

Document explicatif relatif à la mise à jour 2020 de la stratégie européenne pour la physique des particules

*Groupe sur la stratégie européenne
(préparé par le Secrétariat de la stratégie)*

Le Conseil du CERN avait adopté en juillet 2006, lors d'une session spéciale à Lisbonne, la première stratégie européenne pour la physique des particules (ci-après dénommée « la stratégie »), qui comptait dix-sept prises de position. En mai 2013, une première mise à jour de la stratégie avait été adoptée par le Conseil du CERN lors de sa session spéciale à Bruxelles. La deuxième mise à jour de la stratégie, exposée dans le présent document, a été élaborée par le Groupe sur la stratégie européenne (ESG) lors de sa réunion de six jours tenue à Bad Honnef en janvier 2020. Celui-ci a été aidé par le Groupe préparatoire sur la physique, qui a apporté des contributions scientifiques sur la base des éléments présentés lors du symposium public tenu à Grenade en mai 2019 et des documents soumis par la communauté mondiale. En outre, six groupes de travail ont été créés au sein du Groupe sur la stratégie européenne afin d'étudier les questions énoncées ci-après. Leurs conclusions ont été examinées lors de la réunion de Bad Honnef.

- Groupe de travail n° 1 : Aspects socio-professionnels pour la nouvelle génération ;
- Groupe de travail n° 2 : Questions relatives aux projets mondiaux hébergés par le CERN ou financés par l'intermédiaire du CERN hors d'Europe ;
- Groupe de travail n° 3 : Relations avec d'autres groupes et organisations ;
- Groupe de travail n° 4 : Transfert de connaissances et de technologie ;
- Groupe de travail n° 5 : Sensibilisation du public, éducation et communication ;
- Groupe de travail n° 6 : Durabilité et impact environnemental.

Le présent document explicatif fournit des informations sur le contexte qui sous-tend les prises de position. Les recommandations faites par les groupes de travail au Conseil du CERN concernant de possibles modifications de certaines questions organisationnelles sont également exposées. La présentation des prises de position s'aligne sur celle adoptée en 2006 et en 2013 ; elle comprend un préambule présentant les arguments scientifiques, suivi de 20 prises de position :

1. deux prises de position sur les **principales évolutions depuis la stratégie de 2013**
2. trois prises de position sur les **considérations générales sur la mise à jour 2020**
3. deux prises de position sur les **initiatives futures prioritaires**
4. quatre prises de position sur les **autres activités scientifiques essentielles pour la physique des particules**
5. deux prises de position sur les **synergies avec des disciplines voisines**
6. trois prises de position sur les **questions organisationnelles**

7. quatre prises de position sur l'**impact environnemental et sociétal**

Chaque prise de position décrit brièvement le sujet, puis fournit une recommandation, indiquée en italique. Au sein de chaque partie numérotée, les lettres utilisées pour indiquer les sous-parties n'ont aucune valeur hiérarchique. Dans le présent document, les prises de position figurent en bleu et en retrait, et sont suivies d'un texte explicatif.

Préambule

Préambule

La nature renferme les secrets des lois de la physique fondamentale dans les fragments les plus infimes de l'espace et du temps. En développant des technologies pour explorer des énergies toujours plus grandes et, ainsi, des échelles de distance toujours plus petites, la communauté de la physique des particules a fait des découvertes qui ont profondément changé notre connaissance scientifique du monde qui nous entoure. Néanmoins, nombre des mystères concernant l'Univers, comme la nature de la matière noire et la prédominance de la matière sur l'antimatière, restent à élucider.

Le projet de mise à jour 2020 de la stratégie européenne pour la physique des particules, exposé dans le présent document, propose une perspective à court et à long termes. Elle a pour but d'élargir notablement la connaissance au-delà des limites actuelles, de stimuler un développement technologique innovant et de maintenir le rôle de premier plan joué par l'Europe dans le domaine de la physique des particules sur la scène internationale. La mise à jour de 2013 intervenait peu après la découverte du boson de Higgs, événement considérable qui fut un tournant décisif pour la recherche en physique des particules. Le Grand collisionneur de hadrons (LHC) a établi le rôle crucial du boson de Higgs dans l'acquisition de la masse par les particules fondamentales, mais les caractéristiques observées des masses restent une énigme. Le boson de Higgs est une particule unique en son genre qui soulève des questions profondes sur les lois fondamentales de la nature. Il représente également un outil expérimental puissant pour étudier ces questions.

Au cours de la décennie à venir, le LHC, y compris dans sa version à haute luminosité, demeurera le principal outil à l'échelle mondiale permettant d'explorer la physique à la frontière des hautes énergies. Du fait de la spécificité du boson de Higgs, des arguments scientifiques convaincants plaident en faveur de la construction d'un nouveau collisionneur électron-positon fonctionnant comme « usine à Higgs ». Un tel collisionneur produirait une grande quantité de bosons de Higgs dans un environnement très limpide, amènerait des progrès considérables dans la cartographie des diverses interactions du boson de Higgs avec d'autres particules et constituerait une part essentielle d'un programme de recherche qui comprendrait également l'étude de l'énigme de la structure des saveurs et le secteur des neutrinos.

L'étude d'énergies sensiblement plus élevées que celles générées par le LHC permettra d'analyser la production de paires de bosons de Higgs et ainsi d'en apprendre davantage sur l'interaction de la particule avec elle-même, ce qui est fondamental pour mieux comprendre le matériau qui compose l'Univers. Par ailleurs, grâce à l'exploration d'un nouveau champ d'énergies, des découvertes seront faites et des mystères qui demeurent aujourd'hui, comme celui de la nature de la matière noire, pourraient être élucidés. La communauté de la physique des particules est prête à franchir la prochaine étape qui la conduira à des énergies encore plus

élevées et à des échelles encore plus petites. L'idée est de préparer une usine à Higgs, suivie d'un collisionneur de hadrons doté d'une sensibilité aux échelles d'énergie d'un ordre de grandeur supérieur à celles du LHC, tout en faisant face aux défis techniques et environnementaux qui en découlent.

La présente stratégie expose des objectifs stimulants et ambitieux qui conduiront la recherche technologique et scientifique vers un nouveau territoire, encore inexploré, pour le bien de la discipline et de la société.

1. Principales évolutions depuis la stratégie de 2013

Quatre activités scientifiques prioritaires de grande envergure figuraient dans la stratégie de 2013. Deux d'entre elles, portant sur le LHC et la physique des neutrinos, constituent le fondement des recommandations présentées en détail dans cette partie. Les deux autres concernaient de futurs collisionneurs ; la première d'entre elles, qui recommandait un programme de recherche et développement (R&D) pour un ambitieux projet d'accélérateur post-LHC au CERN, a conduit à la réalisation d'études détaillées portant sur deux scénarios possibles de collisionneur à la frontière des hautes énergies devant être hébergé au CERN : soit un collisionneur électron-positon (le Collisionneur linéaire compact, ou CLIC, pour lequel un plan de mise en œuvre de projet a été élaboré à la suite d'un rapport préliminaire de conception), soit un collisionneur hadron-hadron (le Futur collisionneur circulaire, ou FCC, qui a fait l'objet d'un rapport préliminaire de conception). Ces deux études prévoient, dans une éventuelle première phase, la construction d'une usine à Higgs électron-positon (le FCC-ee dans le deuxième scénario). Elles servent de fondement aux recommandations formulées dans la troisième partie de la présente stratégie concernant les initiatives futures prioritaires.

La deuxième prise de position de 2013 relative aux futurs collisionneurs portait sur le projet de Collisionneur linéaire international (ILC) au Japon, autre possibilité d'usine à Higgs électron-positon qui fonctionnerait au moyen d'une technologie différente de celle du CLIC ou du FCC-ee. La recommandation correspondante était la suivante : « *L'Europe attend avec intérêt une proposition du Japon afin de discuter d'une éventuelle participation.* » Cependant, aucune proposition n'a été reçue à ce jour, bien que la communauté de la physique des particules manifeste toujours un intérêt fort pour la construction d'un ILC au Japon. La recommandation énoncée dans la troisième partie de la présente stratégie reflète cet intérêt. Une quatrième possibilité de mise en œuvre d'une usine à Higgs électron-positon a émergé depuis que la stratégie de 2013 a été formulée : il s'agit du collisionneur électron-positon chinois (CEPC), qui aurait une portée similaire à celle du FCC-ee. Les technologies requises pour une usine à Higgs électron-positon sont parvenues à maturité et l'intérêt scientifique pour une telle installation est très élevé ; c'est pourquoi ces quatre alternatives, qui présentent toutes des atouts différents, sont étudiées dans différentes régions du monde.

La principale priorité de la stratégie de 2013 était d'exploiter le Grand collisionneur de hadrons (LHC) à son plein potentiel, en préparant son passage à une plus haute luminosité (projet HL-LHC).

