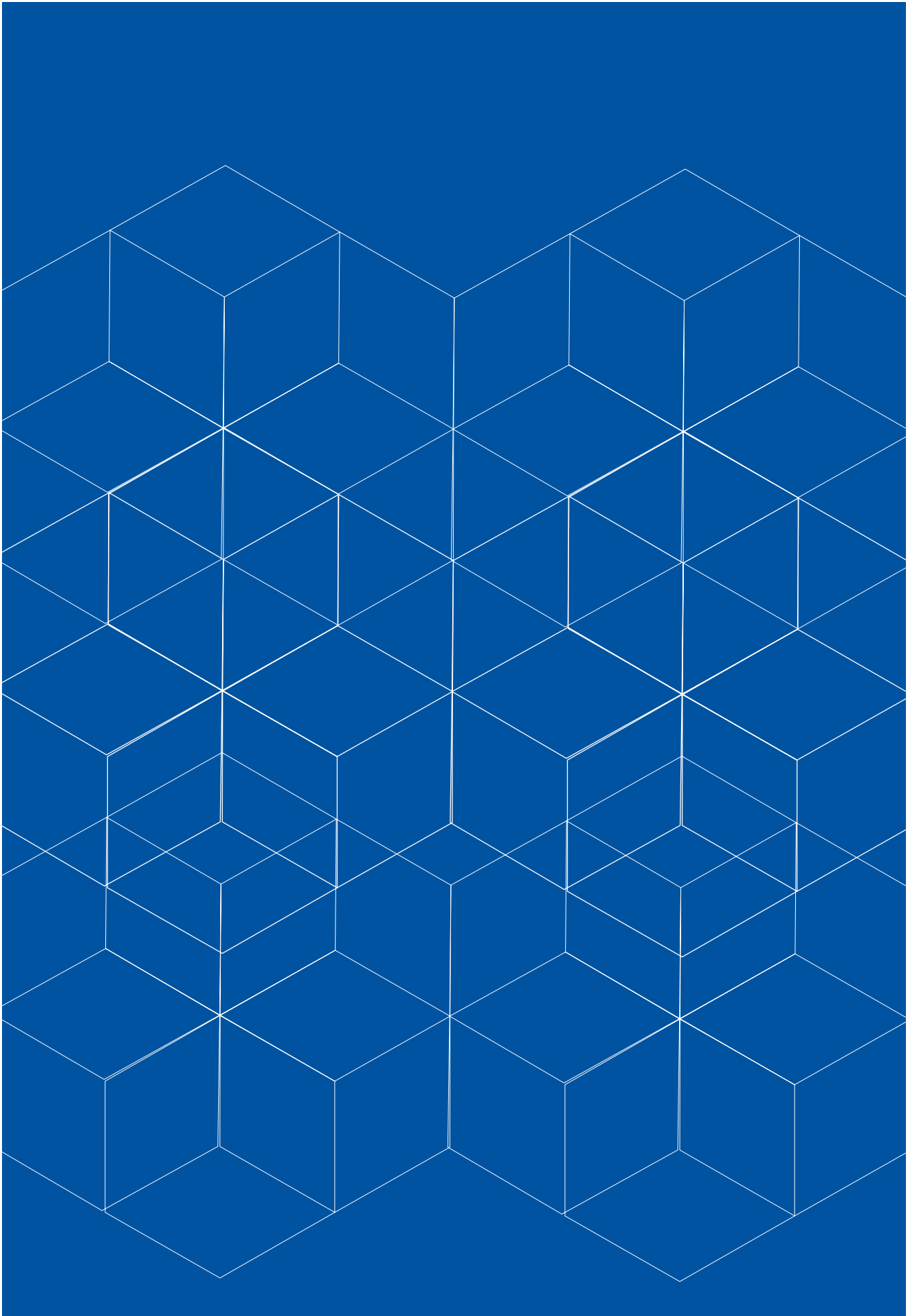




# Rapport annuel **2020**



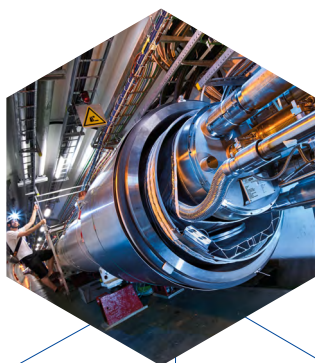


# SOMMAIRE

---

*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 unique au monde 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  
2020 EN IMAGES**

---

**P16  
UN LABORATOIRE POUR LE MONDE**

---

**P18  
EXPLORER LA NATURE DE L'UNIVERS**

---

**P26  
LES MACHINES DES DÉCOUVERTES**

---

**P36  
ACCÉLÉRATEUR D'INNOVATION**

---

**P40  
SENSIBILISER ET FORMER**

---

**P44  
AGIR POUR UNE RECHERCHE  
RESPONSABLE**

---

**P46  
CONSTRUIRE L'AVENIR**

---

**P54  
GOUVERNANCE**

---

**P57  
LE CERN EN CHIFFRES**

---



## MESSAGE DE LA PRÉSIDENTE DU CONSEIL

Jamais le Conseil public du CERN n'aura réuni autant de participants que le 18 juin 2020 : plus de 3 000 personnes ont suivi en ligne la réunion de l'organe de tutelle de l'Organisation pour connaître les dernières nouvelles du Laboratoire. En raison de la pandémie de COVID-19, le Conseil public s'est tenu pour la première fois par visioconférence, ce qui a permis d'annoncer à la communauté mondiale de la physique des particules la mise à jour tant attendue de la stratégie européenne pour la physique des particules.

En janvier, après deux ans de travaux préparatoires, le processus de mise à jour est entré dans sa phase finale à l'occasion d'un symposium public à Bad Honnef (Allemagne). Les prises de position et le document explicatif qui en ont découlé ont été examinés en détail le 25 mai lors d'une session en ligne du Conseil. Cependant, l'approbation officielle prévue le même jour à Budapest (Hongrie) a dû être annulée, et la résolution du Conseil relative à la mise à jour a été adoptée ultérieurement, en juin.

La priorité pour la physique des particules en Europe reste la réussite de la phase à haute luminosité du LHC. Cet ambitieux projet, qui concerne à la fois l'accélérateur et les expériences, nécessite un engagement total. Il aura pour corollaire un programme de physique passionnant, qui nous permettra d'en savoir plus sur le boson de Higgs et améliorera comme jamais nos connaissances dans de nombreux domaines.

Les années à venir seront cruciales pour l'avenir à long terme du CERN. Les recommandations de la stratégie mise à jour sont d'ailleurs déjà reflétées dans le plan à moyen terme que la Directrice générale a présenté au Conseil. Parmi elles figurent le lancement d'une étude de faisabilité pour la construction au CERN d'un collisionneur de 100 km, ainsi que la présentation, à temps pour la prochaine mise à jour de la stratégie, de plans pour la construction et le financement du tunnel. Le Groupe des directeurs de laboratoires européens et le Comité européen sur les futurs accélérateurs (ECFA) ont, quant à eux, été chargés d'établir des feuilles de route pour la R&D sur les accélérateurs et les détecteurs. La mise en œuvre de ces feuilles de route au

CERN et dans les laboratoires des États membres jettera les bases technologiques des futurs programmes au CERN. Si la mise au point d'aimants à champ élevé est cruciale, il est également essentiel que d'autres concepts d'accélérateurs atteignent un niveau de maturité qui permettra leur évaluation.

Durant le processus de mise à jour, des questions plus vastes liées à nos activités ont été largement discutées. Les perspectives sociales et professionnelles des futures générations dans notre discipline, et, plus largement, dans la société, constituent un aspect important de la mise à jour, de même que la participation européenne à des projets mondiaux et la place de la physique des particules dans la recherche au sens large. Le transfert de connaissances et de technologies, la sensibilisation du public, l'éducation et la communication sont jugés essentiels pour créer des ponts entre la recherche publique et la société. Pour la première fois, des recommandations ont été formulées dans le cadre du processus de mise à jour concernant l'impact de notre discipline sur le développement durable et l'environnement, lesquelles font écho à la parution en septembre du premier rapport public du CERN sur l'environnement.

Je remercie vivement toutes les personnes qui ont participé à la mise à jour de la stratégie, en particulier le Secrétariat de la stratégie et sa présidente, Halina Abramowicz. Je tiens également à remercier le personnel et la Direction du CERN, ainsi que les délégations des États membres et des États membres associés pour leur soutien et leur coopération inestimables. J'espère que 2021 marquera la fin de la pandémie, et je me réjouis à la perspective de vivre à vos côtés les prochaines étapes à venir sur la voie de la résolution des mystères les plus profonds de la nature.

Ursula Bassler



## MESSAGE DE LA DIRECTRICE GÉNÉRALE

En cette année de pandémie de COVID-19 marquée par des défis sans précédent pour la société, le CERN a lui aussi dû faire face à des difficultés inédites et s'est avant tout attaché à protéger la santé de tous ceux et celles présents sur ses sites. Les efforts et le dévouement d'un grand nombre de personnes et de services, ainsi que l'exemplarité avec laquelle le personnel s'est conformé aux nouvelles mesures de sécurité et procédures de travail, nous ont permis de préserver la sûreté du domaine. De nombreuses avancées ont été réalisées lors de cette deuxième année du LS2, aussi bien en ce qui concerne les améliorations apportées au complexe d'accélérateurs et aux expériences en vue de la troisième période d'exploitation, que la préparation de la phase à haute luminosité du LHC (HL-LHC). La mise à niveau des injecteurs du LHC (projet LIU) s'est achevée avec succès et, bien que la situation de télétravail généralisé et la mise en place de protocoles sanitaires aient inévitablement entraîné des retards, à la fin de l'année nous étions en bonne voie pour une remise en service du complexe d'accélérateurs en 2021. En parallèle, l'analyse de données s'est poursuivie à un rythme soutenu tout au long de l'année et a conduit à de formidables résultats de physique pour l'ensemble du programme des expériences du Laboratoire.

La mise à jour de la stratégie européenne pour la physique des particules par le Conseil du CERN a été l'un des temps forts de l'année. La stratégie mise à jour fixe des objectifs ambitieux, et je me félicite que le plan à moyen terme pour la période 2021-2025 prévoie les plans et les ressources nécessaires à leur mise en œuvre.

Autre fait marquant de l'année 2020, la parution du premier rapport public du CERN sur l'environnement. Dans ce rapport, le Laboratoire prend le ferme engagement de mener ses recherches dans le respect de l'environnement. Le document fixe des objectifs ambitieux pour réduire notre impact écologique dans les années à venir et matérialise l'engagement de l'Organisation en faveur d'un avenir durable pour la recherche. Trois projets à fort enjeu environnemental ont progressé en 2020 : les rejets de chaleur du LHC servent à chauffer un nouveau quartier d'une commune avoisinante ; la construction d'un nouveau centre de calcul doté d'un récupérateur de chaleur intégré a été approuvée ; et les

travaux de construction du Portail de la science, notre nouveau centre d'éducation et de communication grand public, qui produira sa propre électricité grâce à des panneaux solaires, ont été lancés.

En 2020, le système de valeurs de la science a prouvé sa pertinence. Les scientifiques ont plus que jamais occupé le devant de la scène, notamment en développant des vaccins en un temps record. Bien que ces travaux soient très éloignés du champ de compétences du CERN, la communauté de la physique des particules s'est jointe à l'effort mondial de lutte contre le virus. Le groupe d'action « *CERN against COVID-19* » a ainsi coordonné plusieurs initiatives de la communauté, allant de la production de gel hydroalcoolique et de visières de protection au développement d'un respirateur, en passant par la mise à disposition de ressources informatiques pour les recherches directement en lien avec le virus.

L'année 2020 étant la dernière de mon premier mandat de directrice générale du CERN, je souhaite remercier les directeurs sortants, Frédéric Bordry (Accélérateurs et technologie), Eckhard Elsen (Recherche et informatique) et Martin Steinacher (Finances et ressources humaines) pour leur excellent travail et leur dévouement envers l'Organisation et sa communauté.

Les faits qui ont marqué l'année 2020 au CERN sont présentés dans ce rapport. Les réalisations qui y sont décrites ont été rendues possibles grâce aux compétences, au travail assidu et à l'engagement du personnel du CERN, ainsi qu'au soutien sans faille de nos États membres et États membres associés. Au nom de l'ensemble de la Direction, je leur adresse toute ma gratitude, et je remercie personnellement le Conseil de m'avoir témoigné sa confiance en me confiant un nouveau mandat de cinq ans à la tête de l'Organisation.

Fabiola Gianotti

# 2020 EN IMAGES

*Alors que les travaux liés au deuxième long arrêt technique (LS2) battaient leur plein, le CERN, comme le reste du monde, a été confronté aux défis liés à la pandémie de COVID-19. Même si de nombreux événements ont dû être reportés, le passage au mode sécurisé n'a pas empêché le Laboratoire d'obtenir des résultats de physique exceptionnels et de mettre à niveau ses accélérateurs et expériences. Découvrez les temps forts de l'année en images.*

## 20 JANVIER

Les discussions tenues à Bad Honnef aboutiront à la formulation de recommandations pour la mise à jour de la stratégie européenne pour la physique des particules.



## 20 JANVIER

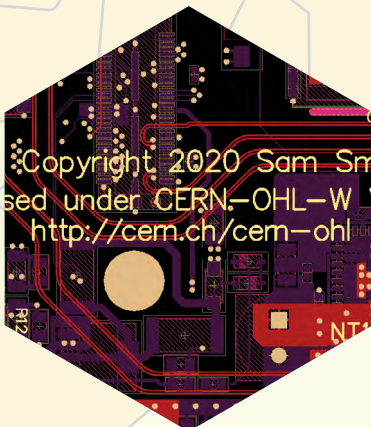
S.E. M. Egils Levits, président de la République de Lettonie, en visite au CERN.

(CERN-PHOTO-202001-016-41)



## 14 FÉVRIER

À Pavie (Italie), le CNAO, synchrotron conçu avec l'aide du CERN et utilisé pour le traitement du cancer, traite une pathologie cardiaque avec un faisceau de protons - une première mondiale.



Copyright 2020 Sam Sm  
sed under CERN-OHL-W  
<http://cern.ch/cern-ohl>

## 19 FÉVRIER

ALPHA annonce les premières mesures de certains effets quantiques dans l'antimatière, ouvrant la voie à de futures études de précision.

(CERN-PHOTO-201810-266-4)

## 12 MARS

Le CERN met à jour sa licence sur le matériel libre, avec trois variantes adaptées à différents modèles de collaboration.

(CERN-HOMEWEB-PHO-2020-022-1)

## 20 MARS

Le CERN passe en mode sécurisé et restreint ses activités à celles essentielles pour la sécurité et la sûreté des sites et des équipements.

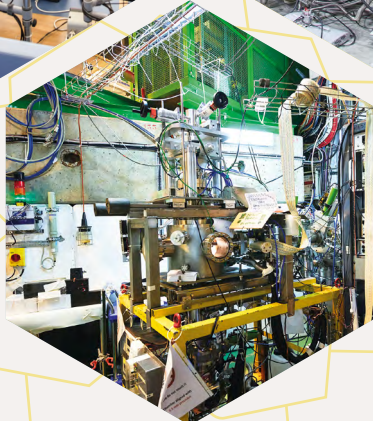
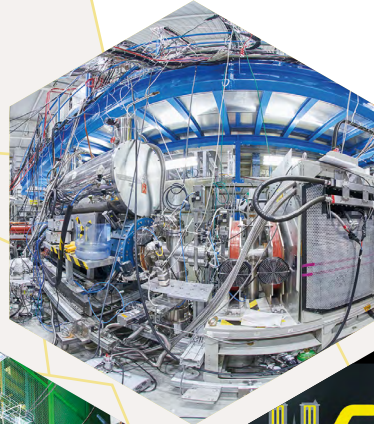
(OPEN-PHO-ACCEL-2020-002-3)



## 6 MAI

Les scientifiques d'ASACUSA créent et étudient de nouveaux atomes exotiques au PSI grâce aux équipements des expériences du CERN.

(CERN-HOMEWEB-PHO-2020-056-1)



## 14 MAI

CLOUD découvre un mécanisme à l'origine du « smog » urbain, dont l'étude pourrait permettre d'agir contre la pollution aux particules fines.

(CERN-PHOTO-201909-278-3)

## 27 MAI

ISOLDE effectue les premières mesures par spectroscopie laser d'une molécule radioactive à durée de vie courte.

(CERN-PHOTO-201911-394-20)

## 25-30 MAI

À la conférence LHCP, les expériences LHC présentent des résultats sur de nouvelles signatures du boson de Higgs, des hadrons exotiques comportant des quarks  $c$  et des pistes prometteuses pour la recherche d'une nouvelle physique.



## 15 JUIN

Deux équipes d'élèves du secondaire de Suisse et d'Allemagne remportent l'édition 2020 du concours *Ligne de faisceau pour les écoles*.

(OPEN-PHO-LIFE-2020-006-4)



## 19 JUIN

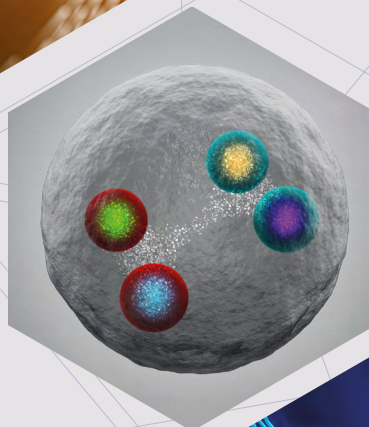
À sa 199<sup>e</sup> session, le Conseil du CERN annonce la mise à jour de la stratégie européenne pour la physique des particules.



## 19 JUIN

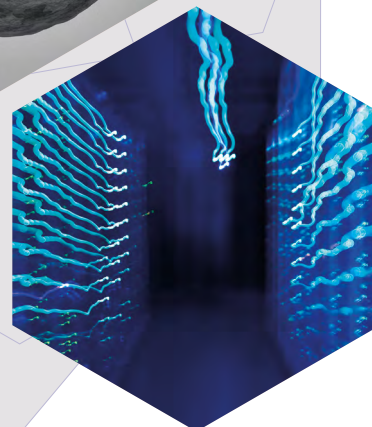
Signature de l'Accord par lequel l'Estonie obtient le statut d'État membre associé en phase préalable à l'adhésion.

(CERN-PHOTO-202006-088-9)



## 1<sup>ER</sup> JUILLET

La collaboration LHCb découvre un nouveau type de tétraquark, particule exotique constituée de quatre quarks c.



## 22 JUILLET

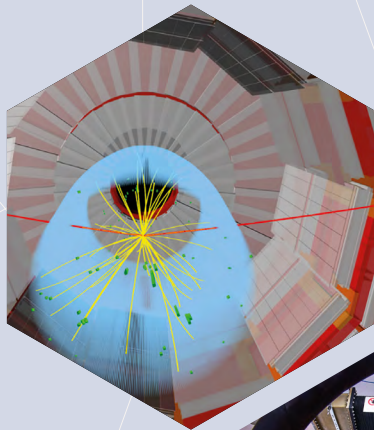
Le CERN, le SKA, GÉANT et PRACE collaborent sur la prochaine génération de supercalculateurs.

(CERN-PHOTO-201707-174-1)



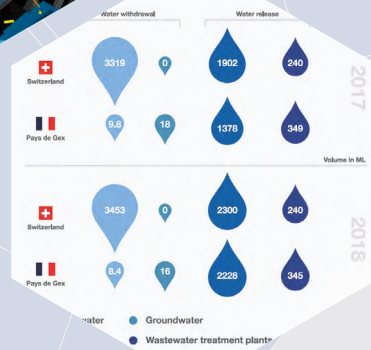
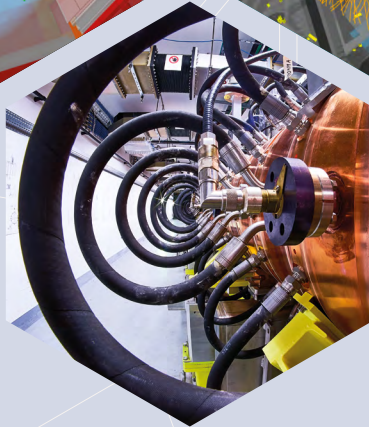
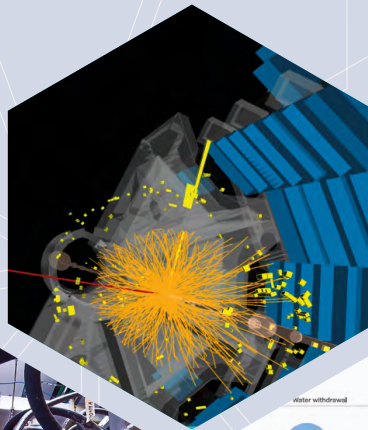
### 3 AOÛT

ICHEP2020 : ATLAS et CMS annoncent de nouveaux résultats montrant la désintégration du boson de Higgs en deux muons.  
(OPEN-PHO-EXP-2020-002-1)



### 5 AOÛT

ICHEP2020 : ATLAS observe des collisions de photons produisant des particules porteuses de la force faible, apportant un nouvel éclairage sur les interactions de ces particules.  
(ATLAS-PHOTO-2020-031-1)



### 20 AOÛT

Le Linac 4 remplace le Linac 2 en tant que premier accélérateur dans la chaîne d'injection du LHC.  
(CERN-PHOTO-201704-093-10)

### 9 SEPTEMBRE

Parution du premier rapport public du CERN sur l'environnement, qui décrit l'empreinte environnementale actuelle du Laboratoire et ses objectifs futurs.

## 18 SEPTEMBRE

L'ADIAS décerne le prix *Webby Honoree 2020* à l'équipe de communication du CERN pour sa vidéo en direct à 360° diffusée depuis la caverne de CMS.

(CERN-PHOTO-202009-119-2)



## 1<sup>ER</sup> OCTOBRE

Les autorités genevoises donnent leur feu vert à la construction du Portail de la science.



## 28 OCTOBRE

ELENA injecte des ions  $H^-$  et les achemine pour la première fois vers les expériences GBAR et ALPHA.

(CERN-PHOTO-201804-086-10)

## 10 NOVEMBRE

Chloé Delarue et Patricia Domínguez remportent la résidence artistique *Simetría*, qui se déroulera au CERN et à ALMA-ESO.

## 23 NOVEMBRE

Les cinq projets coordonnés par le CERN soumis aux appels à proposition de projets du programme Horizon 2020 obtiennent un financement de l'UE.  
(CERN-PHOTO-201809-249-16)



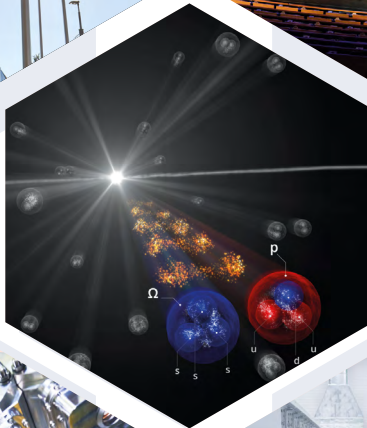
## 30 NOVEMBRE

Le CERN donne le coup d'envoi de *Sparks!*, nouveau forum sur l'innovation scientifique, dont le premier thème sera l'intelligence artificielle.  
(OPEN-PHO-ACCEL-2020-003-1)



## 9 DÉCEMBRE

La collaboration ALICE montre comment les collisions proton-proton au LHC peuvent révéler l'interaction forte entre les hadrons, ouvrant la voie à des études de haute précision sur la force forte.



## 11 DÉCEMBRE

Le Booster du PS reçoit son premier faisceau après une importante mise à niveau pendant le deuxième long arrêt.  
(CERN-PHOTO-202012-170-1)



## 11 DÉCEMBRE

Le CERN annonce une nouvelle politique de données ouvertes pour les expériences LHC.  
(IT-PHO-CCC-2021-001-13)



# LE CERN PARTICIPE À LA LUTTE CONTRE LA PANDÉMIE DE COVID-19

*En mars, la Directrice générale crée le groupe d'action « CERN against COVID-19 » afin de coordonner les idées et contributions de la communauté du CERN pour lutter contre la pandémie. Le CERN reste en permanence en contact avec la communauté médicale, s'appuyant, par exemple, sur l'accord de collaboration avec l'Organisation mondiale de la santé. Voici un résumé en images de certaines de ces initiatives, fondées sur la connaissance scientifique, le savoir-faire technique et les équipements disponibles au CERN, dans les États membres et ailleurs, et menées en étroite collaboration avec les institutions sanitaires et des experts d'autres domaines.*

**27 mars : Le CERN crée un groupe d'action chargé de recenser et de soutenir les contributions de l'Organisation à la lutte contre la pandémie de COVID-19.**

## AIDE À LA COMMUNAUTÉ LOCALE

Le Service de Secours et du Feu du CERN aide les ambulanciers suisses et français.



(CERN-PHOTO-202004-072-2)

(CERN-PHOTO-202004-062-1)

(CERN-PHOTO-202004-066-5)  
(CERN-PHOTO-202004-067-5)



Le CERN produit et livre des équipements de protection individuels à des services de première ligne de la région : visières de protection, parois transparentes et gel hydroalcoolique.



(CERN-PHOTO-202005-074-45)  
(CERN-PHOTO-202004-058-11)

## APPAREILS MÉDICAUX

Des physiciens et ingénieurs de la collaboration LHCb, avec le soutien de plusieurs départements du CERN, mettent au point le respirateur HEV.

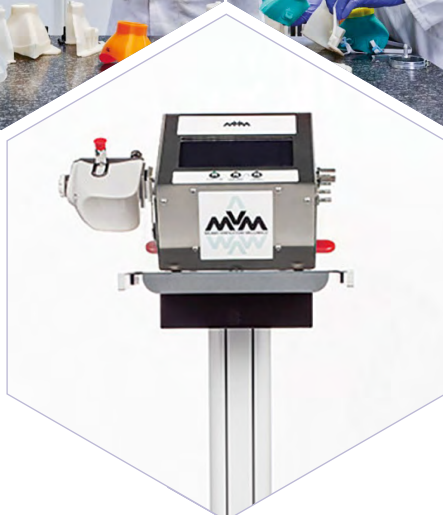
(CERN-PHOTO-202008-107-12)



(CERN-PHOTO-202005-077-5)



Les modèles de masques imprimés en 3D mis au point au CERN sont publiés sous la licence *Open Hardware* du CERN.



