



STRATÉGIE EUROPÉENNE POUR LA PHYSIQUE DES PARTICULES
MISE À JOUR 2026

Document explicatif
Groupe sur la stratégie européenne



_Table des matières

Avant-propos	5
1. Principales évolutions depuis la stratégie de 2020	6
2. Considérations générales concernant la mise à jour 2026	11
3. Prochain projet de collisionneur phare au CERN	14
4. Autres pistes de recherche en physique des particules	26
5. Théorie	31
6. Technologies	33
7. Mise en œuvre de projets, coopération avec de grands laboratoires de physique des particules en Europe	42
8. Synergies avec les disciplines voisines	45
9. Durabilité et impact environnemental	48
10. Dialogue avec le public, éducation, communication et aspects socioprofessionnels	51
Annexe 1 : Groupe sur la stratégie européenne	56
Annexe 2 : Groupe préparatoire sur la physique	58
Annexe 3 : Groupes de travail du Groupe préparatoire sur la physique	59
Annexe 4 : Groupes de travail du Groupe sur la stratégie européenne	60
Annexe 5 : Glossaire	61



Avant-propos

La physique des particules étudie les constituants fondamentaux de la matière et les forces qui les unissent. La mise au point de technologies visant à explorer l'infiniment petit à des énergies de plus en plus élevées, avec des mesures de plus en plus précises, a ouvert la voie à des découvertes qui ont révolutionné notre compréhension des lois de la physique qui régissent l'Univers. La découverte du boson de Higgs a représenté un immense pas en avant. Cependant, en dépit de tous ces progrès, nombre de mystères, tels que la nature de la matière noire, la prédominance de la matière sur l'antimatière et les caractéristiques observées des masses des particules fondamentales, n'ont toujours pas été élucidés. C'est là un argument de poids en faveur de la poursuite des explorations selon différentes approches. Les collisionneurs de haute énergie restent l'unique moyen d'étudier directement le boson de Higgs, lequel pourrait apporter des réponses à certaines de ces questions.

Le boson de Higgs étant une particule unique en son genre, des arguments scientifiques convaincants ont été avancés, dans le cadre de la mise à jour 2020 de la stratégie européenne pour la physique des particules, en faveur de la construction d'un nouveau collisionneur électron-positon fonctionnant comme une usine à Higgs, suivie d'une exploration plus poussée au moyen d'un collisionneur proton-proton exploité au niveau d'énergie le plus élevé possible. Le Conseil du CERN a ainsi lancé une étude visant à déterminer la faisabilité d'un futur collisionneur circulaire (FCC), avec comme première phase éventuelle une usine à Higgs et de production électrofaible sous la forme d'une machine électron-positon. Cette étude s'est achevée en 2025.

Au cours des dix dernières années, les expériences menées au Grand collisionneur de hadrons (LHC) ont accompli des avancées importantes concernant la mesure des propriétés du boson de Higgs et l'exploration des interactions entre particules à l'échelle d'énergie du TeV.

Lorsqu'il fonctionnera à haute luminosité, le LHC restera le principal instrument dans le monde pour l'exploration à la frontière des hautes énergies, la collecte de données devant se poursuivre jusqu'en 2041. Pour pouvoir répondre aux questions de physique des particules hors de la portée du LHC à haute luminosité (HL-LHC), des avancées considérables seront nécessaires, tant sur le plan de la précision que sur le plan de l'énergie.

Le mandat donné au Groupe sur la stratégie européenne par le Conseil du CERN aux fins de la présente mise à jour est d'élaborer un plan concret qui permette de faire avancer de manière importante la connaissance dans le domaine de la physique fondamentale par la réalisation d'un nouveau projet phare au CERN. Ce plan devra susciter et valoriser la collaboration internationale, et permettre à l'Europe de continuer de jouer un rôle de premier plan dans la discipline.

1



Principales évolutions depuis la stratégie de 2020

LHC et LHC à haute luminosité

Dans la mise à jour 2020 de la stratégie européenne pour la physique des particules, la pleine exploitation du LHC et du LHC à haute luminosité était présentée comme l'axe central de la physique des particules en Europe. Après l'installation et la mise en service des améliorations des injecteurs du LHC et des éléments relevant de la première phase des améliorations des expériences au cours du deuxième long arrêt, le LHC a entamé sa troisième période d'acquisition de données (2022-2026), avec des collisions proton-proton et des collisions d'ions lourds. L'accélérateur, les expériences et l'infrastructure de calcul décentralisée ont affiché des performances exceptionnelles. Au cours de la troisième période d'exploitation, jusqu'à fin 2025, les expériences polyvalentes ATLAS et CMS ont collecté les données de collisions proton-proton à une énergie dans le centre de masse de 13,6 TeV, ce qui correspond à une luminosité intégrée d'environ 300 fb^{-1} , soit le double du volume des données collectées pendant toute la deuxième période d'acquisition de données (deuxième période d'exploitation, 2015 – 2018). Grâce à cette augmentation du volume de données, à la mise au point de techniques d'expérimentation innovantes et aux avancées de la théorie, les expériences LHC ont produit quantité de résultats de physique remarquables.

L'exploration des propriétés du secteur du Higgs, et, par conséquent, de la nature de la brisure de symétrie électrofaible, reste un des axes principaux de la recherche au LHC. Des progrès considérables ont été faits en ce qui concerne les mesures des propriétés du boson de Higgs et de ses interactions avec les autres particules. Tous les principaux modes de production et rapports d'embranchement se sont avérés correspondre aux prédictions du Modèle standard selon la précision expérimentale actuelle. Sur la base de la structure de couplage prévue dans le Modèle standard, les couplages du boson de Higgs avec les bosons W et Z sont mesurés avec des incertitudes d'environ 5 % ; les couplages fermioniques sont mesurés avec des incertitudes d'environ 5 à 6 % en ce qui concerne les leptons τ et les quarks t , et d'environ 10 % pour les quarks b dans chaque expérience. Des indices de l'existence de couplages de Yukawa à des fermions de deuxième génération ont été observés via des désintégrations $H \rightarrow \mu\mu$. Jusqu'à présent, le paramètre d'autocouplage du boson de Higgs, qui régit les propriétés de la transition de phase électrofaible lors des premiers instants de l'Univers, n'a pas été limité de façon aussi stricte. Il est principalement exploré grâce à la production de paires de bosons de Higgs. Même si l'on s'attend à la présence de production de ces paires parmi les données de la troisième période d'exploitation, la mesure de l'autocouplage du Higgs nécessite la pleine puissance du LHC à haute luminosité, avec une incertitude attendue de 27 %.

En outre, d'importantes mesures de précision de paramètres électrofaibles (m_W , $\sin^2 \theta_W$, etc.) et d'interactions multibosons, qui donnent lieu à des états finaux à deux ou trois bosons, ont été effectuées et des territoires relevant d'une physique au-delà du Modèle standard ont été explorés grâce à des recherches d'écarts au niveau des taux ou des distributions cinématiques. Les écarts potentiels par rapport aux prédictions du Modèle standard sont également paramétrés grâce au cadre des théories effectives des champs.

L'expérience LHCb a continué de livrer des mesures de haute précision dans des domaines clés de la physique des saveurs, de la violation de CP et de la mise à l'épreuve du Modèle standard. Les résultats récents incluent l'observation de la violation de CP dans des désintégrations de baryons b , des mesures plus précises des paramètres de la matrice CKM, des études de l'universalité de la saveur leptonique, des observations de désintégrations rares et la caractérisation de nouveaux états hadroniques exotiques. Tirant parti d'un système de déclenchement entièrement basé sur des logiciels et de sous-détecteurs améliorés, l'expérience LHCb a pu quintupler sa luminosité de crête, ce qui ouvre la voie à un ambitieux programme de mesures doté d'une sensibilité accrue aux phénomènes au-delà du Modèle standard.

Après une mise à niveau réussie, l'expérience ALICE a continué d'étudier la physique de la matière soumise à l'interaction forte aux densités d'énergie les plus élevées jamais atteintes dans des collisions d'ions lourds. Un vaste éventail d'études ont été menées afin de caractériser le plasma quarks-gluons, fluide fortement couplé proche de la perfection. Parmi les principales mesures permises par l'amélioration des capacités de précision et de rapidité du système de trajectographie, on peut citer l'écart entre les flux collectifs des mésons et des baryons charmés – signature de la recombinaison des quarks c avec des constituants du plasma quarks-gluons en expansion – et la première mesure du flux de l'hypertriton, noyau formé à partir d'une recombinaison de baryons étranges et non étranges.

Le LHC sera mis à l'arrêt à la mi-2026, afin que commence l'installation de nouveaux éléments pour la machine à haute luminosité, dont des systèmes d'aimants reposant sur une technologie qui n'existait pas encore lors de la construction du LHC. En parallèle, les activités menées dans le cadre des programmes d'amélioration de phase 2 des détecteurs ATLAS et CMS en vue de l'exploitation à haute luminosité du LHC continuent de bien progresser. Après quelques difficultés techniques, la production de la plupart des sous-systèmes a débuté. À terme, le LHC à haute luminosité (HL-LHC) produira plus de cinq fois plus de données que le LHC, ce qui permettra de faire un bond en avant sur le plan de la précision et du potentiel de découverte d'une nouvelle physique. Le HL-LHC devrait être exploité de 2030 à 2041. Il est crucial que son programme soit mené à bien selon le calendrier prévu pour que la construction du futur collisionneur phare puisse débuter dans les temps.

Les collaborations ALICE et LHCb ont également élaboré des propositions concernant d'autres mises à niveau importantes (ALICE 3 et amélioration de phase 2 de LHCb) qui seront opérées à la fin des années 2030 pour que tout le potentiel du HL-LHC puisse être exploité. ALICE 3 permettra, entre autres, d'étudier la thermalisation des quarks lourds dans le plasma quarks-gluons en utilisant des baryons multicharmés et les corrélations de mésons charmés, ainsi que l'évolution dans le temps de la température

du plasma quarks-gluons. Les améliorations importantes apportées à LHCb devraient lui permettre de renforcer sa précision, d'atteindre une sensibilité record aux observables essentiels de physique des saveurs et de mettre en œuvre un vaste programme de recherche au-delà de la physique des saveurs.

Étude de faisabilité du FCC

La réalisation de l'étude de faisabilité du FCC au CERN, qui faisait partie des recommandations de la mise à jour de la stratégie en 2020, est un autre accomplissement notable. Une conception de référence cohérente pour le programme FCC, accompagnée d'un scénario d'implantation territoriale bien avancé, a été élaborée. La faisabilité technique de collisions électron-positon au FCC a été démontrée et des scénarios de financement plausibles ont été échafaudés. Des promesses de contributions financières conséquentes ont été reçues de la part de donateurs du secteur privé, et d'autres financements pourraient être apportés par l'Union européenne d'après le projet de cadre financier pluriannuel de la Commission européenne pour la période 2028-2034.

Le rapport relatif à l'étude de faisabilité du FCC a été passé en revue par des comités d'experts indépendants avant d'être examiné par le Conseil du CERN et ses organes subsidiaires, le Comité des directives scientifiques et le Comité des finances. Cette étude portait sur un vaste éventail de questions liées à l'éventuelle réalisation d'un tel projet, notamment les objectifs de physique, la géologie, le génie civil, les infrastructures techniques, les dimensions territoriale et environnementale, les besoins en R&D pour les accélérateurs et les détecteurs, les avantages socio-économiques et le coût. L'étude de faisabilité du FCC a notamment accordé une grande place à la configuration et à l'emplacement de l'anneau du collisionneur et de l'infrastructure associée, qui ont été conçus de sorte à maximiser les bénéfices scientifiques tout en tenant compte de la compatibilité territoriale, des contraintes environnementales et de construction, et du coût. L'option privilégiée est un anneau d'une circonférence de 90,7 km, situé à une profondeur moyenne de 200 m, avec huit sites en surface et quatre zones d'expériences souterraines. Tout au long de l'étude de faisabilité, le CERN a été accompagné par ses deux États hôtes, la France et la Suisse, qui ont travaillé avec des entités aux niveaux local, régional et national. Des réunions d'information avec les communautés locales ont débuté, et d'autres échanges avec la population sont en préparation, conformément aux cadres respectifs des États hôtes, de manière à garantir un dialogue constructif avec les parties prenantes des différents territoires.

Le rapport relatif à l'étude de faisabilité détaille également les concepts et les pistes envisagés pour limiter le plus possible l'empreinte environnementale du FCC, tout en favorisant le développement de nouvelles technologies au service de la société.

R&D sur les accélérateurs, les détecteurs et l'informatique

Conformément aux recommandations de la mise à jour 2020 de la stratégie, des feuilles de route ont été élaborées afin d'organiser des activités cohérentes dans les domaines de la R&D sur les accélérateurs et les détecteurs.

Le Groupe des directeurs de grands laboratoires de physique des particules (LDG), qui réunit 11 grands laboratoires de physique des particules européens, a été chargé d'élaborer une feuille de route relative à la R&D sur les accélérateurs compte tenu des

synergies créées avec des partenaires internationaux. L'un des principaux objectifs était de définir les priorités en termes de technologies et les résultats attendus pour la décennie. Cinq domaines principaux de R&D ont été définis et des collaborations adaptées ont été mises en place : aimants à champ élevé (HFM) fondés sur la technologie des supraconducteurs à haute température critique (HTS) ; systèmes et structures de radiofréquence à gradient élevé ; accélération par champ de sillage plasma à gradient élevé et par laser ; faisceaux de muons de forte brillance et collisionneurs de muons, et linacs à récupération d'énergie (ERL). Les avancées réalisées ont été passées en revue et les résultats ont été soumis en tant que contribution au processus de mise à jour de la stratégie.