Après avoir produit des collisions de protons à des énergies de 7 et 8 TeV lors de la première période d'exploitation, le LHC a fourni environ 150 fb^{-1} de collisions à l'expérience ATLAS et à l'expérience CMS lors de la deuxième période d'exploitation, à une énergie de 13 TeV. Des processus du Modèle standard faisant intervenir, par exemple, des bosons de jauge et scalaires, et des quarks t , ont été mesurés sur neuf ordres de grandeur de section efficace. Pour la première fois, une fenêtre a été ouverte sur le secteur scalaire grâce à l'exploration des interactions du boson de Higgs avec des bosons vecteurs et des particules de troisième génération. Presque toutes les zones d'ombre du Modèle standard et bon nombre de questions encore irrésolues, au-delà du Modèle standard, sont liées au secteur scalaire. Son étude est donc d'une importance capitale. De nouveaux phénomènes de physique ont été recherchés à l'aide du LHC, en atteignant pour la première fois directement des masses se situant aux alentours de 1 TeV et au-delà. Des idées créatives ont émergé pour rendre accessibles des phénomènes d'une nouvelle physique grâce aux données du LHC, par exemple en recherchant des particules à longue durée de vie.

a) Depuis que la stratégie de 2013 a recommandé la mise en œuvre du programme de relèvement de la luminosité du LHC, le projet HL-LHC a été approuvé par le Conseil du CERN en juin 2016 et progresse comme prévu. Parallèlement, le LHC a atteint une énergie de 13 TeV dans le centre de masse, a dépassé la luminosité nominale, et a permis d'obtenir une multitude de résultats de physique remarquables. Au vu de cette performance, associée aux techniques expérimentales innovantes développées par les expériences LHC et les versions améliorées prévues de leurs détecteurs respectifs, le HL-LHC promet un potentiel de physique sensiblement accru. Les aimants supraconducteurs à champ élevé en Nb₃Sn qui sont requis ont été développés. *Mener à bien la transformation du LHC en machine de haute luminosité et la mise à niveau de ses détecteurs, tout en poursuivant l'effort d'innovation en matière de techniques d'expérimentation, devra rester l'axe central de la physique des particules en Europe. Le potentiel de physique du LHC et du HL-LHC, comprenant l'étude de la physique des saveurs et du plasma de quarks et de gluons, devra être pleinement exploité.*

Le programme HL-LHC a été approuvé par le Conseil du CERN en juin 2016, avec l'objectif de décupler la luminosité intégrée des collisions de protons à 14 TeV fournies aux expériences ATLAS et CMS. L'augmentation de la luminosité intégrée visée avec le HL-LHC permettra d'effectuer des mesures et des recherches plus précises, et de mettre à l'épreuve la compréhension de la physique des particules de manière directe à l'échelle du TeV et de manière indirecte à des énergies de plusieurs TeV. D'intenses travaux de R&D sur les accélérateurs menés sur plusieurs années ont conduit à la mise au point de dipôles courts en niobium-étain (Nb₃Sn) supraconducteur, qui seront testés en conditions réelles lors de la troisième période d'exploitation du LHC. Ils remplaceront certains des dipôles longs existants, en niobium-titane (NbTi) supraconducteur, afin de faire de la place pour les collimateurs supplémentaires nécessaires pour atteindre les luminosités élevées du HL-LHC.

Les versions améliorées des détecteurs des expériences ATLAS et CMS, documentées dans un ensemble de rapports de conception technique, ont été approuvées, et les collaborations internationales se préparent à mettre en service ces détecteurs d'ici à 2027, année où commencera la première période d'exploitation du HL-LHC. Pour la communauté mondiale de la physique des particules, il est important que cette amélioration se réalise dans les délais, et l'octroi constant de ressources suffisantes est une priorité. C'est en poursuivant l'innovation en matière de techniques expérimentales qu'il sera possible d'observer une physique inédite, que la troisième période d'exploitation du LHC mettra à notre portée. L'intégration de technologies émergentes aux systèmes de déclenchement, aux installations de calcul et de gestion des données massives, aux algorithmes de reconstitution et aux méthodes d'analyse permettra de tirer le meilleur parti des ensembles de données qui seront recueillies. Il convient de nourrir la passion de l'innovation et de reconnaître les progrès accomplis, au sein de la communauté de la physique des particules et au-delà, par exemple en accordant une place plus importante à ces sujets dans les programmes de conférence.

Outre les collisions de protons, les collisions d'ions lourds sont également étudiées dans le LHC, grâce à l'expérience ALICE. Celle-ci fait l'objet d'une mise à niveau en vue des troisième et quatrième périodes d'exploitation du LHC. Au-delà de la quatrième période, la communauté de la recherche sur les ions lourds a pour ambition de concevoir une nouvelle expérience, afin de poursuivre un riche programme de recherche avec le HL-LHC. Le programme de physique des saveurs, rendu possible grâce aux collisions de protons produites par le LHC, est très vaste ; il sera renforcé encore grâce aux améliorations actuelles et futures du détecteur LHCb.

b) L'existence d'une masse non nulle pour le neutrino est un indice probant d'une nouvelle physique. Le programme mondial de physique des neutrinos explore toute la palette du vaste secteur du neutrino et bénéficie d'un vigoureux soutien en Europe. Dans le cadre de ce programme, la plateforme neutrino a été créée par le CERN en réponse à la recommandation de la stratégie de 2013 et a réussi à s'imposer comme un point d'ancrage pour la communauté européenne de la recherche sur le neutrino participant à des projets s'appuyant sur des accélérateurs en dehors de l'Europe. *L'Europe, et le CERN par le biais de la plateforme neutrino, devront continuer à soutenir des expériences longue distance au Japon et aux États-Unis. En particulier, il conviendra de continuer à collaborer avec les États-Unis et d'autres partenaires internationaux en vue de la mise en place de l'installation neutrino longue distance (LBNF) et de l'expérience neutrino souterraine (DUNE).*

La découverte des oscillations des neutrinos impose d'introduire une physique nouvelle car de nouveaux états des particules connues ou des interactions nouvelles sont nécessaires pour obtenir les termes de masse appropriés dans la théorie. Nous savons que les neutrinos ont une masse inférieure de plusieurs ordres de grandeur à celle des leptons chargés. Les théories expliquant cette légèreté couvrent un spectre de plusieurs ordres de grandeur sur l'échelle d'une nouvelle physique. Des leptons neutres légers (neutrinos stériles) ou plus lourds pourraient exister. Les neutrinos pourraient être leurs propres antiparticules, auquel cas il y aurait violation du nombre leptonique.

L'ampleur aussi vaste du secteur des neutrinos pourrait avoir un lien avec l'asymétrie matière-antimatière observée dans l'Univers. Le profil de mélange des neutrinos est également très différent de celui observé pour les quarks, certains termes n'étant pas encore bien connus. La physique des neutrinos fait partie intégrante de la quête des saveurs. Il est donc indispensable de poursuivre l'exploration du secteur des neutrinos grâce à des expériences sur les neutrinos d'accélérateur, de réacteur, solaires, atmosphériques et cosmiques.

La priorité est de mener à bien le programme de mesures des paramètres d'oscillation, notamment en ce qui concerne la phase de violation de CP de la matrice de mélange et la hiérarchie des masses des neutrinos. Deux programmes d'expérimentation approuvés, robustes et complémentaires, sont en préparation pour atteindre cet objectif aux États-Unis et au Japon, avec les expériences DUNE et Hyper-Kamiokande. Conformément aux recommandations de la stratégie de 2013, de nombreux physiciens européens participent à ces deux programmes, avec l'appui du CERN, principalement grâce à la plateforme neutrino. Cette dernière a permis de grandes avancées, notamment en faisant la démonstration à grande échelle de la technique de la chambre à projection temporelle (TPC) à argon liquide, qui sera utilisée dans le cadre de l'expérience DUNE, aux États-Unis. Pour cela, de très grands cryostats adaptés au futur détecteur de plusieurs kilotonnes de DUNE ont dû être fabriqués. Les autres avancées réalisées grâce à la plateforme neutrino incluent la rénovation d'ICARUS en vue de son utilisation dans le cadre du programme courte distance du Fermilab, la création d'un spectromètre magnétique (BabyMIND) et l'amélioration du détecteur proche ND280 pour l'expérience T2K au Japon. Il est vivement souhaité que la plateforme neutrino continue d'être exploitée au CERN au service de la communauté mondiale de la recherche sur les neutrinos.

Un programme d'expérimentation complémentaire est nécessaire pour déterminer les sections efficaces et les flux de neutrinos, afin d'extraire le plus de données de physique possible de DUNE et d'Hyper-Kamiokande. Plusieurs expériences visant à déterminer les flux de neutrinos existent dans le monde. Il convient de continuer à étudier la possibilité de réaliser une installation destinée à mesurer les sections efficaces de neutrinos avec une précision de l'ordre du pour cent, ainsi que les retombées qui en découleraient. D'autres expériences complémentaires importantes utilisant des neutrinos de réacteur et des neutrinos atmosphériques sont en cours de préparation. Elles pourraient permettre de découvrir la hiérarchie des masses des neutrinos et de réaliser d'autres mesures précises de leur oscillation. L'étude de la masse absolue et de la nature des neutrinos (Dirac ou Majorana), qui constitue une autre priorité dans ce domaine, est assurée grâce aux mesures en laboratoire et aux mesures cosmologiques. Les études techniques relatives à la future génération d'installations de neutrinos longue distance doivent se poursuivre.

En apportant un soutien européen équilibré à cet effort mondial, il sera possible de déterminer les masses des neutrinos et les paramètres de leur oscillation (y compris la phase de violation de CP), et de rechercher d'éventuels écarts par rapport au modèle à trois neutrinos connus.