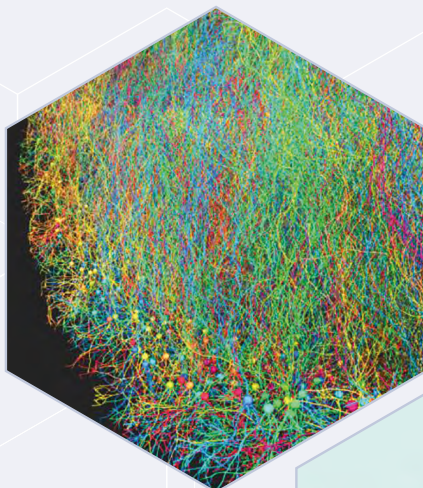
Le CERN soutient les projets MVM (*Mechanical Ventilator Milano*) de la collaboration GADM (*Global Argon Dark Matter*), et Openbreath, pour développer et produire des respirateurs évolutifs et peu coûteux.

## CALCUL ET ANALYSE DE DONNÉES



Zenodo et OpenAIRE préservent et partagent l'ensemble des données, logiciels, prétrages et tout autre objet de recherche en rapport avec la pandémie, afin d'aider la communauté scientifique à trouver des solutions contre ce fléau.

Le CERN fait équipe avec des épidémiologistes de l'Université de Genève pour modéliser les rythmes d'infection et de propagation de l'infection et la transmission du virus dans les espaces clos.



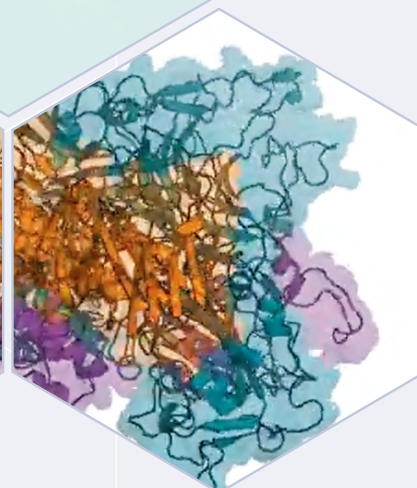
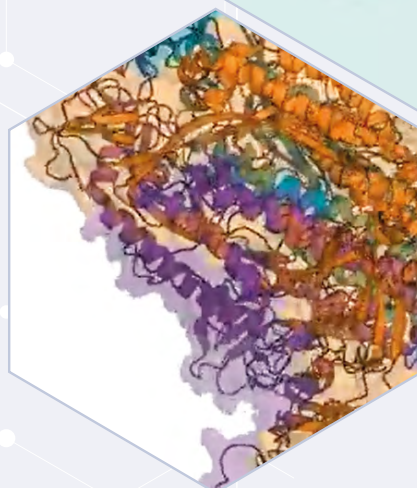
Exemple d'une simulation à grande échelle grâce à BioDynaMo.

Les ressources informatiques du CERN sont mobilisées pour le hackathon #VersusVirus, initiative soutenue par la Confédération suisse.

**ONLINE HACKATHON**  
28.5. – 31.5.2020  
**#VERSUSVIRUS**

Under the patronage of  
Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun Svizra  
Sveits Confederation  
Federal Department of Home Affairs FDHA  
Federal Department of Economic Affairs,  
Education and Research DARE

Le CERN et les sites de calcul du LHC soutiennent le projet de partage de puissance de calcul *Folding@home*, plateforme d'informatique distribuée qui modélise la dynamique moléculaire des protéines. Le CERN met à disposition environ 10 000 cœurs de processeurs de son principal centre de calcul.



Un lauréat du concours Background Challenge, organisé par le Bulletin du CERN en avril 2020.



## INFORMER ET MOBILISER LA COMMUNAUTÉ DU CERN PENDANT LA PANDÉMIE DE COVID-19

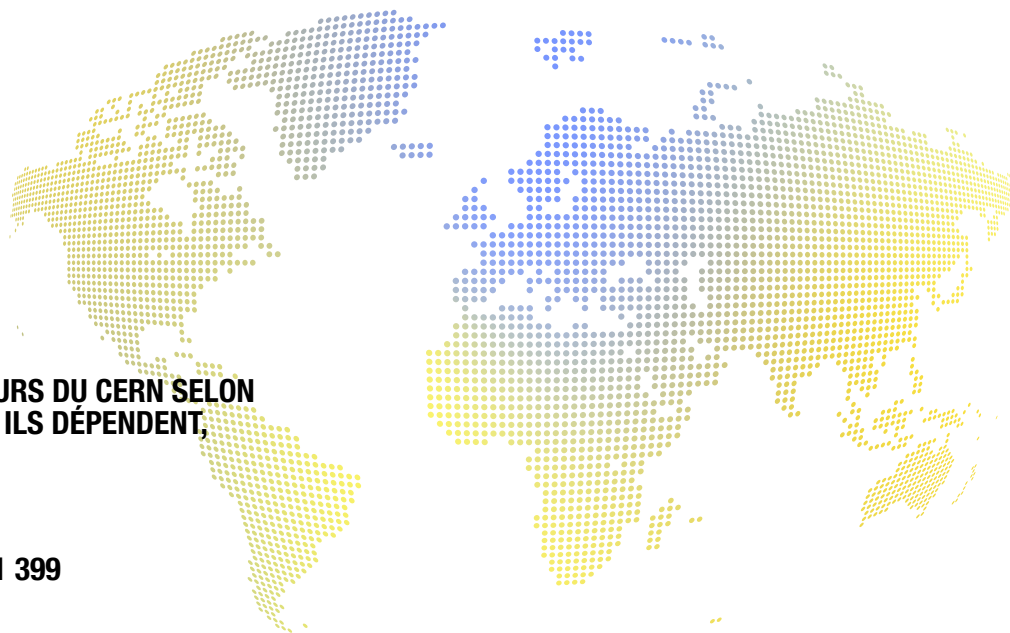
Une communication régulière permet à tous les membres du personnel d'être informés des mesures sanitaires mises en place au CERN, de rester connectés entre eux et de prendre part aux activités du Laboratoire, afin que les opérations se poursuivent en toute sécurité.

Un site web consacré à la pandémie regroupe les dernières informations utiles. On y trouve des actualités et des conseils pratiques pour rester en bonne santé et garder le lien avec

ses collègues. Quatre réunions publiques en ligne sont organisées, avec des sessions de questions-réponses avec la Directrice générale et la Direction du CERN. Des messages vidéo de la Directrice générale, des directeurs et des chefs de département sont produits et partagés avec la communauté. Pendant le mode sécurisé (de mars à mai), le *Bulletin du CERN* passe à une fréquence hebdomadaire, et à compter de septembre, des bulletins d'informations COVID-19 sont envoyés chaque semaine au personnel.

# UN LABORATOIRE POUR LE MONDE

*Haut lieu de la coopération scientifique internationale, le CERN a, en 2020 encore, servi de vivier à une communauté scientifique multiculturelle, vive et diligente. Malgré les nombreux défis liés à la pandémie de COVID-19, cette grande famille forte de 16 400 personnes a su rester unie et attentive au bon déroulement des nombreuses activités du Laboratoire. Deux mille six cents membres du personnel ont ainsi poursuivi les travaux de développement, de construction et d'exploitation du complexe d'accélérateurs et de détecteurs, véritable système nerveux du CERN, tout en analysant les données produites. Cette infrastructure colossale et cette pléthore de données ont en outre servi un programme de recherche mené par près de 11 400 utilisateurs comptant 110 nationalités et rattachés à des instituts dans 76 pays.*



## RÉPARTITION DES UTILISATEURS DU CERN SELON LE PAYS DE L'INSTITUT DONT ILS DÉPENDENT, AU 31 DÉCEMBRE 2020

**NOMBRE D'UTILISATEURS : 11 399**

### ÉTATS MEMBRES (6 632)

Allemagne 1 185 – Autriche 82 – Belgique 122 – Bulgarie 37 – Danemark 35 – Espagne 325 – Finlande 79 – France 794 – Grèce 138  
Hongrie 67 – Israël 63 – Italie 1 388 – Norvège 78 – Pays-Bas 166 – Pologne 272 – Portugal 80 – Roumanie 99 – Royaume-Uni 875  
Serbie 35 – Slovaquie 66 – Suède 96 – Suisse 329 – Tchéquie 221

### ÉTATS MEMBRES ASSOCIÉS EN PHASE PRÉALABLE À L'ADHÉSION (27)

Chypre 11 – Slovénie 16

### ÉTATS MEMBRES ASSOCIÉS (390)

Croatie 38 – Inde 151 – Lituanie 13 – Pakistan 35 – Turquie 124 – Ukraine 29

### OBSERVATEURS (3 071)

États-Unis d'Amérique 1 839 – Japon 211 – Russie 1 021

### AUTRES PAYS (1 279)

Afrique du Sud 57 – Algérie 2 – Argentine 15 – Arménie 10 – Australie 23 – Azerbaïdjan 2 – Bahreïn 2 – Bélarus 26 – Brésil 108 – Canada 196  
Chili 22 – Colombie 15 – Cuba 3 – Égypte 14 – Émirats arabes unis 2 – Équateur 4 – Estonie 26 – Géorgie 35 – Hong Kong 20 – Indonésie 7  
Iran 13 – Irlande 6 – Islande 3 – Jordanie 5 – Koweït 2 – Lettonie 6 – Liban 17 – Malaisie 4 – Malte 3 – Maroc 18 – Mexique 49 – Monténégro 5  
Nouvelle Zélande 11 – Oman 1 – Pérou 2 – Porto Rico 2 – République de Corée 132 – République populaire de Chine 334 – Singapour 3  
Sri Lanka 8 – Taiwan 50 – Thaïlande 16





(CERN-PHOTO-202001-011-4)

Le CERN est un laboratoire ancré dans un espace européen résolument tourné vers le monde. En 2020, l'Organisation a ainsi poursuivi l'intensification de ses relations avec de nombreux États, instituts et laboratoires du monde entier. Tout d'abord, les discussions visant à l'élargissement de l'Organisation dans l'espace européen ont abouti à la signature en juin 2020 d'un accord avec l'Estonie qui confèrera au pays le statut d'État membre associé en phase préalable à l'adhésion après l'entrée en vigueur de l'accord en février 2021. En parallèle, le processus d'accession de la Lettonie au statut d'État membre associé s'est poursuivi en 2020. La politique de rayonnement international du CERN s'est également traduite en 2020 par l'accès des États-Unis au statut d'observateur à l'égard du projet LHC à haute luminosité. L'Organisation a également signé un accord de coopération internationale avec la Macédoine du Nord, ainsi qu'un accord scientifique avec le Centre brésilien de recherche sur l'énergie et les matériaux. Le CERN ne déroge pas à sa volonté d'enrichir et de catalyser la recherche menée en son sein grâce aux échanges d'idées et de savoir-faire que ces partenariats intensifient.

*Le CERN signe un accord de collaboration avec le Centre brésilien de recherche sur l'énergie et les matériaux.*  
(CERN-PHOTO-202012-166-17)



*En juin, le réseau des alumni du CERN a fêté son 3<sup>e</sup> anniversaire lors d'un événement en direct depuis le tunnel du Linac 4. (CERN-VIDEO-2020-032-001)*

Le rayonnement international du CERN repose également sur un réseau d'alumni connectés et dynamiques. Les membres du personnel et anciens du CERN mis en contact à travers ce réseau misent sur l'entraide et le partage de compétences pour mettre l'expérience acquise au CERN au service de carrières épanouies dans des domaines variés. Véritable creuset regroupant des profils très divers liés par leur attachement à l'Organisation, le réseau est un espace dans lequel se perpétue l'esprit de la communauté CERN au sein et à l'extérieur du Laboratoire. Il est institutionnalisé et accompagné depuis maintenant plus de trois ans par le programme *CERN Alumni*, qui comptait en 2020 quelque 6 583 membres répartis dans plus de 100 pays, et neuf groupes régionaux (Autriche, États-Unis, Grèce, Italie, Pays-Bas, Royaume-Uni et Suisse). La diversité des profils des alumni se reflète dans les nombreux événements organisés par le réseau : en 2020 encore, et malgré les obstacles liés à la pandémie de COVID-19, une sélection d'événements en ligne a permis aux alumni de s'informer sur des aspects spécifiques de la mission du CERN grâce à la série « *News*



*from the lab* » (Nouvelles du laboratoire), ou d'explorer leurs éventuelles possibilités de réorientation à travers la série d'ateliers « *Moving Out of Academia to* » (« Quitter le monde de la recherche pour... »), dont le succès s'est confirmé avec la dernière édition « *Moving Out of Academia to Medtech* », en septembre. Ces événements réunissent et rapprochent les membres de ce réseau dynamique, qui s'est désormais établi en tant qu'espace idéal pour tisser de nouveaux liens et partager des expériences.

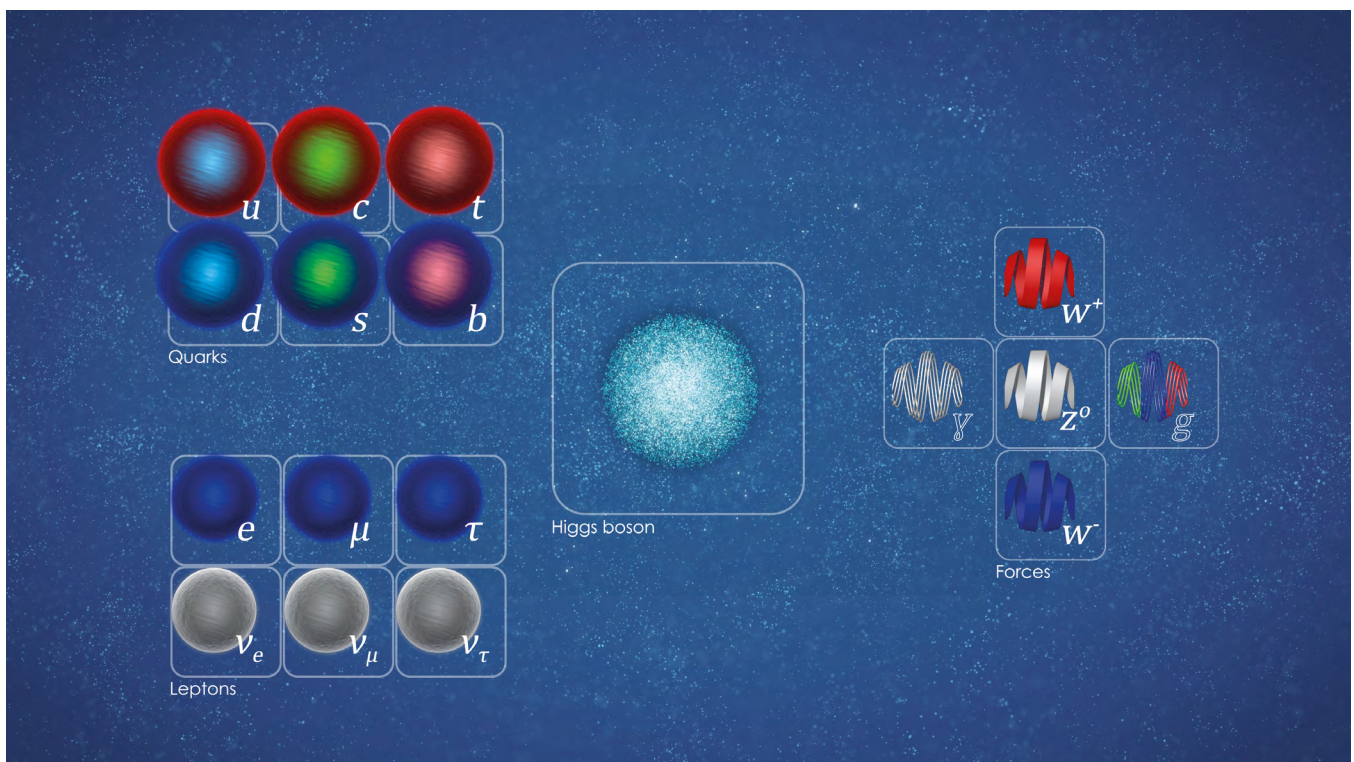
# EXPLORER LA NATURE DE L'UNIVERS

*Le CERN explore la structure fondamentale de notre Univers grâce à un complexe d'accélérateurs perfectionné, capable de générer des collisions entre faisceaux de particules ou de projeter ces faisceaux sur des cibles fixes. Les résultats sont enregistrés par des détecteurs géants et analysés par des milliers de physiciens, au CERN ou ailleurs.*

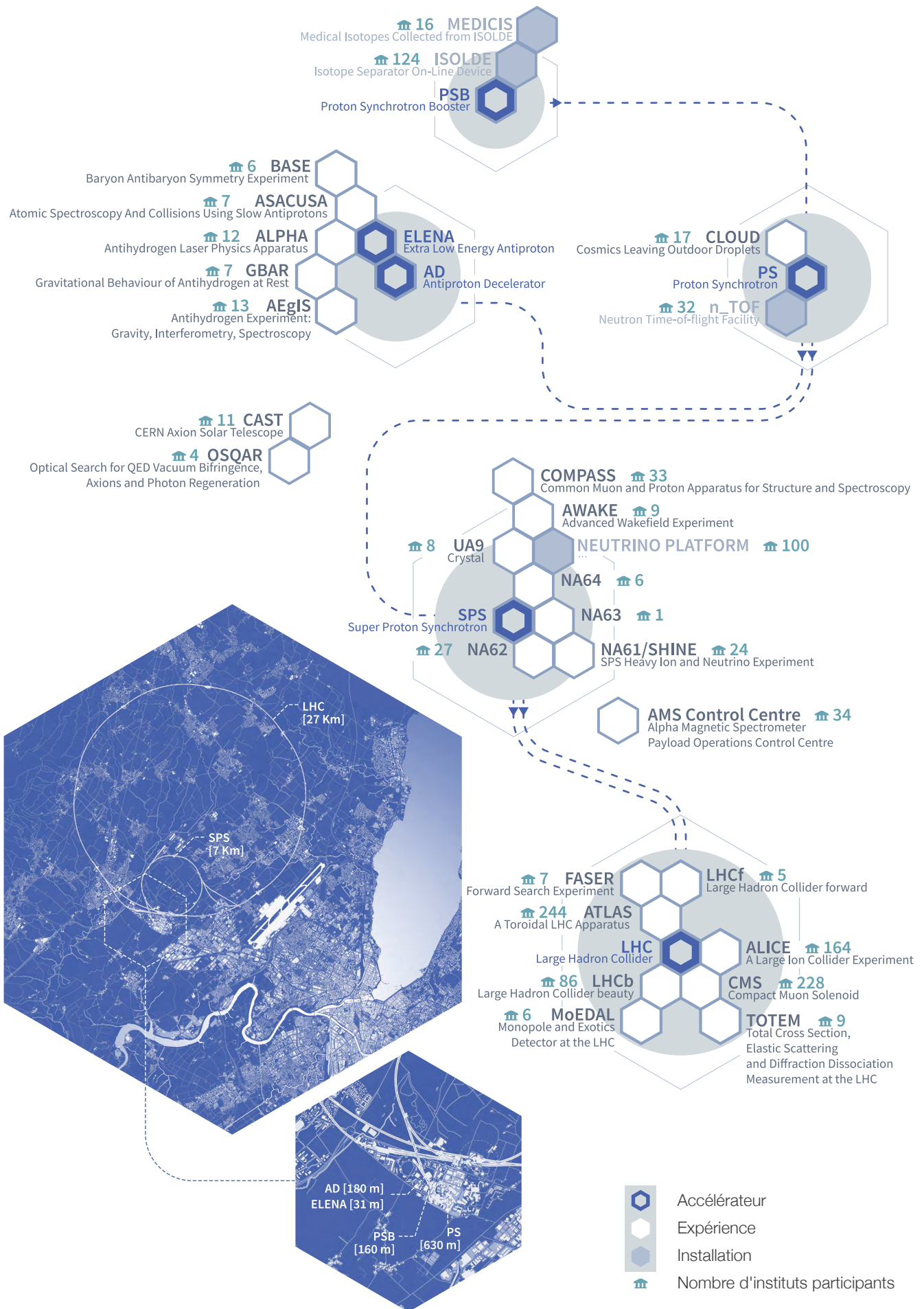
## LE COMPLEXE D'ACCÉLÉRATEURS ET LES EXPÉRIENCES

Le Grand collisionneur de hadrons (LHC) est l'accélérateur phare du CERN. Il fait entrer en collision des faisceaux de protons aux plus hauts niveaux d'énergie jamais atteints dans des machines, et les résultats sont enregistrés par sept expériences (ALICE, ATLAS, CMS, LHCb, LHCf, MoEDAL et TOTEM) et bientôt par une nouvelle expérience, FASER. Le deuxième long arrêt du LHC, initié fin 2018, s'est poursuivi en 2020, avec d'importants travaux de maintenance et d'amélioration sur les machines et les expériences. Malgré cet arrêt technique et la pandémie de COVID-19, 2020 a été

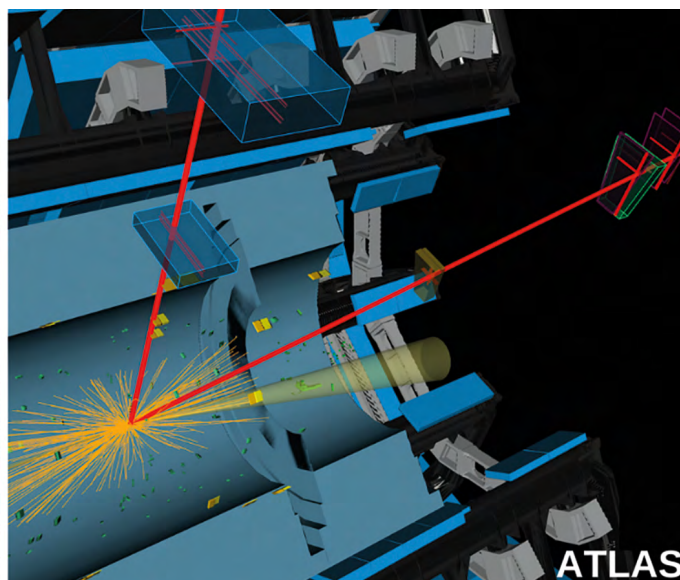
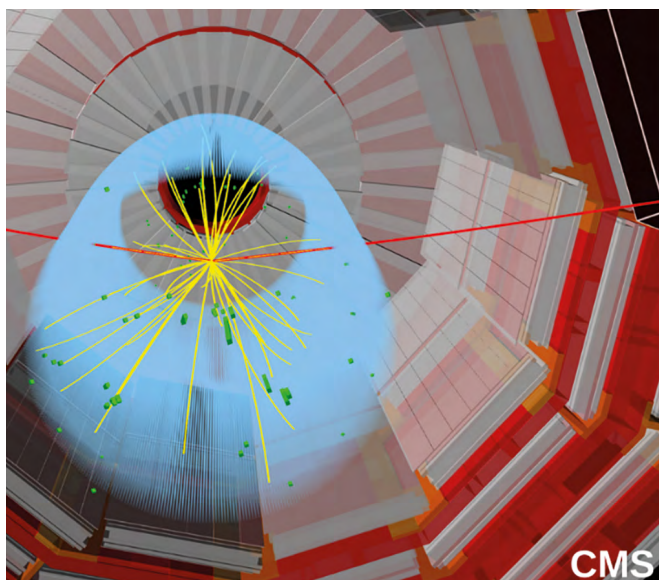
très productive : achèvement du processus de la mise à jour de la stratégie européenne pour la physique des particules (voir p. 47), mais aussi plusieurs résultats de physique remarquables issus de l'analyse des données collectées avant l'arrêt par des expériences LHC et hors LHC. Parmi ces résultats, on peut citer l'observation des premiers signes d'interaction du boson de Higgs avec des particules de deuxième génération, celle d'une nouvelle forme d'asymétrie matière-antimatière dans les particules Bs, et la démonstration d'une technique révélant les dynamiques de l'interaction forte entre des particules composites appelées hadrons. Le 30 mars, le programme de physique du LHC, dont les expériences ont publié près de 3 000 articles scientifiques, a célébré son dixième anniversaire.



Particules du Modèle standard de la physique des particules. (OPEN-PHO-CHART-2015-001)



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 deux muons, enregistrés par les expériences CMS (à gauche) et ATLAS (à droite). (OPEN-PHO-EXP-2020-002-1)

ATLAS ET CMS ONT PRÉSENTÉ LES PREMIERS INDICES D'UNE INTERACTION ENTRE LE BOSON DE HIGGS ET UN MUON, C'EST-À-DIRE UN FERMION DE DEUXIÈME GÉNÉRATION.

## LE BOSON DE HIGGS ET LA DEUXIÈME GÉNÉRATION

Les collaborations ATLAS et CMS étudient le boson de Higgs et ses interactions avec les autres particules, depuis sa découverte en 2012. Dans le Modèle standard, c'est lui qui donne leur masse aux particules élémentaires. Ainsi, la force de l'interaction du boson de Higgs avec ces particules est proportionnelle à leur masse. Tout écart par rapport à cette relation pourrait ouvrir la voie à une nouvelle physique. ATLAS et CMS étudient les interactions du boson de Higgs en étudiant sa désintégration en particules plus légères, ou la manière dont il est produit en association avec d'autres particules. Les deux expériences ont précédemment observé l'interaction du boson de Higgs avec d'autres bosons et les fermions élémentaires les plus lourds. Les fermions élémentaires (quarks et leptons) sont classés en trois générations de masse croissante. ATLAS et CMS ont déjà observé les interactions du boson de Higgs avec la troisième génération (la plus lourde) de fermions – le lepton tau et les quarks t et b. En revanche, les interactions plus faibles avec les fermions plus légers de deuxième génération – le muon et les quarks c et s – restaient insaisissables.

ATLAS et CMS ont poursuivi leur exploration poussée du boson de Higgs et ont présenté les premiers indices d'une interaction avec un muon, c'est-à-dire un fermion de deuxième génération. CMS a mis en évidence la désintégration du boson de Higgs en deux muons avec une signification statistique de trois écarts-types, alors qu'ATLAS

a atteint une signification statistique de deux écarts-types. La combinaison des deux résultats permettrait de dépasser les trois écarts-types, constituant une confirmation solide de la désintégration du boson de Higgs en deux muons.

Les deux expériences ont également découvert de nouvelles signatures du boson de Higgs. ATLAS a présenté les résultats de sa recherche d'un processus rare de transformation du Higgs en un boson Z et un photon ( $\gamma$ ), alors que CMS a présenté les résultats de sa première recherche de transformations rares du Higgs dans lesquelles intervient également un boson Z, mais accompagné d'un méson  $\rho$  (rho) ou  $\phi$  (phi).