Une feuille de route relative à la R&D sur les détecteurs a été élaborée sous l'égide du Comité européen sur les futurs accélérateurs (ECFA), soutenue par le ferme engagement de toute la communauté à coordonner de manière cohérente les travaux de R&D en Europe, compte tenu de l'évolution des technologies émergentes en physique des particules et dans les disciplines connexes. Des collaborations pour la R&D sur les détecteurs, hébergées au CERN, ont été créées afin de prendre en charge un portefeuille diversifié de travaux de R&D à même d'améliorer la performance du programme de physique des particules à court et à long termes. Ces travaux de R&D porteront sur les détecteurs en milieu gazeux et liquide, les détecteurs à semi-conducteurs, les détecteurs de photons, les capteurs quantiques, les calorimètres, l'électronique et la mécanique. Les collaborations ont été constituées et les travaux ont déjà débuté.

La communauté de la physique des particules a également mené des travaux de R&D communs et coordonnés dans le domaine de l'informatique 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. En tant que technologie révolutionnaire, l'intelligence artificielle (IA) joue déjà un rôle important en physique des particules.

Physique hors collisionneurs

Des progrès considérables ont également été accomplis dans le domaine de la physique hors collisionneurs. Des expériences menées au CERN et dans d'autres instituts européens ont aussi grandement contribué à l'importante diversité du programme de physique des particules. Avec l'approbation du projet SHiP, expérience utilisant un arrêt de faisceaux et des faisceaux de haute intensité, le CERN a renouvelé son engagement en faveur d'un programme ambitieux, complémentaire du LHC.

S'agissant des neutrinos, d'importantes avancées ont été réalisées en ce qui concerne la détermination de la masse des neutrinos et du mélange leptonique, et la construction de la prochaine génération d'expériences neutrino utilisant des accélérateurs progresse rapidement. La plateforme neutrino du CERN est un élément central de la participation européenne au programme neutrino longue distance mondial. En particulier, les contributions de l'Europe au projet LBNF/DUNE ont été décisives et restent une priorité pour le CERN.

2



Considérations générales concernant la mise à jour 2026

Comprendre la nature de la matière noire dans l'Univers reste une priorité pour les expériences de physique et d'astrophysique des particules. Un ensemble complet d'expériences a été créé avec une importante participation européenne, notamment des expériences utilisant un collisionneur, des expériences avec cibles fixes, des expériences utilisant un arrêt de faisceaux et un accélérateur, et des expériences recherchant spécifiquement des candidats à la matière noire de faible masse. En ce qui concerne les technologies des détecteurs, celles utilisées pour les expériences sur la matière noire ont des similitudes avec celles des expériences neutrino. En particulier, la mise au point de grands détecteurs à gaz rare liquéfié est importante pour la recherche de particules massives interagissant faiblement.

En Europe, les laboratoires nationaux ont grandement contribué au programme de physique hors collisionneur en faisant progresser l'exploration des symétries fondamentales et du Modèle standard grâce à des expériences plus petites et complémentaires, d'un niveau d'énergie moindre. La recherche de désintégrations modifiant la saveur des leptons en est un exemple.

Durabilité

D'importants progrès ont été réalisés concernant la durabilité des infrastructures de recherche en physique des particules et l'atténuation de leur impact sur l'environnement. La réutilisation de l'énergie et la R&D sur des systèmes de refroidissement et des gaz pour détecteurs plus écologiques en sont quelques exemples. Le CERN s'est engagé à ce que tout nouveau projet mené au Laboratoire soit exemplaire du point de vue de la durabilité, et intègre des principes d'écoconception à chaque phase : conception, construction, exploitation et mise hors service.

L'Europe doit au CERN sa 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, repose sur la poursuite de projets scientifiques à fort impact menés par le Laboratoire et la communauté de la physique des particules dans les universités et les centres de recherche. L'exploitation du LHC puis du HL-LHC permettra au CERN de rester le premier laboratoire de physique des particules à la frontière des hautes énergies du monde. Grâce au vaste et exceptionnel volume de données qui sera produit lors de l'exploitation du LHC à haute luminosité, l'exploration du secteur du Higgs et les tests précis du Modèle standard dans les domaines électrofaible et des saveurs se poursuivront. Certaines des mesures portant sur les désintégrations rares du boson de Higgs et une première mesure de l'autocouplage du boson de Higgs ouvriront de nouvelles perspectives. En outre, de nouveaux domaines de l'espace des paramètres en ce qui concerne la recherche d'écart par rapport au Modèle standard pourront être explorés.

A. La pleine exploitation du potentiel de physique du LHC et du HL-LHC et la transformation du LHC en machine de haute luminosité restent les priorités absolues de la physique des particules en Europe. Tout doit être fait pour que la mise à niveau du LHC en HL-LHC se fasse selon le calendrier fixé.

Conformément au mandat défini par le Conseil du CERN, l'objectif de la mise à jour 2026 de la stratégie européenne pour la physique des particules est d'élaborer un plan visionnaire et concret qui permette de faire considérablement avancer la connaissance dans le domaine de la physique fondamentale par la réalisation du prochain projet phare du CERN, lequel devra susciter et valoriser la collaboration internationale, et permettre à l'Europe de continuer de jouer un rôle de premier plan dans la discipline. La mise à jour de la stratégie devra indiquer quelle est l'option privilégiée pour le prochain collisionneur au CERN, et hiérarchiser les autres options possibles au cas où la première s'avérerait non réalisable ou non compétitive. Elle devra aussi indiquer des domaines prioritaires pour des approches complémentaires des collisionneurs, pour d'autres expériences susceptibles d'être envisagées au CERN et dans d'autres laboratoires en Europe, ainsi que pour une participation à des projets hors d'Europe.

En vue de l'organisation du processus de mise à jour de la stratégie, il a été demandé au Groupe sur la stratégie européenne* de prendre en considération les contributions de la communauté de la physique des particules, l'état de la mise en œuvre de la mise à jour 2020 de la stratégie, les progrès accomplis au cours des dernières années et le paysage international de la discipline.

*Les compositions du Groupe sur la stratégie européenne et du Groupe préparatoire sur la physique sont présentées en annexe.

Les contributions des communautés de la physique des particules des États membres et États membres associés du CERN et d'autres pays représentent un élément essentiel de la mise à jour de la stratégie. Pour que les informations recueillies servent au mieux la stratégie et soient aussi cohérentes et uniformes que possible, l'ECFA a donné des consignes concernant la collecte des contributions des communautés nationales. Les communautés nationales ont été invitées à donner leur avis sur l'option privilégiée pour un nouveau collisionneur au CERN, ainsi que sur les autres options possibles au cas où la première s'avérerait non réalisable ou non compétitive. En outre, des contributions ont été demandées sur d'autres questions liées à la stratégie, notamment l'importance du programme de physique hors collisionneurs et l'ampleur de la participation du CERN aux disciplines voisines.

Au total, au printemps 2025, 266 contributions avaient été apportées par la communauté au processus de mise à jour de la stratégie concernant les possibles projets phares hébergés au CERN et des projets dans d'autres domaines de la physique. Ces contributions émanaient des communautés de physique des particules d'Europe et d'ailleurs, ainsi que de laboratoires nationaux et de scientifiques en début de carrière. Elles ont fait l'objet de discussions lors d'un symposium public qui s'est tenu à Venise du 23 au 27 juin 2025 et qui a réuni plus de 600 physiciens de près de 40 pays. Les questions relatives à la physique et aux technologies contenues dans les 266 contributions et les délibérations tenues lors du symposium public ont été résumées par le Groupe préparatoire sur la physique (PPG)* dans le Cahier d'information sur la physique, qui a été publié fin septembre 2025.

Le modèle actuel de collaboration entre le CERN et les instituts nationaux, les laboratoires et les universités de ses États membres et États membres associés est essentiel pour l'avenir de la discipline. Le fait qu'un grand nombre d'instituts d'États non-membres participent au programme du CERN – environ 35 % des 12 400 utilisateurs du CERN viennent d'États non-membres – et apportent des contributions notables démontre l'attractivité du programme scientifique du CERN et le succès de ce modèle. Outre son programme de physique des hautes énergies, 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.

Des laboratoires nationaux en Europe disposent d'installations importantes et d'expériences plus réduites qui permettent des recherches sur des questions de physique fondamentales, en dehors de leur participation au programme de physique du CERN. Ils jouent également un rôle crucial dans la mise au point et le perfectionnement des technologies pour l'informatique, les accélérateurs et les détecteurs requis par le programme de physique des particules européen, tout en mettant à disposition des infrastructures partagées essentielles telles que des installations de faisceaux d'essai et des installations d'irradiation.

B. L'écosystème unique des centres de recherche en physique des particules et des universités en Europe devrait être encore renforcé afin que les objectifs fixés dans cette stratégie soient atteints.

Le vaste éventail de questions fondamentales en physique des particules et la complexité des diverses installations requises pour les traiter, ainsi que la nécessité d'utiliser les ressources de manière efficace, ont conduit à l'émergence d'une communauté mondiale

de la physique des particules ayant des intérêts et des objectifs communs. La stratégie européenne pour la physique des particules 2026 prend en compte les programmes de physique riches et complémentaires entrepris par les partenaires de l'Europe partout dans le monde, ainsi que les développements scientifiques et technologiques réalisés dans les disciplines voisines et l'industrie. Dans le cas d'une nouvelle grande installation hébergée au CERN, des engagements à long terme sont également requis de la part d'États non européens, et doivent tenir compte des coûts de construction et d'exploitation. Un modèle de gouvernance adapté doit être défini.

C. La mise en œuvre de la stratégie devrait s'effectuer en collaboration étroite avec les partenaires mondiaux et les disciplines voisines.

La communauté de la physique des particules et la Commission européenne ont une solide expérience de collaboration. La participation à des réseaux européens consacrés au développement des technologies des futurs accélérateurs et détecteurs a contribué à la cohérence des travaux menés au CERN et dans les laboratoires nationaux, et a facilité leur aboutissement. Le CERN et la communauté européenne de la physique des particules devraient travailler avec la Commission européenne pour élaborer et mettre en place les instruments de financement nécessaires à la réalisation d'un grand accélérateur au CERN et de projets communs de R&D sur les technologies de pointe.

D. La relation entre la communauté de la physique des particules et la Commission européenne devrait être encore renforcée, afin que soient examinés de possibles financements 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.

3 !

Prochain projet de collisionneur phare au CERN

Les collisionneurs de haute énergie sont indispensables pour approfondir notre compréhension de la structure fondamentale de la nature et découvrir de possibles phénomènes relevant d'une nouvelle physique, au-delà du Modèle standard. Les machines capables d'atteindre les hautes énergies et les hautes intensités sont les principaux moteurs de la discipline, car elles permettent de réaliser d'importants progrès concernant la mise à l'épreuve des fondements de la théorie quantique des champs et de faire des découvertes révolutionnaires. Le fantastique programme de physique du LHC se poursuivra avec le HL-LHC, dont l'exploitation devrait débuter en 2030 et s'achever en 2041. Le programme du LHC à haute luminosité constituera la référence expérimentale de tout futur collisionneur. La pleine exploitation de ce programme sera le fondement nécessaire à toute stratégie à long terme, car elle améliorera considérablement la précision dans un vaste éventail d'observables, tout en permettant de poursuivre l'exploration de la frontière des hautes énergies.

Concernant le futur collisionneur phare du CERN qui succédera au HL-LHC, il était précisé que la mise à jour 2026 de la stratégie européenne pour la physique des particules devait présenter « *un plan visionnaire et concret qui permette de faire avancer de manière importante les connaissances dans le domaine de la physique fondamentale par la réalisation du prochain projet phare du CERN* ». Cette grande avancée nécessite à la fois un niveau de précision maximal concernant les mesures du Modèle standard après le HL-LHC et une vision qui permettent d'atteindre des énergies de collision les plus élevées possible à long terme.

Les programmes de physique et la faisabilité technique de plusieurs projets d'installation – collisionneurs électron-positon (e^+e^-) circulaires et linéaires, un collisionneur électron-proton (e^-p) et des collisionneurs d'hadrons et de muons de haute énergie – ont été comparés. La compatibilité des collisionneurs e^+e^- et e^-p avec une vision à long terme de l'exploration de la physique aux plus hautes énergies a également été étudiée. La comparaison du potentiel pour la physique portait principalement sur la physique de précision et le potentiel de découvertes. La faisabilité technique a été comparée en évaluant la maturité technique des différentes machines, leur profil de risque et les incertitudes liées à leur performance, à leur calendrier et à leur coût. La vision de l'exploration aux plus hautes énergies à long terme englobe la faisabilité des différentes options de collisionneur (e^+e^- et e^-p) et leur compatibilité avec un collisionneur d'hadrons de 100 TeV et, soit un collisionneur e^+e^- de très haute énergie à accélération plasma, soit un collisionneur de muons, tous deux atteignant une énergie dans le centre de masse de 10 TeV.

Le potentiel pour la physique des différentes installations dépend fortement des énergies dans le centre de masse, des luminosités intégrées et de l'ampleur du programme de physique global permise, par exemple, par des échantillons de bosons Z très importants. Des mesures précises constitueront le pilier central du programme du futur collisionneur.

De meilleures connaissances des propriétés du Higgs, des observables de précision de la partie électrofaible, de la physique du quark top, des observables de physique des saveurs et de la chromodynamique quantique de précision offrent une sensibilité accrue à une nouvelle physique, bien au-delà de la portée cinématique directe du HL-LHC. Pour évaluer le potentiel de découverte d'une physique au-delà du Modèle standard, plusieurs modèles de référence sont utilisés, parmi lesquels des scénarios composites autour du Higgs, la supersymétrie avec des états colorés et électrofaibles, des modèles de matière noire simplifiés, des singulets scalaires, de nouvelles interactions de jauge et des portails reliant le Modèle standard à des secteurs cachés. Ensemble, ces différents modèles recouvrent une grande diversité de motivations théoriques et de signatures expérimentales.