2. Considérations générales sur la mise à jour 2020

a) L'Europe, à travers le CERN, jouit d'une position de leader dans le domaine de la physique des particules s'appuyant sur des accélérateurs, et dans celui des technologies associées. L'avenir de la discipline en Europe et au-delà dépend de la capacité constante du CERN et de sa communauté de réaliser des projets scientifiques ambitieux. *Cette mise à jour de la stratégie devra être mise en œuvre afin que l'Europe maintienne sa position de leader sur les plans scientifique et technologique.*

Avec la construction et l'exploitation efficace du LHC, le CERN s'est positionné au premier rang mondial des laboratoires de physique des particules. La coopération entre les États membres, les États membres associés et les États non-membres, et la concentration au CERN de l'effort européen en matière de physique des particules, ont permis de créer une ressource exceptionnelle du point de vue des réalisations scientifiques, du capital humain, de la collaboration internationale, des compétences techniques et de l'infrastructure de recherche. Le nombre d'utilisateurs du CERN est passé de 10 400 en 2013 à 12 600 en 2018, environ 35 % des utilisateurs provenant d'États non-membres. Outre le programme du LHC à haute énergie, le CERN exploite l'ensemble de sa chaîne d'accélérateurs afin de livrer des faisceaux à des installations de recherche de premier plan pour, entre autres, des études sur les isotopes instables et l'antimatière. Afin d'exploiter et d'améliorer ces installations, le CERN et d'autres laboratoires reposant sur des accélérateurs utilisent des technologies de pointe, notamment des cavités radiofréquence pour accélérer les particules, des aimants supraconducteurs pour les guider et les focaliser, la cryogénie pour refroidir les aimants et les faire fonctionner, et l'ultravide pour permettre aux faisceaux de circuler. En physique des particules, il est également nécessaire de pouvoir stocker, traiter et diffuser de grands volumes de données. L'ensemble de ces technologies sont mises à la disposition de toute l'Europe, au profit des États membres et des États membres associés.

b) Le modèle organisationnel européen centré sur une collaboration étroite entre le CERN et les instituts nationaux, les laboratoires et les universités de ses États membres et États membres associés est essentiel pour assurer la réussite durable de la discipline. Il s'est révélé très efficace pour tirer parti des ressources et des compétences collectives des communautés de la physique des particules, de la physique des astroparticules et de la physique nucléaire, ainsi que de nombreux domaines de recherche interdisciplinaires. La collaboration avec les États non-membres et la contribution substantielle de ces derniers témoignent également de la réussite de ce modèle. *La communauté de la physique des particules doit renforcer encore l'écosystème d'exception que représentent les centres de recherche en Europe. En particulier, les programmes coopératifs entre le CERN et ces centres de recherche devront être développés et disposer de ressources adéquates pour que les objectifs définis dans la mise à jour de la stratégie puissent être atteints.*

Les laboratoires nationaux auxquels il est fait référence dans la stratégie sont des moyennes et grandes infrastructures situées en Europe qui sont exploitées, gérées et financées par les autorités nationales du pays où elles sont implantées. Ils collaborent, aux côtés d'instituts de recherche et

d'universités, à de grands programmes du CERN, ainsi qu'à des initiatives menées localement et dans d'autres grands laboratoires, et présentant un intérêt pour cette stratégie.

Certains instituts de recherche européens ont su trouver des synergies fructueuses avec d'autres communautés, dont les activités vont bien au-delà de la physique des particules (et donc de cette stratégie). Ils ont établi des liens étroits avec des réseaux tels que LEAPS (*League of European Accelerator-based Photon Sources*) et LENS (*League of Advanced European Neutron Sources*), spécialisés dans la R&D sur les éléments des accélérateurs et des détecteurs. Un programme dynamique et coordonné d'initiatives au sein des laboratoires nationaux pourrait renforcer l'appui aux projets européens de R&D sur les technologies de pointe destinées aux accélérateurs et aux détecteurs. La coordination des activités de R&D est essentielle pour favoriser les avancées scientifiques et optimiser l'exploitation des ressources ; aussi est-il nécessaire de renforcer les efforts collaboratifs de R&D afin de pouvoir relever les défis dans le domaine des technologies de pointe pour les accélérateurs et les détecteurs, et de mobiliser les compétences nécessaires en vue des futures grandes infrastructures, au CERN et ailleurs.

En outre, la forte visibilité des instituts de recherche européens dans les grands projets supranationaux est essentielle pour assurer leur pérennité, c'est-à-dire pour obtenir un financement national stable, un meilleur accès aux programmes européens et un lien renforcé avec l'innovation. Il est également important de garder à l'esprit le rôle que jouent les universités, les instituts de recherche et les laboratoires nationaux d'Europe en rendant accessibles diverses grandes plateformes techniques pour la mise au point, les tests et la fabrication des éléments destinés aux accélérateurs et aux détecteurs. Cette infrastructure technologique européenne comprend également des salles blanches pour l'assemblage des détecteurs, des faisceaux d'essai, des installations d'irradiation à faible bruit de fond pour les analyses, des zones de tests thermiques à vibrations réduites et des lasers haute puissance ; la stratégie devrait approuver et garantir les ressources nécessaires pour les exploiter.

c) Le vaste éventail de questions fondamentales en physique des particules et la complexité des diverses installations requises pour les traiter, ainsi que la nécessité de faire un usage efficace des ressources, ont conduit à l'instauration d'une communauté mondiale de la physique des particules ayant des intérêts et des objectifs communs. La présente stratégie prend en compte les programmes de physique riches et complémentaires entrepris par les partenaires de l'Europe aux quatre coins du monde, ainsi que les développements scientifiques et technologiques réalisés dans les disciplines voisines. *La mise en œuvre de la stratégie devra s'effectuer en collaboration étroite avec les partenaires mondiaux et les disciplines voisines.*

La précédente mise à jour de la stratégie soulignait que la croissance de la taille des installations de pointe en physique des particules avait entraîné la réduction de leur nombre et la mondialisation du domaine, et qu'il était nécessaire que des partenaires potentiels de différentes parties du monde participent à la planification des entreprises futures. La réalisation en temps opportun de grands programmes complémentaires dans diverses régions du monde, chacun d'entre eux étant unique en

son genre et repoussant les frontières de la physique des particules, reste essentielle pour les progrès du domaine, ainsi que pour le développement de ses technologies-clés. Avec le programme neutrino, l'Europe a choisi de participer aux programmes longue distance au Japon et aux États-Unis plutôt que de construire sa propre installation. En contrepartie, elle s'est assurée d'obtenir un appui en vue de la réalisation dans les délais du HL-LHC. La vision à long terme de l'Europe consiste à conserver sa position de chef de file dans l'exploration de nouvelles frontières d'énergie, vision qui est partagée par les autres régions.

3. Initiatives futures prioritaires

a) La prochaine priorité pour ce qui concerne les collisionneurs est une usine à Higgs électron-positon. À plus long terme, la communauté de la physique des particules en Europe a l'ambition de faire fonctionner un collisionneur proton-proton à la plus haute énergie atteignable. La réalisation de ces objectifs ambitieux passera par l'innovation et les technologies de pointe :

- *la communauté de la physique des particules devra accroître ses activités de R&D centrées sur des technologies d'accélérateur de pointe, en particulier celles destinées aux aimants supraconducteurs à champ élevé, y compris les supraconducteurs à haute température ;*
- *l'Europe, avec ses partenaires internationaux, devra étudier la faisabilité technique et financière d'un futur collisionneur de hadrons d'une énergie d'au moins 100 TeV dans le centre de masse au CERN, avec, comme première phase éventuelle, la construction d'une usine à Higgs et de production électrofaible sous la forme d'une machine électron-positon. L'étude de faisabilité des collisionneurs et de l'infrastructure correspondante devra être mise en œuvre en tant que projet d'envergure mondiale, et être réalisée suivant le calendrier de la prochaine mise à jour de la stratégie.*

La réalisation en temps voulu au Japon du Collisionneur linéaire international (ILC) électron-positon serait compatible avec cette stratégie, et, dans cette hypothèse, la communauté européenne de la physique des particules souhaiterait y collaborer.

À la suite des discussions du symposium public de Grenade, il a été convenu, comme indiqué dans le préambule, que la priorité serait de construire une usine à Higgs électron-positon, puis, à plus long terme, un collisionneur de hadrons à la frontière des hautes énergies. Deux possibles collisionneurs à la frontière des hautes énergies ont fait l'objet d'études en vue d'une mise en œuvre au CERN, à savoir le CLIC et le FCC (exposés dans la première partie du présent document). Le CLIC pourrait atteindre une énergie de 3 TeV dans le centre de masse, alors que le FCC pourrait atteindre 100 TeV, voire plus. Lorsqu'il s'agit d'étudier le potentiel scientifique de chaque machine, il faut garder à l'esprit que, dans un collisionneur e^+e^- comme le CLIC, toute l'énergie disponible est mise au service des collisions ; en revanche, dans un collisionneur tel que le FCC, les constituants des protons, qui sont des particules composites, interagissent avec une portion de l'énergie totale du faisceau.

Compte tenu des aspects relatifs à la conception, à la technologie et à la mise en œuvre du CLIC, la première phase (usine à Higgs) pourrait être menée à bien sur une période de 15 ans, et un relèvement

de l'énergie pourrait avoir lieu par la suite. Cela étant, la possibilité d'une augmentation spectaculaire du niveau d'énergie qu'offre cette technologie pour un futur collisionneur de hadrons par rapport aux 13 TeV du LHC fait qu'elle est considérée comme la plus prometteuse pour une future installation à la frontière des hautes énergies. Cependant, une vaste infrastructure serait nécessaire pour le tunnel circulaire, de même que des aimants à champ élevé (de 16 teslas selon le modèle de conception actuellement défini), qui sont loin d'être prêts pour une production en série. Ainsi, il est important de réaliser une étude de faisabilité afin de savoir si un tel collisionneur pourra être prêt à temps pour la prochaine mise à jour de la stratégie et de prendre une décision concernant la mise en œuvre de ce projet. L'étude de faisabilité devra aborder les éléments suivants : possibilité de construire une infrastructure aussi grande à proximité du CERN ; plan financier nécessaire pour mener à bien et exploiter un projet de cette ampleur avec des partenaires internationaux ; gouvernance du projet, et gestion de la consommation d'énergie. Pour que ce futur collisionneur atteigne, dans le respect du calendrier fixé, la sensibilité nécessaire pour explorer une nouvelle physique à des échelles dix fois supérieures à celles du HL-LHC, il convient d'accélérer le développement d'aimants à champ élevé, y compris celui de supraconducteurs à haute température utilisés en option et associés à d'autres technologies d'accélérateur innovantes, et de coordonner en conséquence les ressources disponibles en Europe et ailleurs.