On retiendra également la recherche de signes de transformation du boson de Higgs en particules susceptibles de constituer la matière noire, qui représente plus de cinq fois la masse de la matière ordinaire dans l'Univers. ATLAS a obtenu une limite supérieure concernant la probabilité qu'un boson de Higgs se transforme en des particules invisibles dénommées WIMP (particules massives interagissant faiblement), alors que CMS a obtenu des résultats d'une nouvelle recherche portant sur les transformations du Higgs en quatre leptons via au moins un « photon noir » intermédiaire, présentant également des limites sur la probabilité d'une telle transformation au LHC.

## TESTER LE MODÈLE STANDARD ET SES EXTENSIONS

Les collaborations LHC continuent à scruter le Modèle standard et ses extensions. LHCb a observé une nouvelle forme d'asymétrie matière-antimatière dans les mésons  $B_s^0$ . Ce résultat, important pour l'étude de l'asymétrie entre matière et antimatière, complète la précédente observation de la violation de CP intégrée sur la durée chez ces mêmes mésons. Dans cette observation, l'amplitude de la violation varie avec la durée de vie en raison des oscillations spontanées d'une particule en son antiparticule et réciproquement. Les mésons  $B_s^0$  oscillent 3 000 milliards de fois par seconde, mais l'excellente résolution du détecteur LHCb permet d'observer les effets de ces oscillations.

À l'actif de LHCb également, la mesure la plus précise jamais réalisée de l'angle  $\gamma$  dans un triangle lié à la matrice Cabibbo-Kobayashi-Maskawa, qui quantifie la force des interactions entre les quarks de différents types et la possible violation de CP dans les quarks. Ou encore, la découverte de plusieurs nouvelles particules composites faites de quarks, dont de nouveaux baryons b et deux particules exotiques formées de quatre quarks, ou tétraquarks : l'une composée de quatre quarks c et l'autre ne comptant qu'un seul quark c. Ces nouvelles particules exotiques sont un « laboratoire » idéal pour l'étude de l'interaction forte.

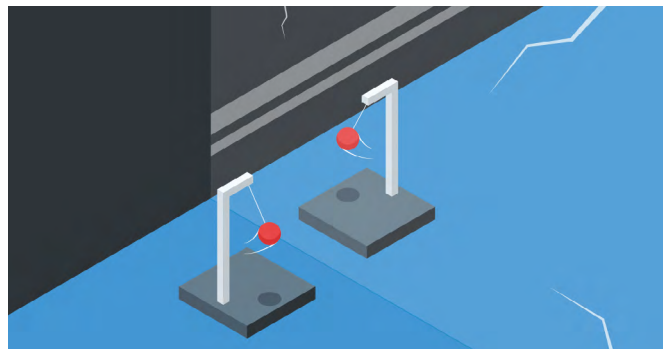
LHCb a par ailleurs poursuivi ses recherches sur des anomalies par rapport au Modèle standard constatées lors de certaines désintégrations de mésons B. La collaboration a notamment présenté une nouvelle analyse de données issues de la désintégration d'un méson  $B^0$  en un méson  $K^*$  et une paire de muons. Lors d'études précédentes, elle avait découvert un écart par rapport aux prédictions du Modèle standard dans le paramètre  $P_5^1$ , calculé à partir de la distribution des angles des produits de désintégration du  $B^0$  par rapport au  $B^0$  initial. Après l'ajout de nouvelles données à ses analyses, on constate encore un écart par rapport au Modèle standard pour certains paramètres, dont le paramètre  $P_5^1$ . Comme dans les analyses précédentes, le résultat ne suffit pas à établir une preuve irréfutable, mais constitue un apport important aux travaux sur l'origine de ces anomalies.

Outre ses résultats relatifs au Higgs, ATLAS a réalisé deux études pour lesquelles le LHC a été utilisé comme collisionneur de photons. L'une de ces études a permis d'observer des collisions de photons produisant des paires de bosons W. Le résultat confirme l'une des principales prédictions de la théorie électrofaible, à savoir que les particules porteuses de force peuvent interagir avec elles-mêmes, et ouvre la voie à de nouveaux moyens d'exploration. Une autre étude a permis l'observation directe et la mesure de deux photons se transformant en matière, plus précisément en une paire de leptons. De telles mesures sont importantes pour comprendre comment la lumière interagit avec la matière aux plus hautes énergies atteintes en laboratoire. À signaler également les nouvelles limites fixées pour des leptons supersymétriques à longue durée de vie, détrônant celles établies au LEP, une mesure précise du phénomène d'universalité de la saveur des leptons dans la

désintégration des bosons W suggérant que l'écart mesuré précédemment au LEP serait dû à une fluctuation, et enfin une nouvelle recherche de matière noire aboutissant aux limites les plus strictes jamais fixées dans une expérience avec collisionneur.

En ce qui concerne CMS, outre les résultats liés au Higgs, l'expérience a enregistré la première observation de la production simultanée de trois bosons W ou Z. Ce phénomène extrêmement rare permet d'explorer l'auto-interaction quartique entre ces bosons. La collaboration a également observé pour la première fois la désintégration d'un méson  $B_s^0$  en un méson  $\phi$  et un candidat pour un tétraquark appelé  $\chi_{c1}(3872)$ , constatant que le taux de désintégration du  $B_s^0$  en ces deux particules est environ deux fois plus faible que dans le cas de la désintégration d'un méson  $B^+$  en un  $\chi_{c1}(3872)$  et un méson  $K^+$ . Cet écart pourrait permettre de mieux comprendre la nature du  $\chi_{c1}(3872)$ . L'année a également été marquée par la première mesure du taux de production associée d'un boson W et d'un photon dans des collisions proton-proton à une énergie de 13 TeV, qui s'est avéré conforme aux prédictions du Modèle standard ; par la définition de limites parmi les plus contraignantes concernant l'existence de leptoquarks qui interagiraient avec des quarks et des leptons de troisième génération, qui a permis d'exclure une partie de la gamme de masses envisageables pour expliquer les anomalies du méson B, et par la recherche de particules à longue durée de vie se désintégrant en jets, qui a permis d'établir des limites intéressantes dans différents modèles théoriques.

Les expériences TOTEM, LHCf et MoEDAL ont aussi obtenu des résultats notables en 2020 : mesures par LHCf de quantités liées à la production de photons et de neutrons dans des collisions proton-proton à de petits angles par rapport à la ligne de collision ; résultats obtenus par MoEDAL lors de la première recherche directe de particules chargées électriquement et magnétiquement, et publication par TOTEM de mesures de sections efficaces proton-proton à des énergies situées entre 2,7 et 13 TeV. FASER, nouvelle expérience du LHC approuvée en 2019 pour la recherche de particules légères interagissant faiblement, est en cours d'installation et devrait être en place en 2021.



Dans une transformation selon la symétrie de CP, une particule est échangée avec l'image miroir de son antiparticule. LHCb a observé la brisure de cette symétrie dans les désintégrations de mésons b étranges (sphère rouge à gauche) oscillant en leurs antiparticules (oscillation illustrée par le mouvement du pendule).

(CERN-HOMEWEB-PHO-2020-121-4)

## L'UNIVERS D'ALICE

Le LHC génère aussi des collisions de noyaux de plomb et d'autres ions lourds, tels que des noyaux de xénon. Ces collisions recréent le plasma quarks-gluons, l'état dense de quarks et de gluons en liberté qui aurait existé juste après le Big Bang. Le plasma recréé ne peut pas être observé directement, mais les expériences LHC peuvent déduire ses propriétés et ses effets à partir des signatures qu'il laisse sur les particules produites dans les collisions. La collaboration ALICE, spécialisée dans ces collisions, a mesuré dans des collisions plomb-plomb le flux elliptique d'hadrons contenant un quark c, lié soit à un quark léger (formant un méson D), soit à un antiquark c (formant un méson  $J/\psi$ ). L'équipe a constaté que, pour une faible impulsion, le flux elliptique des mésons D n'est pas aussi important que celui des pions, qui ne contiennent que des quarks légers, alors que le flux elliptique des mésons  $J/\psi$  est plus faible que celui des deux autres. Ce résultat indique que les quarks c lourds sont entraînés par l'expansion du plasma quarks-gluons, mais probablement dans une moindre mesure que les quarks légers, et que les mésons D comme les mésons  $J/\psi$ , à de faibles impulsions, sont en partie formés par la liaison de quarks en mouvement. Une autre mesure réalisée par ALICE concernant le flux d'électrons issu de désintégrations d'hadrons B, qui contiennent un quark b, indique que les quarks b sont également sensibles à l'élongation du plasma.

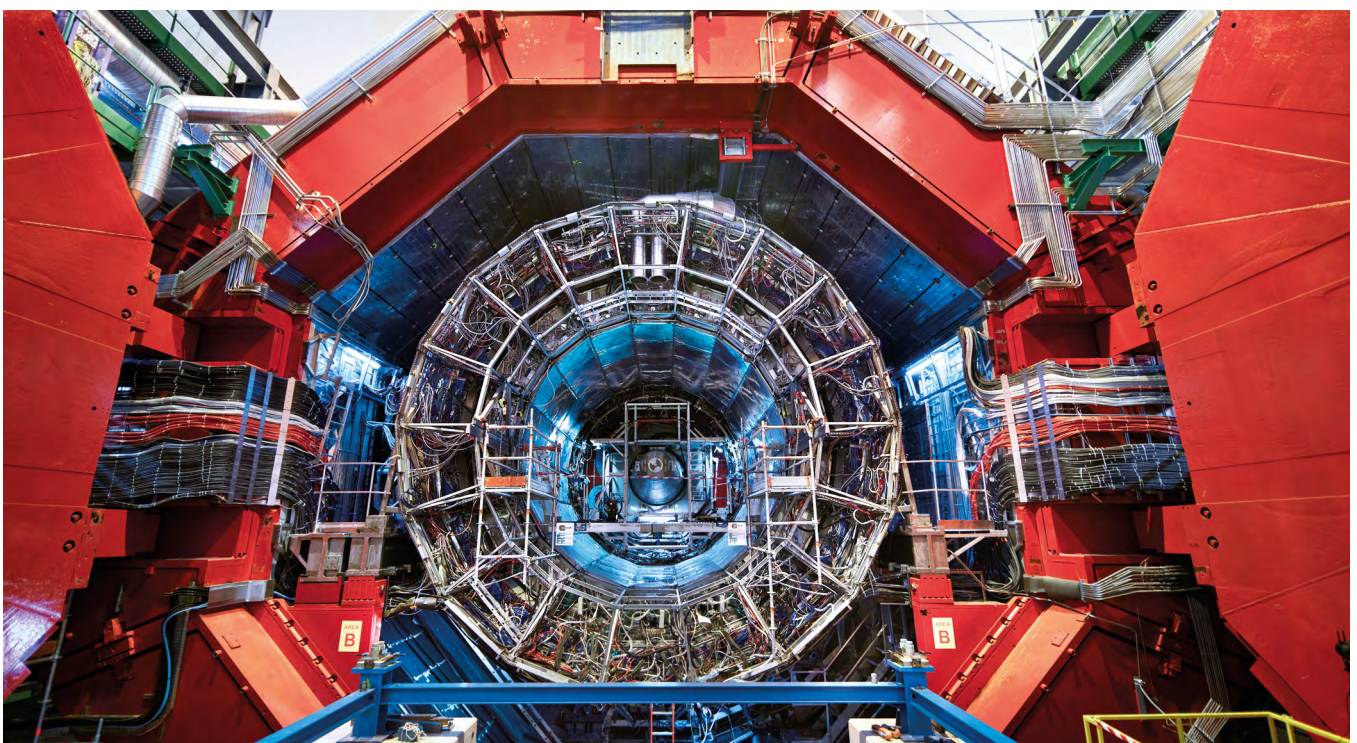
ALICE a également présenté des mesures de la production de muons issus de désintégrations d'hadrons contenant des quarks lourds, dans des collisions de noyaux de plomb et de noyaux de xénon plus petits. Les mesures révèlent que ces deux systèmes de collisions se caractérisent par

une réduction de la production de muons par rapport aux collisions proton-proton. Cette réduction est causée par la perte d'énergie des quarks lourds qui traversent le plasma, et s'avère être la même dans les collisions de noyaux de plomb et de noyaux de xénon produisant un nombre similaire de particules.

Par ailleurs, ALICE a obtenu des résultats notables à partir de collisions proton-proton concernant les probabilités de production et d'annihilation d'antideutérons (équivalents dans l'antimatière des noyaux de deutérium) dans les collisions proton-proton ; ces mesures sont fondamentales pour modéliser la production et l'absorption des antideutérons dans l'espace intersidéral. Cette modélisation est nécessaire pour interpréter les données issues d'expériences qui sont à la recherche d'antideutérons, ceux-ci pouvant être générés par des annihilations ou des désintégrations de matière noire ou par d'autres sources, telles que des collisions de rayons cosmiques de haute énergie avec le milieu interstellaire.

Une autre étude d'ALICE montre comment une technique fondée sur la mesure de la différence d'impulsion entre les hadrons produits lors des collisions proton-proton auprès du LHC peut être utilisée pour révéler la dynamique de l'interaction forte entre ces particules. Cette technique avait déjà permis à ALICE d'étudier des interactions entre plusieurs types d'hypérons (hadrons contenant un ou plusieurs quarks s). Cette fois, l'équipe a eu recours à la technique décrite pour étudier avec une grande précision l'interaction entre un proton et l'hypéron Omega, qui contient trois quarks s. Cette mesure permet de comparer les prédictions des calculs de chromodynamique quantique (CDQ) sur réseau et représente une base d'évaluation solide pour des travaux théoriques ultérieurs.

*ALICE a montré que les collisions proton-proton au LHC permettent d'explorer l'interaction forte. (CERN-PHOTO-202008-104-64)*





*L'expérience ALPHA dans le hall du Décélérateur d'antiprotons, au CERN. (CERN-EX-1011301-01)*

## PERSPECTIVES THÉORIQUES

En 2020, le département Physique théorique du CERN (TH) a mené des recherches de pointe venant appuyer les activités du Laboratoire et servir la communauté internationale de la physique théorique. Ces recherches portaient sur plusieurs domaines allant des théories des cordes et du champ quantique à la physique des collisionneurs, en passant par la cosmologie et l'astrophysique des particules.

Elles ont donné lieu au dépôt de plus de 280 articles sur le serveur arXiv. Parmi les éléments notables qui en sont ressortis figurent des mesures précises de processus du Modèle standard ; une méthode efficace fondée sur l'apprentissage automatique pour identifier les signes de nouvelle physique au LHC ; plusieurs études relatives à la matière noire, notamment sur la production de trous noirs au centre de corps célestes ; l'interprétation de l'observation par NANOGrav (Observatoire nord-américain des nanohertz pour les ondes gravitationnelles) d'un fond stochastique d'ondes gravitationnelles produit par des cordes cosmiques ; la possible résolution d'une anomalie dans les mesures de la constante de Hubble, qui correspond à la vitesse d'expansion de l'Univers ; et la mise au point de méthodes analytiques permettant d'appliquer des contraintes non perturbatives sur la structure de diffusion des particules.

Le département a activement participé aux études de physique relatives à la stratégie européenne pour la physique des particules, et il a apporté une contribution fondamentale au Centre de physique du LHC du CERN, ainsi qu'aux groupes de travail sur la physique du LHC et sur les projets de futurs collisionneurs (CLIC et FCC). Il a joué un rôle de premier plan dans des initiatives de recherche d'une nouvelle physique, à la fois dans le cadre de la plateforme neutrino (voir p. 52) et de la physique hors collisionneurs (voir p. 53).

En raison de la pandémie de COVID-19, le département a accueilli moins de personnes que les années précédentes : 178 scientifiques (20 associés, 116 visiteurs scientifiques payés et 42 visiteurs scientifiques non payés). Les instituts de théorie accueillis par le département ont également été touchés, puisque seuls trois programmes ont eu lieu cette année. Cependant, le département a organisé un grand nombre d'activités scientifiques virtuelles (séminaires, ateliers, tables rondes) qui ont eu beaucoup de succès.

## L'ANTIMATIÈRE

Le Décélérateur d'antiprotons (AD) du CERN fournit des antiprotons de basse énergie aux expériences qui étudient les propriétés des antiprotons, des atomes antiprotoniques et de l'antihydrogène. Ces études permettent de comparer avec une finesse croissante le comportement de la matière et celui de l'antimatière, afin de tester avec précision une symétrie fondamentale du Modèle standard et un principe fondamental de la relativité générale. En 2020, l'AD a accueilli cinq expériences : ALPHA, AEGIS, ASACUSA, BASE et GBAR. Toutes ces expériences ont été reliées au nouvel anneau ELENA, qui ralentit encore davantage les antiprotons, pour qu'ils puissent être plus facilement piégés par les expériences. Plusieurs améliorations techniques ont été entamées et se poursuivront en 2021, pour accroître le potentiel de mesure des expériences une fois que le complexe d'accélérateurs sera de nouveau opérationnel.

Parmi les résultats publiés figurent la première mesure par ALPHA au CERN de deux effets quantiques, la structure fine et le déplacement de Lamb, dans la structure énergétique de l'atome d'antihydrogène, l'équivalent en antimatière de l'hydrogène. Ces mesures concordent avec les prédictions théoriques de ces effets dans l'hydrogène « ordinaire », et ouvrent la voie à des mesures plus précises de ces grandeurs et d'autres effets fondamentaux.

Autres résultats notables, la production par ASACUSA à l'Institut Paul Scherrer – grâce à des équipements du CERN – d'un atome exotique d'hélium pionique, prédit par la théorie mais jamais vérifié expérimentalement, et la réalisation des premières mesures de la façon dont cet atome absorbe la lumière laser et résonne avec celle-ci. Ce nouvel atome consiste en un noyau de l'isotope hélium-4, un électron et un pion de charge négative à un niveau d'énergie plus élevé. Il s'agit de la première mesure spectroscopique au laser d'un atome exotique contenant un méson. Les mesures spectroscopiques au laser d'atomes exotiques pourraient être utilisées pour déterminer avec une grande précision la masse et les autres propriétés des mésons, et également pour fixer des limites sur d'éventuelles nouvelles forces agissant sur les mésons.



Une partie du hall d'expérimentation d'ISOLDE. (CERN-PHOTO-201911-394-9)

## LE MONDE DES NOYAUX

L'installation de physique nucléaire ISOLDE envoie sur une cible un faisceau de protons de 1,4 GeV issu du Booster du PS afin de générer des faisceaux d'ions radioactifs exotiques pour des études dans les domaines de la physique nucléaire et atomique, de la physique du solide et des sciences de la vie. Ces faisceaux exotiques peuvent être réaccélérés à l'aide des accélérateurs linéaires REX et HIE-ISOLDE, qui permettent d'atteindre des énergies proches de 10 MeV par nucléon (proton ou neutron). En raison de l'arrêt en cours, aucune expérience n'a été menée à ISOLDE en 2020. Néanmoins, plusieurs améliorations ont été apportées aux expériences et de nombreux résultats ont été obtenus à partir de l'analyse des données collectées avant l'arrêt.

L'un des temps forts de l'année a été la mesure de l'affinité électronique de l'astate, l'élément chimique le plus rare sur Terre (on en compte seulement 70 mg dans la croûte terrestre). L'affinité électronique est l'énergie qui se dégage lorsqu'un électron est ajouté à un atome neutre à l'état gazeux pour former un ion négatif, et il s'agit de l'une des propriétés les plus fondamentales d'un élément chimique. Ce résultat est important pour la recherche, aussi bien fondamentale qu'appliquée : il révèle des propriétés jusqu'ici inconnues de cet élément et permet de tester des modèles théoriques, et présente également un intérêt pratique, l'astate étant un candidat prometteur pour la création de composés chimiques destinés au traitement du cancer par thérapie alpha ciblée.

Parmi les autres résultats notables, il a été découvert que le noyau du  $^{222}\text{Ra}$  (isotope du radium) a une forme de poire stable, alors que le  $^{228}\text{Ra}$  oscille entre la forme d'une

poire et son image miroir. Ces résultats ont permis aux chercheurs de conclure qu'il n'y a à ce jour dans la nature que trois cas ( $^{222}\text{Ra}$ ,  $^{224}\text{Ra}$  et  $^{226}\text{Ra}$ ) pour lesquels il existe une preuve irréfutable d'un noyau en forme de poire. Ces noyaux servent à tester les théories nucléaires existantes, et ils pourraient être utilisés pour la recherche d'un moment dipolaire électrique dans les particules, en particulier lorsqu'ils font partie de molécules telles que le monofluorure de radium. Les toutes premières mesures du monofluorure de radium par spectroscopie laser, réalisées par ISOLDE et publiées en 2020, constituent un pas important en ce sens.

ISOLDE a également commencé à s'aventurer dans une région presque inexplorée de la carte des nucléides, avec une première étude de la structure neutronique de l'isotope du mercure  $^{207}\text{Hg}$ , qui est un voisin relativement proche de noyaux concernés par un processus responsable de la production d'environ la moitié des noyaux plus lourds que le fer.

## NOUVELLES DE L'ESPACE

Arrimé à la Station spatiale internationale et commandé par un centre de contrôle au CERN, le Spectromètre magnétique alpha (AMS-02) continue de surprendre avec ses observations des rayons cosmiques, particules chargées qui voyagent dans l'espace à des énergies pouvant atteindre des milliers de milliards d'électronvolts. L'année a débuté avec une série de sorties dans l'espace très complexes, réalisées sur une période de six mois, visant à remplacer le système de refroidissement d'AMS afin de prolonger la durée de vie de l'expérience. Plus tard dans l'année, l'équipe d'AMS a présenté de nouvelles mesures sur les variations





Le détecteur AMS sur la Station spatiale internationale.

des flux de rayons cosmiques primaires lourds – les noyaux lourds de néon, de magnésium et de silicium – en fonction de la rigidité (valeur liée à l'impulsion d'une particule chargée dans un champ magnétique). Elle a découvert que les flux du néon, du magnésium et du silicium présentent une relation fonctionnelle à la rigidité identique, ce qui est inattendu, lorsque la rigidité dépasse 86,5 GV, avec, au-dessus de 200 GV, un écart inexplicable par rapport aux prédictions de

la théorie en vigueur concernant l'origine et la propagation des rayons cosmiques. Par ailleurs, la relation fonctionnelle observée est différente de celle précédemment mesurée par AMS pour des rayons cosmiques primaires plus légers que sont l'hélium, le carbone et l'oxygène. La théorie actuelle de l'origine et de la propagation des rayons cosmiques se trouve ainsi à nouveau remise en question.

## CIBLES FIXES ET AUTRES

D'autres expériences basées au CERN, dont beaucoup sont alimentées par des faisceaux du Booster du PS, du PS et du SPS, ont aussi réalisé de grandes avancées. L'une d'elles est l'expérience CLOUD, qui étudie la formation des aérosols et des nuages dans une chambre ultra-pure. En 2020, elle a mis au jour un nouveau mécanisme responsable d'épisodes de pollution atmosphérique hivernale (« smog ») dans les villes, découverte qui pourrait influencer les politiques de lutte contre ce type de pollution. Parmi les autres résultats obtenus figurent des mesures de particules pour les expériences sur les neutrinos et les rayons cosmiques et l'étude du plasma quarks-gluons dans les collisions d'ions lourds avec des cibles fixes (NA61/SHINE); des études de désintégrations rares du kaon et recherches de nouveaux leptons neutres lourds (NA62), avec la première observation d'un indice significatif de la désintégration ultra-rare d'un kaon chargé positivement en un pion chargé et une paire neutrino-antineutrino; des études des processus de rayonnement dans des champs électromagnétiques forts (NA63); des recherches de particules du secteur sombre (NA64), y compris la première recherche par NA64 d'axions et de particules semblables aux axions; des mesures de processus induits par des neutrons pertinents pour la physique nucléaire et l'astrophysique (n\_TOF); des études

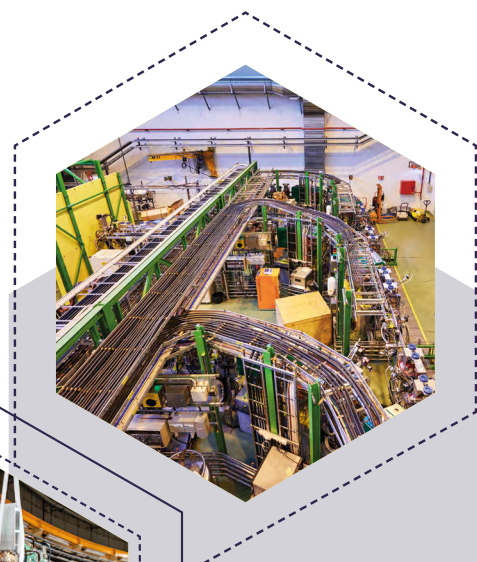
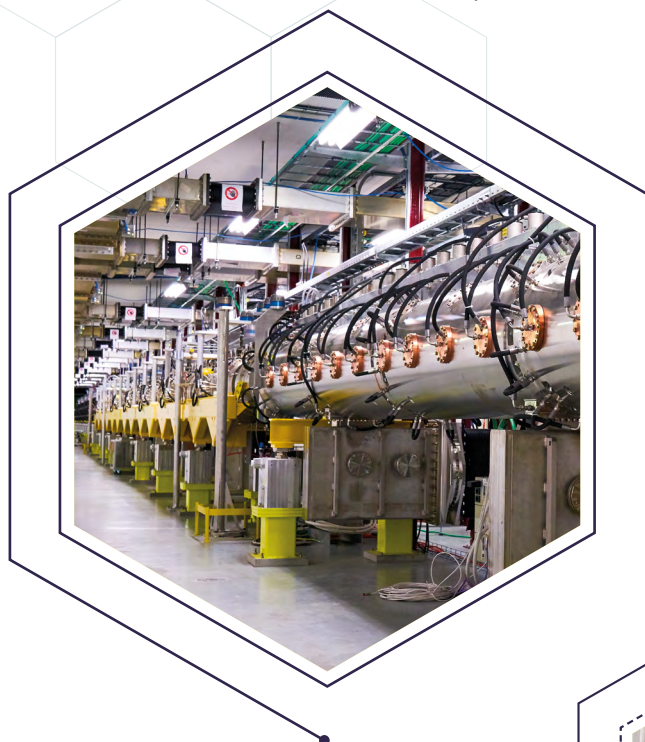
de la structure hadronique avec COMPASS et son futur successeur, l'expérience AMBER, approuvée en décembre 2020, et enfin des recherches de caméléons et d'axions (CAST).