Potentiel pour la physique

FCC-ee : parmi les collisionneurs électron-positon, le FCC-ee exploité à différents stades d'énergie, y compris au pôle Z, au seuil de production d'une paire de W, au niveau du processus « *Higgs-strahlung* » et au seuil de production d'une paire de quarks top, offre le programme de physique de précision le plus complet. L'association d'ensembles de données très vastes et de stades d'énergie multiples permettra de déterminer les couplages du Higgs avec un niveau d'incertitude inférieur au pour cent, de mesurer la largeur du boson de Higgs sans référence à des modèles, et de mesurer avec une précision inédite les observables de la partie électrofaible et la masse du quark top. L'obtention d'un ensemble de données à la phase tétra-Z permettra également de constituer un programme de physique des saveurs de premier plan et de procéder à des déterminations compétitives de paramètres importants de la chromodynamique quantique, tels que α_s .

CLIC et LCF : les collisionneurs linéaires e^+e^- permettent d'avoir des faisceaux polarisés qui améliorent la sensibilité à certains processus électrofaibles, mais ils sont exploités à des luminosités largement inférieures et à des énergies dans le centre de masse allant jusqu'au seuil de production du Higgs. Les programmes concernant les observables de précision de la partie électrofaible, la physique des saveurs et la chromodynamique quantique qu'ils permettraient de mener au pôle Z sont considérablement réduits. À des énergies faibles, le LCF250 et le CLIC conservent une partie du potentiel du FCC-ee en termes de physique de précision, avec toutefois des limites importantes. En outre, le LCF250 ne permet pas de mesure de précision au seuil de production du quark top. Ainsi, la sensibilité atteignable du LCF250 et du CLIC380 aux couplages du Higgs, aux observables de précision de la partie électrofaible et aux observables de physique des saveurs est considérablement réduite. En résumé, les collisionneurs linéaires de basse énergie n'offrent pas l'ampleur ou la puissance statistique nécessaires pour procéder à des tests précis et complets du Modèle standard incluant les cinq axes de recherche, à savoir le secteur du Higgs, les observables de précision de la partie électrofaible, la physique du quark top, la physique des saveurs et la chromodynamique quantique. Ils ne peuvent être considérés que comme des installations intermédiaires et ne seraient compétitifs dans aucun domaine de physique face à une machine comparable au FCC-ee, telle que le Collisionneur circulaire électron-positon (CEPC), si celui-ci venait à être exploité en Chine.

À des énergies dans le centre de masse plus élevées, le CLIC1500 et le LCF550 élargissent considérablement le potentiel pour la physique comparés au CLIC380 et au LCF250, respectivement. L'accès à la production de di-Higgs à ces énergies offre une sensibilité améliorée à l'autocouplage du Higgs, alors que des mesures du quark top à des énergies

supérieures permettent d'améliorer les limites pour les recherches dans le secteur du quark top. Comparés au FCC-ee, le CLIC1500 et le LCF550 offrirait un programme de physique renforcé pour la physique du quark top et un programme équivalent pour la physique du Higgs, avec toutefois une mesure plus précise de l'autocouplage du Higgs. En revanche, les deux collisionneurs resteraient considérablement moins puissants qu'une installation de type FCC-ee en ce qui concerne les observables de précision de la partie électrofaible, la physique des saveurs et la chromodynamique quantique de précision, qui sont les éléments clés du programme de physique complet pour l'exploration du Modèle standard.

LEP3 : les performances pour la physique du LEP3, collisionneur e^+e^- qu'il est prévu d'installer dans le tunnel existant du LHC, sont inférieures à celles du FCC-ee, car le LEP3 n'offre pas de programme de physique du quark top et sa luminosité est au moins trois fois inférieure, avec des incertitudes importantes. Son programme de physique est plus robuste et plus large (observables de précision de la partie électrofaible, physique des saveurs et chromodynamique quantique de précision) que celui des collisionneurs linéaires de plus faible énergie, le CLIC380 et le LCF250. Comparé aux collisionneurs linéaires de haute énergie (CLIC1500 et LCF550), le LEP3 est plus performant en ce qui concerne la physique des saveurs et la chromodynamique quantique de précision, mais plus faible s'agissant de la physique du Higgs et du quark top. Le LEP3 ne peut être considéré que comme une installation intermédiaire et ne serait compétitif dans aucun domaine de physique face à une machine comparable au FCC-ee, telle que le CEPC, si celui-ci venait à être exploité en parallèle.

LHeC : une installation lepton-hadron telle que le LHeC offre un programme de physique de précision complémentaire de celui des collisionneurs e^+e^- . Il tire sa force exceptionnelle de la diffusion profondément inélastique, qui produit des contraintes inégalées sur les fonctions de distribution des protons et des partons nucléaires, lesquelles sont essentielles pour des mesures de précision dans les collisionneurs d'hadrons. Cependant, l'impact du LHeC sur le programme hautement prioritaire de physique de précision dans les secteurs électrofaible et des saveurs reste limité. À quelques exceptions près, telles que l'étude des désintégrations du Higgs en quark c , le programme de physique du Higgs du LHeC est également très limité en comparaison de celui des collisionneurs e^+e^- mentionnés dans le présent document. Le LHeC ne peut être considéré que comme une installation intermédiaire et ne serait compétitif dans aucun domaine de physique face à une machine comparable au FCC-ee, telle que le CEPC, si celui-ci venait à être exploité en parallèle.

Les performances des programmes de physique de précision et les recherches d'une physique au-delà du Modèle standard de l'ensemble des collisionneurs sont présentées dans l'illustration 3.1 ci-contre.

Maturité technologique et coût de construction

Le **FCC-ee** se démarque aussi des autres projets par le niveau de maturité de son ingénierie et l'état avancé de sa préparation. L'étude de faisabilité du FCC, qui comporte une estimation du coût et un calendrier de construction, a fait l'objet d'un examen minutieux par des comités d'experts et par le Conseil du CERN et ses organes subsidiaires. Des travaux de R&D sont nécessaires pour parvenir à une performance reproductible pour des cavités 800 MHz en niobium massif et, en particulier, des cavités 400 MHz en cuivre à revêtement niobium, lorsqu'elles seront installées dans les cryomodules à une échelle industrielle. En outre, pour maintenir la consommation d'énergie dans les limites estimées, la production de

klystrons à haut rendement dans la plage 400-800 MHz doit être industrialisée. Si la source de positons est proche de la performance du SLC, l'expérience P3 en cours à l'Institut Paul Scherrer (PSI) vise à augmenter encore le rendement de positons par électron incident. L'industrialisation est également nécessaire pour la production du système de vide de grande capacité avec revêtement NEG et du système d'aimants.

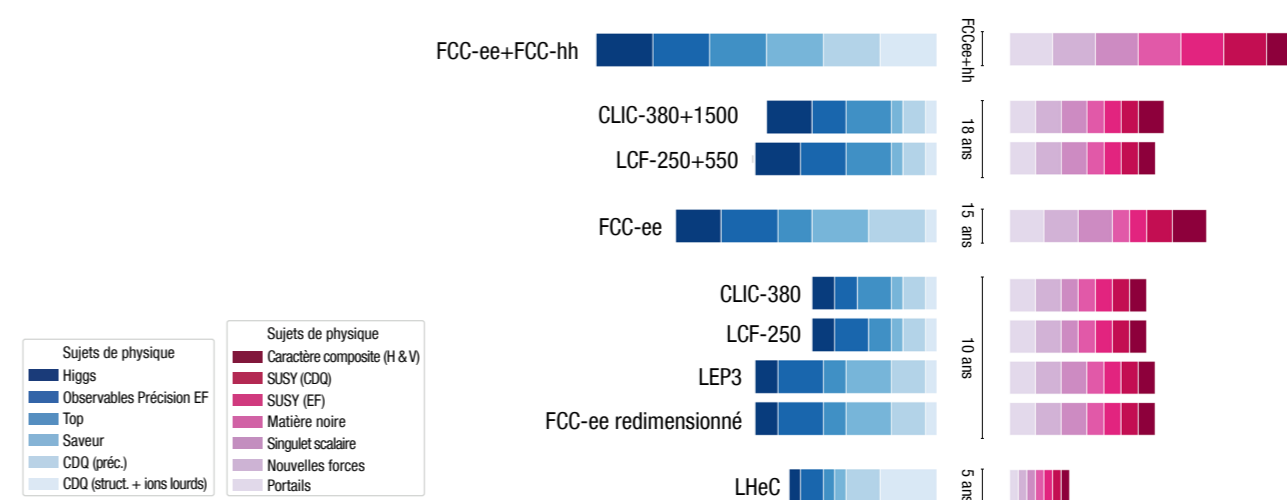


Illustration 3.1 : Performances pour la physique de l'ensemble des collisionneurs, y compris le FCC-ee redimensionné. Le diagramme de gauche présente le programme de physique de précision et celui de droite l'exploration d'une possible physique au-delà du Modèle standard. Les critères selon lesquels les collisionneurs sont comparés sont indiqués dans la légende. La performance maximale reçoit une note de 5 et correspond à l'option du FCC-ee, suivie à terme du FCC-hh, qui offre le meilleur potentiel pour la physique.

Ce programme de R&D est bien défini et des ressources ont été allouées à l'élaboration d'un rapport sur la phase de conception technique préliminaire dans le plan à moyen terme du CERN pour 2026-2030. Les performances pour la physique peuvent être prédites avec une bonne fiabilité par les simulations et l'expérience acquise avec les anciens et actuels collisionneurs circulaires e^+e^- . De vastes études de préparation des sites ont été réalisées, et d'autres travaux de reconnaissance géologique sont en cours afin de préciser l'emplacement du tunnel. Le FCC-ee est le seul projet possédant déjà un cadre complet de gestion des risques intégré à la planification de sa construction. L'estimation actuelle du coût de construction du FCC-ee est très conséquente : 15,3 milliards de CHF. Tous les coûts indiqués pour le FCC-ee et les autres collisionneurs sont les coûts applicables au CERN et supposent que le CERN participe à hauteur de 10 % au coût de construction des expériences.

La conception du **CLIC** est relativement compacte pour un collisionneur de leptons à l'échelle du TeV. Les principales technologies ont fait l'objet d'une démonstration de principe, mais d'autres démonstrations de grande échelle (non incluses dans l'actuelle estimation des ressources de R&D), ainsi que l'intégration des systèmes et l'industrialisation des principaux composants du linac, sont nécessaires, ce qui implique un degré d'incertitude concernant le coût et le calendrier. Les performances sont bien anticipées par des simulations de bout en

bout, mais certains risques doivent encore être surmontés grâce à la R&D. Le CLIC à 1,5 TeV nécessite un tunnel de 29,6 km. Un emplacement situé dans le bassin de Genève a été évalué, sans qu'aucun obstacle géologique n'ait été trouvé ; d'autres études territoriales et géologiques détaillées sont nécessaires pour déterminer l'emplacement des tunnels et des différentes installations de surface. L'estimation actuelle du coût de construction d'un CLIC de 380 GeV est conséquente : 7,5 milliards de CHF. Pour un CLIC de 1 500 GeV, elle est très conséquente : 14,6 milliards de CHF.

Le **LCF** est basé sur la technologie avancée des cavités supraconductrices radiofréquence de 1,3 GHz en niobium massif, déjà utilisées à l'installation européenne XFEL (DESY) et au LCLS-II (SLAC). Le gradient de fonctionnement, le facteur de qualité et la combinaison de ces deux paramètres n'ont pas encore été testés en exploitation et font l'objet d'un programme de R&D. Alors que la plupart des systèmes sont bien développés, des travaux de R&D sont encore nécessaires concernant la source de positons, les arrêts de faisceaux et le système de focalisation finale. Des simulations détaillées de bout en bout ont permis de valider l'objectif de luminosité estimé, qui est considéré comme réaliste. Le calendrier global est jugé crédible, mais il nécessiterait une phase de préparation comprenant des études d'implantation territoriale et des études géologiques détaillées concernant le tunnel de 33,5 km requis. Les estimations de coût et de calendrier sont considérées comme crédibles, le génie civil restant la principale incertitude. L'estimation actuelle du coût de construction d'un LCF de 250 GeV est conséquente : 9,4 milliards de CHF. Pour un LCF de 550 GeV, elle est très conséquente : 14,8 milliards de CHF.

La conception du **LEP3** (collisionneur e^+e^- dans le tunnel du LHC) est une pré-étude de conception qui s'appuie principalement sur des extrapolations faites à partir d'études préliminaires menées en 2013 et des études sur le FCC-ee. En l'absence de conception détaillée des mailles et de simulations à grande échelle, les projections de performance comportent une part élevée d'incertitude. La conception actuelle repose sur une combinaison de quadripôles et d'hexapôles supraconducteurs à haute température critique, qui présentent actuellement des niveaux de maturité technique bas. Bien que la réutilisation du tunnel simplifie la planification territoriale et réduise les coûts, la logistique associée au démontage, au stockage et à l'élimination des éléments du LHC à haute luminosité entraîne des incertitudes non négligeables pour le LEP3. En l'absence d'un rapport préliminaire de conception, le calendrier, les coûts et les risques comportent une part élevée d'incertitude. L'estimation actuelle du coût de construction du LEP3 est de 4,1 milliards de CHF.