Si le grand tunnel circulaire prévu pour ce collisionneur peut être construit, il comprendra aussi l'infrastructure nécessaire pour l'implantation d'une usine à Higgs électron-positon comme première étape possible, du type de celle étudiée dans le cadre du projet FCC-ee. Le projet FCC-ee présente aussi la particularité de pouvoir fournir, à des énergies plus basses dans le centre de masse, une quantité considérable de bosons vecteur faible et des produits de leur désintégration, lesquels pourraient servir à réaliser des tests de précision de la physique électrofaible et à étudier en profondeur l'énigme de la structure des saveurs.

b) Les possibilités de physique des collisionneurs de haute énergie et de haute intensité reposent sur des technologies d'accélérateur innovantes, qui constituent en outre un élément moteur pour nombre de domaines de la science et de l'industrie utilisant des accélérateurs. Parmi les technologies à l'étude figurent les aimants à champ élevé, les supraconducteurs à haute température, les structures d'accélération par champ de sillage plasma et d'autres structures d'accélération à gradient élevé, des faisceaux de muons de forte brillance ou encore des linacs à récupération d'énergie. *La communauté européenne de la physique des particules doit intensifier ses travaux de R&D sur les accélérateurs et y consacrer des ressources adéquates. Une feuille de route devra définir les priorités en termes de technologies, compte tenu des synergies créées avec des partenaires internationaux et d'autres communautés, par exemple dans les domaines des sources de photons et de neutrons, de l'énergie de fusion et de l'industrie. Les résultats attendus pour cette décennie devront être définis en temps voulu et coordonnés entre le CERN et les laboratoires et instituts nationaux.*

La R&D sur les accélérateurs est cruciale pour l'élaboration du programme relatif au futur collisionneur, et elle devra être intensifiée. À cette fin, la communauté européenne de la physique des particules devra élaborer une feuille de route relative à la R&D sur les accélérateurs, axée sur les technologies essentielles pour les futurs collisionneurs, tout en entretenant des liens bénéfiques avec d'autres communautés, notamment dans les domaines des sources de photons et de neutrons, et de l'énergie de fusion. Cette feuille de route devra être établie le plus tôt possible, dans le cadre d'une étroite coopération entre les laboratoires nationaux et le CERN.

La communauté de la physique avec accélérateurs, dont le CERN est le chef de file en Europe, avec ses partenaires aux États-Unis et au Japon, engage des efforts dans la conception d'aimants à champ élevé utilisant le supraconducteur Nb₃Sn. Les premiers résultats concluants de tests sur des dipôles de 11 teslas ont récemment été rapportés, et un quadripôle de taille réelle reposant sur la technologie Nb₃Sn a été construit et a été qualifié aux États-Unis. Ces efforts sont motivés par les besoins du programme d'amélioration du HL-LHC. Une approche ciblée, de type « mission », devra être adoptée pour la R&D sur les aimants à champ élevé (de 16 teslas et plus) ; essentielle à la concrétisation d'un futur collisionneur de hadrons, elle visera à faire en sorte qu'une énergie la plus élevée possible puisse être atteinte, et de limiter la durée et le coût de la phase de développement. La mise au point et la production de ces aimants utilisant la technologie Nb₃Sn, ainsi que l'option des supraconducteurs à haute température critique permettant d'atteindre 20 teslas, devraient prendre une vingtaine d'années et nécessiteront un effort mondial intense. L'engagement du CERN dans ce processus aurait un effet catalyseur sur les travaux connexes réalisés par les laboratoires et les instituts de recherche nationaux, ainsi que des retombées positives importantes pour la société. La technologie des supraconducteurs à haute température critique a une large gamme d'applications en médecine, en science et dans le domaine de l'ingénierie des systèmes d'alimentation, de même que les aimants à champ élevé, qui sont également utilisés dans les centrales à fusion. Par exemple, cette technologie peut être utilisée dans les systèmes d'alimentation électrique (câbles, moteurs, générateurs ou transformateurs), où les supraconducteurs remplacent les conducteurs résistifs, ainsi que dans les dispositifs de stockage de l'énergie magnétique supraconductrice (SMES) et dans les limiteurs de courant de défaut (FCL).

Outre les aimants à champ élevé, la feuille de route de la R&D sur les accélérateurs pourrait porter sur :

- la R&D pour des avancées concrètes dans le domaine de l'accélération par sillage plasma (par technologie laser et/ou faisceau conducteur), étape cruciale en vue des futurs collisionneurs linéaires, avec de possibles réalisations intermédiaires (ex. : construction de lasers à électrons libres (FEL - *free-electron lasers*) fondés sur la technologie plasma). Les dernières avancées en matière d'installations compactes pour des applications diverses (médecine, photonique, etc.), compatibles avec des capacités universitaires et des petits et moyens laboratoires, sont prometteuses ;
- une étude de conception internationale sur un collisionneur de muons, qui représente une occasion unique d'atteindre des énergies de plusieurs TeV, inaccessibles pour les collisionneurs e⁺e⁻, et potentiellement dans un tunnel circulaire plus compact que celui d'un collisionneur de hadrons.

La principale difficulté reste la production d'un faisceau intense de muons refroidis, mais des idées nouvelles sont à l'étude ;

- un programme vigoureux de R&D sur des linacs à récupération d'énergie (ERL) multi-tours de haute intensité, préconisant la fabrication d'un modèle de démonstration en vue de permettre également des utilisations à basse énergie.

La réduction de la consommation d'énergie est un facteur important à prendre en compte lors de la conception d'un accélérateur. D'importants progrès ont été réalisés concernant la mise au point de structures d'accélération à gradient élevé supraconductrices ou résistives. Cette technologie, indispensable pour les collisionneurs e^+e^- , est également fonction des sources de lumière implantées partout dans le monde.

4. Autres activités scientifiques essentielles pour la physique des particules

a) La recherche de la matière noire et l'étude des symétries de la saveur et des symétries fondamentales sont des éléments cruciaux pour la recherche d'une nouvelle physique. Cette recherche peut s'effectuer de nombreuses manières, par exemple en réalisant des mesures de précision de la physique des saveurs et des moments électriques ou magnétiques dipolaires, ou encore en recherchant des axions, particules candidates au secteur noir qui interagissent faiblement avec la matière. De nombreuses options sont envisageables pour traiter ces questions de physique, par exemple, des collisionneurs à la frontière des hautes énergies, des expériences avec accélérateurs et des expériences hors accélérateurs. Un programme diversifié, complémentaire de la frontière des hautes énergies, constitue un volet essentiel de la stratégie européenne pour la physique des particules. *Les expériences menées dans des laboratoires en Europe, dans des domaines diversifiés, susceptibles d'avoir un impact important sur les programmes de physique des particules, devront être soutenues, de même que la participation à des expériences présentant les mêmes caractéristiques menées dans d'autres régions du monde.*

Les caractéristiques des masses et des mélanges observées pour les constituants fondamentaux de la matière, les quarks et les leptons, restent une énigme malgré la foule de nouveaux résultats expérimentaux obtenus depuis la dernière mise à jour de la stratégie. L'étude de l'énigme de la structure des saveurs pourrait montrer la voie d'une nouvelle physique, avec une sensibilité largement supérieure à celle obtenue par des recherches directes (p. ex. la preuve de l'existence du quark t qui a suivi l'étude du mélange du méson B). En outre, la physique des saveurs et la violation de CP, qui jouent un rôle essentiel dans la détermination des paramètres du Modèle standard, font l'objet de nombreuses expériences partout dans le monde. Celles-ci consistent notamment à effectuer les mesures suivantes : moments dipolaires électriques ou magnétiques de particules chargées et neutres, d'atomes et de molécules ; désintégrations rares de muons avec des faisceaux de muons de haute intensité au PSI, au FNAL et au KEK ; désintégrations rares de kaons au CERN et au KEK, et plusieurs désintégrations de particules c et/ou b au LHC, en particulier avec l'expérience LHCb. Les expériences Belle II, au KEK, au Japon, et LHCb (qui subit actuellement des travaux d'amélioration), au CERN, devraient prochainement produire de nouveaux résultats.

Il apparaît, d'après des observations galactiques et cosmologiques, que, dans le contexte de la relativité générale, la matière noire est la forme dominante de la matière dans l'Univers. L'existence de la matière noire est un autre indice convaincant de l'existence d'une physique au-delà du Modèle standard, et la détecter en laboratoire reste l'un des grands défis de la physique des particules. D'après les limites actuelles déterminées par un grand nombre d'expériences de détection directe qui se recourent, la masse d'une particule de matière noire pourrait se situer entre 10^{-22} eV et plusieurs dizaines de fois la masse du Soleil, soit de l'ordre de la masse des trous noirs primordiaux. Pour étudier les multiples possibilités, un ensemble complet d'expériences et de techniques est nécessaire. Les expériences à cible fixe et celles au niveau des arrêts de faisceau, reposant sur des accélérateurs, peuvent effectuer des recherches sensibles et complètes sur la matière noire et les médiateurs du secteur sombre à des échelles inférieures au GeV, en complément de celles réalisées par les collisionneurs de haute énergie et d'autres approches.