CLOUD a découvert un nouveau mécanisme responsable d'épisodes de pollution atmosphérique hivernale (« smog ») dans les villes. (CERN-PHOTO-201909-278-1)

# LES MACHINES DES DÉCOUVERTES

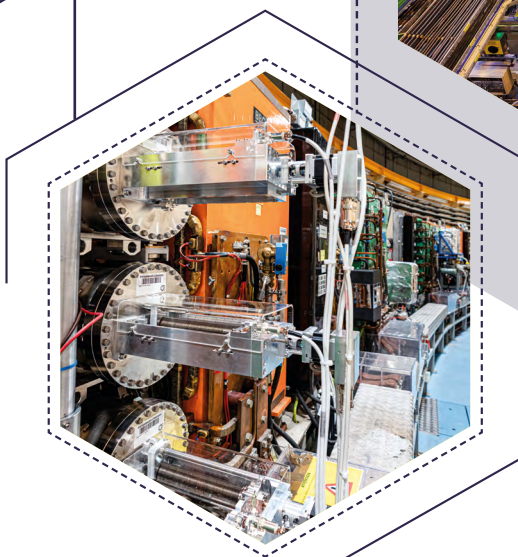
*L'année 2020, année charnière du deuxième long arrêt technique (LS2) du complexe d'accélérateurs du CERN, a mis les équipes à rude épreuve. La pandémie de COVID-19 a eu un impact sur le calendrier, déjà bien chargé, des activités de maintenance, de rénovation et de remplacement d'équipements pendant le LS2. Malgré ces difficultés, le projet d'amélioration des injecteurs du LHC (LIU) et les améliorations réalisées en prévision de la troisième période d'exploitation du LHC et du LHC à haute luminosité (HL-LHC) ont suivi leur cours, notamment grâce à l'engagement sans faille de toutes les équipes.*



## ACCÉLÉRATEUR LINÉAIRE 4 (LINAC 4)

La mise en service du Linac 4 s'est poursuivie. En août, des faisceaux à 160 MeV ont parcouru toute la machine. En décembre, le Linac 4 alimentait pour la première fois le Booster du PS.

(CERN-PHOTO-201704-093-2)



## ISOLDE

Les stations cibles et le dérouleur de bande d'ISOLDE ont été remplacés. Un cryomodule de l'accélérateur linéaire HIE-ISOLDE a été réinstallé après avoir subi des réparations et une série de tests.

(CERN-PHOTO-201911-394-11)

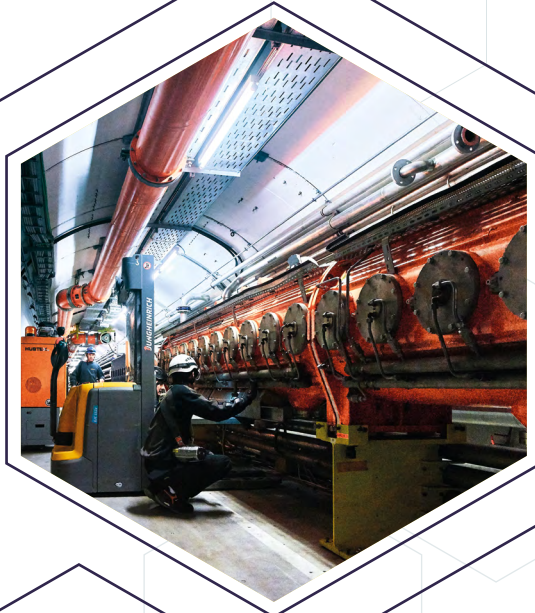
## BOOSTER DU PS (PSB)

Environ 40 % de la machine ont été changés ou améliorés. En décembre, le Booster recevait son premier faisceau du Linac 4, ce qui marquait la toute première connexion entre les deux accélérateurs. (CERN-PHOTO-202006-085-9)

## SUPERSYNCHROTRON À PROTONS (SPS)

Les travaux d'amélioration du système d'accélération ont pris fin. Le nouveau dispositif de décharge de faisceaux a été installé au point 5.

(CERN-PHOTO-201902-032-12)



## GRAND COLLISIONNEUR DE HADRONS (LHC)

Dans le cadre du projet DISMAC, l'isolation électrique de la 1 232<sup>e</sup> et dernière diode du LHC a été réalisée. Cinq des huit secteurs du LHC ont été refroidis à la fin de l'année. Les deux systèmes externes de décharge de faisceaux du LHC ont été améliorés.

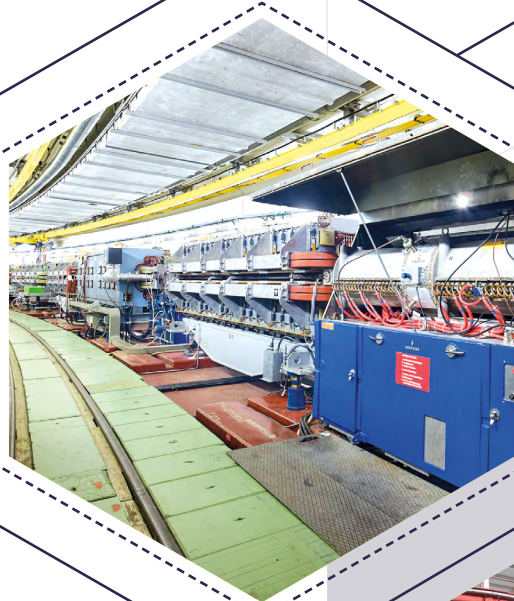
(CERN-PHOTO-202101-019-2)



## SYNCHROTRON À PROTONS (PS)

Le système d'injection dans le PS a été équipé d'un nouvel aimant à septum et d'un nouvel aimant de déflexion rapide. Deux nouveaux absorbeurs de faisceaux internes ont été installés dans la machine.

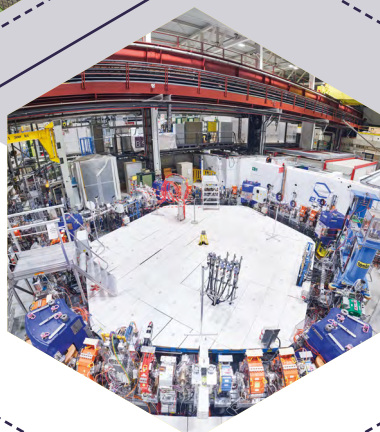
(CERN-PHOTO-202004-081-3)

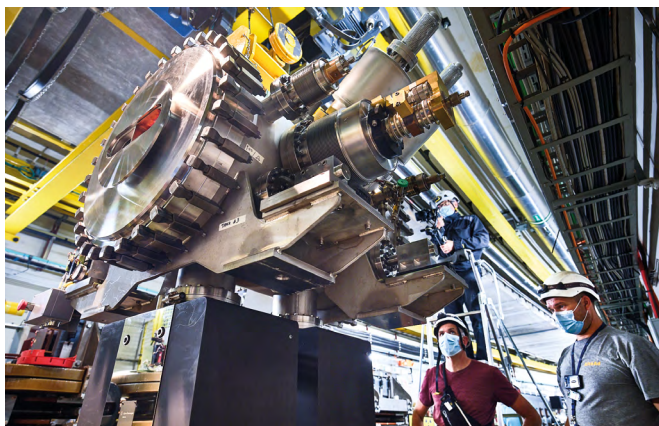


## DÉCÉLÉRATEUR D'ANTIPROTONS (AD) ET ELENA

Des ions  $H^-$  ont été injectés et ont circulé dans le nouveau décélérateur ELENA. Ils ont ensuite été extraits pour la première fois jusqu'aux portes des expériences GBAR, BASE, ASACUSA et ALPHA.

(CERN-PHOTO-201611-300-1)





Le nouvel aimant à septum et l'aimant de déformation d'orbite pendant l'installation dans la ligne d'injection du PS.

(CERN-PHOTO-202006-090-13)

## LES PREMIERS INJECTEURS REDÉMARRENT

Le complexe d'accélérateurs du CERN sort progressivement de deux années d'hibernation, qui ont permis de réaliser des opérations de maintenance et des réparations. Le deuxième long arrêt technique s'est ainsi achevé durant l'été pour l'**accélérateur linéaire 4** (Linac 4), l'accélérateur le plus récent du CERN. Pendant la phase de développement machine, qui s'est terminée à la mi-août, des faisceaux d'ions hydrogène négatifs ( $H^-$ ) de basse énergie ont traversé la première partie de l'accélérateur pour la première fois en 2020. Le 20 août, les premiers faisceaux à l'énergie nominale de 160 MeV (contre 50 MeV avec le Linac 2) ont parcouru toutes les structures accélératrices jusqu'à un absorbeur spécifique situé à l'extrémité du linac.

Le Linac 4, premier maillon de la chaîne d'accélérateurs de protons, façonne les faisceaux d'ions  $H^-$  de manière différente de son prédécesseur, le Linac 2. Le Booster du Synchrotron à protons (PSB), l'accélérateur en aval, est alors alimenté en ions  $H^+$  grâce à un innovant système d'injection qui fonctionne sous forme d'échange de charge. Cette technologie permet de limiter les pertes de particules à l'injection, et de produire des faisceaux de haute brillance. Il est également possible d'adapter la dispersion en énergie des faisceaux afin qu'elle corresponde à l'acceptance du Booster.

La remise en service du **Booster du Synchrotron à protons** (PSB), un bolide métamorphosé pendant le LS2, a suivi de près celle du Linac 4. En décembre, le Booster recevait déjà son premier faisceau en provenance du Linac 4, marquant ainsi la toute première connexion entre les deux accélérateurs.

Le moteur (l'alimentation et les convertisseurs de puissance), l'accélérateur (les cavités radiofréquence), la direction (les aimants), l'injection, le circuit de refroidissement, les systèmes de contrôle et de sécurité, etc., un très grand nombre d'équipements du Booster – environ 40 % de la machine ! – ont été changés ou améliorés.

Les travaux sur l'accélérateur quasi cinquantenaire ont répondu à deux exigences : injecter et accélérer des particules à plus haute énergie en provenance du Linac 4,

et augmenter la brillance du faisceau d'un facteur deux, autrement dit sa concentration en particules.

Afin de conserver cette brillance dans le Synchrotron à protons (PS), l'accélérateur suivant, le Booster augmentera l'énergie jusqu'à 2 GeV (contre 1,4 GeV auparavant) grâce à son tout nouveau système d'accélération et d'alimentation principale. Les effets de répulsion électrique entre les particules de même charge (répulsion coulombienne) sont d'autant moins grands que l'énergie augmente : l'énergie concourt à maintenir les particules groupées et donc la brillance. Or qui dit plus de brillance, dit plus de luminosité, faisant du Booster une machine-clé pour augmenter la luminosité du LHC.

Pour pouvoir recevoir les particules à une énergie de 2 GeV en provenance du Booster, le système d'injection dans le **Synchrotron à protons** (PS) avait besoin d'un nouvel aimant à septum et d'un nouvel aimant de déflexion rapide. Ces deux aimants permettent de dévier de leur trajectoire les faisceaux de protons entrant dans le PS en provenance du Booster pour leur faire suivre une orbite circulaire.

Le nouvel aimant à septum, installé au printemps, repose sur le principe des courants de Foucault ; c'est la première fois qu'un tel aimant à septum est utilisé au CERN. Dans le PS, l'aimant à septum est associé à cinq aimants de déformation d'orbite et à un aimant de déflexion rapide ; ils constituent le système d'injection. L'aimant à septum dévie la trajectoire du faisceau en provenance du Booster vers l'anneau du PS. Les aimants de déformation d'orbite modifient l'orbite dans le PS de sorte que sa position et son angle correspondent à ceux du faisceau en sortie de septum. Enfin, l'aimant de déflexion rapide, situé en aval, place le faisceau injecté sur l'orbite nominale. Dès le mois de janvier, le nouvel aimant de déflexion rapide a été installé, remplaçant ainsi celui qui était en service depuis 1979.

Les systèmes d'accélération du PS ont fait l'objet de vastes améliorations, et toutes les cavités radiofréquence (RF), la rétroaction transversale et les systèmes RF de bas niveau ont été modifiés pour fournir les intensités de faisceaux requises pour le HL-LHC.

Le PS a par ailleurs été doté de deux nouveaux absorbeurs de faisceaux internes. Installés dans l'accélérateur au mois de juin, ils sont le fruit de cinq années de développement dans le cadre du projet d'amélioration des injecteurs du LHC (LIU). Le cœur de l'absorbeur est constitué de deux éléments de densité croissante – du graphite isostatique et un alliage de cuivre, de chrome et de zirconium – que le faisceau traverse successivement. Chaque absorbeur est encastré dans une structure blindée en acier et béton qui participe à l'absorption du faisceau. L'équipement a un mode de fonctionnement original par rapport aux absorbeurs utilisés au CERN. Les particules sont habituellement déviées par un aimant de déflexion rapide afin d'être dirigées vers un absorbeur statique. Le nouvel absorbeur du PS, au contraire, vient à la rencontre des faisceaux : il oscille pour obstruer la chambre à vide sans que la trajectoire des particules n'ait besoin d'être déviée.



Les deux nouveaux absorbeurs de faisceaux internes du PS, encastrés dans une structure blindée en acier et béton (en vert), ont été installés dans l'accélérateur au mois de juin.  
(CERN-HOMEWEB-PHO-2020-094-1)



La zone Est, l'une des installations les plus anciennes du CERN, est transformée en un centre de recherche de pointe.  
(CERN-PHOTO-202101-009-1)

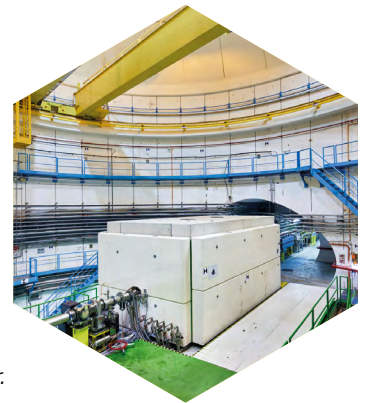
Le vendredi 23 octobre, les clés du PS ont été rendues à l'équipe en charge de l'exploitation, marquant ainsi le début de la période de mise en service du matériel.

Dans la **zone d'expérimentation Est**, alimentée par le PS, les principaux travaux de consolidation ont progressé, avec l'installation et la mise en service de la nouvelle ligne d'extraction en provenance du PS et de nouveaux convertisseurs de puissance, ainsi que d'un nouvel arrêt de faisceaux. La nouvelle ventilation de la zone primaire a été mise en place et d'importants travaux ont été réalisés sur les systèmes de refroidissement, de ventilation et de distribution électrique. La zone d'expérimentation a par ailleurs été modifiée pour l'expérience CLOUD.

Le 4 décembre, exactement à la date prévue, les membres du groupe Coordination et ingénierie de l'accélérateur ont cette fois remis les clés du **Supersynchrotron à protons (SPS)** au groupe Opérations, marquant, là aussi, le début de la période de mise en service des équipements.

Les travaux de modification du système d'accélération de la machine ont été achevés cette année. Ce nouveau système, basé sur des amplificateurs à transistors radiofréquence de puissance, très novateurs et d'une puissance inégalée dans le monde, permettra d'accélérer les faisceaux plus intenses. La nouvelle installation a nécessité de modifier les cavités accélératrices, qui ont été réinstallées, tandis que les 32 tours contenant les 10 240 transistors étaient mises en service. Parallèlement, les systèmes de contrôle des faisceaux ont été améliorés.

Le nouveau dispositif de décharge de faisceaux du SPS, qui remplace celui placé au point 1 de l'accélérateur, a été installé au point 5. Cet absorbeur a été développé dans le cadre du projet LIU et se compose d'un dispositif de 10 mètres de long constitué d'un assemblage de matériaux à densité élevée destiné à absorber toute la puissance du faisceau du SPS. L'absorbeur est encastré dans une structure blindée composée de béton, de fer et de marbre.



Le nouveau dispositif de décharge de faisceaux du SPS, situé au point 5 de l'accélérateur.  
(CERN-PHOTO-202011-158-5)



Le micro-four du Linac 3 est refermé après avoir été rechargé en plomb.  
(CERN-PHOTO-202011-154-1)

## AMÉLIORATION DES ÉQUIPEMENTS AU LINAC 3

Construit en 1994, l'**accélérateur linéaire 3 (Linac 3)** est le point de départ des ions, le plus souvent des noyaux de plomb, utilisés soit pour des collisions dans le LHC, soit pour des expériences à cible fixe.

Pour produire les faisceaux d'ions, de l'oxygène gazeux et de la vapeur de plomb sont injectés dans la chambre à plasma de la source. Une micro-onde est appliquée, de façon à créer le plasma dans lequel sont ionisés les atomes de plomb et d'oxygène ; le plasma est confiné par un champ magnétique. Pour vaporiser le plomb, le Linac 3 utilise un micro-four. Cette année, l'équipe du Linac 3 a développé et testé une nouvelle configuration de ce four, dans le but d'augmenter sa performance.

Le Linac 3 a par ailleurs été doté d'un nouveau système d'extraction – le système qui prélève les ions plomb dans la chambre à plasma – qui permet de mieux régler le faisceau extrait, et pourrait accroître son intensité.



L'un des quatre cryomodules de HIE-ISOLDE avec ses cinq cavités radiofréquence. (OPEN-PHO-ACCEL-2016-016-7)

## LES INSTALLATIONS DE PHYSIQUE NUCLÉAIRE PASSENT AU NIVEAU SUPÉRIEUR

Dans la zone cible d'**ISOLDE**, alimentée par le PSB, les stations cibles (« *Front ends* ») ont été remplacées par une nouvelle génération de stations permettant la production d'isotopes radioactifs plus exotiques. Une autre amélioration significative a été le remplacement, après 40 années d'utilisation, du dérouleur de bande, qui permet d'échantillonner les isotopes radioactifs et de les identifier. Le nouvel instrument permet un temps d'échantillonnage beaucoup plus bref pour les isotopes à courte durée de vie et dispose de détecteurs plus performants.

Dans le hall d'ISOLDE, HIE-ISOLDE (*High Intensity and Energy Isotope mass Separator On-Line*), l'accélérateur linéaire compact pour isotopes lourds, est composé de

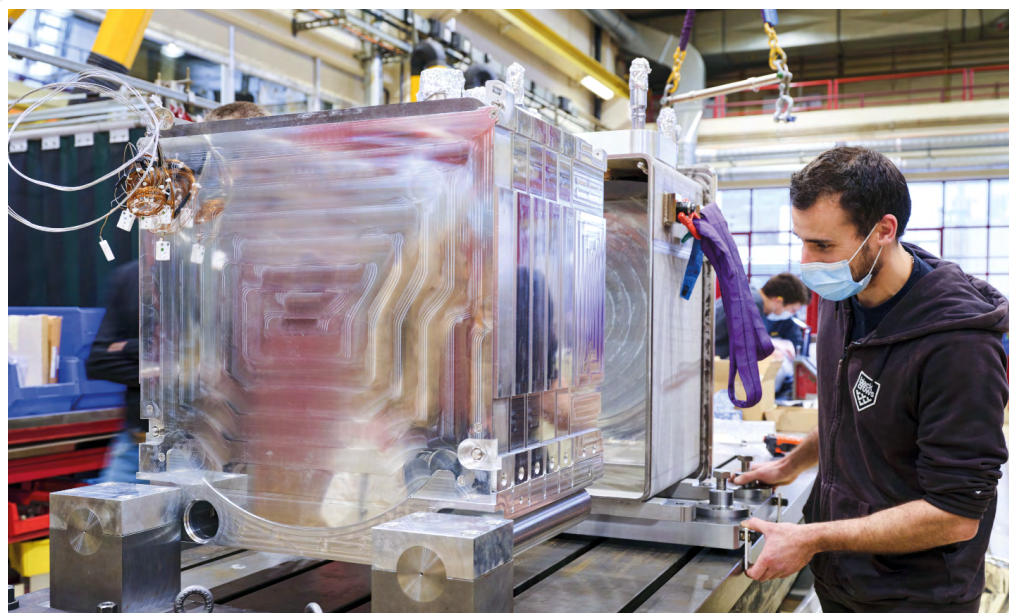
20 cavités radiofréquence supraconductrices regroupées en quatre cryomodules, chacun refroidi aux environs de 4 kelvins. Cet accélérateur porte les isotopes radioactifs à une vitesse pouvant atteindre 15 % de celle de la lumière. À cette énergie, les noyaux peuvent fusionner ou échanger des nucléons avec les atomes des cibles sur lesquelles ils sont envoyés.

Cette année, l'un de ses quatre cryomodules, qui s'était révélé défectueux après avoir été mis en service, a été réinstallé après avoir subi des réparations et une série de tests. À l'automne, un faisceau de néon stable provenant d'une source indépendante a été injecté dans la machine, validant son bon fonctionnement.

La conception du canon à électrons de l'élevateur d'état de charge de REX-EBIS, qui alimente en ions de charges élevées le linac résistif REX-ISOLDE et le linac supraconducteur HIE-ISOLDE, a été entièrement repensée. De nouveaux boîtiers de diagnostic ont par ailleurs été installés le long de REX-ISOLDE ; ils apporteront de précieuses informations sur les pertes de faisceau inexplicables enregistrées avant le LS2.

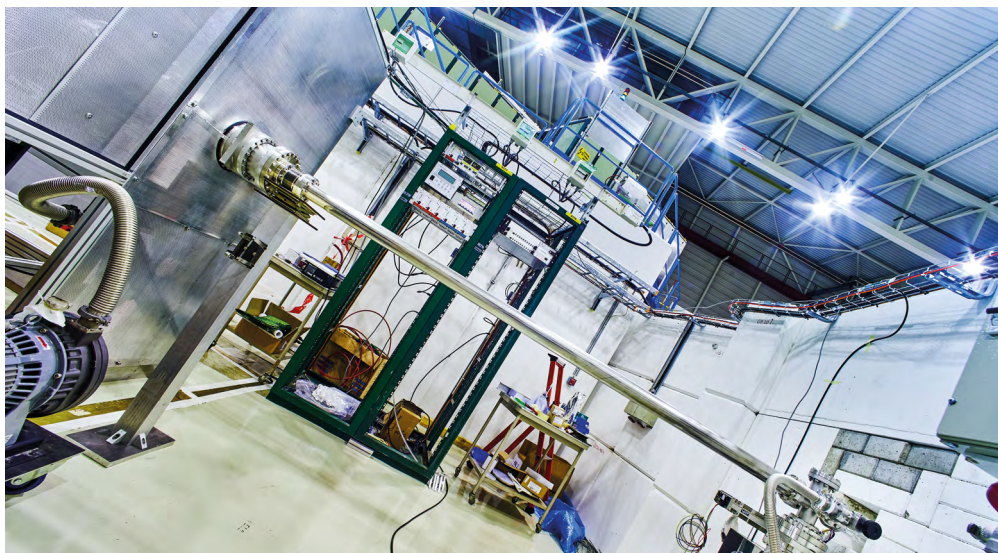
Le laboratoire de manipulation des matières nucléaires d'ISOLDE est désormais doté d'une extension afin d'accueillir le « nano-lab », une infrastructure unique conçue pour le développement de matériaux innovants pour les cibles d'ISOLDE.

La construction de la nouvelle cible de l'**installation de mesure du temps de vol des neutrons** (n\_TOF), qui étudie les interactions noyau-neutron, a été achevée. La cible sera installée début 2021 et recevra ses premiers faisceaux du PS en juillet 2021. Plusieurs mises à niveau et améliorations ont également été menées à bien dans la zone cible et sur les lignes de faisceaux de neutrons. Les convertisseurs de puissance ainsi que les systèmes de contrôle de la ligne de transfert des protons vers la cible de n\_TOF ont aussi été améliorés.



Construction de la nouvelle cible de n\_TOF.

(CERN-PHOTO-202010-175\_02)



*Ligne de transfert connectant l'anneau ELENA (derrière le mur à droite) à l'expérience GBAR (à gauche). (CERN-PHOTO-201708-192-11)*

## ELENA ALIMENTE SES PREMIÈRES EXPÉRIENCES

**ELENA** (*Extra Low Energy Antiprotons deceleration ring*), le nouvel anneau de décélération du CERN, a pu à nouveau injecter et faire circuler des ions  $H^-$  issus d'une source indépendante et les acheminer pour la première fois jusqu'aux portes des expériences GBAR, BASE, ASACUSA et ALPHA.

ELENA est la nouvelle pièce maîtresse de l'usine d'antimatière. Recevant les antiprotons du **Décélérateur d'antiprotons** (AD) à une énergie de 5,3 MeV, elle les décélère ensuite jusqu'à 0,1 MeV, ce qui permettra aux expériences de piéger près de 100 fois plus d'antiprotons qu'auparavant.

La nouvelle expérience GBAR a été connectée à ELENA dès 2017. À partir de novembre 2018, le LS2 a été consacré au démontage puis au remplacement des anciennes lignes

par les nouvelles lignes de transfert entre ELENA et ALPHA, AEGIS, ASACUSA et BASE, et à l'installation de nouvelles lignes vers les futures expériences de l'usine d'antimatière.

Ces nouvelles lignes de transfert comportent des technologies innovantes : les anciens électroaimants font place à des plaques électrostatiques dipolaires et quadripolaires, suffisantes pour diriger les particules extrêmement ralenties. En se passant de systèmes magnétiques, l'usine d'antimatière choisit une solution économique et réalise des gains d'espace mis à profit pour augmenter le nombre de quadripôles et ainsi focaliser davantage le faisceau afin de le rendre moins sensible aux perturbations. Innovation également du côté de l'instrumentation : les nouveaux moniteurs pour observer le faisceau permettent une mesure précise du faisceau en n'en interceptant qu'une partie. Les premiers diagnostics du faisceau d'ions  $H^-$  traversant les nouvelles lignes jusqu'aux portes des expériences, obtenus à la fin de l'année, sont très encourageants.

## LE LHC A ENTAMÉ SON REFROIDISSEMENT

Les travaux de consolidation du **Grand collisionneur de hadrons** (LHC) sont presque terminés. Au mois de janvier, les équipes du projet DISMAC (Consolidation de l'isolation des diodes et des aimants supraconducteurs) ont renforcé l'isolation électrique de la 1 232<sup>e</sup> et dernière diode. La dernière boîte à diode a ainsi pu être ressoudée courant février. Après le travail d'isolation, les équipes suivantes réalisent les tests électriques et d'assurance qualité, et referment les interconnexions une à une. En raison de la pandémie de COVID-19, les travaux ont dû être suspendus au printemps, entraînant un retard d'environ trois mois. La dernière interconnexion a ainsi été refermée durant le mois de juillet.

