

# Mise à jour de la stratégie européenne pour la physique des particules

par le Groupe sur la stratégie européenne

## 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'énergies 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

---

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 Nb<sub>3</sub>Sn 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.*

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).*

## **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.*

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.*

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.*

### 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.*

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.*

### 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.*

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.*

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.*

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.*

## **5. Synergies avec des disciplines voisines**

---

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.*

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.*

## 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.*

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.*

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.*

## 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.*

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.*

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.*

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.*

## **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.