Il serait souhaitable de déterminer de manière indépendante la structure du proton afin d'exploiter pleinement la précision permise par les collisionneurs de hadrons actuels et futurs. Des mesures détaillées de la structure du proton complètent l'investissement dans les calculs théoriques et améliorent la sensibilité pour la recherche de nouveaux phénomènes. L'idée d'un programme fondé sur des expériences à cible fixe et des collisionneurs électron-proton spécifiques, tels que le LHeC et le FCC-ep, est préconisée en Europe. En décembre 2019, le département de l'Énergie des États-Unis a approuvé le « besoin aux fins d'exécution de la mission » (« *mission need* », ou « *Critical Decision 0* ») de construire un collisionneur électron-ion (EIC) au laboratoire de Brookhaven, ce qui permet de poursuivre les travaux sur l'étude préliminaire de conception de ce collisionneur de nouvelle génération et ainsi, potentiellement, de cartographier la structure tridimensionnelle du proton.

Un groupe d'étude consacré à la physique au-delà des collisionneurs a été constitué au CERN afin d'explorer les possibilités offertes par le complexe d'accélérateurs et l'infrastructure du CERN dans le but d'obtenir de nouveaux indices sur quelques-unes des questions en suspens de la physique des particules au moyen de projets complémentaires des collisionneurs de haute énergie et d'autres projets dans le monde. Ce groupe, qui a suscité un vif intérêt, est devenu *de facto* le point de contact pour les nouvelles initiatives de recherche axées non seulement sur le potentiel des installations du CERN, mais aussi sur celui d'autres installations disponibles dans toute l'Europe, dans les laboratoires et les instituts de recherche nationaux. Bon nombre de propositions de nouvelles expériences au CERN sont d'une dimension telle qu'elles pourraient être examinées par la voie ordinaire, par les comités scientifiques et la Commission de la recherche, en vue de leur approbation. Parmi les propositions concernant de nouvelles installations de plus grande envergure examinées dans le cadre de l'Étude sur la physique au-delà des collisionneurs, celle relative au dispositif d'arrêt de faisceau du SPS figure dans le peloton de tête. Cependant, compte tenu des autres recommandations formulées dans la présente stratégie, un tel projet serait difficile à financer sur le budget du CERN.

Étant donné les défis auxquels est confronté le CERN dans la préparation du futur collisionneur, on n'insistera jamais assez sur l'importance du rôle joué par les laboratoires nationaux dans la poursuite de l'exploration du secteur des basses énergies. Outre les exemples déjà mentionnés ci-dessus, un vaste programme de recherche d'axions est proposé à DESY, des recherches sur les particules de matière noire de faible masse au moyen d'un faisceau de positons sont en cours à Frascati, et l'installation COSY, à Jülich, pourrait servir de modèle de démonstration pour mesurer le moment électrique dipolaire du proton. Ces initiatives devraient être vivement encouragées et soutenues.

L'Europe a la possibilité de jouer un rôle de premier plan dans ce programme scientifique diversifié en soutenant des projets susceptibles d'avoir de fortes retombées, qui ne nécessitent le plus souvent que des investissements modérés et qui jouent un rôle crucial en matière de formation et de préparation d'une nouvelle génération de chercheurs polyvalents, armés pour faire face aux défis de demain.

b) La physique théorique est un élément moteur essentiel de la physique des particules, ouvrant des perspectives de recherche nouvelles et audacieuses, encourageant des recherches expérimentales et apportant les outils nécessaires pour exploiter pleinement les résultats des expériences. Elle joue également un rôle important en éveillant l'imagination du grand public et en inspirant les jeunes scientifiques. Le progrès de la discipline dépend de la réalisation de travaux théoriques spécifiques et d'une collaboration intense entre les communautés théorique et expérimentale. *L'Europe devra continuer à soutenir vigoureusement un vaste programme de recherche théorique couvrant l'ensemble du spectre de la physique des particules, des questions abstraites aux questions phénoménologiques. L'exploration de nouvelles voies de recherche devra être encouragée et des passerelles vers des domaines tels que la cosmologie, la physique des astroparticules et la physique nucléaire devront être favorisées. La recherche exploratoire comme la recherche théorique ayant une incidence directe sur les expériences devront être soutenues, ce qui passe notamment par la reconnaissance de l'activité consistant à fournir et à développer des outils de calcul.*

La physique des particules théorique européenne est très développée et, dans de nombreux domaines, se classe au premier rang mondial. Elle couvre un vaste éventail de sujets, allant des idées abstraites de la théorie des cordes à la simulation détaillée des processus de la physique des collisionneurs. Il est important, pour l'avenir du domaine, de conserver cette approche large.

La physique des particules théorique utilise des techniques qui ne se limitent pas à une discipline particulière. Les résultats de disciplines voisines, telles que la cosmologie, la physique nucléaire, l'astrophysique, la physique atomique, la physique de la matière condensée, le calcul et l'information quantique, nourrissent le dialogue scientifique. Cet enrichissement mutuel est essentiel pour faire progresser le domaine, et il constitue un atout propre aux universités et instituts d'Europe. En parallèle, la physique des particules expérimentale tire parti des avancées théoriques (et expérimentales) obtenues dans les disciplines voisines, telles que la supraconductivité et le calcul.

Les idées théoriques, des premiers concepts de la mécanique quantique et de la relativité jusqu'aux plus récentes découvertes sur le fonctionnement de l'Univers, ont le pouvoir de passionner les jeunes esprits et d'attirer les jeunes vers la physique des particules, et peuvent servir de passerelle vers les matières relevant du domaine des sciences, de la technologie, de l'ingénierie et des mathématiques (STIM), répondant ainsi à un besoin sociétal important. Les activités de communication grand public bénéficient du regard particulier apporté par les physiciens théoriciens.

La discipline se caractérise par une importante mobilité : les jeunes chercheurs diplômés de l'université débutent leur carrière dans des instituts situés aussi bien en Europe que dans d'autres régions du monde. Le département Théorie du CERN est un véritable centre névralgique de la recherche, à l'échelle européenne comme mondiale.

La pleine exploitation du LHC et du HL-LHC, ainsi que des futurs collisionneurs, nécessitera un investissement dans des méthodes et calculs théoriques. La caractérisation complète du boson de Higgs est un bon exemple d'aspect pour lequel la précision améliorée des expériences nécessitera l'amélioration concomitante des calculs théoriques. La théorie joue aussi un rôle important dans l'évaluation de l'importance stratégique pour le domaine des futurs investissements réalisés dans les accélérateurs et l'infrastructure expérimentale.

Les domaines qui exigent beaucoup de calculs, tels que la phénoménologie de précision auprès de collisionneurs, la théorie des champs sur réseau ou le développement de générateurs d'événements de Monte-Carlo et d'autres outils logiciels, produisent des résultats sur le long terme. Les théoriciens qui prennent part à ces passionnantes activités, ainsi qu'à d'autres projets ambitieux de longue durée, doivent avoir des perspectives de carrière qui tiennent compte de cette particularité (grâce par exemple à des cursus postdoctoraux d'une durée appropriée et à la création de postes de chercheur spécifiques offrant des possibilités d'évolution de carrière).

c) La réussite des expériences de physique des particules repose sur une instrumentation innovante et sur des infrastructures de pointe. Afin de préparer et de réaliser de futurs programmes de recherche expérimentale, la communauté doit continuer à accorder une place importante à l'instrumentation. *Des programmes de R&D sur les détecteurs et les infrastructures correspondantes devront être soutenus au CERN et dans les instituts nationaux, les laboratoires et les universités. Des synergies entre les besoins de différents domaines scientifiques et ceux de l'industrie devront être mises en lumière et exploitées de manière à renforcer l'efficacité du processus de développement et à accroître les possibilités de transfert de technologie au bénéfice de la société dans son ensemble. Les plateformes et groupements collaboratifs devront bénéficier d'un soutien adapté de manière à assurer une cohérence dans la réalisation de ces activités de R&D. La communauté devra définir une feuille de route mondiale en matière de R&D sur les détecteurs, qui viendra appuyer les diverses propositions aux niveaux européen et national.*

En matière d'instrumentation pour détecteurs, l'innovation s'est avérée essentielle à la mise au point des conceptions novatrices des détecteurs actuels et des détecteurs améliorés pour le HL-LHC,

permettant la collecte, la reconstitution et l'analyse de collisions de protons à des luminosités inédites. Mener à bien le futur programme de recherche à court et à long termes exposé dans la présente mise à jour de la stratégie nécessite de réaliser des avancées en matière d'instrumentation, au travers d'une R&D ciblée et propice à des changements en profondeur. Récemment, des initiatives ont été lancées dans le domaine de la R&D stratégique sur les détecteurs par le département EP du CERN et par le comité d'examen de l'ECFA consacré à la R&D sur les détecteurs, avec le soutien de programmes financés par l'UE, tels qu'AIDA et ATTRACT. La coordination des activités de R&D est essentielle pour favoriser les avancées scientifiques de ces activités et optimiser l'exploitation des ressources ; aussi est-il absolument nécessaire de renforcer les structures de R&D collaborative existantes et d'en créer de nouvelles, afin de relever les futurs défis expérimentaux du domaine au-delà du HL-LHC.

Coordonnée par l'ECFA, une feuille de route devrait être élaborée par la communauté de manière à équilibrer les efforts de R&D sur les détecteurs en Europe, en tenant compte des progrès réalisés par les disciplines voisines dans le domaine des technologies émergentes. Cette feuille de route devrait déterminer et présenter un portefeuille diversifié de R&D sur les détecteurs qui ait le plus de chances de renforcer la performance du programme de physique des particules à court et à long termes. Elle pourrait, par exemple, déterminer les grands défis qui orienteront le processus de R&D à moyen et à long termes et définir des nœuds technologiques suffisamment étendus pour servir de base à la création de plateformes de R&D. Il serait ainsi possible de mener des actions concertées et efficaces au niveau international afin de relever les défis technologiques liés aux futures expériences tout en favorisant un environnement qui stimule l'innovation et la collaboration avec l'industrie.