S'en sont suivis des tests de pression ; le dernier des huit tests de pression (un par secteur) effectués dans le LHC a été réalisé le 27 octobre dans le secteur 6-7. Cette étape n'a révélé aucun problème mécanique dans la machine.

Les tests électriques durant le refroidissement et les contrôles métrologiques ont en revanche révélé certaines non-conformités. L'équipe d'intervention spéciale du projet DISMAC est en charge des réparations et des corrections, qui auront lieu début 2021. Aucune de ces non-conformités ne semble critique.

Le refroidissement d'un premier secteur du LHC a malgré tout pu démarrer à l'automne – il s'est achevé avec succès le 15 novembre. Le secteur a été refroidi à l'hélium superfluide à une température de 1,9 K (-271,3 °C), soit la température d'exploitation nominale. Quatre autres secteurs ont ensuite également été refroidis. Les trois derniers secteurs seront refroidis en 2021, ce qui permettra ensuite à l'ensemble du LHC de fonctionner dans ses conditions cryogéniques nominales.

Début février ont commencé les travaux sur les deux systèmes de décharge de faisceaux externes de l'accélérateur. Lors de la dernière période d'exploitation,



*L'un des absorbeurs externes de remplacement du LHC est extrait du tunnel pour subir des travaux d'amélioration en vue de la troisième période d'exploitation de l'accélérateur. (CERN-PHOTO-202001-018-15)*

la température interne maximale des absorbeurs grimpeait jusqu'à 1 000 °C en à peine 100 microsecondes après chaque décharge de faisceau. Après le LS2 et l'augmentation de l'intensité des faisceaux du LHC, la température pourra atteindre 1 500 °C. Pour endurer un tel régime, les dispositifs de décharge de faisceaux du LHC sont composés d'un absorbeur en graphite de 8 mètres de long contenu dans un tube en acier inoxydable, lui-même installé dans un blindage en fer rempli d'azote gazeux.

Après dix ans de service, les systèmes de décharge de faisceaux montraient des signes de fatigue. En vue de la troisième période d'exploitation du LHC, il a été décidé d'améliorer les deux absorbeurs de remplacement.

L'une des principales modifications a porté sur le système de support des absorbeurs, désormais suspendus à des câbles en acier haute résistance pour un meilleur amortissement. Les travaux d'amélioration ont également inclus l'installation de nouvelles « fenêtres » de faisceau en alliage de titane qui emprisonnent la partie en graphite de l'absorbeur dans son atmosphère d'azote. La ligne de transfert en provenance du LHC a par ailleurs physiquement

été déconnectée de l'absorbeur pour éviter la propagation des mouvements de vibration dans le tube de faisceau placé sous ultravide en provenance de l'accélérateur.

Les travaux se sont achevés début octobre. Des instruments fixés sur les absorbeurs améliorés recueilleront des données pendant la prochaine période d'exploitation ; celles-ci aideront notamment à concevoir les absorbeurs du futur LHC à haute luminosité (HL-LHC).

Pendant le LS2, des travaux d'amélioration ont aussi été menés sur le réfrigérateur du point 4, datant du précédent accélérateur, le Grand collisionneur électron-positon (LEP). La rénovation a permis de faire passer sa puissance réfrigérante de 16 kW à 18 kW à 4,5 K en vue du HL-LHC.

Le réfrigérateur du point 4 est critique pour le HL-LHC car, en plus de refroidir les secteurs 3-4 et 4-5, il doit aussi refroidir les sections dans lesquelles sont installées les cavités radiofréquence, exigeantes en matière de refroidissement. Pour gagner les précieux 2 kW, les quatre turbines et échangeurs de chaleur des deux boîtes froides du point 4 ont été remplacés par des équivalents plus performants.



*Au point 4, la boîte froide située en surface mesure environ 6 m de long pour 3 m de diamètre. Tous ses éléments sont isolés sous vide pour limiter le rayonnement thermique. (CERN-PHOTO-201912-412-4)*

## UN NOUVEAU CALENDRIER POUR LE LS2

La phase de confinement due au COVID-19, qui a entraîné un arrêt des activités sur les sites du CERN, la fermeture de nombreux instituts partenaires, puis le redémarrage progressif, a naturellement eu un impact sur le programme du deuxième long arrêt technique (LS2). Au mois de juin, un nouveau calendrier des activités du LS2 a donc été établi, prévoyant la circulation des premiers faisceaux tests de faible intensité dans le LHC fin septembre 2021, soit quatre mois après la date prévue pré-COVID-19.

Aucun changement n'a été apporté au calendrier après 2022. L'arrêt technique hivernal (YETS) 2023/2024 sera un arrêt normal. Le LS3 commencera début 2025.





Le Centre de calcul du CERN est au cœur de l'infrastructure scientifique, administrative et informatique du CERN. (IT-PHO-CCC-2018-001-12)

## INFORMATIQUE : MISES À NIVEAU ET CONTINUITÉ

L'informatique est essentielle à l'exploitation des données fournies par les expériences, mais aussi au bon déroulement des activités de tous les départements du CERN. Si la pandémie n'a pas empêché les équipes d'atteindre la plupart des objectifs fixés pour 2020, nombre d'activités ont dû être réorganisées et redéfinies par ordre de priorité. Les services informatiques ont également assuré la continuité des activités du CERN en fournissant à la communauté les infrastructures et connexions permettant de travailler à distance.

Tous systèmes confondus, les connexions de visioconférence ont quadruplé dès le mois de mars, en raison des mesures prises en réponse à la pandémie de COVID-19. Un nouveau service de visioconférence a cependant pu être testé en phase pilote, puis déployé avec succès. La réponse du CERN à la pandémie a également conduit à une expansion significative de l'infrastructure LoRaWAN, nécessaire pour le déploiement des proximètres, des boîtiers conçus pour avertir les personnes quand elles sont trop proches physiquement et enregistrer ces contacts afin d'assurer un suivi en cas d'infection.

L'année 2020 a été décisive pour tous les services informatiques en vue de la préparation de l'exploitation 3. En effet, un nombre important de maintenances et de mises à niveau du réseau, des bases de données, des serveurs et des systèmes de stockage ne peuvent être effectuées que lorsque le LHC fonctionne. L'année 2020 est aussi celle de la mise en production du projet NXCALLS (nouvelle génération des historiques d'activités des accélérateurs). Pour ce projet essentiel à la mission du CERN, l'équipe des bases de données a investi beaucoup d'efforts pour développer les outils administratifs et les systèmes de suivi adéquats, désormais utiles à de nombreux autres projets.

En 2020, 40 tonnes de nouveau matériel ont été installées dans le Centre de calcul du CERN et 25 tonnes en ont été retirées. Depuis 2012, le CERN fait régulièrement don de matériel informatique ne répondant plus à ses besoins en termes de rendement, mais néanmoins plus que suffisant pour des environnements moins exigeants. En 2020, 117 serveurs du Centre de calcul du CERN et six commutateurs réseau ont été donnés à l'Université du Fayoum en Égypte, et 254 châssis de serveurs ont été donnés à LHCb. En outre, des équipements du Centre de données du CERN, qui étaient sur le point d'être désinstallés, ont été utilisés pour les projets *Rosetta@Home* et *Folding@Home* pour simuler le repliement des protéines. Enfin, l'aboutissement de l'appel d'offres pour la conception,

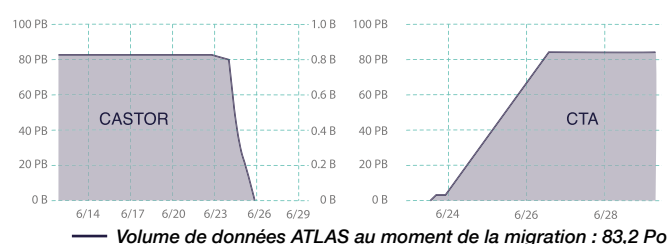
la construction, l'exploitation, et la maintenance d'un nouveau Centre de calcul écoénergétique sur le site de Prévessin est un autre événement majeur de 2020. L'attribution du contrat a été entérinée lors de la réunion de décembre du Comité des finances du CERN.

## CONSOLIDATION DU STOCKAGE DES DONNÉES

Ces dix dernières années, les exigences ont évolué et un nouveau système de gestion des disques, EOS, a été développé pour le stockage immédiat, « en ligne », et l'analyse des données. En 2020, EOS a fourni 2,5 exaoctets de données de physique. Cependant, EOS ne permettant pas le stockage « hors ligne » et l'archivage des données, un nouveau projet d'archivage de données sur bandes (*CERN Tape Archive - CTA*) a été conçu ; il servira pour l'enregistrement final des données d'EOS sur bandes. Les premiers déploiements sur CTA ont eu lieu en 2020 pour les expériences ALICE, ATLAS et CMS. Ils ont nécessité la migration de plus de 200 pétaoctets de données.

Outre la mise en production de CTA, le CERN s'est préparé à l'exploitation 3 en installant une nouvelle bibliothèque de bandes dans le Centre de calcul, et en améliorant le service de transfert des documents (*File Transfer Service - FTS*). Ce système, qui distribue la majorité des données du LHC à travers la Grille mondiale de calcul pour le LHC (*Worldwide LHC Computing Grid - WLCG*), a bénéficié de plusieurs améliorations significatives de ses performances. FTS travaille maintenant de concert avec CTA et est utilisé par plus de 35 expériences au CERN et dans d'autres expériences scientifiques faisant un usage intensif de données. En 2020, FTS a transféré à la Grille WLCG environ un milliard de fichiers et plus d'un exaoctet de données.

### Données totales (ATLAS)

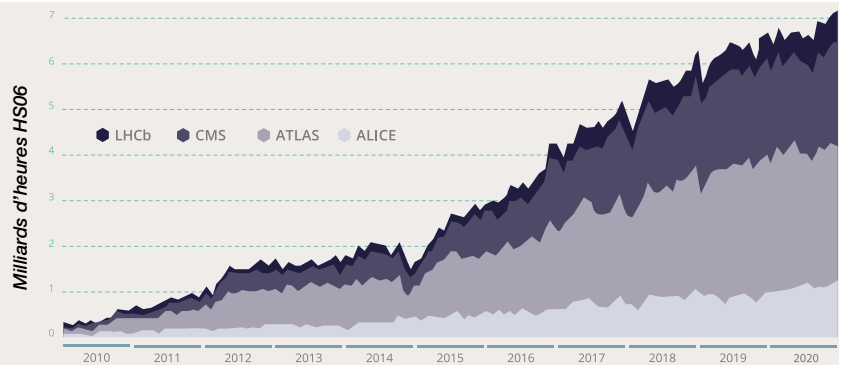


CTA est officiellement entré en production le 29 juin 2020, après la migration réussie de 83 pétaoctets de données ATLAS, initialement stockées dans CASTOR.

## MONTÉE EN PUISSANCE DE LA GRILLE

La Grille WLCG s'est avérée extrêmement stable et fiable en 2020, permettant la diffusion rapide de résultats de physique de haute qualité. Bien que les détecteurs n'aient pas enregistré de données en 2020, les quatre expériences LHC ont néanmoins continué à utiliser tous les services et ressources de la Grille à pleine capacité.

De fait, les niveaux de temps de processeur utilisés ont atteint de nouveaux sommets au cours de l'année. Le volume total de stockage utilisé dans le monde avoisinait un exaoctet, réparti à parts égales entre bandes magnétiques et disques.



### Évolution du temps de cœur de processeur global fourni par la Grille WLCG

Comme le montre le graphique, le temps de cœur de processeur global fourni par la Grille WLCG, exprimé en milliards d'heures HS06 par mois (HS06 étant la mesure de référence en physique des hautes énergies de la performance du processeur), augmente régulièrement. En 2020, la Grille WLCG a combiné les ressources informatiques d'environ un million de cœurs de processeurs.

## PRÉPARER LE FUTUR

En ce qui concerne l'avenir, les besoins informatiques prévisionnels pour le LHC à haute luminosité (HL-LHC) excèdent de très loin ceux prévus pour l'exploitation 3. Les besoins en capacité de stockage et de calcul seront supérieurs de plusieurs ordres de grandeur à ce que, à budget constant, les projections en termes de progrès technologiques permettent d'espérer. Divers partenariats, collaborations, et projets ont œuvré activement à relever ces défis en 2020. Les travaux sur l'utilisation de processeurs graphiques (*Graphics Processing Unit - GPU*) se sont également poursuivis.

CERN openlab, partenariat public-privé unique en son genre, au travers duquel le Laboratoire collabore avec des entreprises et des instituts de recherche de premier plan dans le domaine des technologies de l'information et de la communication, a soutenu un nombre record de 34 projets en 2020 qui présentent un grand potentiel pour fournir des solutions pour les futurs défis informatiques du CERN. Le CERN, SKAO, PRACE et GÉANT ont uni leurs forces grâce à une nouvelle collaboration portant sur le calcul haute performance. Cette dernière vise à surmonter les défis relatifs à l'utilisation du calcul haute performance dans le cadre de grands projets scientifiques produisant d'importants volumes de données, et à ainsi aider les communautés de recherche à libérer le plein potentiel de la prochaine génération de matériel.

L'équipe WLCG pilote le projet DOMA (*Data Organisation, Management, Access*), qui vise à développer des prototypes basés sur les concepts d'un « lac de données », où les données peuvent être transmises à la demande aux centres de traitement plutôt que pré-placées dans ces centres. L'équipe du CERN dirige un ensemble de travaux dans le cadre du projet ESCAPE financé par l'UE pour démontrer qu'il est possible d'utiliser ce concept. Au cours de son premier mandat, le groupe de travail sur l'accès DOMA a produit un rapport d'activités dont les informations ont été reprises en mai 2020 dans le document sur l'informatique pour le HL-LHC. Une répétition générale a également eu lieu le 17 novembre 2020 et a démontré la capacité du pilote de

« lac de données » à répondre aux besoins de nombreuses communautés scientifiques différentes en termes d'exécutions de flux de données réalistes sur une période de 24 heures. À cette occasion, 10 champs de recherches, 10 sites et environ 50 scientifiques de différents domaines ont partagé avec succès une infrastructure commune et un cadre commun de gestion des données pour la première fois dans des conditions réalistes.

Enfin, la capacité des réseaux externes du CERN a été accrue en 2020, ce qui a permis le doublement de la bande passante disponible pour les transferts vers les sites connectés à LHCONE et l'introduction d'une première liaison à 400 gigabits par seconde qui sera utilisée pour les prochains défis de données de la Grille WLCG afin de la préparer aux débits de données nettement plus élevés attendus à l'ère du HL-LHC.

## LA SCIENCE DANS LES NUAGES

Plus de 90 % des ressources informatiques du Centre de calcul du CERN sont déployées via un nuage privé basé sur OpenStack, un projet *open source* établissant un environnement en nuage extrêmement modulable. Dix ans après sa création, ce nuage fournit 300 000 cœurs physiques et virtuels dans le Centre de calcul du CERN. Le projet CS3MESH, coordonné par le CERN, a démarré en janvier 2020. Il permet aux prestataires de services de fournir une infrastructure connectée à la pointe de la technologie pour renforcer l'efficacité des collaborations scientifiques et améliorer le partage de données selon les principes FAIR. Il pose les fondements d'une infrastructure scientifique et éducative permettant de fournir des services de stockage en nuage en Europe grâce à une fédération simple de services de synchronisation et de partage (CS3) préexistants et via l'intégration avec des flux de travail d'applications multidisciplinaires.

En 2020, le CERN a présenté avec succès ou a participé à 16 projets financés par la Commission européenne pour la mise en place du nuage européen pour la science ouverte (*European Science Cloud - EOSC*). L'initiative EOSC a été

proposée en 2016 par la Commission européenne pour mettre en place une économie compétitive des données et de la connaissance en Europe. EOSC vise à offrir à 1,7 million de chercheurs européens et à 70 millions de professionnels un environnement virtuel avec des services intégrés pour le stockage, la gestion, l'analyse et la réutilisation des données de la recherche. Le CERN est devenu membre de l'association EOSC créée en 2020, et a été nommé en tant qu'organisation mandatée pour représenter les membres de l'EIROforum.

## LOGICIELS LIBRES POUR UNE SCIENCE OUVERTE

Depuis la sortie du logiciel du *World Wide Web* sous licence libre en 1994, le CERN n'a eu de cesse d'innover dans ce domaine, soutenant le matériel libre (licence *CERN Open Hardware*), l'accès ouvert (SCOAP<sup>3</sup> - Groupement pour la libre diffusion des résultats de physique des particules), et les données ouvertes (Portail de données ouvertes du CERN).

En 2020, le Portail de données ouvertes du CERN, qui permet aux expériences du LHC de partager leurs données, a continué de se développer. ATLAS a publié ses premiers échantillons de données à 13 TeV, tandis que CMS a finalisé la publication des données proton-proton 2010-2011 et a publié de nouveaux échantillons de données de physique des ions lourds. La couverture de la physique des particules hors LHC s'est accrue avec de nouveaux ensembles de

données de l'expérience OPERA de production de neutrinos électroniques et de hadrons contenant des quarks c.

Le mois de décembre 2020 a été marqué par la publication de la politique de données ouvertes du CERN, qui vise à permettre aux expériences du LHC d'adopter une approche cohérente en matière d'ouverture et de préservation des données.

Plusieurs technologies du CERN sont développées dans cette logique d'accès ouvert. Zenodo, le système d'archivage de données ouvertes gratuit codéveloppé par le CERN et accessible à toutes les sciences, en fait partie. En 2020, la croissance de Zenodo a été étonnante, avec six fois plus de visiteurs (15 millions) que l'année précédente. Dans le cadre de la contribution à la lutte contre la pandémie, une communauté spéciale a été créée sur Zenodo, la page d'accueil a été adaptée et des lignes d'assistance spécifiques bénéficiant d'un traitement accéléré ont été créées pour aider toute personne ayant besoin de partager des ensembles de données liés à la maladie.

Le projet MALT, qui avait débuté en 2018 pour atténuer les effets des augmentations prévues des droits de licence de logiciels par une transition vers des logiciels ouverts, a vu plusieurs de ses initiatives aboutir en 2020, comme la mise en place du nouveau système CERN d'authentification unique (*Single Sign On - SSO*), du système d'authentification à deux facteurs et de CERNphone. Des services supplémentaires tels que Mattermost, CodiMD, Discourse, pour n'en citer que quelques-uns, ont aussi été mis à disposition au cours de ces deux dernières années.



Participants de l'École d'informatique inversée 2020 du CERN.

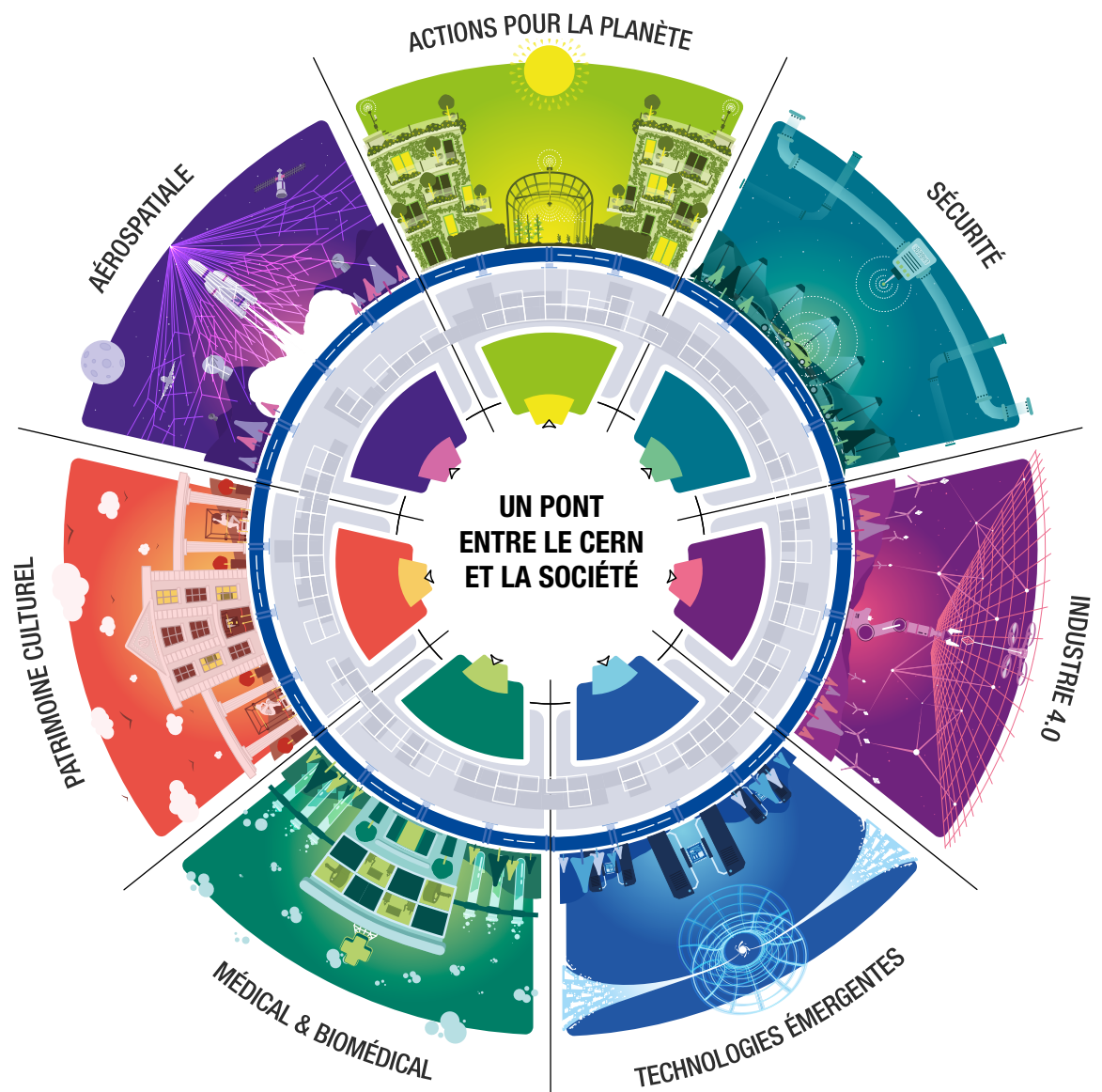
## L'ÉCOLE D'INFORMATIQUE DU CERN A 50 ANS

En 2020, l'École d'informatique du CERN (*CERN School of Computing - CSC*), qui favorise la diffusion des connaissances et l'apprentissage dans le domaine de l'informatique scientifique, a célébré son 50<sup>e</sup> anniversaire. Depuis sa première édition en Italie, en 1970, l'école a eu lieu dans 24 pays et a été suivie par plus de 2 900 étudiants provenant des cinq continents et représentant 80 nationalités. Sa mission est de créer une culture commune de l'informatique scientifique parmi les scientifiques et les

ingénieurs en physique des particules et dans d'autres sciences. Trois écoles ont normalement lieu chaque année. En raison de la pandémie, l'école thématique et l'école principale ont dû être annulées. Cependant, l'école inversée (où les étudiants se transforment en enseignants) a finalement été organisée sous un format en ligne en septembre avec plus de 1 300 inscriptions – un record absolu. Chaque cours en ligne a été suivi par plusieurs centaines de personnes.

# ACCÉLÉRATEUR D'INNOVATION

*Pour apporter des réponses aux grandes énigmes de l'Univers, le CERN repousse les frontières de la technologie des accélérateurs, des détecteurs et de l'informatique. Les progrès qui en découlent trouvent des applications dans des domaines variés : médical, biomédical, patrimoine culturel, protection de l'environnement. Le CERN coopère activement avec des spécialistes des sciences, de la technologie et de l'industrie et avec ses organes directeurs pour encourager le transfert de technologies, stimuler l'innovation et promouvoir le développement économique dans ses États membres, maximisant ainsi son impact positif sur la société.*



*Les trois piliers technologiques du CERN, les accélérateurs, les détecteurs et l'informatique, recouvrent divers champs de compétence et ont des retombées positives dans de nombreux secteurs.*

## DU CERN À LA SOCIÉTÉ

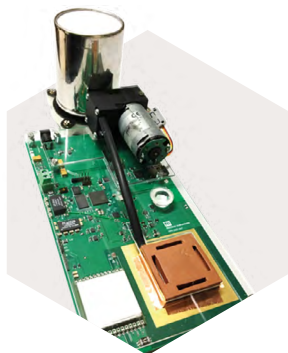
Nombre de technologies innovantes naissent des outils et techniques développés au CERN pour la physique des particules. Le CERN définit les technologies et compétences qui pourraient avoir un impact sociétal, puis étudie les possibilités de collaboration avec l'industrie. Impossible de ne pas évoquer ici les technologies et connaissances que le CERN a mises au service de la lutte contre la pandémie de COVID-19 (voir également le chapitre 2 « 2020 en images », pp. 6-15).



Détail d'un prototype de collisionneur linéaire compact, technologie sur laquelle repose la conception de la future installation FLASH.  
(CERN-PHOTO-202008-108-13)

### UNE INSTALLATION DE RADIOTHÉRAPIE À LA POINTE DE L'INNOVATION

Le CERN continue de mettre ses technologies au service de solutions visant à répondre aux défis de santé présents et futurs. L'un de ces défis consiste à obtenir des électrons de haute énergie pour la radiothérapie FLASH, capable de pénétrer très profondément dans l'organisme de façon ciblée en limitant les effets secondaires. En septembre, le CERN et le Centre hospitalier universitaire vaudois (CHUV) ont annoncé qu'ils collaboreraient sur un projet d'installation innovante utilisant la technologie du CLIC (Collisionneur linéaire compact) pour accélérer des électrons à des énergies très élevées afin de traiter des tumeurs jusqu'à 15 à 20 cm de profondeur.



RaDoM, prototype de dispositif de contrôle du radon, fournit des données en temps réel sur lesquelles seront basées des mesures d'atténuation.



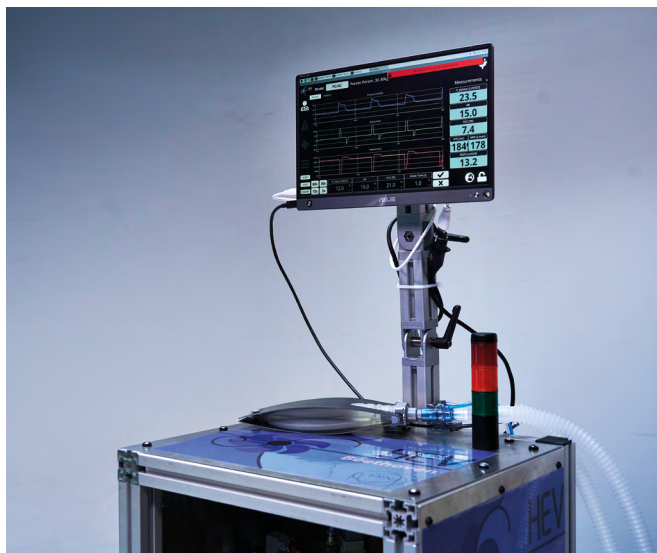
En haut à gauche : Image combinant des spectres d'énergie mesurés par le scanner Rtoo. En haut à droite : Le scanner Rtoo scannant La Vierge à l'enfant.