La performance du **LHeC** dépend en grande partie d'un linac à récupération d'énergie d'intensité très élevée, à trois passes accélératrices, exploité avec très peu de pertes de faisceau et à des niveaux de puissance de faisceau au moins trois fois supérieurs à ceux atteints jusqu'ici. Cet ambitieux régime d'exploitation explique la note de maturité technologique actuellement faible, l'incertitude attendue en ce qui concerne la performance et la nécessité de disposer d'une installation de démonstration, PERLE, en cours de construction. Si l'actuelle conception d'un linac à récupération d'énergie à trois passes, en cours de développement, ne s'avérait pas viable, la luminosité du LHeC serait dix fois plus faible. La réalisation du LHeC nécessiterait la construction d'un nouvel accélérateur d'électrons, avec un tunnel de 9 km relié au tunnel existant du LHC. Alors que les travaux d'implantation territoriale devraient rester modestes, de potentielles interférences entre les travaux de génie civil et l'exploitation du HL-LHC pourraient avoir des conséquences sur le

calendrier global. Le calendrier du projet ne pourra être fixé de manière fiable que lorsque le programme PERLE aura été mené à terme. L'estimation actuelle du coût de construction du LHeC est de 2,1 milliards de CHF.

Vision pour une exploration aux plus hautes énergies à très long terme

La vision à très long terme nécessite l'exploration des interactions de particules à la frontière des hautes énergies, soit au moins 10 TeV. Les machines à la frontière des hautes énergies viennent au premier rang s'agissant du potentiel de découvertes directes de nouveaux états lourds. Un collisionneur d'hadrons de très haute énergie offre la meilleure sensibilité aux particules colorées, aux résonances des vecteurs lourds et aux vecteurs de matière noire de masse élevée. Un collisionneur de muons e^+e^- avec une énergie dans le centre de masse de 10 TeV atteint une portée comparable dans de nombreux scénarios des secteurs électrofaible et noir, et excelle en ce qui concerne les contraintes indirectes découlant des processus de haute énergie.

La mise à jour 2020 de la stratégie recommandait que « *l'Europe, avec ses partenaires internationaux, [étudie] 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* ». En effet, un collisionneur d'hadrons de nouvelle génération exploité à des énergies autour de 100 TeV offrirait une précision inégalée dans l'étude de plusieurs observables du Higgs, notamment les désintégrations rares et l'autocouplage du Higgs, ainsi qu'une sensibilité unique aux interactions du quark top à de hautes énergies. Sa portée en ce qui concerne la chromodynamique quantique et la structure partonique s'étend à des régimes cinématiques jusqu'ici inexplorés, et son programme d'ions lourds explore la matière soumise à l'interaction forte à des températures et à des densités extrêmes.

À la suite de la mise à jour 2020 de la stratégie européenne pour la physique des particules, le CERN a lancé l'étude de faisabilité du FCC, qui s'est achevée en novembre 2025 et a démontré la faisabilité technique de la construction d'un tunnel de 91 km, à proximité du Laboratoire, qui accueillerait le FCC-ee et pourrait héberger un collisionneur d'hadrons, à savoir le FCC-hh.

Le FCC-hh permettrait de réaliser des collisions proton-proton à une énergie de 85 TeV grâce à des dipôles en Nb_3Sn , avec l'objectif d'un champ opérationnel de 14 T à 1,9 K. Ces objectifs sont technologiquement atteignables, cependant pas à l'échelle requise par un collisionneur : la technologie Nb_3Sn progresse continuellement, mais 15 à 20 années de R&D sont encore nécessaires avant que des conceptions soient industrialisables. La technologie Nb_3Sn serait la seule option viable si un collisionneur d'hadrons indépendant (non précédé du FCC-ee) devait être construit à court terme.

Si, toutefois, le FCC-hh devait succéder au FCC-ee en tant que machine de seconde phase, il est concevable que des aimants à haute température critique (HTS) soient utilisés. Cette technologie permettrait de réduire la consommation d'électricité ou de produire des champs et des énergies de faisceau plus élevés pour une consommation électrique équivalente. Au-delà de leurs avantages pour la construction de collisionneurs, la technologie HTS et les aimants

HTS nécessitent une collaboration très importante avec l'industrie et pourraient être source de retombées importantes pour la société. Le développement de câbles HTS conformes aux spécifications requises pour les aimants d'un collisionneur à haute luminosité de haute énergie n'en est toutefois qu'à ses débuts, et celui des aimants HTS nécessite d'importants travaux de R&D. Cependant, en tant qu'option sur le très long terme, le FCC-hh devrait bénéficier des avancées réalisées au cours des années de construction et d'exploitation du FCC-ee.

Les incertitudes quant au coût et au calendrier du FCC-hh sont principalement liées au développement des aimants ; ce serait également le cas si le FCC-hh était envisagé comme un projet indépendant, basé sur la technologie Nb₃Sn, moins risquée.

Un collisionneur linéaire électron-positon ou un collisionneur de muons de haute énergie pourraient constituer une alternative pour atteindre la frontière des hautes énergies.

Un collisionneur linéaire électron-positon de haute intensité de 10 TeV serait basé sur un accélérateur à champ de sillage plasma, solution présentant des défis très importants et dont il n'a pas encore été démontré qu'elle était réalisable. Les collisionneurs de leptons de moyenne énergie, tels que le LCF-1 TeV et le CLIC 3 TeV, pourraient être réalisables, même si des obstacles technologiques et liés à la consommation d'énergie devraient être surmontés. Ils auraient une sensibilité supérieure à celle des machines de basse énergie, mais resteraient limités en ce qui concerne la couverture de la gamme des masses par leur énergie dans le centre de masse. Leur impact serait plus élevé s'ils étaient combinés soit à une installation d'une précision très élevée à des énergies inférieures, soit à une installation ultérieure à la frontière des hautes énergies.

Un collisionneur de muons offre une voie potentiellement économe en énergie d'évoluer vers des collisions de leptons de haute luminosité à une énergie dans le centre de masse pouvant atteindre 10 TeV ; cependant, il n'a pas encore atteint le même niveau de maturité que les autres propositions. Les technologies qui sous-tendent la conception d'un collisionneur de muons en sont encore à un stade d'exploration précoce. Une feuille de route complète pour la R&D a été élaborée, dont la clé de voûte est un démonstrateur de refroidissement en 6D. Sans ces travaux de R&D, il ne sera possible de répondre de manière crédible à aucune des principales questions en suspens concernant un collisionneur de muons multi-TeV. Par conséquent, il n'est pas possible à ce stade d'établir des estimations réalistes de la performance, du calendrier et du coût d'une telle machine.

Toutes ces considérations montrent que seul un collisionneur d'hadrons exploité à 100 TeV serait en mesure d'explorer tout le potentiel pour la physique à la frontière des hautes énergies dans le calendrier prévu par la nouvelle mise à jour de la stratégie européenne pour la physique des particules. Seul un tel collisionneur pourrait explorer le potentiel de découvertes jusqu'aux échelles de masses élevées avec une précision révolutionnaire dans les secteurs du Higgs, du quark top et de la chromodynamique quantique, tout en offrant des capacités qu'aucune autre installation actuellement envisagée ne pourrait fournir.

Contributions des communautés nationales de la physique des hautes énergies

Dans le mandat confié au Groupe sur la stratégie européenne en vue de la mise à jour 2026 de la stratégie, il était indiqué que plusieurs aspects devraient être pris en considération,

parmi lesquels « *les contributions de la communauté de la physique des particules* ». À cette fin, l'ECFA a compilé plusieurs questions devant être examinées par les communautés nationales de la physique des hautes énergies lors de leurs délibérations concernant la question du futur collisionneur phare au CERN. Les deux principales questions étaient les suivantes :

- Q1 : Quelle est l'option privilégiée d'accélérateur de grande échelle pour succéder au LHC au CERN ?
- Q2 : Quelle serait l'option de rechange privilégiée si l'option privilégiée ne s'avérait pas réalisable ?

D'autres questions concernaient les options de rechange privilégiées au cas où l'option privilégiée ne s'avérait pas compétitive et la raison d'être de chaque option de rechange, à savoir si elle était principalement motivée par des considérations de physique, de maturité technologique, de coût ou de calendrier.

L'illustration 3.2 montre les réponses aux questions Q1 et Q2 (respectivement les diagrammes du haut et du bas). Les réponses à la question Q1 sont quasiment unanimes parmi les États membres et États membres associés du CERN, qui considèrent le FCC-ee comme le futur collisionneur phare à privilégier. Dans les réponses plus détaillées, le projet FCC-ee bénéficie d'un soutien fort et constant en tant qu'option privilégiée. Bien qu'ils soient moins nombreux, les États non-membres ayant répondu aux questions sont, dans l'ensemble, favorables au choix du FCC-ee.

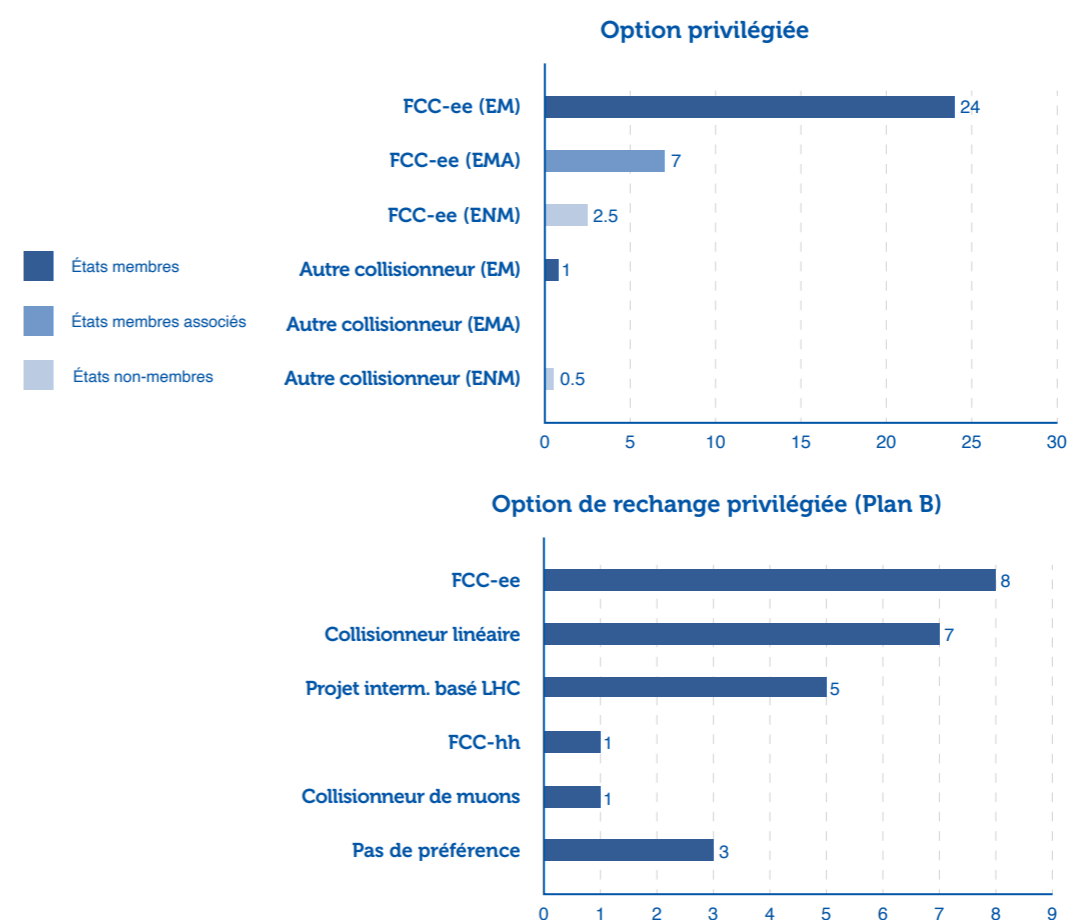


Illustration 3.2 : Contributions des communautés nationales de la physique des hautes énergies concernant l'option privilégiée de collisionneur (en haut) et l'option de rechange privilégiée si l'option privilégiée ne s'avérait pas réalisable (en bas). Les trois barres correspondant au FCC-ee et celles intitulées « Autre collisionneur » dans le diagramme du haut représentent les réponses des États membres du CERN (EM), des États membres associés (EMA) et des États non-membres (ENM). Dans le diagramme du bas, seules les réponses des États membres sont prises en compte. La ligne « Projet interm. LHC » renvoie aux deux projets intermédiaires basés sur le LHC (LEP3 et LHeC).

Les réponses à la question Q2 concernant un « *Plan B* » s'il s'avérait que l'option privilégiée n'était pas réalisable pour des raisons financières et techniques, sont plus variées, les deux plus fréquentes portant sur une autre forme de FCC-ee ou un collisionneur linéaire (CLIC ou LCF). Les réponses à ces questions portaient presque exclusivement sur la faisabilité financière du FCC-ee, la faisabilité technique ayant déjà été démontrée dans l'étude de faisabilité du FCC.

Les pays également en faveur du FCC-ee en tant que solution de rechange proposent qu'au lieu d'opter pour une autre machine, la communauté étudie différents scénarios d'atténuation des potentielles difficultés financières. Par exemple, report du démarrage du FCC-ee, étalement des coûts sur une plus longue période, recherche d'une solution de financement viable pour que le concept du FCC puisse être exploité ou que le tunnel du FCC puisse être construit, et intensification des investissements dans la R&D sur les aimants à champ élevé, en particulier les aimants HTS.

Un nombre presque identique de communautés de la physique des hautes énergies s'est prononcé en faveur d'un collisionneur linéaire au CERN en tant qu'option de rechange privilégiée, mettant en avant le rôle d'une usine à Higgs aux énergies de 550 GeV et 1,5 TeV. Les projets intermédiaires basés sur le LHC (LEP, LHeC et HL-LHC augmenté) ont également été cités parmi les options de rechange privilégiées. Certains pays se sont explicitement exprimés en faveur d'un « programme intermédiaire » consistant à exploiter l'infrastructure du LHC (par ex., LHeC ou installation pour la physique aux petits angles) afin de maintenir la dynamique au cas où le projet FCC devrait être repoussé de plus de dix ans. Un petit nombre de communautés ont indiqué que leur option de rechange privilégiée était le passage direct au FCC-hh. Quelques pays n'ont pas spécifiquement nommé de machine, mais ont souligné que le choix d'une option de rechange devait être fait rapidement et orienté par des objectifs de physique et un calendrier bien définis.