Les activités de R&D sur les détecteurs nécessitent des infrastructures et des outils spécialisés, ainsi qu'un accès à des installations d'essai. Les laboratoires et instituts de recherche nationaux européens jouent un rôle central et important en permettant l'accès à ces installations et infrastructures et en mettant à disposition des compétences spécialisées et un appui aux utilisateurs. Ces plateformes technologiques facilitent et favorisent une forte participation de l'industrie.

d) Les logiciels et les infrastructures informatiques à grande échelle gérant de gros volumes de données constituent un élément essentiel des programmes de recherche en physique des particules. La communauté fait face à d'importants défis dans ce domaine, notamment dans la perspective du HL-LHC. Aussi les modèles de logiciels et de calcul utilisés pour la recherche en physique des particules doivent-ils évoluer de manière à répondre aux besoins futurs de la discipline. *La communauté devra mener activement des travaux de R&D communs et coordonnés en collaboration avec d'autres domaines de la science et de l'industrie afin de développer des infrastructures logicielles et de calcul tirant parti des récents progrès réalisés dans le domaine des technologies de l'information et de la science des données. Le développement plus avant de politiques internes en matière de données ouvertes et de*

préservation des données devra être encouragé, et un niveau adéquat de ressources investi dans leur mise en œuvre.

C'est grâce à la mise en place d'une infrastructure logicielle et informatique efficace qu'il est possible d'obtenir les résultats scientifiques des expériences de physique des particules. L'informatique et les logiciels sont des sujets de R&D importants en eux-mêmes et sont essentiels pour maintenir et améliorer les capacités de recherche en physique des particules. Il est nécessaire d'assurer une coordination forte au sein de la communauté en ce qui concerne les activités de R&D dans les domaines informatique et logiciel, et d'établir des structures de coordination communes qui favoriseront la cohérence de ces activités, la planification à long terme et la mise en place de moyens efficaces pour exploiter les synergies avec d'autres disciplines et avec l'industrie. Parmi les initiatives récentes, on peut citer la *HEP Software Foundation (HSF)*, qui s'attaque aux défis informatiques et logiciels communs liés à la physique des particules, et *ESCAPE (European Science Cluster of Astronomy & Particle Physics ESFRI Research Infrastructures)*, qui explore les synergies dans les domaines de l'astronomie, de l'astrophysique des particules et de la physique des particules s'appuyant sur des accélérateurs.

Les avancées en matière de développement informatique et logiciel à fort impact devraient être reconnues aussi bien au sein de la communauté de la physique des particules qu'à l'extérieur. Les compétences nécessaires pour mener des activités de R&D dans ces domaines sont de sérieux atouts pour un spécialiste de la physique des particules. Leur reconnaissance contribuera grandement à développer des perspectives de carrière intéressantes et à faire en sorte que les scientifiques restent impliqués dans ces domaines de R&D. Davantage de spécialistes doivent être formés pour répondre aux besoins essentiels, en particulier compte tenu de l'augmentation du volume et de la complexité des données attendue à l'ère du HL-LHC, et pour appuyer les expériences dans les disciplines connexes.

Il est de plus en plus important d'adopter une approche globale de la conception de détecteurs, qui tienne compte des conséquences de l'exploitation sur les ressources informatiques. La communauté doit relever le défi de former des spécialistes capables de combler le fossé qui se creuse entre ces activités. Le rôle important que pourrait jouer l'intelligence artificielle dans les domaines de la conception et de l'exploitation de détecteurs, du traitement de données en ligne et de l'analyse des données commence à apparaître. Les processeurs multicœurs, le traitement multifil et les accélérateurs, tels que les processeurs graphiques, sont d'excellents exemples de progrès réalisés dans les domaines informatique et logiciel ayant un impact important sur les résultats de physique des particules. Les techniques de simulation et de sélection d'événements et les logiciels de reconstitution et d'analyse doivent s'adapter à ce type d'évolutions.

5. Synergies avec des disciplines voisines

Il existe de nombreuses synergies entre la physique des particules et d'autres domaines de recherche, comme la physique nucléaire et l'astrophysique des particules, qui abordent également des questions fondamentales et utilisent des outils communs. La science des accélérateurs est tout autant liée à la

physique des lasers et des plasmas qu'à la science des matériaux. Il existe en outre des synergies avec la physique atomique, comme le montre le programme d'expérimentation sur l'antihydrogène mené au Décélérateur d'antiprotons (AD) du CERN et dans le cadre du projet ELENA. Les spécialistes de la physique des particules et de la physique des lasers aspirent à explorer ensemble le passionnant domaine de l'électrodynamique quantique (QED) dans le cadre du projet européen XFEL, implanté à Hambourg.

a) Divers axes de recherche se situant à l'intersection de la physique des particules et de la physique nucléaire nécessitent des expériences et des installations spécifiques. L'Europe dispose d'un programme de physique nucléaire dynamique, que ce soit au CERN (notamment dans le cadre du programme sur les ions lourds), ou au sein d'autres laboratoires en Europe. Par-delà l'Europe, la construction d'un nouveau collisionneur électron-ion, prévue aux États-Unis, en vue de l'étude de la structure partonique du proton et du noyau, suscite l'intérêt de chercheurs européens. *L'Europe devra préserver sa capacité de réaliser des expériences innovantes à l'intersection de la physique des particules et de la physique nucléaire, et le CERN devra continuer de collaborer avec le NuPECC sur des questions d'intérêt commun.*

Les synergies entre la physique des particules et la physique nucléaire sont guidées par l'ambition de parvenir à une compréhension de principe premier de la dynamique forte fondée sur la chromodynamique quantique. En outre, ces deux disciplines utilisent des outils d'expérimentation similaires. Le programme de base du CERN comprend non seulement les installations ISOLDE et n_TOF, mais aussi le programme d'ions lourds au SPS et au LHC. De futures installations européennes, telles que FAIR, NICA et ESS, prévoient des programmes de recherche qui présentent un intérêt pour la physique des particules. La feuille de route de la physique nucléaire en Europe est coordonnée par le Comité européen de collaboration pour la physique nucléaire (NuPECC) et il existe des canaux de communication bien établis entre les communautés de la physique des particules et de la physique nucléaire. Le NuPECC a exprimé son vigoureux soutien à la prolongation du programme d'ions lourds durant la période du HL-LHC et au-delà, si un collisionneur de hadrons de haute énergie devait être construit au CERN dans l'avenir. Les collisionneurs électron-proton, tels que le LHeC ou le FCC-ep, qui offrent la possibilité d'inclure des cibles à ions, intéressent également le NuPECC, qui s'apprête à déclarer son soutien en faveur de la participation de l'Europe au projet de collisionneur électron-ion aux États-Unis.

b) La physique des astroparticules, coordonnée par l'APPEC en Europe, s'intéresse également à des questions concernant la physique fondamentale des particules et leurs interactions. La découverte des ondes gravitationnelles, événement majeur survenu depuis la dernière mise à jour de la stratégie, a contribué au développement d'observations à messagers multiples de l'Univers. *Les synergies entre la physique des particules et la physique des astroparticules devront être renforcées par le biais d'échanges scientifiques et de la coopération technologique dans des domaines d'intérêt commun et mutuellement bénéfiques.*

Les synergies sont multiples entre la physique des particules et l'astrophysique des particules sur le plan des infrastructures, des détecteurs, des systèmes de calcul, des modèles d'interaction et des objectifs de physique. Les domaines de recherche mettant en lien ces deux disciplines sont la physique des neutrinos, les recherches sur la matière noire, la physique des rayons cosmiques, et potentiellement dans l'avenir, les ondes gravitationnelles. Les mesures de précision des propriétés des neutrinos dépendent des neutrinos solaires et atmosphériques pour la détermination de divers paramètres de masse et de mélange. Les grands détecteurs souterrains de neutrinos sont utilisés tant pour les expériences longue distance avec accélérateur qu'en astrophysique des particules. Les recherches sur la matière noire sont menées par des expériences souterraines spécialisées et par de grands détecteurs d'astroparticules tels que H.E.S.S., Antares ou IceCube, et, prochainement, par l'observatoire CTA. EuCAPT, le centre de recherche pour la physique théorique des astroparticules du consortium APPEC (*Astroparticle Physics European Consortium*), a récemment été créé, et le CERN a été choisi pour être son premier site d'hébergement. La nécessité de renforcer ces synergies a été clairement exprimée dans les contributions nationales à la présente mise à jour de la stratégie.

Le statut d'« Expérience reconnue » créé par le CERN permet aux collaborations dont les expériences ne sont pas basées au Laboratoire, mais concernent des domaines pertinents pour ses objectifs scientifiques, d'utiliser son infrastructure (par exemple, pour organiser des réunions, se servir des bureaux ou recevoir un appui administratif). Il conviendrait de mettre en place une nouvelle procédure pour les collaborations qui recherchent l'appui technique du CERN, lequel devrait se limiter à la mise à disposition de compétences techniques et de services d'infrastructure d'une manière qui soit financièrement neutre pour l'Organisation.

Les liens qui unissent la physique des particules s'appuyant sur des accélérateurs à des domaines connexes, tels que l'astrophysique des particules et la physique nucléaire, devraient être renforcés grâce à l'échange de compétences et de technologies dans des domaines d'intérêt commun et mutuellement bénéfiques. Pour mieux explorer et renforcer les synergies, un séminaire périodique conjointement organisé par l'ApPEC, l'ECFA et le NuPECC a récemment été créé. La communication et l'échange de résultats entre les différentes communautés sont essentiels, par exemple sur les diverses questions relatives à la matière noire qui sont abordées grâce à des approches expérimentales complémentaires.