### REDÉCOUVERTE D'UNE TOILE PERDUE DE RAPHAËL

La physique des particules a déjà permis d'authentifier des œuvres d'art en déterminant leur composition sans les détériorer. Le dernier exemple en date est celui de *La Vierge à l'enfant*. La jeune entreprise tchèque InsightART a pu attribuer cette peinture au grand maître de la Renaissance Raphaël grâce à Rtoo, scanner robotique à rayons X utilisant des détecteurs de photons Timepix. InsightART a fait varier la longueur d'ondes des rayons X de façon à produire 11 images haute résolution, ce qui a permis d'en apprendre davantage sur l'œuvre et a valu à l'entreprise de remporter le prix ArtTech 2020.

### DES SOLUTIONS ENVIRONNEMENTALES FONDÉES SUR DES TECHNOLOGIES DU CERN

Les ressources intellectuelles du CERN sont mises à profit pour relever un autre défi colossal : construire un monde plus durable. Cette année, des technologies du Laboratoire ont contribué à assurer la surveillance de l'environnement, grâce aux entreprises dérivées PlanetWatch et BAQ. PlanetWatch a annoncé l'activation, à Milan et à Tarente (Italie), de plus de 100 capteurs destinés à détecter les pics de pollution atmosphérique locale et à en identifier les causes. Le CERN et BAQ ont signé un accord de licence sur la technologie RaDoM (*Radon Dose Monitor*), prototype de dispositif de contrôle du radon incluant un service en nuage pour la collecte et l'analyse des données, le contrôle des mesures et le pilotage des mesures d'atténuation sur la base de données en temps réel, qui pourrait contribuer à prévenir des maladies telles que le cancer du poumon.



Présentation du respirateur HEV, conçu par des membres de la collaboration LHCb pour lutter contre la pandémie de COVID-19. (CERN-PHOTO-202008-107-3)

## FINANCER LE TRANSFERT DE CONNAISSANCES POUR PROMOUVOIR L'INNOVATION

Le Fonds pour le transfert de connaissances et le budget consacré aux applications médicales sont deux mécanismes destinés à encourager le personnel du CERN à valoriser le potentiel des technologies du Laboratoire. Ils apportent à de nombreux projets l'appui nécessaire pour stimuler l'innovation, en finançant des bourses universitaires ou en favorisant le transfert à la société d'applications commerciales de technologies du CERN. Parmi les projets marquants de 2020 figurent le respirateur HEV (*High-Energy Ventilator*), dispositif médical de haute qualité destiné notamment à une utilisation en soins intensifs, et un logiciel de compatibilité qui permettra de déployer les commandes numériques des convertisseurs de puissance du CERN dans d'autres accélérateurs, tels que le synchrotron SOLEIL.

EN 2020, LE CERN A ÉTÉ RÉCOMPENSÉ  
POUR AVOIR SUSCITÉ DE L'INTÉRÊT  
ENVERS LA MÉGA SCIENCE ET LIMITÉ  
L'IMPACT DE LA PANDÉMIE SUR  
LES ACHATS.

### LES ENTREPRISES ET LE CERN

Les achats sont un aspect fondamental de l'impact économique du CERN dans ses États membres : les progrès dans les domaines des accélérateurs, des détecteurs et de l'informatique se concrétisent à travers des collaborations commerciales, contribuant à stimuler l'innovation. Le CERN a continué de s'approvisionner pour le projet LHC à haute luminosité (HL-LHC), pour le Portail de la science, ainsi que pour la conception, la construction, l'exploitation et la maintenance du nouveau centre de données sur le site de Prévessin. En tout, le CERN a émis 30 000 commandes, 62 appels d'offres, 114 demandes d'offres dépassant 50 000 CHF et a signé 230 contrats, dont 139 accords de collaboration. Les dépenses engagées en 2020 pour les divers contrats et commandes se sont élevées à 441 MCHF (environ 37 % du budget).

Le Service des achats a participé à des événements industriels au Danemark, en Espagne, en France, en Inde, en Suède et en Turquie, et a organisé l'exposition industrielle *La France au CERN*, tenue pour la première fois en ligne. Lors de la conférence *Big Science Sweden 2020*, le CERN a reçu le prix *Big Science Sweden Influencer: Research Facility*.



Le prix d'excellence EIPM-Peter Kraljic 2020, décerné au groupe Achats et services industriels du CERN.

Malgré ces chiffres impressionnants, la crise sanitaire mondiale a eu des conséquences sur les achats, en raison des restrictions imposées aux États membres et aux États hôtes. Lorsque le CERN est passé en mode sécurisé, des mesures ont été prises pour atténuer l'impact de cette transition sur les contractants (soutien aux demandes de chômage et appui pour honorer les obligations contractuelles). En reconnaissance de son action face à la pandémie, le groupe Achats et services industriels du CERN a reçu de l'EIPM (*European Institute for Purchasing Management*) le prix d'excellence *Peter Kraljic 2020* dans la catégorie *Master of Business Continuity*.

*En participant aux projets de l'Union européenne, le CERN renforce ses liens avec les universités, les instituts de recherche, les laboratoires, l'industrie et les décideurs politiques de ses 23 États membres et au-delà.*

*(CERN-PHOTO-201809-249-15)*



## **COLLABORATION INTERNATIONALE POUR LA SCIENCE**

Le CERN cultive une étroite collaboration avec l'enseignement supérieur et l'industrie en participant à des projets cofinancés par la Commission européenne, dans le cadre du programme Horizon 2020. Cette année, le CERN a participé à 41 projets et en a coordonné 11 (dont AIDA-2020, ARIES et ATTRACT), avec une contribution de la Commission de 28,6 millions d'euros. En outre, le financement des cinq projets coordonnés par le CERN au titre du programme « Infrastructures de recherche » a été approuvé. Ces projets, fondés sur le transfert de connaissances, les partenariats d'innovation et le transfert de technologies entre des laboratoires de physique des particules et l'industrie, portent sur les futurs accélérateurs (I.FAST) et détecteurs (AIDAInnova), les installations de test de radiorésistance (RADNEXT), les isotopes médicaux (PRISMAP) et les

technologies de détection et d'imagerie (ATTRACT2), pour un total de 70 millions d'euros de contributions de la Commission. Au total, 20 projets associant le CERN ont été retenus pour un financement en 2020.

Par ailleurs, le CERN a bouclé son année de présidence de l'EIROforum (forum des organisations de recherche intergouvernementales européennes), lors de laquelle il a créé un nouveau groupe de travail sur l'environnement et la durabilité, publié un guide sur l'innovation et le transfert de technologies et participé, en septembre, à l'organisation des journées Recherche et Innovation en Europe. L'EIROforum réunit huit des plus grands laboratoires de recherche européens (CERN, EMBL, ESA, ESO, ESRF, European XFEL, EUROfusion et ILL).

## **ATTRACT PHASE 2 : COORDONNER LE FINANCEMENT D'INITIATIVES INNOVANTES À CONTRE-COURANT**

ATTRACT réunit des instituts de recherche fondamentale et des industries d'Europe pour guider la future génération de technologies de détection et d'imagerie. Pendant la phase 1, 170 idées innovantes ont obtenu des financements et leurs résultats ont été présentés lors de la conférence ATTRACT, diffusée en ligne depuis Bruxelles. La phase 2 financera les concepts technologiques les plus prometteurs pour des applications scientifiques, industrielles ou sociétales. En outre, elle intensifiera le soutien aux jeunes innovateurs : 400 d'entre eux (contre 100 pendant la phase 1) auront la possibilité de créer un prototype de leur solution grâce aux technologies des projets financés par ATTRACT. Par ailleurs, une étude socio-économique inédite sera réalisée et une concertation avec des acteurs des secteurs public et privé sera menée en vue de trouver des solutions permettant de rationaliser le financement de l'innovation.



# SENSIBILISER ET FORMER

*La mission du CERN, de même que la physique des particules et la recherche scientifique, ne peuvent obtenir un soutien à long terme sans des activités d'éducation et de sensibilisation. Chaque année, le CERN partage son travail avec les jeunes et les moins jeunes, dans ses États membres, ses États membres associés et au-delà. Il s'agit de permettre à chacun de comprendre les sciences et technologies qui sous-tendent la recherche au Laboratoire et de donner envie aux jeunes de poursuivre une carrière scientifique ou technique.*

*Malgré l'annulation de nombreuses activités sur site en raison de la pandémie de COVID-19, le CERN a continué de sensibiliser le public partout dans le monde. Certaines activités ont été repensées pour être organisées en ligne, et d'autres ont vu le jour. Plusieurs continueront d'être proposées à l'avenir en complément de l'indispensable offre en présentiel.*

*L'équipe suisse lauréate de l'édition 2020 du concours Ligne de faisceau pour les écoles, au S'Cool LAB du CERN. L'autre équipe lauréate a mené ses expériences à DESY (Hambourg). (OPEN-PHO-LIFE-2020-006-20)*





## UN ENGAGEMENT LOCAL ET MONDIAL

Le CERN est une destination prisée du grand public, avec en moyenne 150 000 visiteurs par an. En raison de la pandémie, les visites guidées ont été annulées à partir du mois de mars, et les expositions permanentes ont été fermées. Ainsi, seules 27 000 personnes ont visité le CERN cette année. Quatre manifestations publiques ont été organisées au Globe de la science et de l'innovation, contre 27 en 2019.

Le contact avec le public s'est poursuivi en ligne. Des conférences virtuelles ont été données par des guides du CERN pour les scolaires et le grand public. Entre avril et décembre, plus de 7 000 participants ont assisté à 315 présentations sur le CERN, dans dix langues différentes, avec la possibilité de poser des questions. La majorité des participants (75 %) étaient des scolaires.

Malgré les contraintes imposées par la pandémie, 37 décideurs des États membres du CERN, de ses États membres associés et d'autres pays sont venus sur place ou ont participé à des visites virtuelles.

L'exposition itinérante phare du CERN, *Accélérateur de science*, a pu se rendre en Turquie et poursuivre sa route en Estonie, attirant environ 52 000 visiteurs dans les deux pays.

Concernant les expositions, permanentes et itinérantes, l'année a été mise à profit pour améliorer l'offre existante. Les circuits ont été optimisés sur plusieurs sites

(Décélérateur d'antiprotons, ATLAS et LHCb), et de nouveaux contenus seront visibles dès 2021 à ATLAS et à LHCb. L'offre d'expositions itinérantes du CERN a été actualisée et a fait l'objet d'un nouveau portail en ligne.

Le dialogue avec les voisins du CERN reste un volet important de ses efforts en matière de communication locale. Dans le cadre de la Journée internationale des femmes et des filles de science, 2 793 élèves de 135 classes des environs ont assisté à des présentations données par 67 femmes sur leur métier au CERN, à l'EPFL et à l'Université de Genève.

Le dialogue entre art et science s'est poursuivi, plusieurs commandes du programme *Arts at CERN* ayant été exposées dans de grands musées d'art, tels que le Centre Pompidou (Paris), la Tate Modern et galeries Serpentine (Londres), le New Museum (New York) et le Museum of Contemporary Art (Chicago).

LA PANDÉMIE DE COVID-19 A  
PERTURBÉ LES ACTIVITÉS SUR  
PLACE, MAIS LE CERN A CONTINUÉ  
DE SENSIBILISER LE PUBLIC PARTOUT  
DANS LE MONDE.



Le lancement de Sparks!, le forum générateur d'innovation du CERN, a fait l'objet d'une conférence en ligne en novembre. L'intelligence artificielle sera le thème de la première édition, qui se déroulera en septembre 2021.

(OPEN-PHO-ACCEL-2020-003-10)

## UN FORUM SUR LA CONNAISSANCE ET L'INNOVATION

*Sparks!* est un nouveau forum pluridisciplinaire consacré à l'innovation scientifique qui sera organisé sur deux jours chaque année ; il réunira des scientifiques du monde entier, ainsi que des décideurs, des représentants de l'industrie, des philanthropes et des éthiciens, et comprendra un volet public.

La conférence de lancement en ligne a réuni des chercheurs du CERN, ainsi que des pionniers et des spécialistes de premier plan de l'intelligence artificielle (IA), qui ont abordé

des questions telles que la prévalence de l'IA dans nos vies, ses applications dans des domaines comme la médecine, l'astronomie et la climatologie, et l'utilisation que la société veut en faire dans le futur.

Cet événement a reçu un bon accueil sur les réseaux sociaux, avec des chiffres supérieurs à la moyenne pour une publication du CERN. La vidéo a totalisé 7 100 vues, avec un pic de 265 vues simultanées et plus de 760 heures de visionnage. Le tweet annonçant l'événement a été vu près de 250 000 fois. Plus de 900 réactions positives ont été recueillies sur la plateforme professionnelle LinkedIn, et les stories Instagram ont été vues près de 22 000 fois.

## UN INTÉRÊT MÉDIATIQUE INTERNATIONAL

Les efforts déployés pour faire connaître le CERN, nourrir l'intérêt du public pour le Laboratoire et faire en sorte que les États membres et les États membres associés continuent de contribuer à ses avancées se sont poursuivis dans les médias internationaux.

Les visites de médias ont aussi souffert de la pandémie : seules 76 visites ont eu lieu pour 180 journalistes (contre 554 visites pour plus de 1 100 journalistes en 2019), presque toutes au premier trimestre.

Malgré ces contraintes, l'intérêt des médias pour le CERN est resté élevé, avec plus de 270 demandes de journalistes et un peu plus de 129 000 publications recensées dans le monde en 2020. Sur les 23 actualités publiées, 12 concernaient des résultats de physique du LHC et d'autres expériences du CERN.

Un des faits marquants de l'année a été la session de questions-réponses avec des journalistes, tenue pour l'annonce de la mise à jour de la stratégie européenne pour la physique des particules en juin (voir encadré). Cette session fait partie des trois événements innovants de ce type organisés en 2020.

## UNE PRÉSENCE NUMÉRIQUE EN EXPANSION

La présence numérique du CERN a continué de croître, du fait du remplacement de nombreuses activités d'éducation et de communication par des sessions en ligne, et de nouvelles initiatives sur les réseaux sociaux. Les pages du site web du CERN ont été consultées 9 millions de fois par

3,6 millions d'internautes et l'intérêt accordé aux contenus du CERN sur les réseaux sociaux a augmenté de 107 %.

Trois reportages en direct sur les grandes étapes du deuxième long arrêt ont été produits et diffusés sur plusieurs réseaux sociaux. Ces reportages ont suscité près de 50 000 réactions positives et enregistré jusqu'à 1 100 vues simultanées.

La revue *CERN Courier*, qui est passée à un mode de publication essentiellement en ligne, a continué d'enregistrer d'excellents résultats. Cette année, près de 100 000 personnes ont lu deux numéros spéciaux, 100 articles d'actualités, 20 comptes rendus de conférence, 18 tribunes et entretiens, 6 portraits professionnels et 15 critiques d'art.

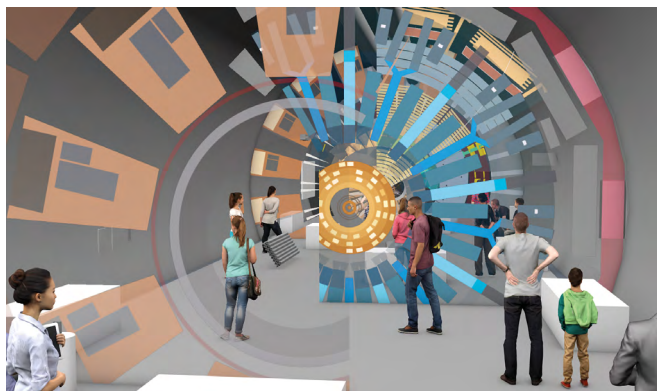
## LE PORTAIL DE LA SCIENCE DU CERN – UN NOUVEAU PÔLE POUR L'ÉDUCATION ET LE DIALOGUE AVEC LE PUBLIC

La construction du Portail de la science du CERN a débuté en décembre, après l'exécution de toutes les procédures administratives et l'adjudication du principal contrat de construction.

En parallèle, la conception du contenu des expositions, des laboratoires pédagogiques et des espaces publics a bien avancé. Un atelier international, qui a notamment rassemblé des participants des États membres du CERN, a été l'occasion de réfléchir aux contenus des laboratoires. Plus de 300 idées d'activités pour des publics d'âges différents ont émergé. La détection, le calcul et les aimants sont les premiers thèmes retenus pour l'élaboration des modules.

## COMMUNICATION SUR LA MISE À JOUR DE LA STRATÉGIE EUROPÉENNE POUR LA PHYSIQUE DES PARTICULES

En collaboration avec le Réseau de communication de la physique des particules en Europe (EPPCN), plusieurs supports de communication ont été élaborés sur la mise à jour 2020 de la stratégie européenne pour la physique des particules. La communauté scientifique a été invitée à suivre en ligne le Conseil public. Un communiqué de presse commun a été adapté par chaque État membre à son propre contexte. Des articles ont été publiés sur les sites web du CERN et des États membres, et une session de questions-réponses pour les journalistes a eu lieu le 19 juin avec la Présidente du Conseil, la Directrice générale et la Secrétaire scientifique du Groupe sur la stratégie. Un récapitulatif de la session a été élaboré pour les membres de l'EPPCN, les délégations au Conseil et les parties prenantes des États membres. Le Conseil public a été suivi par plus de 3 000 internautes. Au total, 19 médias de 11 pays ont participé à la session de questions-réponses. L'annonce de la mise à jour de la stratégie a été couverte par des médias du monde entier, avec 409 publications, et a suscité des réactions positives ou neutres (78 %). Pendant la même période, environ 4 000 mentions ont été comptabilisées sur les réseaux sociaux.



Vue d'artiste de la conception préliminaire d'une partie de l'exposition *Découvrir le CERN* par iArt/Finzi Pasca.

Trois groupements ont été sélectionnés pour concevoir, construire et installer les éléments des trois expositions *Découvrir le CERN*, *Notre Univers* et *Monde quantique*, qui intégreront un grand nombre des 65 espaces interactifs créés avec la participation de 90 scientifiques et ingénieurs

du CERN. L'artiste Julius von Bismarck a été choisi pour créer la principale œuvre d'art de la commande *Explorer l'inconnu*, à la suite d'un concours international organisé par le programme *Arts at CERN*. L'expérience vécue par les visiteurs a fait l'objet de nouvelles recherches, dont les résultats seront utilisés pour la conception des expositions.

La conception du bâtiment, notamment le cahier des charges de l'amphithéâtre et de la réception, a été finalisée avec l'équipe d'architectes.

Le travail de recherche de financements s'est poursuivi : 77 MCHF, sur les 87 MCHF nécessaires, ont été collectés exclusivement sous la forme de dons.

## DONNER DE L'AUTONOMIE AUX ENSEIGNANTS ET AUX ÉLÈVES

Les enseignants sont des ambassadeurs ; ils transmettent à leurs élèves et à leurs pairs les idées enrichissantes qu'ils ont retirées des programmes du CERN. En raison de la pandémie, seuls trois programmes nationaux pour les enseignants ont eu lieu en 2020, en janvier et février, réunissant 80 participants (contre 904 participants pour 31 programmes en 2019).

Chaque année, plusieurs milliers d'élèves font l'expérience directe des recherches de pointe menées au CERN. En 2020, la pandémie de COVID-19 a contraint le S'Cool LAB à fermer ses portes dès le mois de mars et à repousser à 2021 les six programmes de stage pour les élèves du secondaire (Belgique, Danemark, Grèce, Italie, Roumanie et Suisse).

Néanmoins, des activités et expériences du S'Cool LAB ont été proposées sur les réseaux sociaux pendant 11 semaines.

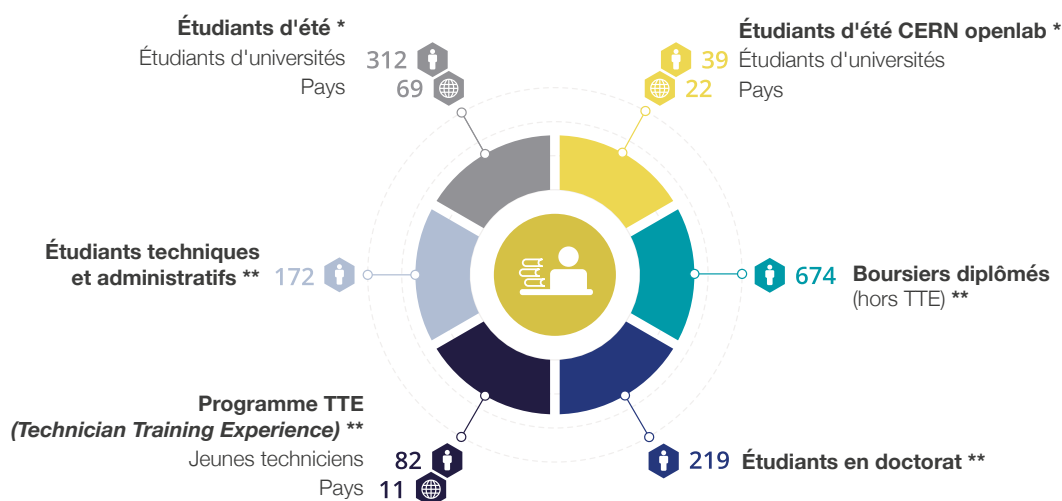
Les expériences à faire soi-même ont remporté un franc succès (10 000 « j'aime » et 280 000 vues sur Facebook et Twitter). Un cours de physique des particules en ligne à destination des 14-19 ans a été élaboré pour présenter aux élèves les modèles fondamentaux de la discipline.

Malgré les restrictions sanitaires, le concours *Ligne de faisceau pour les écoles* s'est bien déroulé, avec la participation record de plus de 1 300 élèves répartis en 198 équipes de 47 pays (dont huit nouveaux pays). Les deux équipes lauréates venaient de Suisse et d'Allemagne. En raison du long arrêt en cours au CERN, les expériences proposées par les équipes lauréates ont été menées à DESY (Hambourg, Allemagne). La pandémie empêchant l'équipe suisse de s'y rendre, celle-ci a été accueillie au CERN et a travaillé à distance avec l'équipe allemande, présente à DESY.

## FORMER LES JEUNES SCIENTIFIQUES

Le Laboratoire offre aux étudiants et aux jeunes diplômés un environnement de travail et de formation enrichissant ; les États membres et États membres associés du CERN bénéficient ainsi d'un flux de professionnels très qualifiés, jouissant d'excellentes compétences techniques et d'une expérience internationale. Malgré la pandémie, cette mission-clé s'est poursuivie sans relâche, essentiellement à distance : environ 750 boursiers et plus de 390 doctorants et étudiants administratifs et techniques, 144 stagiaires et quelque 160 participants à des stages de courte durée ont rejoint l'Organisation pour saisir cette formidable occasion d'apprendre et de travailler. Pour ce qui est des étudiants d'été, sur les 351 étudiants de plus de 90 pays sélectionnés, seule une partie a pu participer aux projets virtuels proposés.

## Les programmes de formation du CERN



\* Nombre d'étudiants d'été sélectionnés. Du fait de la pandémie, le programme a dû être adapté à un format en ligne et seule une partie des étudiants a pu participer aux projets virtuels proposés.

\*\* au 31.12.2020

Le CERN propose un large éventail de formations qui permettent aux étudiants et aux jeunes diplômés d'acquérir d'excellentes compétences techniques et de bénéficier d'une expérience internationale.

# AGIR POUR UNE RECHERCHE RESPONSABLE

**Le CERN veille au bien-être et à la sécurité de toutes les personnes qui utilisent ou visitent ses installations, ou vivent à proximité de ses sites, et s'efforce de limiter le plus possible son impact sur l'environnement.**

## UNE RECHERCHE RESPECTUEUSE DE L'ENVIRONNEMENT

L'année 2020 aura été celle de la parution du premier rapport public du CERN sur l'environnement, établi selon les normes GRI (*Global Reporting Initiative*). Ce rapport porte sur la période 2017-2018 et décrit l'empreinte environnementale du CERN, ainsi que ses objectifs pour les années à venir. L'un de ces objectifs, accepté et financé par la Direction, est de réduire les émissions directes de gaz à effet de serre du CERN de 28 % d'ici fin 2024. Un rapport sur la période 2019-2020 est prévu pour 2021.

En 2020, le Comité directeur pour la protection de l'environnement du CERN (CEPS) a achevé la mise en œuvre de la stratégie pour la protection de l'environnement 2016-2020 et a établi celle pour la période 2021-2025. Il a également mis en place des groupes de travail sur l'utilisation des gaz fluorés, la gestion des déchets et la biodiversité, et lancé une évaluation des émissions de carbone liées à la mobilité, aux missions, à la restauration et aux achats.



En 2020, l'Organisation a découvert une nouvelle espèce d'orchidées sur ses sites, la Spiranthe d'automne, portant le total à 16. La variété la plus présente sur le domaine est l'Orchis pyramidal, en photo ici. (OPEN-PHO-LIFE-2018-006-3)

## UNE MEILLEURE TRAÇABILITÉ DES PRODUITS CHIMIQUES

En avril, l'Organisation a lancé un nouvel outil pour la sécurité chimique : CERES, le registre des produits chimiques du CERN pour l'environnement, la santé et la sécurité. Cette base de données recense tous les produits chimiques présents sur les sites du CERN et permet de visualiser leur emplacement précis. Elle comprend des informations exhaustives sur la sécurité, ainsi que des données sur les évaluations des risques chimiques et environnementaux et les mesures d'atténuation mises en place. Elle offre une traçabilité complète des produits chimiques au CERN et améliore la sécurité du domaine en facilitant l'accès à l'information et en permettant de déclencher des mesures de prévention et de protection adaptées.

## NOUVELLES ÉVALUATIONS DE LA SÉCURITÉ INCENDIE

En 2019, le CERN a lancé le projet FIRIA (*Fire-Induced Radiological Integrated Assessment*), dans le but de proposer une méthodologie pour l'évaluation des risques classiques et radiologiques posés par les incendies sur la vie, l'environnement et les biens, en tenant compte de la complexité et des caractéristiques spécifiques de chaque installation. En 2020, l'évaluation des risques à ATLAS a été réalisée selon cette méthode ; le rapport relatif à ISOLDE, premier cas pilote du projet, a également été finalisé.