Résumé

Le FCC-ee fournirait le programme de haute précision en physique des particules le plus vaste du monde, avec un potentiel de découvertes exceptionnel dans les secteurs électrofaible, du Higgs, des saveurs et du quark top, ainsi que des avancées dans le domaine de la chromodynamique quantique. Sa faisabilité technique a été démontrée par une étude de faisabilité complète du FCC, et son périmètre et son coût sont bien définis. Des scénarios de financement plausibles ont également été élaborés, et le calendrier établi permettrait de voir circuler les premiers faisceaux cinq à sept ans après la fin de l'exploitation du LHC à haute luminosité. Le FCC-ee conforterait l'Europe dans son rôle de leader dans le domaine de la physique des particules de haute énergie, ferait progresser la technologie et générerait des retombées sociétales importantes.

Le projet FCC-ee ouvrirait également la voie à un collisionneur d'hadrons qui réutiliserait le tunnel et une grande partie de l'infrastructure, étendant le potentiel de découvertes

bien au-delà des 10 TeV, l'échelle d'énergie des partons, conformément à l'ambition de la communauté de mener des explorations aux énergies les plus élevées possible. L'appui massif de la communauté de la physique des particules des États membres et États membres associés du CERN en faveur du FCC-ee conforte sa position d'option privilégiée.

Toutes les autres options de collisionneur ne sont examinées qu'en tant qu'options de rechange possibles, au cas où le FCC-ee ne serait pas réalisable. Elles ne présentent pas de plan concret ou ambitieux, car elles ne répondent pas à une ou plusieurs des exigences liées au futur collisionneur phare du CERN, à savoir :

- offrir suffisamment de précision au niveau du programme du collisionneur électron-positon pour pouvoir être compétitives vis-à-vis d'une machine comparable au FCC-ee qui serait exploitée en parallèle,
- présenter un plan suffisamment concret, incluant des tests sur les principales technologies utilisées, ou
- présenter une vision convaincante concernant l'exploration des plus hautes énergies atteignables.

Pour faire face à l'éventualité selon laquelle le FCC-ee complet ne s'avérerait financièrement pas réalisable, et compte tenu de l'avis quasi unanime des contributions des communautés nationales de la physique des hautes énergies ainsi que de l'analyse présentée ci-avant, la possibilité d'un collisionneur fondé sur le concept du FCC-ee, mais avec un coût inférieur et des capacités de physique réduites a également été examinée dans le cadre de la mise à jour en cours de la stratégie européenne pour la physique des particules. L'option d'un FCC-ee redimensionné a ainsi été étudiée. Les scénarios de redimensionnement prévoient notamment la suppression du programme consacré aux quarks top, la construction de deux régions d'interaction et expériences au lieu de quatre et l'abaissement de la puissance du système de radiofréquence (RF) de 40 %. Ces mesures permettraient de réduire le coût de construction de respectivement 1,3 milliard de CHF, 0,8 milliard de CHF et 0,35 milliard de CHF, ce qui donnerait un coût total de 12,85 milliards de CHF, soit environ 15 % de moins que le coût du FCC-ee complet. Bien que cette réduction du coût puisse sembler insuffisante, elle reflète néanmoins un redimensionnement important de l'accélérateur FCC-ee, une très grande partie du coût de construction total du FCC-ee étant liée au tunnel et à l'infrastructure. Dans ce scénario, le programme de physique du FCC-ee serait réduit du fait de l'absence d'un programme consacré aux quarks top et d'une luminosité intégrée qui serait inférieure d'un facteur de 0,36, en raison de l'abaissement de la puissance du système RF et de l'existence de seulement deux expériences. Ce facteur découle du ratio de puissance RF (3/5), de la réduction de moitié du nombre d'expériences et d'une réduction de 20 % grâce à l'optimisation des paramètres de la machine pour deux expériences au lieu de quatre.

Les performances pour la physique du FCC-ee redimensionné restent plus élevées que celles des collisionneurs linéaires, car elles incluent des programmes concernant les observables de précision de la partie électrofaible, la physique des saveurs et la chromodynamique quantique à tous les niveaux d'énergie. Les programmes relatifs à la physique du Higgs et du quark top seraient équivalents à ceux du LCF250 et du CLIC380, mais inférieurs à ceux des collisionneurs linéaires de haute énergie, le LCF550 et le CLIC1500. Le coût de ces derniers, cependant, serait sensiblement le même que le coût du FCC-ee en tant qu'option privilégiée, mais supérieur à celui du FCC-ee redimensionné. Le FCC-ee redimensionné permettrait d'offrir une vision à long terme viable pour la discipline en préparant le terrain

pour un collisionneur d'hadrons à très longue échéance. Enfin, le FCC-ee redimensionné permettrait de restaurer le périmètre initial du FCC-ee, soit partiellement grâce à une période d'exploitation de 15 ans, qui est la durée d'exploitation prévue du FCC-ee, mais sans campagne de production de quarks top, soit pleinement si des ressources supplémentaires, provenant par exemple de partenaires internationaux, sont réunies et permettent d'ajouter le programme consacré aux quarks top. Cette solution serait particulièrement pertinente pour garantir la compétitivité face à une machine comparable au FCC-ee qui serait exploitée ailleurs dans le monde.

Un résumé comparatif des performances de physique (précision et potentiel nouvelle physique), de la compétitivité face à une machine équivalente au FCC-ee telle que le collisionneur circulaire électron-positon (CEPC), de la maturité technique, du coût de construction, du calendrier et de la voie vers des énergies dans le centre de masse des collisions parton-parton de 10 TeV ou plus est présenté à l'illustration 3.3.

Machine	Physique de précision	Physique au-delà du Modèle standard	Compétitivité / CEPC	Maturité technique	Coût de const. (MdCHF)	Période	Voie vers ≥ 10 TeV
FCC-ee	22	23			15.3	2046-2060	
Descoped FCC-ee	15	17			12.9	2046-2055	
LCF550	15	17			14.8	2045-2065	
CLIC1500	14	18			14.6	2045-2066	
LCF250	10	16			9.4	2045-2053	
CLIC380	10	16			7.5	2045-2054	
LEP3	15	17			4.1	2047-2062	
LHeC	8	7			2.1	2044-2051	

Illustration 3.3 : Comparatif de tous les collisionneurs candidats au regard des performances de physique, de la compétitivité face à une machine équivalente au FCC-ee telle que le collisionneur circulaire électron-positon (CEPC), de la maturité technique, du coût de construction, de la période d'exploitation et de la voie pour atteindre les énergies de collision les plus élevées. Les chiffres concernant la précision et la physique au-delà du Modèle standard reflètent les évaluations de physique qui apparaissent dans l'illustration 3.1.

Conclusion

Le projet FCC-ee offre un programme de physique exceptionnel ; sa faisabilité technique a été démontrée par l'étude de faisabilité complète du FCC ; son périmètre et son coût sont bien définis ; des scénarios de financement plausibles ont été présentés et le calendrier prévu permettrait de voir circuler les premiers faisceaux cinq à sept ans après la fin de l'exploitation du LHC à haute luminosité. L'appui massif des communautés de la physique des hautes énergies des États membres et États membres associés du CERN en faveur du FCC-ee conforte sa position d'option privilégiée.

Parmi toutes les options de collisionneur examinées dans le cadre de la mise à jour de la stratégie européenne pour la physique des particules, le FCC-ee se distingue comme étant la seule qui offre à la fois un plan concret, grâce à un programme de physique exceptionnel pour une exploration de haute précision du Modèle standard, et une vision claire de l'avenir à long terme de la physique des particules, ouvrant la voie à une exploration directe de phénomènes aux énergies les plus élevées que l'on puisse imaginer et réutilisant le tunnel d'un collisionneur de protons. Le FCC-ee permettrait à l'Europe de continuer de jouer un rôle de premier plan dans le domaine de la physique des particules, ainsi que de faire progresser la technologie et de générer des retombées sociétales importantes.

A. Le futur collisionneur circulaire électron-positon (FCC-ee) est l'option privilégiée recommandée pour le prochain projet de collisionneur phare au CERN.

Pour tous les autres collisionneurs, des inconvénients importants ont été relevés. En ce qui concerne la demande consistant à « hiérarchiser les autres options possibles au cas où l'option privilégiée s'avérerait non réalisable ou non compétitive », et compte tenu du programme de physique exceptionnel qu'offre le FCC-ee, ce dernier devrait rester l'option privilégiée, et les options de rechange ne devraient être examinées que si sa réalisation s'avère impossible. La faisabilité technique du projet FCC-ee ayant été démontrée, les seules incertitudes qui subsistent concernant sa mise en œuvre sont liées à sa viabilité financière et à la survenue possible de difficultés non anticipées, notamment en lien avec la construction du tunnel.

La principale option de rechange envisagée est un FCC-ee redimensionné. Même si ce redimensionnement aurait une incidence notable sur l'étendue du programme de physique et sur le niveau de précision, le FCC-ee redimensionné permettrait toujours d'avoir un programme de physique solide et constituerait une option viable pour atteindre les hautes énergies, contrairement à d'autres options proposées. En outre, ces scénarios de redimensionnement seraient réversibles en cas d'obtention de ressources supplémentaires.

B. Une machine FCC-ee redimensionnée est l'option de rechange privilégiée pour le prochain projet phare au CERN.

Toutes les autres options de rechange sont associées à des programmes de physique d'une précision largement inférieure à celle du projet FCC-ee et ne seraient pas compétitives face à un collisionneur comparable au FCC-ee, tel que le CEPC. En outre, en leur état actuel, elles ne permettent pas d'atteindre le niveau d'énergie des partons (10 TeV et au-delà). À ce stade, en l'absence de raisons rendant l'option FCC-ee irréalisable, les options de rechange ne sont pas classées.

4



Autres pistes de recherche en physique des particules

L'exploration du secteur des neutrinos, la recherche de particules du secteur sombre, les mesures de précision dans le secteur des saveurs et la mise à l'épreuve des symétries fondamentales sont des éléments cruciaux de la physique des particules. D'importants progrès dans ces domaines sont attendus au cours de la prochaine décennie, avec la réalisation d'un vaste programme d'expériences, de petite à grande échelle, grâce à des installations utilisant des accélérateurs, des laboratoires souterrains et d'autres infrastructures spécialisées, et à un travail théorique conséquent.

Physique du neutrino

L'origine de la masse des neutrinos reste l'une des questions en suspens les plus importantes en physique des particules. Les neutrinos sont beaucoup plus légers que les autres fermions, ce qui donne à penser que leur masse pourrait constituer une manifestation de faible énergie d'une physique au-delà du Modèle standard, présentant des liens étroits avec l'asymétrie matière-antimatière et l'évolution cosmique de l'Univers.

Au cours des dix prochaines années, de grandes avancées devraient être réalisées par un vaste ensemble d'expériences utilisant des faisceaux de neutrinos provenant d'accélérateurs (DUNE et Hyper-Kamiokande), de réacteurs nucléaires (JUNO) et de gerbes atmosphériques (IceCube et KM3NeT). Ces travaux permettront d'améliorer considérablement nos connaissances des paramètres de mélange des neutrinos et du modèle d'oscillation à trois saveurs, de déterminer la hiérarchie des masses des neutrinos et, potentiellement, de mesurer la violation leptonique de CP, et ainsi de dévoiler un ingrédient clé de la production de l'asymétrie baryonique observée dans l'Univers.

La participation européenne aux expériences DUNE et Hyper-Kamiokande repose sur la plateforme neutrino du CERN et s'appuie sur cette installation pour la mise au point de détecteurs. Pour atteindre le niveau de précision expérimentale supérieur, une réduction notable des incertitudes systématiques liées aux flux et aux sections efficaces des neutrinos sera nécessaire. Cet objectif nécessite des efforts coordonnés faisant intervenir des détecteurs proches, des expériences de production d'hadrons auprès des accélérateurs du CERN et, possiblement, de nouveaux faisceaux spéciaux, associés à des avancées en théorie nucléaire pour améliorer la modélisation des interactions neutrino-noyau.

Les observations cosmologiques atteignent à ce jour la précision statistique requise pour explorer l'échelle de masse absolue des neutrinos et montrent actuellement une légère tension avec les données sur les oscillations des neutrinos. Par conséquent, il est essentiel de progresser en ce qui concerne les mesures en laboratoire. L'expérience KATRIN approche de sa sensibilité maximale, et il est crucial que des activités continues de R&D soient menées sur la future génération d'expériences relatives aux désintégrations bêta et à la capture d'électrons afin d'augmenter encore cette sensibilité.

La recherche de la double désintégration bêta sans émission de neutrino, dont la découverte démontrerait que les neutrinos sont des particules de Majorana, que la symétrie du nombre leptonique est violée et qu'une physique au-delà du Modèle standard existe, est une autre frontière importante à explorer. Les grandes expériences hébergées dans les laboratoires souterrains européens qui utilisent des isotopes de germanium, de molybdène et de xénon pourraient enregistrer des progrès notables au cours des dix prochaines années. La poursuite des activités de R&D est nécessaire pour permettre de nouvelles avancées dans ce domaine. Compte tenu de l'importance de cette mesure, une confirmation par plusieurs expériences et des avancées dans le domaine théorique concernant la détermination des éléments de la matrice nucléaire sont essentielles.

