (en haut, à droite)

Marco Jeroen Kraan/NIKHEF : p. 44 (en bas)

PIXELRISE : p. 46 (en haut)

CEA-Irfu, p. 48 (en haut)

CERN : toutes les autres images

Réalisation éditoriale et graphique :

Groupe Éducation, communication et activités grand public du CERN eco.office@cern.ch

Traduction et relecture :

Service de traduction du CERN et Griselda Jung (traductrice extérieure)

ISSN 0304-291X

ISBN 978-92-9083-657-5 (version papier)

ISBN 978-92-9083-658-2 (version électronique)

DOI : 10.17181/RapportAnnuel2023

<http://dx.doi.org/10.17181/RapportAnnuel2023>

© Copyright 2024, CERN

Le CERN publie le présent rapport en libre accès sous la licence *Creative Commons Attribution 4.0 International* <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.fr>, afin de permettre une diffusion et une utilisation larges, à l'exception des images, protégées par le droit d'auteur (voir plus haut).