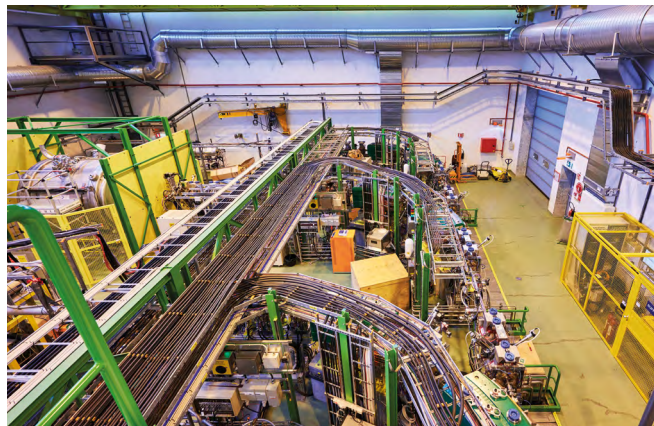
Au cours du projet, plusieurs collaborations ont été mises en place, notamment avec l'Université de Lund (Suède) et le *National Institute of Standards Technology* (NIST, États-Unis), et dans le cadre de l'étude sur la sécurité incendie du Futur collisionneur circulaire.

## REVITALISATION DU NANT D'AVRIL

Le CERN a cosigné une charte élaborée par WWF Genève pour améliorer la qualité de l'eau et la biodiversité du Nant d'Avril, le deuxième principal affluent du Rhône dans le bassin genevois.

Le Nant d'Avril, comme tous les cours d'eau de la région, souffre d'une sécheresse estivale. Grâce à l'eau provenant des tours de refroidissement du CERN et du réseau de chaleur à distance des Vergers, l'affluent restera bien alimenté.

En plus d'améliorer la qualité de l'eau, le projet permettra d'enrichir la biodiversité sur l'ensemble du bassin versant, notamment en rouvrant des sections souterraines et en construisant des berges naturelles. Ces actions favoriseront la recolonisation par certaines espèces, comme la truite commune, la salamandre tachetée et la couleuvre à collier. Les travaux commenceront en 2021 et le projet prendra fin en 2033.



ISOLDE a été le premier cas pilote du projet FIRIA (Fire-Induced Radiological Integrated Assessment). (CERN-PHOTO-201911-394-11)

## COVID-19

L'année 2020 a été dominée par la pandémie de COVID-19. En matière de sécurité, le CERN applique toujours les normes les plus strictes, son objectif principal étant de préserver la santé et la sécurité de toutes les personnes présentes sur ses sites, tout en permettant, dans la mesure du possible, un fonctionnement efficace de ses installations.

Avant de passer en mode sécurisé à la mi-mars, l'Organisation a mis en place un numéro spécial COVID-19 pour son personnel. Cette permanence téléphonique a pris en charge les appels concernant toutes les questions médicales liées à la maladie : évaluation de l'état de santé, traçage des cas contact et échanges réguliers avec les personnes en quarantaine. Depuis sa mise en place, ce service a reçu plus de 8 000 appels, dont 3 000 ont nécessité l'intervention du Service médical du CERN.

Depuis mai, un ensemble de mesures a été instauré afin de limiter le risque de transmission du virus. Le fait que le domaine du CERN se trouve sur la frontière franco-suisse nécessite d'appliquer des mesures cohérentes qui soient compatibles avec la réglementation des deux États hôtes. Si le protocole initial mis en place par le CERN s'est avéré fiable et avisé, les consignes ont évolué au cours de l'année en fonction de l'évolution de la situation dans les États hôtes.

L'unité Santé et sécurité au travail et protection de l'environnement a entrepris un examen approfondi des études sur l'infection COVID-19 et a développé un modèle mathématique simplifié visant à simuler la propagation aéroportée du SARS CoV 2 dans les espaces clos. L'outil, appelé CARA (*COVID Airborne Risk Assessment*), est disponible via une application web et permet de savoir rapidement et facilement si les mesures mises en œuvre dans un contexte particulier sont suffisantes pour prévenir la transmission aéroportée du virus.

# CONSTRUIRE L'AVENIR

*L'année 2020 a été déterminante pour l'avenir de l'Organisation. Les grandes orientations pour le long terme ont été définies par la mise à jour de la stratégie européenne pour la physique des particules, tandis que les travaux pour la haute luminosité se sont poursuivis.*

*Vue d'artiste du FCC, le futur collisionneur circulaire. (OPEN-PHO-ACCEL-2019-001-27)*



LA MISE À JOUR DE LA STRATÉGIE  
DÉFINIT LES GRANDES ORIENTATIONS  
SCIENTIFIQUES DE L'ORGANISATION  
POUR LA PREMIÈRE MOITIÉ DU  
XXI<sup>E</sup> SIÈCLE.

## LA MISE À JOUR DE LA STRATÉGIE EUROPÉENNE POUR LA PHYSIQUE DES PARTICULES

Préparer l'avenir de la recherche en physique des particules fait partie du mandat du CERN. En 2020, l'Organisation a dessiné son avenir à moyen et long termes avec la mise à jour de la stratégie européenne pour la physique des particules.

Instaurée en 2006, et mise à jour en 2013 et en 2020, la stratégie européenne pour la physique des particules est le fruit d'un processus de délibération scientifique qui jette les bases de l'avenir de la physique des particules en Europe. Le CERN est au premier rang des acteurs et bénéficiaires de ces plans d'avenir, bénéficiant de la coopération d'autres instituts de recherche dans les États membres du CERN et au-delà.

Au terme d'un processus participatif associant aussi largement que possible la communauté de la physique des particules, le document final du Groupe sur la stratégie européenne a été rendu public en juin 2020. La mise à jour met la pleine exploitation du LHC et du LHC à haute luminosité (HL-LHC) au cœur de la physique des particules européenne dans les années à venir. Elle met aussi l'accent sur la poursuite de l'appui aux expériences longue distance au Japon et aux États-Unis, et sur le fait que l'Europe doit rester disposée à participer à d'autres projets phares qui seront bénéfiques à la discipline dans son ensemble, tels que le projet de Collisionneur linéaire international.

La stratégie mise à jour considère un collisionneur électron-positon fonctionnant comme « usine à Higgs » comme l'installation prioritaire après le Grand collisionneur de hadrons (LHC), afin de mesurer les propriétés du boson de Higgs avec une extrême précision. Sur le long terme, elle recommande que le CERN réalise, dans une première phase, une étude sur la faisabilité technique et financière d'un futur collisionneur de hadrons d'une énergie inégalée (100 TeV), un collisionneur électron-positon étant une première étape possible. Elle réaffirme l'importance d'intensifier les activités de recherche et développement sur des technologies de pointe pour les accélérateurs, les détecteurs et l'informatique, condition préalable à tout programme de recherche futur à court ou long terme.

Études, recherches et travaux se sont donc poursuivis en 2020 en vue de façonner l'avenir ébauché par la stratégie européenne – un avenir où l'Europe conserve un rôle de premier plan pour la physique des particules et les technologies novatrices mises au point pour la discipline.

## LE LHC À HAUTE LUMINOSITÉ

Le projet LHC à haute luminosité (HL-LHC) est sur les rails pour démarrer lors de la quatrième période d'exploitation, à la mi-2027. Ce projet d'amélioration du LHC augmentera la luminosité intégrée au sein de l'accélérateur de sorte qu'il produise dix fois plus de collisions en dix ans que celles produites jusqu'en 2024. En 2020, le développement d'équipements novateurs en vue de la haute luminosité s'est poursuivi, tout comme les travaux d'excavation des tunnels qui accueilleront ces équipements. Par ailleurs, Lucio Rossi a pris sa retraite après 10 ans à la tête du projet, passant le relais à Oliver Brüning en juillet 2020.

Les travaux de génie civil pour le HL-LHC ont bien progressé avec l'excavation de galeries à proximité du tunnel du LHC aux points 1 et 5, reliées à l'accélérateur par des connexions également souterraines, en vue d'abriter certains des nouveaux équipements. Malgré un retard de trois mois dû à la pandémie de COVID-19, ces excavations ont été achevées, à l'exception du perçage pour les connexions supraconductrices et les connexions électriques des cavités radiofréquence, prévu pendant le troisième long arrêt technique. Les premiers équipements ont été installés dans les nouvelles cavernes, alors que la construction des bâtiments se poursuivait en surface. Des efforts importants sont en cours pour protéger les équipements des rayonnements accrus qui résulteront

*La construction de nouveaux ouvrages souterrains qui accueilleront des équipements HL-LHC près du point 1 du LHC a considérablement avancé en 2020. (CERN-PHOTO-202009-121-1)*





Un collimateur de type TCLD en cours d'installation au point 7 du LHC.  
(CERN-PHOTO-202007-102-1)

de la haute luminosité. En 2020, l'un des deux nouveaux absorbeurs TDIS (*Target Dump Injection Segmented*) a été installé au niveau d'un des deux points d'injection entre le SPS et le LHC en attendant l'installation de son jumeau au deuxième point en 2021. Ces équipements, successeurs des anciens absorbeurs TDI, protégeront le LHC de dommages liés aux rayonnements en cas de défaillance à l'injection.

Parallèlement, le processus de fabrication de l'absorbeur TANB (*Target Absorber Neutral B*) a été validé : ce petit absorbeur de faisceaux protégera les aimants supraconducteurs de la zone IR8 autour de l'expérience LHCb. Parmi la flotte de nouveaux collimateurs qui participeront à la protection des équipements, les collimateurs de type TCLD (*Target Collimator Long Dispersion suppressor*) ont été installés de part et d'autre du point 7 du LHC pour protéger l'expérience ALICE des rayonnements du futur HL-LHC, tandis que les derniers collimateurs à basse impédance ont été livrés au CERN en décembre. Enfin, des efforts importants ont été réalisés pour automatiser l'installation de modules contenant des équipements dans des zones présentant des rayonnements importants.

Une centaine de nouveaux aimants de 11 types différents équiperont le collisionneur amélioré. Le développement des aimants supraconducteurs à base du composé niobium-étain, permettant d'atteindre des champs magnétiques plus élevés, s'est poursuivi. De nouveaux aimants quadripôles dits « triplets » sont destinés à focaliser plus fortement les faisceaux avant leur croisement au cœur des expériences ATLAS et CMS. Des quadripôles de 4,2 mètres de long sont en construction aux États-Unis et des versions longues de 7,2 mètres au CERN. Assemblé en 2019, le premier quadripôle du CERN de taille réelle a été testé, atteignant une énergie de 6,5 TeV. Une défaillance dans la bobine a contraint à l'arrêt des essais, mais le concept de l'aimant a été validé grâce au modèle court qui a dépassé le champ requis. Les deux premiers aimants quadripôles fabriqués aux États-Unis ont passé avec succès des tests à froid. La fabrication de deux aimants dipôles à 11 teslas s'est achevée au CERN, mais des dégradations observées pendant les essais ont justifié la décision de reporter leur installation au prochain long arrêt technique. En parallèle, plusieurs modèles d'aimants novateurs en

développement ont prouvé leur efficacité, qu'il s'agisse des petits quadripôles superferriques développés à l'INFN (Italie) et au KEK (Japon), d'un prototype d'aimant correcteur à bobine imbriquée produit au CIEMAT (Espagne), et testé au CERN, ou bien de l'aimant correcteur de type D2 dont la production industrielle a commencé en Chine. Enfin, le système d'alignement à distance développé en 2020 permettra de préserver l'alignement de certains aimants quadripôles.

Certains équipements du HL-LHC requièrent une alimentation électrique au moyen de lignes de transmission innovantes. Des lignes supraconductrices en diborure de magnésium sont développées pour transporter des intensités atteignant 100 000 ampères. En 2020, un prototype a établi un nouveau record pour le transport d'électricité : 54 000 ampères ont parcouru les 60 mètres de la ligne (27 000 dans chaque direction).



Un aimant quadripôle en niobium-étain pour le projet HL-LHC a atteint un champ magnétique record de 11,4 T lors d'un test au Laboratoire national de Brookhaven, aux États-Unis.



Enfin, le développement des cavités-crabe, qui infléchiront localement les faisceaux pour permettre des collisions frontales et ainsi augmenter le plus possible le nombre de collisions, a suivi son cours avec la finalisation de la construction de deux de ces cavités. Elles seront installées dans le SPS pour être testées en 2023.

## LES EXPÉRIENCES DU LHC VERS LA HAUTE LUMINOSITÉ

### ALICE

Le détecteur ALICE récoltera cent fois plus de données pendant la troisième période d'exploitation des accélérateurs qu'auparavant. Le taux de collision sera plus de six fois plus élevé (50 kHz) que pendant la deuxième période d'exploitation. Ce saut est rendu possible par une rénovation complète du détecteur et de ses systèmes d'acquisition et de traitement des données. En 2020, plusieurs sous-détecteurs finalisés ont été installés dans la caverne.

La chambre à projection temporelle (TPC), grand trajectographe, complètement rénovée, a été installée en août. Désormais équipée de systèmes à multiplicateurs d'électrons dans le gaz (GEM) et d'une nouvelle électronique de lecture, la TPC pourra enregistrer en continu les traces laissées par les particules fusant du cœur du détecteur. La structure Miniframe, de 12 mètres de long et de 14 tonnes, a été descendue dans la caverne en novembre. Elle abrite ses services (électricité, refroidissement, gaz et contrôle) ainsi que ceux du trajectographe interne. Le Miniframe abrite également le déclencheur à interaction rapide (FIT), mis à jour et réinstallé, ainsi que le trajectographe à muons à petits angles (MFT), également réinstallé. Ce sous-détecteur complète l'actuel spectromètre à muons pour en augmenter la résolution. Le nouveau système novateur de trajectographie interne (ITS) a été finalisé avec une installation prévue pour début 2021.



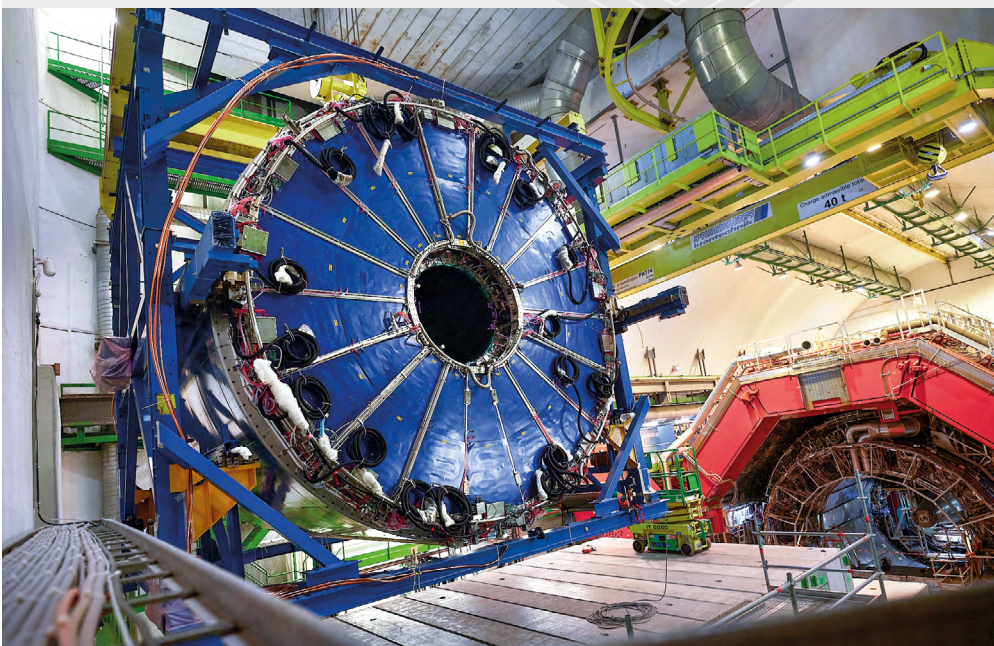
*Avec 54 000 ampères transportés sur 60 mètres de long, cette ligne de transmission électrique destinée au LHC à haute luminosité est la plus puissante jamais construite. (CERN-PHOTO-202002-043-5)*

Enfin, le développement du système intégré en ligne / hors ligne (système O2) a enregistré des progrès considérables, avec la finalisation du câblage dans la salle de comptage et le développement de son centre de calcul qui comptera 250 serveurs.

### ATLAS

L'amélioration de l'électronique de lecture du calorimètre à argon liquide a nettement progressé avec le changement des cartes frontales. La rénovation de l'électronique du calorimètre se poursuit pour augmenter le niveau de segmentation pour le système de déclenchement de premier niveau.

Les travaux de maintenance et de consolidation du calorimètre à tuiles entrent également dans leur phase finale : les activités de maintenance standard de l'électronique frontale sont presque terminées et l'installation des vannes d'isolation au froid débute.



*Le détecteur ALICE (en arrière plan) s'apprête à recevoir la chambre à projection temporelle TPC (à gauche). (CERN-PHOTO-202008-104-78)*

Les nouvelles « petites » roues à muons, qui permettront d'améliorer l'identification de ces particules, sont toujours en cours de développement. Elles sont chacune composées de 16 secteurs avec deux types de chambres (sTGC et MicroMegas). Au terme de l'année 2020, neuf secteurs achevés ont été montés sur le disque de support de l'une des petites roues.

Le détecteur de temps de vol *ATLAS Forward Proton (AFP)*, installé en 2017 à 200 mètres de part et d'autre du point de collision pour étudier les protons émis à de très petits angles, a subi une refonte importante. De nouveaux tubes photomultiplicateurs à longue durée de vie sont en cours d'essai. La résolution temporelle de l'appareil est comprise mieux que jamais.

De nombreux travaux sont en cours pour améliorer les systèmes d'acquisition et de lecture, avec notamment l'installation et la mise en service de FELIX, le système qui assure l'interface entre l'électronique frontale des détecteurs, le système de déclenchement, le système d'acquisition et l'horloge du LHC, et dont le but est de simplifier l'architecture de lecture. Les systèmes de lecture, les serveurs de surveillance en ligne et hors ligne, les serveurs stockant les fichiers et leurs systèmes d'exploitation sont également en cours d'amélioration. Un nouveau logiciel de déclenchement est en cours d'élaboration tandis qu'un nouveau modèle d'analyse, qui permettra de réduire considérablement les formats d'analyse, est également développé pour la troisième période d'exploitation.

La salle de contrôle a repris vie l'espace d'une semaine spéciale (*Milestone Week*) pour une prise de données avec des rayons cosmiques enregistrés par un grand nombre de sous-détecteurs.

## CMS

La mise à niveau du système de détection des muons a été achevée en décembre 2020, avec l'installation de la première couche de détecteurs GEM (multiplicateurs d'électrons dans le gaz), la mise à niveau de l'électronique frontale et des chambres à rubans cathodiques (CSC) bouchon. Tous les détecteurs à muons ont fait l'objet de travaux de maintenance et de réparation, et les chambres à tubes de dérive (DT) ont été testées avec des prototypes du système R/O de la phase II.

La nouvelle couche interne du trajectographe à pixels a été livrée pour une installation en 2021. La consolidation du blindage rotatif est en bonne voie pour l'adapter à la nouvelle chambre à vide qui sera installée début 2021.

Les projets liés au détecteur, tels que la mise à niveau du système de sécurité magnétique ou du thyristor à roue libre, ainsi que les projets liés à l'infrastructure, tels que la préparation de la salle des pompes à CO<sub>2</sub>, sont tous dans les temps pour recevoir le faisceau pilote en septembre 2021.

Tous les projets de conception et de prototypage ont bien avancé, notamment ceux concernant les circuits intégrés, pour permettre la présentation des prototypes finaux en 2020/2021. La production en série a commencé pour certains capteurs ainsi que pour les circuits ASIC. Enfin, le projet de déclenchement de niveau 1 (*Level-1 Trigger*) a été approuvé.

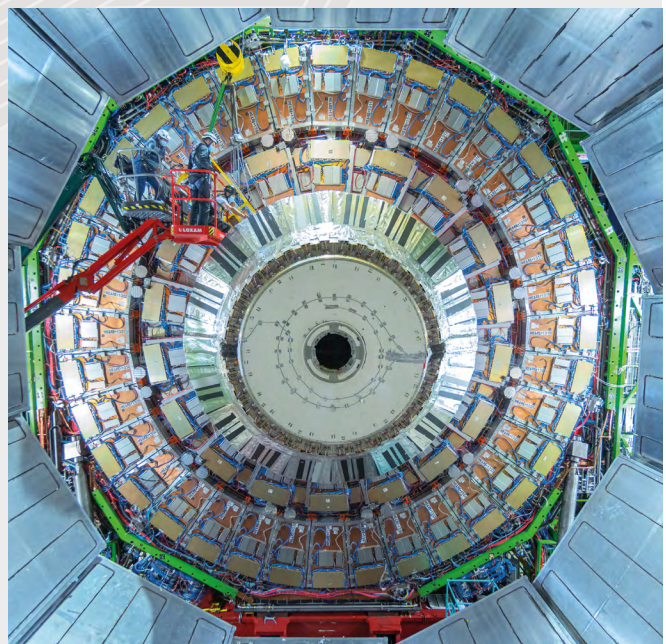
## LHCb

Le détecteur LHCb enregistrera des collisions à un rythme dix fois plus élevé qu'auparavant pendant la troisième phase d'exploitation. Pour atteindre cet objectif et préparer le détecteur à la haute luminosité, les sous-détecteurs sont en cours de construction.

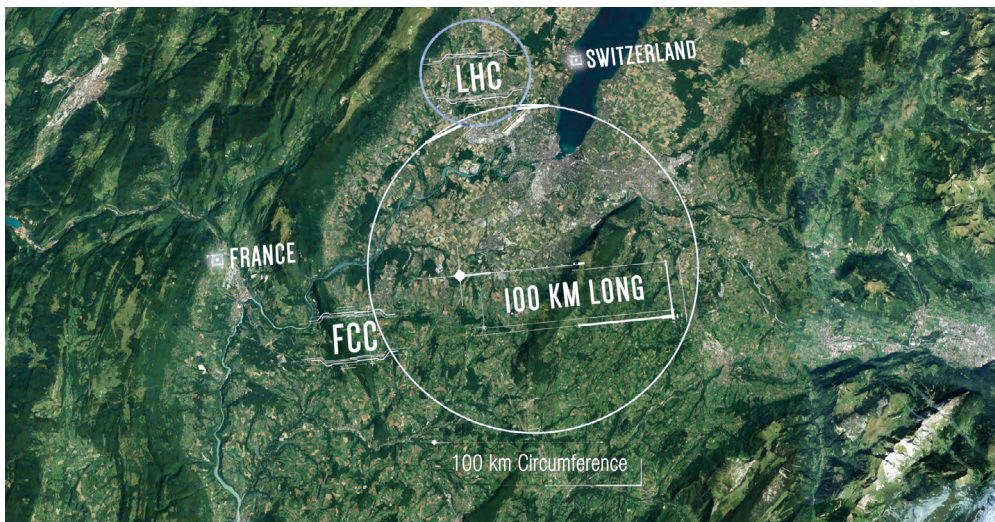
Les travaux de construction des sous-détecteurs VELO, SciFi, UT et RICH avancent à bon train, malgré un ralentissement des activités causé par la pandémie de COVID-19. Des progrès importants ont également été enregistrés dans l'installation de la nouvelle électronique pour le sous-détecteur à muons. Des éléments de blindage ont été installés dans la partie centrale du détecteur pour atténuer les rayonnements au niveau des détecteurs à muons.

Un problème sur les supports des bobines de l'aimant LHCb a été corrigé : un test a démontré qu'il était désormais pleinement opérationnel. L'infrastructure générale et l'électronique commune ont été en grande partie achevées.

L'infrastructure informatique est actuellement exploitée pour des simulations Monte Carlo et des analyses de données de la physique, tandis que l'infrastructure à fibres optiques pour le système de lecture de l'expérience modernisée a été mise en place dans le nouveau centre de données modulaire.



Le dernier GEM (multiplicateur d'électrons dans le gaz) lors de son installation sur le détecteur CMS. (CERN-PHOTO-202009-116-17)



*Proposition d'implantation du FCC dans la région franco-genevoise. (OPEN-PHO-ACCEL-2019-001-33)*

## LE FUTUR COLLISIONNEUR CIRCULAIRE

La stratégie européenne mise à jour recommande que le CERN réalise une étude sur la faisabilité technique et financière d'un futur collisionneur circulaire (FCC) de 100 km, avec comme première phase, la construction d'une usine à Higgs et de production électrofaible sous la forme d'une machine électron-positon, puis d'un collisionneur de hadrons de la plus haute énergie (100 TeV). L'usine à Higgs électron-positon (FCC-ee) permettrait d'étudier en détail les propriétés de cette particule unique et ses interactions avec d'autres particules, et pourrait mener les scientifiques sur la voie d'une physique au-delà du Modèle standard.

Ce collisionneur FCC-ee pourrait ensuite être transformé en un collisionneur de hadrons (FCC-hh) dans le même tunnel, sur le modèle de la construction du LHC, réalisée dans le même tunnel que celui de l'ancien Grand collisionneur électron-positon (LEP). Une telle machine atteindrait des énergies inégalées, donnant accès à des régions d'énergie où des particules encore inconnues pourraient se cacher. Pour relever les défis technologiques d'un tel projet, la stratégie européenne recommande une intensification des efforts de recherche et développement sur les technologies novatrices à l'appui du potentiel pour la physique des collisionneurs de haute énergie.

Dans le cadre de cette étude de faisabilité, l'équipe FCC a commencé à examiner l'impact environnemental du projet, à travers le développement d'une procédure d'évaluation en collaboration avec les États membres, ainsi que son impact socio-économique avec des partenaires internationaux. L'année 2020 a également vu l'achèvement du projet EuroCirCol financé par l'Union européenne à travers le programme Horizon 2020, avec la soumission du rapport final, ainsi que l'approbation de l'étude d'innovation pour le FCC (FCCIS), qui soutiendra les activités internationales de R&D pour le FCC.