Les expériences neutrino offrent également des possibilités exceptionnelles de recherche d'une nouvelle physique, à la fois à la frontière des hautes énergies, où elles imposent des limites parmi les plus strictes à la désintégration des protons, et dans des scénarios où interviennent des particules légères et interagissant faiblement telles que les neutrinos stériles, ou bien des portails neutrino et des nouvelles interactions de jauge. Hyper-Kamiokande et DUNE feront progresser de manière notable les recherches de désintégrations de protons et de neutrons, alors que les nouvelles mesures d'interactions de neutrinos, y compris celle de la diffusion élastique cohérente neutrino-noyau (CEvNS) et les études des neutrinos à l'échelle du TeV au LHC, ouvrent des voies nouvelles et compétitives pour tester le Modèle standard et explorer une nouvelle physique d'une manière complémentaire aux recherches avec collisionneur. L'exploration combinée de la théorie effective du Modèle standard grâce aux observables Higgs et électrofaibles, aux processus relatifs aux saveurs et aux processus de violation du nombre leptonique et du nombre baryonique sera cruciale pour découvrir les caractéristiques du secteur sous-jacent de la nouvelle physique.

Une collaboration étroite entre la théorie et les expériences en physique des neutrinos est essentielle pour une interprétation globale des données, une modélisation précise des effets nucléaires et la découverte de nouvelles possibilités en matière de physique. Le CERN continue de jouer un rôle essentiel en tant qu'élément central de cette collaboration en Europe.

Matière noire

Les indices indirects de la matière noire obtenus à partir de mesures astrophysiques sont peut-être les signes les plus anciens de l'existence d'une physique au-delà du Modèle standard. Dans le modèle *Lambda Cold Dark Matter* (matière noire froide), équivalent du Modèle standard en cosmologie, la matière noire contribue environ cinq fois plus à la densité énergétique de l'Univers que les particules que nous connaissons actuellement. On se rend progressivement compte que la matière noire, comme la matière ordinaire, pourrait se manifester de différentes manières. L'une des grandes avancées de la dernière décennie est l'apparition de théories autour des secteurs sombres riches, dans lesquels la matière noire peut être soit un constituant stable ou instable dans un large secteur de particules encore inconnues, soit un vecteur régissant les interactions avec le secteur visible à travers différents portails. Ces théories montrent qu'il est important de diversifier les recherches sur la matière noire et le secteur sombre.

Les recherches autour de la matière noire et du secteur sombre englobent un vaste éventail d'expériences n'utilisant pas d'accélérateur, allant de grands détecteurs à bruit de fond faible à des détecteurs de dimension réduite en laboratoire, lesquelles viennent

s'ajouter aux recherches avec accélérateur utilisant des collisionneurs, des cibles fixes et des détecteurs adjacents aux accélérateurs. Les recherches fondées sur des accélérateurs et celles non fondées sur des accélérateurs sont complémentaires : seules les recherches avec accélérateur permettent d'établir si les interactions de candidats à de nouvelles particules proviennent du halo de matière noire lié gravitationnellement à notre galaxie, et seules celles sans accélérateur peuvent mesurer les couplages qui déterminent la production de particules du secteur sombre et les taux de désintégration requis pour élucider la structure du secteur sombre. Ce mélange d'approches diverses est essentiel pour optimiser le potentiel de découvertes au sein du spectre extrêmement large de l'espace des paramètres autorisés – de la matière noire ultralégère se comportant comme une onde, comme l'axion, jusqu'aux particules supermassives interagissant faiblement et dont les masses peuvent atteindre la limite de Planck – et permettre aux installations de taille moyenne de jouer un rôle important.

La principale difficulté de toutes ces mesures consiste à trouver « l'aiguille dans la botte de foin », c'est-à-dire repérer des signaux représentant une ppm (une partie par million) à une ppq (une partie par milliard) au milieu d'un bruit de fond d'interactions. Les recherches d'événements rares qui visent à relever ce défi, à la fois en physique de la matière noire et en physique des neutrinos, utilisent de nombreuses technologies communes. L'excellent complexe de laboratoires souterrains en Europe est un pilier de la recherche n'utilisant pas d'accélérateurs, car il fournit des environnements à faible bruit de fond radiogénique ambiant. La recherche de la matière noire et de la double désintégration bêta sans émission de neutrino dépend de la disponibilité pour les cibles de matériaux rares et spécifiques, présentant une radioactivité faible et/ou une abondance isotopique naturelle élevée. Il est important que l'Europe développe sa capacité souveraine à produire de tels matériaux afin de conserver sa compétitivité concernant les recherches sur la matière noire. L'utilisation de cryostats et de la technologie cryogénique pour gérer de grandes cibles cryogéniques a été un important domaine de collaboration entre la plateforme neutrino du CERN et le programme GADM (*Global Argon Dark Matter*). Des synergies importantes existent également entre la mise au point de détecteurs pour les collisionneurs et ceux destinés aux expériences sur la matière noire et les neutrinos sur le plan d'une technologie efficace de détecteur de photons à grande surface.

D'importants progrès en matière de recherche de la matière noire et du secteur sombre sont attendus au cours de la prochaine décennie, avec la réalisation d'un vaste programme d'expériences, de petite à grande échelle, grâce à un élargissement du potentiel pour la physique des expériences utilisant des accélérateurs au HL-LHC et à des expériences de physique aux petits angles de haute intensité, ainsi qu'à de nouvelles expériences de premier plan menées dans des laboratoires souterrains et d'autres infrastructures spécialisées. Les travaux de détection indirecte menés grâce à de grands télescopes et à d'énormes détecteurs de neutrinos offrent un potentiel supplémentaire en permettant l'accès aux plus hautes échelles d'énergie. Les technologies utilisées pour la recherche de matière noire se comportant comme une onde se recoupent largement avec celles utilisées pour la détection quantique de pointe, et pourraient ainsi donner lieu à des améliorations considérables de la sensibilité au cours des dix prochaines années, ouvrant également la voie à un nouvel espace de paramètres dans le domaine de la détection des ondes gravitationnelles. En parallèle, d'importants travaux théoriques permettent de développer de nouvelles idées, des notions de phénoménologie innovantes et des outils agissant en synergie afin d'interpréter de manière cohérente les données à partir du vaste éventail des échelles expérimentales.

- A. Les contributions européennes aux expériences sur les neutrinos et la matière noire avec ou sans accélérateur sont essentielles et devraient être soutenues.
- B. Le CERN devrait continuer d'apporter un appui au programme neutrino longue distance mondial via la plateforme neutrino. La collaboration entre le CERN et les expériences n'utilisant pas d'accélérateur sur des technologies d'intérêt mutuel devrait être poursuivie.

Mesures de précision et tests sur les symétries fondamentales

Les mesures de haute précision des propriétés des particules et les tests sur les symétries fondamentales jouent un rôle essentiel en physique des particules. Ils offrent une ouverture exceptionnelle sur une nouvelle physique, grâce à certains observables spécifiques sensibles aux échelles de masse bien au-delà des 100 TeV, impossibles à observer directement, et à d'autres, sensibles aux nouvelles particules très légères ou aux forces de couplage très faibles. L'éventail de physique sur lequel portent les recherches est très vaste, puisqu'il inclut notamment des recherches générales sur la physique au-delà du Modèle standard et comporte des liens importants avec la physique des neutrinos, la matière noire, la baryogénèse et la nucléosynthèse. Les accélérateurs et autres infrastructures situés dans des laboratoires européens sont autant de possibilités de découvertes dans ces domaines.

La recherche de moments électriques dipolaires se distingue comme étant la manière la plus sensible d'explorer les sources supplémentaires de violation de CP, qui pourraient être nécessaires pour expliquer l'asymétrie baryonique de l'Univers. L'actuelle limite stricte placée sur le moment électrique dipolaire de l'électron, notamment grâce aux expériences utilisant des molécules dans les laboratoires universitaires, impose des contraintes à de nombreuses théories génériques de physique au-delà du Modèle standard dans lesquelles apparaît la violation de CP. La non-observation de moments électriques dipolaires hadroniques, en particulier ceux des neutrons dans des expériences au PSI, à l'ILL, au LANL et à TRIUMF, a également un impact sur ces modèles et contraint la violation de CP dans l'interaction forte à être très limitée (ce qu'on appelle le « problème de symétrie CP dans l'interaction forte »), motivant ainsi la recherche d'axions. La recherche de moments électriques dipolaires s'étend aux systèmes plus lourds, aux baryons, aux noyaux radioactifs et aux muons, en testant de manière sensible les sources supplémentaires de violation de CP et la violation de l'universalité de la saveur leptonique.

La recherche de la violation de la conservation de la saveur des leptons constitue une autre catégorie de sonde hautement sensible pour explorer la physique au-delà du Modèle standard. Les recherches les plus sensibles concernent les transitions muon-électron sans neutrino associé, les travaux internationaux étant poursuivis en Europe au PSI en ce qui concerne les conversions $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ et $\mu^+ \rightarrow e^+ e^+ e^-$, et au FNAL (États-Unis) et au complexe J-PARC (Japon) en ce qui concerne la conversion $\mu^- \rightarrow e^- N$. D'autres recherches sur la violation de la conservation de la saveur des leptons chargés et sur les désintégrations du taux violant l'universalité de la saveur leptonique, ici encore d'une portée exceptionnelle, sont en cours, par exemple, à BES III, LHCb et Belle II, qui conduisent aussi un vaste programme de physique des saveurs autour des quarks charmés. LHCb et Belle II, principalement, et les autres expériences LHC mènent des programmes très vastes en physique des quarks b.

5



Théorie

Les mesures précises des modes de désintégration réalisées avec des hadrons légers, tels que des neutrons, des pions et des kaons, offrent une nouvelle ouverture sur une physique au-delà du Modèle standard aux très hautes énergies. Les études menées par la communauté mondiale sur la désintégration neutronique en Europe à l'ILL, au PSI, à FRM II et, à l'avenir, à l'ESS, cherchent à porter les expériences sur la corrélation entre durée de vie et désintégration à un niveau de précision de 10^{-4} , ouvrant la voie à des tests inédits de l'unitarité du mélange entre les saveurs des quarks. Un objectif de précision comparable est poursuivi dans le cadre des tests sur l'universalité leptonique dans les désintégrations du pion au PSI, remettant en question des prédictions précises du Modèle standard. En physique des kaons, les recherches et mesures améliorées réalisées au CERN et à J-PARC sur des désintégrations rares et précisément calculables, en particulier les désintégrations en un pion et une paire de neutrinos par des voies chargées ou neutres, ainsi que les désintégrations en deux muons, sont l'un des piliers du programme de physique des saveurs.

C. **L'écosystème des laboratoires européens de physique des particules devrait continuer de soutenir un large éventail d'expériences de précision en physique des particules.**

La physique théorique est un aspect essentiel de la physique des particules, qui fournit les cadres conceptuels, les modèles et certains des outils de calcul nécessaires pour interpréter les données, découvrir de nouveaux phénomènes et orienter les futures expériences. Elle englobe un vaste spectre de recherches étroitement liées entre elles, allant de cadres extrêmement abstraits, tels que la théorie des cordes, à l'élaboration de modèles, en passant par la phénoménologie et les études numériques, qui sont essentielles pour formuler des prédictions précises pour les expériences. La physique théorique est également indispensable pour repérer et exploiter les liens existants avec les disciplines voisines, telles que la cosmologie, l'astrophysique, la physique nucléaire, les mathématiques et la science de l'information quantique. Ensemble, ces domaines constituent un écosystème dans lequel les idées et les méthodes s'enrichissent mutuellement, conduisant à des percées conceptuelles et à des avancées pratiques en ce qui concerne la capacité prédictive. L'Europe est active dans l'ensemble de ces disciplines et occupe une position de chef de file dans de nombreux domaines ; il est essentiel de préserver cette omniprésence et ce leadership pour le développement à long terme du domaine.

A. **L'Europe devrait faire en sorte que la physique des particules théorique reste robuste et diversifiée, à la fois sur le plan formel et sur le plan phénoménologique, tout en renforçant et en exploitant davantage les liens avec les disciplines voisines.**

Au cours des décennies à venir, la physique théorique sera confrontée à de grands défis et à de nouvelles possibilités, avec une importance croissante accordée à la précision. La pleine exploitation des données du HL-LHC et les ambitieux objectifs scientifiques des futurs projets phares reposent sur l'existence de prédictions théoriques précises et d'outils d'analyse perfectionnés. Pour parvenir au niveau de précision requis, des efforts coordonnés sont nécessaires dans de nombreux domaines de la théorie, ainsi qu'une collaboration étroite et continue entre la théorie et l'expérimentation. De nombreuses tâches essentielles, y compris le développement d'autres outils pour les calculs à plusieurs boucles, tels que FORM, et des avancées dans le domaine des simulations de pointe ne pourront être accomplies que grâce à une collaboration continue au sein d'équipes plus vastes, dont les contributions doivent être soutenues et valorisées.

Au-delà des calculs théoriques traditionnels, ce très vaste programme de travail nécessite des approches numériques très complexes, en particulier des calculs de QCD sur réseau et des simulations détaillées sur collisionneur, qui sont indispensables à l'interprétation et à la pleine exploitation des résultats expérimentaux. Par conséquent, une formation continue et complète dans ce domaine, telle que celle proposée via MCNet, est essentielle. Ces activités, quant à elles, nécessitent un accès continu à des outils de calcul très performants et à des compétences mathématiques poussées. Les théoriciens qui prennent part à ces projets techniquement exigeants et souvent de longue durée devraient avoir des possibilités de carrière qui reflètent la nature et la valeur de ce travail.

6



Technologies

En parallèle, il est crucial de préserver toute l'étendue de la physique théorique, comme cela a été souligné précédemment. Le CERN devrait jouer un rôle important en ce sens, en collaborant étroitement avec les universités européennes pour promouvoir la mobilité, aider les jeunes chercheurs et attirer les jeunes talents du monde entier.

B. Les efforts collaboratifs visant à améliorer la précision des prédictions théoriques devraient être reconnus et soutenus. L'Europe joue un rôle de premier plan au niveau mondial dans ces domaines et devrait s'efforcer de continuer en ce sens en attirant, en encourageant et en fidélisant les jeunes talents du monde entier. Le CERN devrait continuer de faire partie intégrante de cette démarche.