6. Questions organisationnelles

a) La réalisation d'un projet ambitieux de collisionneur de prochaine génération suppose une collaboration mondiale et un engagement à long terme par l'ensemble des parties à l'égard de la construction et de l'exploitation. *Le CERN devra entamer des discussions avec de potentiels partenaires majeurs dans le cadre de l'étude de faisabilité concernant la réalisation d'un tel projet au CERN. Dans le cas d'un projet mondial réalisé en dehors de l'Europe, auquel il participerait, le CERN devra jouer le rôle de pôle régional européen, assurant une coordination stratégique et un appui technique. Les États membres pourraient fournir des ressources à la nouvelle installation mondiale, soit sous la forme de contributions*

supplémentaires apportées par l'intermédiaire du CERN, soit directement dans le cadre d'accords bilatéraux ou multilatéraux avec l'organisation hôte.

La communauté de la physique des particules envisage plusieurs grands projets qui, en raison de leur taille, de leur complexité, de leur durée et de leur coût, devront être planifiés au niveau mondial. La présente mise à jour de la stratégie s'appuie sur la prise de position relative aux projets mondiaux de la stratégie de 2013, mais tient également compte de la meilleure compréhension des projets actuels du domaine à l'échelle mondiale. Les questions à aborder concernant la gouvernance et le financement des projets mondiaux ont trait soit à l'hébergement par le CERN d'un collisionneur de nouvelle génération en tant que projet financé au niveau mondial, soit à la contribution de l'Europe à un collisionneur de nouvelle génération construit hors d'Europe, et en particulier au rôle que jouerait le CERN à cet égard.

Dans le cas d'une nouvelle installation mondiale hébergée au CERN, des engagements à long terme sont requis de la part d'États non européens, et doivent tenir compte des coûts de construction et d'exploitation. Un tel partage des coûts entre plusieurs régions du monde ira bien au-delà des niveaux actuels de contributions en nature pour le LHC. Les États non européens pourraient contribuer à la réalisation d'une nouvelle installation de deux manières : soit en devenant États membres du CERN et en prenant part à l'ensemble du programme de base du Laboratoire ou à un nouveau programme d'activités (qui ferait partie du programme de base) englobant la nouvelle installation et l'infrastructure correspondante, soit en participant à un projet spécifique, mis en œuvre au travers d'un accord bilatéral ou multilatéral à long terme. Le CERN devrait dès à présent entamer des discussions avec de potentiels partenaires non européens afin de déterminer l'option à privilégier. Ces discussions devraient tenir compte de la nécessité de mettre en lien le degré de participation avec le degré d'influence sur le projet. Le modèle de gouvernance d'une nouvelle installation mondiale hébergée au CERN doit être compatible avec les dispositions de la Convention du CERN, dont la modification n'est pas souhaitable.

Dans le cas d'une contribution européenne à une nouvelle installation mondiale basée hors d'Europe, le CERN devrait, si le Conseil du CERN le décide, assurer la coordination stratégique des contributions européennes et apporter un appui technique à leur égard. Les modalités de la participation européenne resteront à déterminer en temps voulu.

b) La communauté de la physique des particules et la Commission européenne ont une solide pratique de collaboration mutuelle. *La relation entre la communauté de la physique des particules et la Commission européenne devra être renforcée encore, afin que soient examinées de possibles mécanismes de financement pour la réalisation de projets d'infrastructures et de programmes de R&D en coopération avec d'autres domaines de la science et de l'industrie.*

La participation à des réseaux européens consacrés au développement des technologies des futurs accélérateurs et détecteurs (AMICI, ARIES, EUROCOL, TIARA, ATTRACT, AIDA2020, COMPACT XLS, EuPRAXIA, ALEGRO, LEAPS, LENS, etc.) a contribué à la cohérence des

efforts entre le CERN et les laboratoires nationaux et a facilité leur aboutissement. La communauté européenne de la physique des particules devrait travailler avec la Commission européenne pour élaborer et mettre en place les instruments de financement nécessaires à la réalisation des projets communs de R&D (par exemple, dans le cadre du programme européen Horizon).

c) La politique scientifique européenne évolue rapidement vers la science ouverte, qui promeut et accélère le partage de connaissances scientifiques au sein de la communauté dans son ensemble. La physique des particules a fait figure de pionnière en ce qui concerne plusieurs aspects de la science ouverte. *La communauté de la physique des particules devra travailler avec les autorités compétentes pour contribuer à faire en sorte que le consensus qui se dégage sur la science ouverte soit adopté pour la recherche financée par des fonds publics, et devra ensuite mettre en œuvre une politique en matière de science ouverte pour la discipline.*

La science ouverte promeut le partage des connaissances scientifiques et facilite l'utilisation large des découvertes, des données, des méthodes et des infrastructures de recherche, aussi bien au sein de la communauté scientifique que dans la société en général. L'objectif est de faire en sorte que la recherche ait des retombées plus rapides grâce à la diffusion la plus étendue possible des connaissances sur les plans sociétal et éducatif, ce qui contribue également à favoriser l'innovation. La science ouverte comprend le libre accès aux publications scientifiques et aux données de la recherche, la préservation et la réutilisation des résultats des recherches, le partage des infrastructures et la participation au processus de recherche. Les maîtres-mots de cette démarche sont la collaboration et la transparence.

Les politiques de science ouverte sont élaborées et mises en œuvre aux niveaux national et international par les gouvernements, les institutions internationales et les organismes de financement de la recherche. La communauté européenne de la physique des particules et le CERN ont fait figure de pionniers dans divers aspects de la science ouverte, notamment avec l'initiative de publication en libre accès SCOAP3, le système d'archivage Zenodo et, surtout, la création du World Wide Web. Établir une relation constructive avec les décideurs afin d'élaborer une politique de science ouverte pour la discipline est le souhait de la communauté de la physique des particules.

7. Impact environnemental et sociétal

a) L'efficacité énergétique des accélérateurs actuels et futurs ainsi que des installations informatiques est une question qui suscite, et qui devra continuer à susciter, une attention constante. Les déplacements représentent également un défi environnemental en raison de la nature internationale de la discipline. *L'impact environnemental des activités de physique des particules devra continuer d'être étudié de près, et d'être limité autant que possible. Un plan détaillé visant à limiter le plus possible l'impact environnemental et à économiser et réutiliser l'énergie devra faire partie du processus d'approbation de tout projet important. Toutes les solutions permettant d'éviter les déplacements devront être examinées et encouragées.*

Dans un monde où les ressources sont limitées et où les besoins augmentent, et à l'heure du changement climatique, il est indispensable de tenir compte des facteurs de consommation, de durabilité et d'efficacité énergétiques dans les discussions sur l'avenir de la physique des particules. Ces facteurs font déjà l'objet d'une attention particulière et un travail important est réalisé au niveau des installations et des laboratoires existants pour rénover et améliorer les infrastructures vieillissantes, et lors de la conception de nouvelles expériences ou de nouveaux accélérateurs.

On prévoit que la prochaine génération de collisionneurs de particules de haute énergie consommera plusieurs centaines de mégawatts d'électricité, contre environ 100 MW pour le HL-LHC. Les laboratoires européens utilisant des accélérateurs, en particulier le CERN, l'ESRF et l'ESS, étudient activement des solutions pour la conception de nouvelles infrastructures plus respectueuses de l'environnement. Ces efforts doivent continuer d'être soutenus, et les résultats des études doivent être pris en compte dans la conception des versions améliorées des installations existantes et futures. Il existe de nombreuses manières d'améliorer l'efficacité énergétique des complexes d'accélérateurs de particules ; on citera notamment la récupération de la chaleur résiduelle, l'optimisation des systèmes de refroidissement cryogénique et la récupération d'énergie des faisceaux. Les investissements réalisés dans la R&D sur les techniques d'amélioration de l'efficacité énergétique seront déjà rentabilisés à moyen terme, et auront une incidence significative sur les coûts d'exploitation des accélérateurs. Au moment de choisir l'option optimale pour une nouvelle installation, l'efficacité énergétique de l'accélérateur doit être prise en considération parallèlement à d'autres facteurs tels que le coût, le calendrier et le potentiel de physique.

Les technologies requises pour les détecteurs sont elles-mêmes une source potentielle d'émissions de gaz à effet de serre (par exemple, les gaz spéciaux nécessaires pour exploiter certains types de détecteurs). Des efforts importants sont déjà déployés pour trouver des alternatives aux gaz qui présentent un potentiel de réchauffement climatique élevé. Il conviendrait d'encourager et de soutenir vivement les recherches portant sur des solutions respectueuses de l'environnement capables de remplacer des matériaux ayant un potentiel élevé de réchauffement climatique pour les détecteurs de particules. Le recours à des systèmes de recirculation doit être prévu dès les premières étapes de la conception.

Plus la luminosité intégrée est élevée, plus les volumes de données et les besoins en capacité de calcul sont importants. L'efficacité énergétique des centres de calcul s'est considérablement améliorée ces dernières années, et la communauté de la physique des particules devrait continuer de jouer le rôle de chef de file dans ce domaine. Le « *Green IT Cube* » du GSI et le futur nouveau centre de calcul du CERN sont de bons exemples d'initiatives déjà adoptées. En outre, le travail d'optimisation des logiciels peut aussi avoir une incidence importante sur les besoins en ressources. La communauté de la physique des particules met déjà en œuvre de tels efforts, par exemple dans le cadre de la Fondation HSF (*HEP Software Foundation*). La communauté devrait investir aussi bien sur le plan matériel que sur le plan logiciel pour améliorer l'efficacité énergétique de ses infrastructures informatiques.