Des travaux de recherche et développement sur les technologies-clés, comme la supraconductivité ou la cryogénie, se sont poursuivis, bénéficiant du soutien financier du projet H2020 MSCA EASITrain. Parmi ces

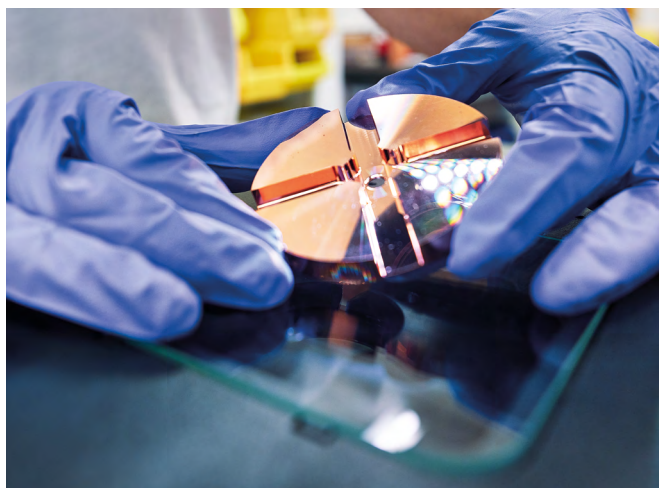
technologies, les cavités radiofréquence supraconductrices et les klystrons de haut rendement ont suscité des efforts importants et le développement de collaborations à l'échelle mondiale. Enfin, les recherches sur l'architecture du collisionneur en vue d'optimiser sa localisation ont abouti à deux propositions alternatives, prévoyant respectivement des anneaux d'une circonférence de 96 et 92 km.

Une étude géologique des sols de la région de Genève a été lancée en 2020, en collaboration avec l'Université de Genève et des collaborateurs pour le développement d'un modèle géologique 3D, ainsi qu'avec l'ETHZ, l'Office fédéral de topographie swisstopo et l'Institut d'ingénierie du territoire (HEIG-VD), pour travailler sur la géodésie physique et le développement d'une infrastructure géodésique. Ces activités sont intégrées dans l'étude de faisabilité en cours.

## LES COLLISIONNEURS LINÉAIRES

Depuis plusieurs années, le projet CLIC développe des technologies en vue de la construction et de l'exploitation d'un collisionneur linéaire électron-positon à haute luminosité en trois étapes, de 380 GeV à 3 TeV, reposant sur un concept innovant d'accélération à deux faisceaux. Les travaux de recherche et développement sur des technologies-clés du CLIC se poursuivront afin que CLIC reste une option possible de futur collisionneur au CERN. Ainsi, CLIC continuera d'être à l'origine de nombreuses innovations technologiques en physique des accélérateurs, trouvant des applications dans des domaines connexes.

En 2020, le programme de recherche CLIC s'est poursuivi, notamment dans le but d'atteindre des gradients d'accélération toujours plus élevés sur des distances toujours plus réduites. De nombreux progrès ont également été enregistrés sur les nano-faisceaux, la luminosité et l'efficacité énergétique, l'optimisation des paramètres des faisceaux et la recherche de systèmes radiofréquence à haut rendement.



Un des éléments du prototype du CLIC, sur lequel la technologie FLASH est basée. (CERN-PHOTO-202008-108-17)

Ce programme de recherche alimentera notamment les études en vue d'un collisionneur linéaire international (ILC). Ce projet, qui pourrait voir le jour au Japon, pourra compter sur le soutien du CERN, la stratégie européenne ouvrant la porte à une telle collaboration.

Les innovations engendrées par le programme de recherche de CLIC ont continué à trouver des applications médicales. Une technologie d'accélération compacte à haut gradient est développée en collaboration avec le Centre hospitalier universitaire vaudois, en Suisse, pour mettre au point FLASH, une technique de radiothérapie par faisceaux d'électrons plus efficace (voir p. 37).

## LA RECHERCHE SUR LES NEUTRINOS

Les neutrinos sont des particules omniprésentes dotées de masses infimes qui pourraient éclairer les physiciens sur des questions fondamentales telles que le déséquilibre entre la matière et l'antimatière dans l'Univers. Ils font depuis plusieurs années l'objet d'un intérêt accru de la communauté de la physique des particules, intérêt qui se reflète dans la mise à jour de la stratégie européenne, laquelle traite également de la recherche dans ce secteur. Celle-ci recommande la consolidation du programme de recherche du CERN sur les neutrinos, le Laboratoire participant à des projets basés aux États-Unis et au Japon en fournissant l'infrastructure pour les tests et les prototypes de ces expériences.

Ce rôle se manifeste à travers la mise en œuvre de l'installation ProtoDUNE, l'installation prototype de la future expérience DUNE (*Deep Underground Neutrino Experiment*), qui sera réalisée aux États-Unis. Il s'agit de deux prototypes de détecteurs de neutrinos : un détecteur monophasé à argon liquide enregistrant les signaux générés lorsqu'un neutrino se heurte à un atome d'argon, et un détecteur biphasé comprenant une couche d'argon gazeux amplifiant les signaux des particules les moins énergétiques avant leur collision avec le liquide.

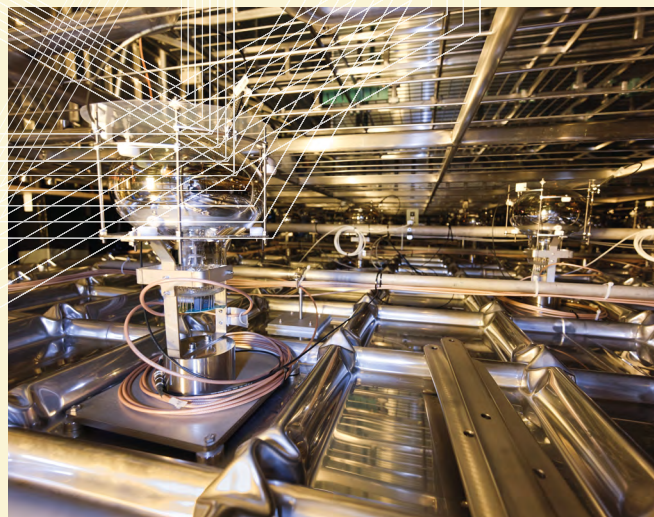
En 2020, la robustesse de la technologie du premier détecteur a été démontrée après 350 jours de fonctionnement

## L'INITIATIVE TECHNOLOGIE QUANTIQUE DU CERN

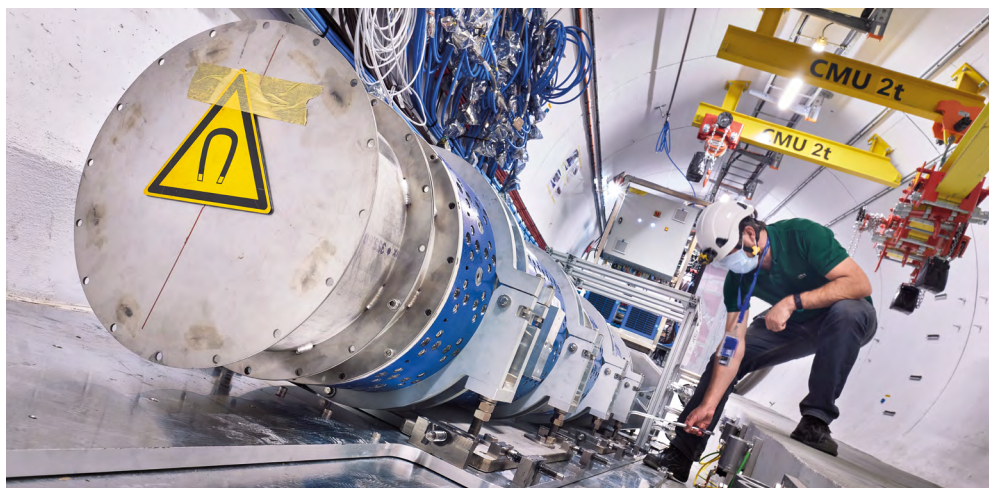
CERN QTI, l'initiative technologie quantique du CERN, annoncée par la Direction en juin, permet au CERN de s'associer à un mouvement mondial, en plein essor, tendant à une « deuxième révolution quantique ». S'il n'est présent sur la scène des technologies quantiques que depuis une période relativement récente, le CERN présente néanmoins l'avantage extraordinaire de rassembler en un seul lieu un ensemble diversifié de compétences et de technologies nécessaires à une approche pluridisciplinaire. Le CERN fournit également des cas d'utilisation permettant de comparer les approches classique et quantique pour certaines applications. Le réseau étendu et dense constitué par le CERN, faisant travailler ensemble universitaires et industriels au sein de collaborations uniques en leur genre telles que CERN openlab, représente un atout supplémentaire.

Au cours des trois prochaines années, CERN QTI évaluera l'impact potentiel des technologies quantiques sur le CERN et la physique des hautes énergies à l'horizon du projet LHC à haute luminosité, et au-delà. La méthode de gouvernance et les instruments opérationnels sont en cours de finalisation et des objectifs concrets en matière de R&D ont été fixés dans les quatre principaux champs d'activité des technologies quantiques : informatique, détection et métrologie, communication, et enfin théorie. Un programme international d'enseignement et de formation sera par ailleurs développé. Des mécanismes de partage des connaissances seront également établis.

ininterrompu, validant ainsi le déploiement de la technologie dans le premier cryostat de DUNE. En parallèle, le groupe neutrino du CERN a proposé une nouvelle version du détecteur basée sur le concept de chambre à projection temporelle (TPC) à dérive verticale et de nouvelles unités de lecture reposant sur une nouvelle technologie. Après le succès des deux prototypes conçus selon cette version, le département de l'énergie des États-Unis s'est prononcé en faveur de cette solution pour le deuxième détecteur lointain de l'expérience.



L'intérieur du détecteur ProtoDUNE dont la robustesse a été testée avec succès en 2020. (CERN-PHOTO-201906-156-2)



Installation de l'aimant de l'expérience FASER dans le tunnel du LHC.  
(CERN-PHOTO-202011-156-8)

## LA PHYSIQUE AU-DELÀ DES COLLISIONNEURS

Le complexe scientifique du CERN offre de très nombreuses possibilités de recherche ne relevant pas des collisionneurs. Depuis 2016, le programme Physique au-delà des collisionneurs (*Physics Beyond Colliders - PBC*) étudie ces possibilités, mettant en lien physiciens théoriciens, physiciens expérimentateurs et physiciens et ingénieurs des accélérateurs pour exploiter le potentiel des infrastructures du CERN.

L'optimisation de la ligne de faisceau issue du SPS pour les expériences KLEVER et NA62 haute intensité (recherche sur la désintégration des kaons), dans la zone Nord, a progressé, tout comme les travaux d'ingénierie sur l'intégration d'AMBER, l'expérience qui succédera à COMPASS. Les études d'optique et de fond pour l'expérience NA64++, qui étudiera la physique du secteur sombre, se sont conclues en 2020, tout comme la définition de la ligne de faisceau pour MuonE, une expérience qui étudiera certaines propriétés des muons. L'intégration d'une expérience à ions lourds (NA60++) dans la zone d'expérimentation Nord EHN1 a été étudiée.

L'optimisation de l'installation BDF (*Beam Dump Facility*) s'est poursuivie avec des études visant à la réduction des pertes de faisceau. BDF produira principalement des hadrons charmés qui alimenteront des expériences spécialisées dans les études du secteur caché. Un prototype de la cible BDF, testé en 2018, a été démantelé grâce à un système complètement robotisé, pour analyser les matériaux qui la composent après irradiation par les faisceaux.

Une cible fixe gazeuse a été installée à l'intérieur de l'expérience LHCb. Les collisions entre les protons du LHC et les molécules de gaz permettront des études sur la chromodynamique quantique et la structure des hadrons. Parallèlement, l'étude sur l'utilisation de cristaux pour courber les faisceaux de protons s'est poursuivie.

Des rayons gamma de haute intensité pourraient être générés par l'excitation avec un laser d'atomes partiellement ionisés accélérés dans le LHC. Une première expérience visant à démontrer le principe de cette usine gamma dans le

SPS a été présentée au Comité du SPS. Des progrès ont été réalisés dans la spécification des composants requis et le développement de modèles et de codes.

La réalisation de l'expérience FASER a beaucoup progressé avec l'achèvement des travaux de génie civil et de préparation de l'infrastructure technique, ainsi que l'installation d'une première partie du détecteur. L'expérience, située en aval du point d'interaction d'ATLAS, projette d'identifier des particules exotiques à longue durée de vie et des particules de matière noire. Une proposition technique pour l'installation du détecteur de diffusion et de neutrinos dans le LHC est par ailleurs en cours de préparation.

Les études conduites sur un anneau de stockage entièrement électrostatique se sont poursuivies pour évaluer l'effort de recherche et développement nécessaire pour mesurer avec précision le moment dipolaire électrique du proton, en vue d'une proposition de construction d'un anneau prototype au COSY (Allemagne).

La conception de l'aimant pour BabyIAXO, un hélioscope pouvant accueillir des cavités micro-ondes pour la recherche d'axions, a été réalisée au CERN.

### AWAKE

L'expérience AWAKE (*Advanced Wakefield Experiment*) se prépare en vue d'une deuxième phase d'exploitation prévue après le long arrêt technique. L'expérience étudie l'utilisation de faisceaux de protons pour générer dans une cellule plasma des ondes (champs de sillage) permettant d'accélérer des faisceaux d'électrons de gradients des centaines de fois plus élevés que dans les accélérateurs actuels. Des mesures sur le plasma d'une nouvelle source installée en 2020 et sur des faisceaux d'électrons ont été réalisées. La conception détaillée d'une nouvelle source d'électrons et de sa ligne de faisceau a été finalisée. Le développement de la source d'électrons a débuté en collaboration avec CLEAR, l'installation linéaire à électrons du CERN destinée aux projets de R&D sur les accélérateurs.

# CONSEIL DU CERN

Composition au 31 décembre 2020

**Présidente du Conseil** : M<sup>me</sup> U. Bassler (France)

**Vice-présidents** : M. P. Lévai (Hongrie), M. J. Schieck (Autriche)

## ÉTATS MEMBRES

### Allemagne

M. S. Bethke  
M. V. Dietz

### Autriche

M. J. Schieck  
S.E. M<sup>me</sup> E.  
Tichy-Fisslberger

### Belgique

M<sup>me</sup> V. Halloin  
M. D. Ryckbosch

### Bulgarie

M. L. Litov  
M. D. Tonev

### Danemark

M. J. J. Gaardhøje  
M<sup>me</sup> F. Wolf

### Espagne

S.E. M<sup>me</sup> A. Díaz-Rato  
Revuelta  
M. J. J. Sánchez Serrano

### Finlande

M<sup>me</sup> P. Eerola  
M. O. Malmberg

### France

M<sup>me</sup> A.-I. Etievre  
S.E. M. F. Rivasseau

### Grèce

M. K. Fountas  
S.E. M. P. Stournaras

### Hongrie

M. P. Lévai  
M. I. Szabó

### Israël

S.E. M<sup>me</sup> M. Eilon Shahaar  
M. E. Rabinovici

### Italie

S.E. M. G. L. Cornado  
M. A. Zoccoli

### Norvège

M<sup>me</sup> L. Furuberg  
M. E. Osnes

### Pays-Bas

M. E. Laenen  
M<sup>me</sup> P. Vogel

### Pologne

M. D. Drewniak  
M. T. Lesiak

### Portugal

M<sup>me</sup> A. L. Nunes Barata  
M. M. Pimenta

### Roumanie

M. F. Buzatu  
M<sup>me</sup> A. Ghinescu

### Royaume-Uni

M. T. Child  
M. M. Thomson

### Serbie

M. P. Adžić  
S.E. M. D. Zlatanović

### Slovaquie

S.E. M. J. Podhorský  
M. B. Sitár

### Suède

M. M. Johnsson  
M<sup>me</sup> K. Jon-And

### Suisse

M. G. Dissertori  
M. G. Haefliger

### Tchéquie

S.E. P. Gajdušek  
M. R. Leitner

## ÉTATS MEMBRES ASSOCIÉS EN PHASE PRÉALABLE À L'ADHÉSION

### Chypre

S.E. M. G. Kasoulides  
M. P. Razis

### Slovénie

M. J. Gašparič  
M. D. Zavrtanik

## ÉTATS MEMBRES ASSOCIÉS

### Croatie

M. T. Antičić  
M. M. Planinić

### Inde

M. A. Mohanty  
M. A. Srivastava

### Lituanie

S.E. M. A. Krivas  
M. V. Razumas

### Pakistan

S.E. M. K. Hasmi  
M. M. Naeem

### Turquie

M. A. Baliçki  
M. A. S. Işilak

### Ukraine

M. B. Grinyov  
M. A. Zagorodniy

## OBSERVATEURS

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

# COMITÉS DU CONSEIL

---

## COMITÉ DES DIRECTIVES SCIENTIFIQUES

---

### Président

M. L. Rivkin  
(Suisse)

### Membres

M. H. Aihara  
M<sup>me</sup> L. Baudis  
M<sup>me</sup> C. Biscari  
M. K. Blaum  
M. R. Brinkmann  
M. R. Cousins  
M. N. Glover  
M<sup>me</sup> B. Heinemann  
M<sup>me</sup> P. Hernandez  
M. G. Martinelli  
M. H. Montgomery  
M. Y. Nir  
M<sup>me</sup> H. Schellman  
M<sup>me</sup> M.-H. Schune  
M. J. P. Wessels

### Membres ès qualités

**Président du Comité des  
expériences LHC**

M. F. Simon

**Président du Comité des  
expériences SPS et PS**

M. J. Nash

**Président du Comité des  
expériences ISOLDE et n\_TOF**

M. M. Pfützner

**Président du Comité européen  
sur les futurs accélérateurs**

M. J. D'Hondt

### Également présents

**Présidente du Conseil**

M<sup>me</sup> U. Bassler

**Président du Comité des  
finances**

M. U. Dosselli

**Directrice générale**

M<sup>me</sup> F. Gianotti

## COMITÉ DES FINANCES

---

### Président

M. U. Dosselli  
(Italie)

### Membres

Un ou plusieurs  
représentants par État  
membre et État membre  
associé

## TREF (FORUM TRIPARTITE SUR LES CONDITIONS D'EMPLOI)

---

### Présidente

M<sup>me</sup> B. Åsman  
(Suède)

### Membres

Un représentant par État  
membre

## COMITÉ D'AUDIT

---

### Président

M. U. Dosselli  
(Italie)

### 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**

Unités de la 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**

Doris Forkel-Wirth

## **Directeur des accélérateurs et de la technologie**

Faisceaux (BE)  
Ingénierie (EN)  
Technologie (TE)

## **Frédéric Bordry**

Paul Collier  
Roberto Losito  
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)  
Gestion des sites et bâtiments (SMB)

## **Martin Steinacher**

Florian Sonnemann  
James Purvis  
Thierry Lagrange  
Lluis Miralles

## **Directrice des relations internationales**

Relations extérieures (IR-REL) : États hôtes, États membres, États associés et États non-membres  
Organisations internationales, partenariats et collecte de fonds  
Planification et évaluation stratégiques, Protocole  
Éducation, communication et activités grand public (IR-ECO)

## **Charlotte Warakulle**

Ana Godinho

## **Directeur de la recherche et de l'informatique**

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

## **Eckhard Elsen**

Manfred Krammer  
Frédéric Hemmer  
Gian Giudice

## **Direction de projets**

Advanced Wakefield Experiment (AWAKE)  
CERN Neutrino Platform  
Extra Low Energy Antiproton (ELENA)  
Future Circular Collider Study (FCC)  
High-Luminosity LHC (HL-LHC)  
LHC Injectors Upgrade (LIU)  
Linear Collider Studies (CLIC and LCS)  
Physics Beyond Colliders (PBC)  
Worldwide LHC Computing Grid (WLCG)

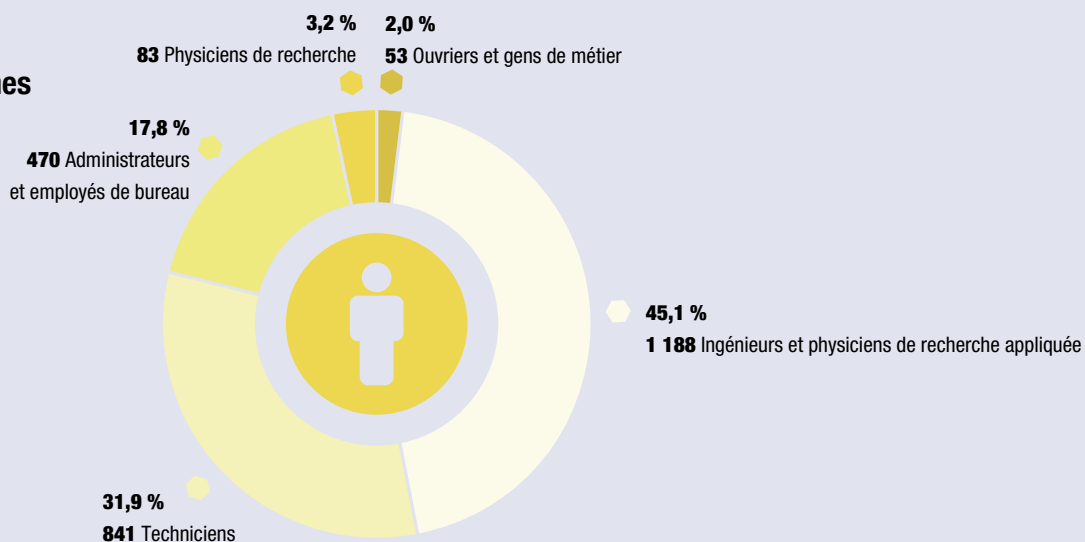
Edda Gschwendtner  
Marzio Nessi  
Christian Carli  
Michael Benedikt  
Lucio Rossi  
Malika Meddahi  
Steinar Stapnes  
Mike Lamont  
Ian Bird



# LE CERN EN CHIFFRES

## PERSONNEL DU CERN

Total : 2 635 personnes



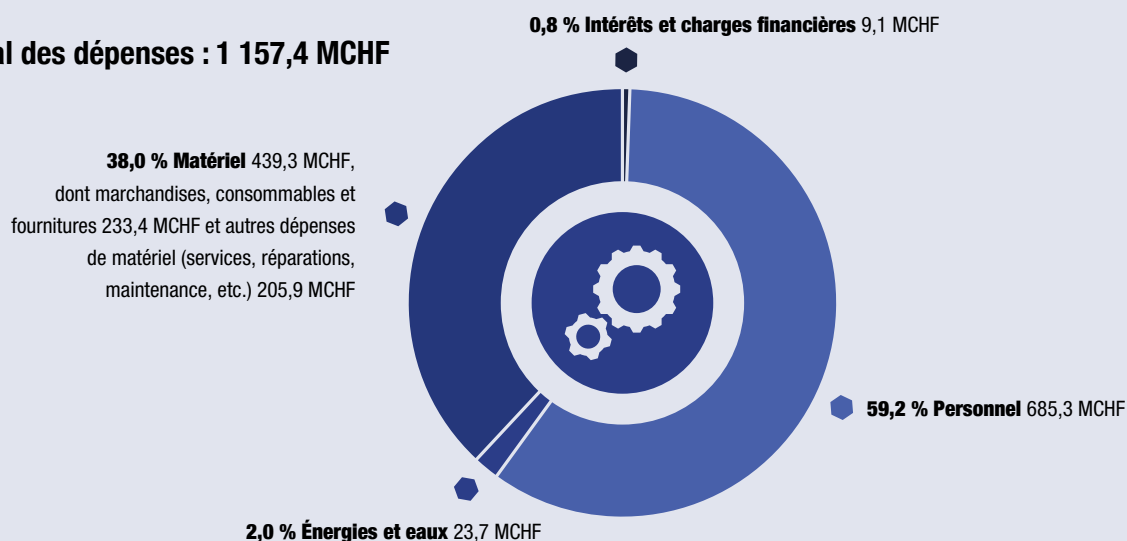
## ÉVOLUTION DES EFFECTIFS DES MEMBRES DU PERSONNEL TITULAIRES

2016	2560
2017	2633
2018	2667
2019	2660
2020	2635

En plus des membres du personnel titulaires, le CERN a employé 756 boursiers (dont les techniciens TTE), formé 555 étudiants et apprentis, et accueilli 1 132 attachés en 2020. L'infrastructure et les services du CERN sont utilisés par une grande communauté scientifique, représentant 11 399 utilisateurs (voir p. 16).

## DÉPENSES DU CERN

Total des dépenses : 1 157,4 MCHF



En 2020, 36,8 % du budget du CERN a été dépensé dans l'industrie au travers d'achats de matériel et de services. Le CERN s'efforce d'équilibrer le retour industriel entre ses États membres (voir p. 38).

**CERN**  
**Esplanade des Particules 1**  
**Case postale 1211**  
**Genève 23**  
**Suisse**  
[home.cern/fr](http://home.cern/fr)

Soixante-sixième 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>

Le Rapport biennal sur l'environnement 2017-2018 est disponible à l'adresse :

[https://e-publishing.cern.ch/index.php/CERN\\_Environment\\_Report](https://e-publishing.cern.ch/index.php/CERN_Environment_Report)

Le Rapport annuel 2020 sur le transfert de connaissances au CERN (en anglais) est disponible à l'adresse : <http://kt.cern/annual-report>

Le Rapport annuel openlab 2020 (en anglais) est disponible à l'adresse :

<http://openlab.cern/resources/annual-reports>

Le Rapport annuel CERN & Society 2020 (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 :

<http://library.cern/annual/list-cern-publications-2020>

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

#### **Images:**

Wikicommons/Birds-eye : p. 6 (en haut à droite)

CNAO : p. 6 (à gauche)

LHCP : p. 7 (en bas à droite)

Renzo Piano Building Workshop :

p. 10 (en haut à droite)

Photos fournies par les artistes :

p. 10 (en bas à droite)

VEXOS : p. 14 (au centre)

Zenodo : p. 14 (en bas à gauche)

OpenAIRE : p. 14 (en bas à droite)

BioDynaMo : p. 15 (en haut)

VersusVirus : p. 15 (au centre)

Folding@home : p. 15 (au centre)

NASA : p. 25

InsightART : p. 37 (en haut à droite)

BAQ : p. 37 (en bas)

ATTRACT : p. 39

iArt/Finzi Pasca : p. 42

Brookhaven National Laboratory : p. 48 (en bas)

CERN : toutes les autres images

#### **Réalisation éditoriale et graphique :**

Groupe Éducation, communication et activités grand public du CERN [eco.office@cern.ch](mailto:eco.office@cern.ch)

#### **Traduction et relecture :**

Service de traduction du CERN, Griselda Jung et Fanny Mourguet

ISSN 0304-291X

ISBN 978-92-9083-600-1 (version papier)

ISBN 978-92-9083-601-8 (version électronique)

DOI : 10.17181/RapportAnnuel2020

<http://dx.doi.org/10.17181/RapportAnnuel2020>

© Copyright 2021, 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).