La science et les technologies à l'appui des accélérateurs, des détecteurs et du calcul, ainsi que des infrastructures connexes, apportent les fondements nécessaires pour répondre aux grandes questions de la physique des particules. Elles sont profondément ancrées dans la communauté internationale de la physique des particules et sont essentielles à la réussite des projets actuels et futurs. Leurs synergies avec les autres domaines de la science et l'industrie sont nombreuses et permettent également des applications aux conséquences sociétales importantes, notamment dans les domaines de la médecine, de l'industrie, de la sécurité et de l'énergie de fusion.

A. Afin que l'Europe reste à l'avant-garde des technologies pour la physique des particules, la R&D en collaboration avec les partenaires internationaux et l'industrie doit continuer d'être soutenue de manière prioritaire, de façon à renforcer la durabilité et les répercussions sociétales de la discipline.

Science et technologie des accélérateurs

Les accélérateurs de pointe reposent sur des modèles détaillés de physique des faisceaux, des simulations puissantes et des technologies clés telles que les aimants à champ élevé, les systèmes d'accélération RF résistifs ou supraconducteurs à gradient élevé, l'accélération par champ de sillage plasma à gradient élevé, les faisceaux de muons de forte brillance et les linacs à récupération d'énergie. Plusieurs approches technologiques répondent directement à la nécessité d'une plus grande durabilité pour les futures installations avec accélérateur. Il s'agit notamment d'aimants supraconducteurs et de résonateurs exploités à une température cryogénique plus élevée, de liaisons supraconductrices, de l'utilisation d'aimants permanents et de sources de puissance RF plus efficaces, associés à une utilisation accrue de la robotique et de l'intelligence artificielle.

La feuille de route relative à la R&D sur les accélérateurs élaborée par le Groupe des directeurs de grands laboratoires a permis de renforcer la collaboration entre les laboratoires européens de physique des particules et les partenaires internationaux, et d'augmenter les synergies avec d'autres domaines, notamment les sources de lumière, les sources de neutrinos avec accélérateur et la physique nucléaire.

Les installations de physique des particules proposées, y compris le FCC-ee, dépendent des technologies SRF de haute performance. Des travaux continus de R&D pour obtenir des gradients d'accélération plus élevés pour les cavités, des pertes cryogéniques plus faibles et une exploitation supérieure à 1,9 K – permise par un traitement de surface amélioré, des matériaux de revêtement innovants et des techniques de fabrication avancées soutenues par la robotique – peuvent améliorer de manière significative la durabilité et la performance, tout en réduisant les coûts. Compte tenu de l'ampleur de cette entreprise, les processus de production et de contrôle qualité doivent être transférés à l'industrie. Des approches innovantes, telles que l'accordage rapide des fréquences, pourraient permettre de réduire considérablement la consommation d'énergie pour une exploitation à haute intensité et avec un cycle utile élevé, en appui aux concepts de récupération d'énergie. La technologie

RF résistive reste également essentielle, par exemple pour les injecteurs du FCC-ee, dans lesquels la robustesse et le rapport coût-efficacité sont des facteurs essentiels.

Les sources de puissance RF font partie des principaux éléments générateurs de coût et d'efficacité pour les futures installations, mais l'Europe dépend actuellement d'une base de fournisseurs industriels trop peu fournie, en particulier dans le domaine des systèmes haute puissance et haute efficacité. Renforcer les capacités des laboratoires à concevoir des sources de puissance RF, créer des prototypes et les industrialiser permettrait d'améliorer la résilience, ce qui profiterait aux projets de collisionneurs, de sources de photons, d'accélérateurs médicaux, de linacs industriels et d'injecteurs pour accélérateurs d'hadrons.

La conception de la future génération de collisionneurs d'hadrons de haute énergie prend appui sur l'expérience acquise avec le LHC et le HL-LHC, mais elle est confrontée à des défis dans les domaines des aimants à champ élevé, de la cryogénie, des systèmes de vide et de la protection des machines. Les dipôles de référence du FCC-hh dépassent les 14 m de longueur, soit deux fois la longueur des plus longs quadripôles des triplets en Nb₃Sn du HL-LHC, qui ont atteint des champs de crête de plus de 12 T. L'objectif pour les dipôles du FCC-hh est d'atteindre 14 T, grâce à des supraconducteurs en Nb₃Sn exploités à 1,9 K et à des températures plus élevées qui pourraient permettre de réduire la puissance cryogénique et le stock d'hélium. Des aimants supraconducteurs à haute température critique pourraient permettre d'abaisser encore la consommation d'énergie ou de produire des énergies de faisceau plus élevées, avec des champs atteignant 20 T, mais leur développement prendra plus de temps et comporte plus d'incertitudes. Le calendrier technique du FCC-hh dépend en grande partie des progrès réalisés en ce qui concerne le développement des aimants dipolaires des arcs. La production d'aimants en Nb₃Sn à l'échelle industrielle pourrait commencer autour de 2045, alors que celle d'aimants HTS pourrait nécessiter cinq à quinze ans de plus et dépend de la démonstration de la faisabilité d'aimants de catégorie accélérateur. Les priorités en matière de R&D sont la réduction des coûts et l'amélioration des performances des conducteurs en Nb₃Sn et l'intensification du développement des conducteurs, des câbles et des bobines à revêtement supraconducteur à haute température critique, associées au contrôle de la qualité du champ, à la détermination des pertes acceptables pendant l'accélération et à la robustesse mécanique. Une approche englobant des considérations relatives à la protection des aimants, à la dynamique des faisceaux, à la cryogénie, au vide, au coût, à la performance et à la consommation d'énergie est essentielle. Des avancées dans le domaine des aimants à champ élevé seraient également profitables aux études sur un futur collisionneur de muons.

Un programme de R&D sur les accélérateurs qui soit ciblé et hiérarchisé selon les axes énoncés ci-dessus est essentiel pour permettre la réalisation dans les temps du projet de futur collisionneur phare et la mise en œuvre de l'ambitieux plan exposé dans le présent document.

B. Pour que l'ambitieux plan présenté se concrétise, la priorité absolue doit être la mise au point et l'industrialisation de technologies clés : structures RF supraconductrices ou résistives de pointe, sources de puissance RF efficaces et aimants de qualité accélérateur ayant un champ compris entre 14 et 20 T, y compris ceux reposant sur des supraconducteurs à haute température critique.

Les développements liés aux structures radiofréquence supraconductrices (SRF) pour les linacs à récupération d'énergie sont aussi très importants pour le FCC-ee. Les linacs à récupération d'énergie produisent des faisceaux intenses de leptons destinés à différentes

applications, bien que la faisabilité d'une exploitation à haute intensité et à haute puissance reste à démontrer. L'installation de démonstration PERLE, à l'IJCLab, testera ce régime tout en appuyant le développement durable de la technologie SRF.

C. La démonstration de la récupération d'énergie multi-tours à haute intensité dans des linacs constitue un grand pas vers des accélérateurs de leptons à haut rendement énergétique utilisables dans un vaste éventail d'applications, et ce travail devrait être poursuivi.

Au-delà des projets de collisionneurs, la R&D sur les accélérateurs sous-tend de nombreuses technologies à fort impact sociétal, allant des diagnostics et traitements médicaux aux énergies propres. Des investissements bien coordonnés sont essentiels, notamment dans des concepts innovants tels que l'accélération par champ de sillage à gradient élevé et les faisceaux de muons de forte brillance. En parallèle, l'impact environnemental et la viabilité à long terme sont des critères à examiner avec attention.

Des progrès considérables ont été réalisés en ce qui concerne les accélérateurs à plasma, et des améliorations ont été apportées à la qualité, la stabilité et l'efficacité des faisceaux. Cependant, pour des applications associées à des collisionneurs, ces avancées doivent être réalisées simultanément. Les principales difficultés sont l'installation par étapes de nombreux modules à plasma, une exploitation en mode multipaquet à une fréquence de répétition élevée, le contrôle du dépôt d'énergie dans le plasma, l'accélération des positons et la précision des simulations de bout en bout. Pour que les technologies concernées soient validées, ces capacités doivent être testées dans des conditions réalistes.

Des collisionneurs de muons pourraient permettre d'obtenir des collisions de leptons à des énergies autour de 10 TeV, mais ces projets restent moins aboutis que d'autres projets de collisionneurs proposés dans le contexte de la mise à jour 2026 de la stratégie européenne pour la physique des particules. Pour évaluer leur faisabilité et leurs performances, un concept de refroidissement des muons en six dimensions devra être testé et les principales technologies sous-tendant la conception du complexe de collisionneurs devront être validées. La gestion du bruit de fond des neutrinos est une autre question à traiter. Ces objectifs devraient être poursuivis en étroite coordination avec les travaux de R&D sur les collisionneurs de muons menés par les États-Unis.

D. Le développement de technologies de pointe à plus long terme, telles que l'accélération par champ de sillage à gradient élevé et d'autres technologies à l'appui des faisceaux de muons de forte brillance, devrait bénéficier d'un soutien adapté. Il conviendrait de tirer parti des synergies avec l'initiative de R&D sur les collisionneurs de muons (États-Unis).

Pour atteindre les objectifs de performance ambitieux des projets de futur collisionneur de grande échelle, des modèles poussés de physique des accélérateurs sont nécessaires, de même que des simulations complètes et le déploiement d'outils robotiques, de jumeaux numériques et de l'IA, afin d'améliorer la disponibilité, la mise en service et l'exploitation de ces machines. Ce programme de R&D s'appuie également sur un vivier fourni d'ingénieurs, de techniciens et de physiciens formés, lequel repose sur des écoles spécialisées et un enseignement supérieur renforcé en sciences et technologies des accélérateurs dans toute l'Europe.

Développement de détecteurs

Les expériences de physique des particules moderne s'appuient sur un vaste portefeuille de technologies de détecteur matures. Les détecteurs à semi-conducteurs, les systèmes de trajectographie à gaz, les calorimètres, les photodétecteurs et les dispositifs de séquençage constituent la structure technologique des expériences actuelles, avec ou sans collisionneur. Grâce à des décennies de travaux de R&D soutenus, ces technologies ont atteint un haut niveau de performance et sont déployées avec succès dans des environnements allant de collisionneurs d'hadrons à haute luminosité aux recherches d'événements rares menées par des expériences souterraines.

À côté de cela, les futurs programmes de recherche expérimentale imposent des contraintes qui dépassent l'état de l'art actuel. Ces impératifs incluent une résolution spatiotemporelle beaucoup plus fine, des budgets de matériel réduits, des débits de données considérablement plus élevés et l'application de contraintes strictes à la consommation d'énergie, au refroidissement et à la durabilité, ainsi qu'une résistance accrue aux radiations pour les applications associées aux collisionneurs d'hadrons. Par conséquent, il est aussi nécessaire de continuer de développer les détecteurs au niveau des systèmes, en intégrant des capteurs et autres éléments électroniques, mécaniques, de refroidissement et d'acquisition de données à des solutions cohérentes et modulables. Ce développement doit être organisé de manière stratégique et aligné sur les calendriers à long terme des expériences.

Dans ce contexte, la mise à jour 2020 de la stratégie européenne pour la physique des particules a soulevé la nécessité d'adopter une approche coordonnée et à long terme du développement de détecteurs et a recommandé l'élaboration d'une feuille de route globale en matière de R&D sur les détecteurs. Depuis, cette feuille de route a été élaborée sous l'égide de l'ECFA pour fournir des orientations stratégiques, fixer des priorités et apporter de la cohérence au niveau des technologies des détecteurs, et ainsi éviter un morcellement et une redondance des efforts. Ses chapitres thématiques définissent les principaux domaines technologiques et les défis transversaux critiques pour les futures expériences.

La création du programme de R&D sur les détecteurs, qui compte huit collaborations, est une conséquence directe de la feuille de route relative à la R&D sur les détecteurs. Chaque collaboration pour la R&D sur les détecteurs a été créée afin de traduire les recommandations stratégiques de la feuille de route en activités de R&D concrètes et coordonnées. Le programme de R&D sur les détecteurs constitue le cadre central de la R&D stratégique sur les détecteurs, y compris pour la préparation des expériences dans le cadre des futurs projets phares, et vise à optimiser les résultats en évitant les doublons. Ces objectifs ne pourront être atteints que par le financement de programmes nationaux qui ciblent le programme de R&D sur les détecteurs et sont alignés sur ses résultats à fournir.

Les collaborations pour la R&D sur les détecteurs, constituées il y a deux ans, ont déjà réussi à rassembler des communautés qui n'avaient auparavant jamais collaboré. Chaque collaboration pour la R&D sur les détecteurs a été structurée conformément au modèle administratif et de gouvernance d'une expérience CERN, de manière à ce que tous les aspects de coordination, de communication de l'information, de gestion des ressources, d'examen et de conformité soient couverts. Cette structure est à la fois légère et alignée sur la feuille de route relative à la R&D sur les détecteurs de l'ECFA et les pratiques en vigueur au CERN.

La coordination entre les huit collaborations pour la R&D sur les détecteurs est essentielle pour favoriser au maximum les synergies, faciliter les échanges de savoir-faire et garantir l'utilisation efficace des ressources tant au niveau scientifique qu'au niveau technique. Les activités générales, telles que les échanges avec l'industrie, l'annonce de conférences, la tenue d'écoles d'instrumentation et la communication grand public, peuvent être menées de manière très efficace grâce à la coordination au niveau du programme. Le Comité de l'ECFA sur les détecteurs et le Forum des gestionnaires des collaborations pour la R&D, récemment créé, devraient mettre en place un cadre approprié afin de soutenir et de renforcer la coordination dans le domaine de la R&D sur les détecteurs.