La nature internationale de la communauté de la physique des particules et la concentration des expériences dans un petit nombre de grandes installations appellent un haut niveau de coordination et incitent les personnes à se déplacer pour se réunir. Une part importante de ces déplacements est également liée à la participation à des conférences et à des ateliers internationaux, ces derniers étant particulièrement importants pour les chercheurs en début de carrière. Les émissions de gaz à effet de serre liées aux transports représentent une part importante de l’empreinte carbone mondiale. En créant le World Wide Web, la communauté de la physique des particules a contribué à révolutionner la manière dont les informations sont diffusées. Il est donc attendu d’elle qu’elle continue d’être à l’avant-garde des initiatives visant à éviter les déplacements physiques, notamment par la tenue de réunions virtuelles, et qu’elle soutienne les formes de déplacement à faible émission de carbone, ainsi que la compensation carbone, lorsqu’un déplacement ne peut être évité.

b) La physique des particules, qui étudie des questions fondamentales et favorise des innovations technologiques, attire les jeunes talents. Assurer leur formation est d’une importance cruciale en vue de répondre aux besoins de la discipline et de la société dans son ensemble. *Pour que les scientifiques en début de carrière s’épanouissent dans leur domaine, la communauté de la physique des particules devra veiller particulièrement à leur encadrement et à leur formation. Des mesures supplémentaires devront être prises au sein des grandes collaborations de manière à accroître la reconnaissance des personnes s’agissant du développement et de la maintenance des expériences, des infrastructures informatiques et des logiciels. La communauté de la physique des particules s’engage à placer les principes d’égalité, de diversité et d’inclusion au cœur de toutes ses activités.*

Parce qu’elle consiste à explorer et à tenter de résoudre les questions fondamentales de l’Univers, la physique des particules fascine à plus d’un titre, à l’intérieur comme à l’extérieur de la communauté. Elle attire des étudiants talentueux dont la formation recouvre de nombreuses matières relevant des sciences, de la technologie, de l’ingénierie et des mathématiques. Ces deux aspects contribuent à renforcer l’importance des sciences dans la société. Les formations, grâce au tutorat et aux écoles spécialisées (jouissant souvent d’une longue tradition d’excellence), devraient mettre l’accent sur l’innovation au sens large. En outre, il devrait être proposé des formations aux personnes occupant des fonctions de direction au sein des collaborations, qui mettraient particulièrement l’accent sur la gestion du stress et l’attention à accorder à l’ambiance de travail. Il est important que la reconnaissance des individus au sein des grandes collaborations soit améliorée, conformément aux orientations formulées par le groupe d’étude de l’ECFA chargé de cette question. En particulier, il convient d’encourager la publication de revues consacrées aux technologies et aux méthodes théoriques et expérimentales. Pour les spécialistes de la physique des particules, les principes d’égalité, de diversité et d’inclusion doivent être clairement présents dans tous les domaines d’activité. Des formations allant dans ce sens devraient être proposées au CERN et dans les autres instituts, et les bonnes pratiques partagées entre instituts. Bon nombre des questions mentionnées ci-dessus ont fait l’objet de discussions parmi les scientifiques en début de carrière. Il est

recommandé que ces derniers constituent une commission, placée sous les auspices de l'ECFA, qui serait chargée d'examiner ces sujets et d'en assurer le suivi.

Les laboratoires nationaux, les instituts de recherche et les universités du monde entier sont un terrain de formation pour les futurs jeunes scientifiques. Pour répondre aux besoins du domaine et de la société dans son ensemble, il est indispensable d'assurer la formation aux technologies-clés. Les programmes coopératifs entre le CERN et les laboratoires nationaux devraient être encouragés afin d'accroître l'impact de la physique des particules et des technologies qui s'y rapportent pour les nouvelles générations et pour la société.

c) La physique des particules a contribué à des progrès dans de nombreux domaines, qui ont apporté de grands bénéfices à la société. Il importe de faire prendre conscience, à toutes les phases des projets de physique des particules, de l'intérêt du transfert de connaissances et de technologie ainsi que de leur impact sociétal. *Les centres de recherche en physique des particules devront promouvoir le transfert de connaissances et de technologie, et aider leurs scientifiques dans cette tâche. La Communauté de la physique des particules devra nouer des liens avec l'industrie afin de faciliter le transfert de connaissances et le développement de technologies.*

Il existe un grand nombre de technologies, déjà mises au point ou en cours de développement par la communauté de la physique des particules, qui pourraient être transférées à d'autres domaines de la science et de l'industrie. La R&D sur les accélérateurs et les détecteurs et le transfert de technologie peuvent tirer parti du réseau exceptionnel de grandes installations qu'offrent le CERN et les laboratoires nationaux, non seulement dans les domaines de la physique des particules, de la physique des astroparticules et de la physique nucléaire, mais aussi dans de nombreux domaines de recherche interdisciplinaires.

Les avancées réalisées dans les laboratoires de physique des particules profitent aux applications médicales des accélérateurs pour la production d'isotopes, la radiothérapie et l'hadronthérapie. Les derniers modèles de portiques supraconducteurs et de détecteurs médicaux en sont de bons exemples.

L'un des aspects essentiels de la présente mise à jour de la stratégie est de reconnaître l'incidence potentielle des évolutions technologiques du domaine des accélérateurs et des domaines connexes sur les progrès réalisés dans d'autres branches de la science, telles que l'astrophysique des particules, la cosmologie et la physique nucléaire. En outre, les avancées dans les domaines des sciences appliquées réalisées conjointement par l'université et l'industrie ont profité à la recherche fondamentale et pourraient s'avérer indispensables pour l'avenir du domaine, ce qui prouve que le transfert de connaissances et de technologie n'est pas une voie à sens unique.

L'un des aspects-clés de l'impact économique de la physique en général, et de la physique des particules en particulier, est l'effort coordonné mis en œuvre pour le transfert de technologie vers

l'industrie européenne, notamment l'accès de l'industrie aux installations des laboratoires nationaux.

d) L'étude des propriétés fondamentales de la nature suscite inspiration et enthousiasme. Il incombe aux scientifiques de faire partager à toutes les parties prenantes et au grand public leur enthousiasme pour les avancées réalisées dans leur domaine. Les concepts du Modèle standard, théorie bien établie pour les particules élémentaires, font partie intégrante de la culture. *La sensibilisation du public, l'éducation et la communication dans le domaine de la physique des particules devront continuer d'être reconnues comme des éléments importants de l'activité scientifique, et de bénéficier d'un soutien adéquat. La physique des particules devra travailler avec l'ensemble de la communauté scientifique à renforcer les liens entre les disciplines scientifiques. La communauté de la physique des particules devra travailler avec le corps enseignant et les autorités compétentes en vue d'étudier les possibilités d'intégration, dans les programmes scolaires généraux, de connaissances de base sur les particules élémentaires et leurs interactions.*

La communauté de la physique des particules est très active dans le domaine de la sensibilisation du public, et l'enthousiasme du grand public pour le domaine témoigne de l'efficacité de ses actions. Cette démarche doit être poursuivie, aussi bien dans sa forme ascendante que dans sa forme descendante. Bon nombre des activités de sensibilisation du public reposent sur des efforts individuels et doivent être considérées comme faisant partie intégrante de la fonction de scientifique et être valorisées dans le cadre de l'évolution de carrière. Il est demandé instamment aux organismes de financement européens d'accompagner systématiquement et explicitement le financement de la recherche en allouant des ressources spécifiques aux activités de sensibilisation.

Les bonnes relations entre les spécialistes de la physique des particules et ceux d'autres disciplines de la recherche contribueront à une meilleure compréhension mutuelle de l'importance et de l'urgence des questions en suspens de la recherche scientifique et généreront des possibilités de recherches interdisciplinaires et transdisciplinaires.

Le groupe international de communication grand public sur la physique des particules (IPPOG) a été créé en tant que structure collaborative entre pays afin d'harmoniser la formation en physique des particules dans l'enseignement secondaire, et son rôle pourrait être élargi à la production de supports de sensibilisation du public. Le Réseau de communication de la physique des particules en Europe (EPPCN) s'est avéré être un canal efficace pour la communication professionnelle en physique des particules. Son efficacité serait encore améliorée si les postes vacants de représentants de l'EPPCN pour l'ensemble des États membres et des États membres associés étaient pourvus. L'IPPOG et l'EPPCN ont un fort potentiel de synergie avec l'APPEC.

Le CERN propose des programmes dynamiques pour les enseignants et les étudiants, générant de précieuses données qui devraient être mises à la disposition de la communauté de la recherche pédagogique. La formation de la future génération de spécialistes en physique des particules et d'ingénieurs est cruciale pour la pérennité du domaine. Les nombreux utilisateurs du CERN qui ont

des fonctions universitaires garantissent la qualité de la formation supérieure en physique des particules. L'enseignement professionnel dans des domaines pertinents pour le CERN doit aussi être encouragé. Il est important d'adopter une démarche inclusive pour tous les étudiants, et les initiatives en faveur des groupes sous-représentés doivent être encouragées.

Le Portail de la science, en cours de construction au CERN, permettra de renforcer les activités de communication grand public et d'éducation dans le domaine de la physique des particules, dont le rayonnement devrait s'étendre à toute l'Europe.

Conclusions

La mise à jour 2020 de la stratégie européenne pour la physique des particules, énoncée dans le présent document, envisage les priorités à court et à long termes de la discipline. Compte tenu de l'échelle de nos ambitions à long terme, le plan européen doit être coordonné avec les autres régions du monde. Une nouvelle mise à jour de la stratégie devra avoir lieu au cours de la deuxième moitié de la décennie, lorsque les résultats de l'étude de faisabilité pour le futur collisionneur de hadrons seront disponibles et qu'une décision pourra être prise à cet égard.