En ce qui concerne les perspectives futures, l'intégration de nouvelles activités de R&D pertinentes au champ thématique plus large des collaborations pour la R&D sur les détecteurs existantes permettra de renforcer la cohérence et l'efficacité tout en préservant la légèreté et le caractère flexible du programme global de R&D sur les détecteurs.

Les dix recommandations stratégiques générales énoncées dans la feuille de route relative à la R&D sur les détecteurs appellent la création d'un cadre cohérent et à long terme dans le domaine de la R&D sur les détecteurs, qui garantisse un accès continu aux infrastructures clés, à un appui en ingénierie, aux outils logiciels et à des financements stables, tout en encourageant la coordination internationale et des activités décentralisées rattachées aux installations centrales. Les recommandations stratégiques générales soulignent également la nécessité de soutenir la recherche « pure », afin de renforcer les carrières et la reconnaissance des experts en R&D sur les détecteurs, de créer des partenariats efficaces avec l'industrie et d'ancrer les pratiques de science ouverte dans toutes les activités liées à l'instrumentation. Toutes ces questions restent très pertinentes et n'ont pas encore été suffisamment explorées. Par conséquent, les initiatives en lien avec les recommandations stratégiques générales doivent aussi être organisées conjointement au sein de toutes les collaborations pour la R&D sur les détecteurs.

E. Pour que les collaborations pour la R&D sur les détecteurs puissent répondre aux exigences des projets phares futurs, elles doivent bénéficier de financements adéquats. De nouveaux domaines et initiatives de R&D devraient être intégrés au système de collaborations pour la R&D sur les détecteurs. Les recommandations stratégiques générales de la feuille de route doivent être pleinement mises en œuvre dans le cadre d'initiatives spécifiques coordonnées entre les collaborations pour la R&D sur les détecteurs.

L'ingénierie des systèmes de détecteurs modernes a atteint un niveau de complexité qui dépasse de loin celle des traditionnels développements réalisés en interne, en particulier dans le domaine de la microélectronique, où les nœuds technologiques poussés, l'intégration hétérogène et les critères rigoureux de vérification entraînent une forte augmentation des coûts. En parallèle, il est devenu compliqué du point de vue juridique et administratif de soumettre conjointement des configurations pour la production de galettes dans les grandes fonderies industrielles, pour des questions de droits de propriété intellectuelle, de responsabilité contractuelle, de réglementation en matière de contrôle des exportations et de conformité avec les normes de qualité industrielle et les cadres de confidentialité ; tout cela entraîne des frais et des risques pour les différents instituts et les petites collaborations. Ces difficultés peuvent être

atténuées efficacement grâce à des collaborations structurées, dans lesquelles les ressources, les compétences et les cadres juridiques sont mis en commun et gérés collectivement. Dans le domaine de la microélectronique, une collaboration en matière de R&D sur les détecteurs a commencé à s'attaquer à ces difficultés, mais un appui plus systématique est nécessaire pour la mise en œuvre de tels modèles collaboratifs.

F. Une approche cohérente et stratégique et des ressources suffisantes pour soutenir une coopération étroite avec l'industrie sont nécessaires pour faire face à l'augmentation des coûts et à la complexité croissante de l'ingénierie, en particulier de la microélectronique.

En ce qui concerne l'ingénierie, les difficultés mentionnées ci-dessus pourraient aussi être surmontées en évitant les développements parallèles et les variantes élaborées à partir de solutions existantes, et en privilégiant systématiquement, si possible, le recours à des composants commerciaux standardisés. L'adoption de telles solutions permettrait de réduire la durée et le coût de développement, ainsi que les risques techniques associés, et améliorerait la compatibilité avec les flux de travail et les chaînes d'approvisionnement de l'industrie. Dans les cas où aucune solution commerciale n'existerait, il conviendrait d'opter pour un codéveloppement ciblé avec l'industrie, afin de garantir que les extensions adaptées soient fabriquées sur des plateformes bien établies et soient conformes aux normes industrielles dès le départ.

G. Pour gagner en efficacité et faire en sorte que les évolutions suivent les tendances technologiques mondiales dans d'autres domaines, priorité devrait être donnée, lorsque cela est possible, aux solutions normalisées et génériques plutôt qu'aux conceptions sur mesure.

Calcul

Le système de calcul pour la physique des particules a largement dépassé sa conception initiale, permettant des flux puissants et une importante réduction des ressources, grâce à un investissement technologique et humain soutenu. Les besoins en calcul peuvent être modélisés sur 50 ans, bien que les défis futurs ne puissent être anticipés uniquement sur la base d'une augmentation des volumes, les contraintes économiques devant également être prises en compte. Alors que la physique des particules et les disciplines connexes deviennent plus complexes et que les initiatives mondiales s'élargissent, celles-ci doivent nécessairement collaborer pour que leur réussite soit durable.

Il est essentiel de favoriser la collaboration et de poursuivre le développement et la prise en charge de solutions logicielles communes utilisables par plusieurs expériences (également dans des domaines autres que la physique des hautes énergies) pour optimiser l'efficacité et éviter la redondance des efforts à toutes les étapes des expériences, de la simulation à la gestion des données. L'adoption de solutions logicielles et d'outils communs est une priorité pour les générations d'expériences actuelles et futures, et des ressources adéquates devraient être garanties.

Les principaux domaines de R&D orientés vers l'avenir sont l'utilisation optimale des processeurs graphiques (GPU), les dispositifs logiques programmables (FPGA), l'intelligence artificielle (IA) et les technologies émergentes, telles que l'informatique quantique. Ces travaux de R&D sont essentiels pour garantir des outils de calcul abordables au cours des prochaines

décennies et pour optimiser le potentiel pour la physique. Ils sont également nécessaires pour suivre les orientations formulées par différents organismes de financement visant une réorganisation en des infrastructures de calcul locales/régionales.

L'exploitation continue et réussie de la Grille de calcul mondiale pour le LHC (WLCG) sera cruciale pour le LHC à haute luminosité et les futures expériences. La grille WLCG doit conserver son rôle central dans le paysage informatique de la physique des hautes énergies et est considérée comme la clé de voûte de la conception des futures initiatives ; elle devra continuer de recevoir un appui sans faille après la fin du HL-LHC. La grille WLCG doit aussi continuer de s'adapter aux évolutions technologiques et aux nouveaux modèles de financement afin de jouer son rôle de catalyseur des résultats de physique.

Pendant la période 2030-2040, plusieurs initiatives scientifiques avec des besoins de calcul comparables à ceux du LHC devraient devenir opérationnelles, y compris la future génération d'expériences de radioastronomie (SKA, LOFAR) et de détecteurs d'ondes gravitationnelles. Les synergies avec ces initiatives doivent être garanties afin d'optimiser l'investissement total dans le calcul scientifique.

H. Un soutien adapté et continu aux logiciels et au calcul et la coordination de ceux-ci doivent être assurés pour que les objectifs des projets de physique des particules, à commencer par le LHC à haute luminosité, puissent être atteints. La planification des futurs projets devrait englober dès le départ les aspects liés au calcul et aux logiciels, en tenant compte de l'efficacité énergétique et de la durabilité.

La physique des particules expérimentale doit être accompagnée par la production de prédictions théoriques adéquates, ce qui devient de plus en plus difficile au fur et à mesure que la précision des expériences augmente. Les simulations de chromodynamique quantique sur réseau sont depuis des décennies l'un des principaux cas d'utilisation pour des machines de calcul haute performance et elles ne peuvent être exécutées sur des systèmes plus petits. Les calculs théoriques, tels que ceux effectués en chromodynamique quantique sur réseau, doivent recevoir un appui mondial pour pouvoir permettre la pleine exploitation de la précision croissante des expériences.

I. Afin de répondre aux besoins théoriques et expérimentaux, tels que ceux liés à la CDQ sur réseau, aux flux de travail utilisant de grandes quantités de données via la Grille de calcul mondiale pour le LHC, ainsi qu'à la préservation et la réinterprétation des données sur le long terme, la communauté de la physique des particules devrait davantage s'engager et contribuer à modéliser l'évolution de l'entreprise commune EuroHPC, des usines d'IA et d'autres initiatives mondiales.

L'IA est une technologie révolutionnaire qui joue déjà un rôle crucial dans le domaine de la physique des particules ; par exemple, elle a démontré qu'elle pouvait dépasser les capacités des algorithmes classiques de plusieurs ordres de grandeur dans différents cas de figure. L'IA a déjà montré des résultats potentiellement révolutionnaires dans tous les domaines importants pour la physique des particules, y compris l'optimisation et l'exploitation des détecteurs et des accélérateurs, la prise de décisions, le traitement des flux de travail (simulation, reconstitution, analyse), la documentation, la formation et la théorie.

Par ailleurs, la physique des particules peut apporter ses propres compétences spécifiques à l'évolution de l'IA : l'IA moderne de grande échelle a besoin d'accéder à des ensembles de données bien gérés et répartis sur l'ensemble du globe pour créer des modèles efficaces et explicables. Or la physique des particules excelle dans ce domaine : elle repose sur des ensembles de données réelles associées à des simulations détaillées, ainsi que sur une infrastructure de données mondiale, et des milliers de physiciens qui en possèdent une connaissance détaillée.

Afin d'optimiser leur efficacité, les activités liées à l'IA doivent être coordonnées entre toutes les disciplines et les différents acteurs concernés, à savoir les expériences, les laboratoires, les instituts de recherche et les universités. Les technologies d'IA liées aux expériences et aux initiatives de physique des particules actuelles et futures sont d'une complexité et d'une importance égales à celles liées au développement des détecteurs ; par conséquent, il est proposé de suivre une approche similaire à celle initiée lors de la mise à jour 2020 de la stratégie européenne pour la physique des particules concernant la R&D sur l'instrumentation, à savoir élaborer une feuille de route cohérente et mettre en œuvre (au moins) des initiatives de terrain à l'échelle européenne.

J. La communauté européenne de la physique des particules doit intensifier ses activités liées à l'IA et y consacrer des ressources adéquates. Une feuille de route, coordonnée conjointement par le CERN et des laboratoires, instituts et universités nationaux, devrait être élaborée afin d'établir des priorités entre les activités liées à l'IA, en tenant compte des synergies avec les partenaires internationaux et les autres communautés.

Transfert de connaissances et de technologies

Le transfert de connaissances et de technologies (KTT) est essentiel pour les sciences fondamentales et facilite leur impact sociétal. Les technologies mises au point pour les accélérateurs de particules, les détecteurs, l'électronique, les logiciels, l'informatique, l'IA et d'autres applications peuvent déboucher sur des projets dérivés dans les domaines de la santé, de la sécurité et de l'énergie. Ainsi, la physique des particules contribue à l'industrie européenne et au renforcement des capacités pour la société, montrant ses répercussions socioéconomiques immédiates et son utilité sur le long terme, et offrant des raisons supplémentaires de poursuivre les financements publics.

En physique des particules, par convention, le transfert de connaissances et de technologies se fait à sens unique, à savoir du monde de la recherche vers le monde extérieur (transfert sortant). Une approche plus efficace consisterait à intégrer dès le début aux processus de recherche et d'innovation les idées et besoins spécifiques d'un vaste éventail d'acteurs de la société (transfert entrant). En combinant ces deux approches pour former un processus de transfert « bidirectionnel », un échange serait mis en place avec les universités, la société, les entreprises et la sphère politique, permettant de traduire les fruits de la recherche en bénéfiques pour la société et d'intégrer les défis du monde réel aux activités de recherche. Les connaissances seraient ainsi développées et élargies de manière conjointe, ce qui les rendrait plus pertinentes vis-à-vis de la société, et permettrait une mise en œuvre beaucoup plus rapide. Afin de renforcer le lien entre la recherche et les applications, tous les nouveaux projets phares – développés par des collaborations mondiales, dont le CERN,

et d'autres centres de recherche et universités – devraient adopter une feuille de route relative au transfert de connaissances et de technologies. Le transfert de connaissances et de technologies devrait être intégré au processus de R&D et envisagé pour toutes les technologies et connaissances.

Un transfert de connaissances et de technologies réussi nécessite une culture dans laquelle les chercheurs participent activement au processus de transfert, des structures d'appui telles que des bureaux de transfert de connaissances et de technologies, et des politiques de propriété intellectuelle claires. La propriété intellectuelle devrait être considérée comme un atout permettant d'optimiser la diffusion des technologies, tout en les protégeant des mauvaises utilisations. Il conviendrait de trouver le bon équilibre entre la diffusion *open source* et le besoin de conserver une souveraineté technologique. Pour ce faire, les bureaux de transfert de connaissances et de technologies devraient procéder à une planification prospective, en utilisant l'innovation ouverte déjà en place et des mécanismes d'innovation transversale. Les outils permettant un processus d'innovation systématique et une analyse propre à la physique des particules doivent être développés plus avant. Ils permettront de garantir que les événements qui réunissent la science, l'industrie et la société aboutissent systématiquement à des idées, des projets et des partenariats concrets.

Il conviendrait de mettre en place une manière structurée de mesurer et de suivre systématiquement l'impact socioéconomique de la physique des particules en incluant les activités de transfert de connaissances et de technologies à tous les niveaux, par exemple grâce aux contrats d'achat et aux activités entrepreneuriales des institutions et des alumnis. Les influences indirectes (par exemple, les activités de R&D industrielle fondées sur des démonstrations de faisabilité réalisées par des chercheurs en physique des particules et l'impact sur la culture, l'art et les sciences sociales) devraient également être prises en compte dans la mesure de l'impact socioéconomique. Les efforts collaboratifs visant à mener des études d'impact et à créer un dépôt centralisé contenant les solutions actuelles en matière de transfert de connaissances et de technologies, des exemples de bonnes pratiques, des données et d'autres paramètres et études, doivent être renforcés.

K. La communauté de la physique des particules devrait renforcer le transfert de connaissances et de technologies en tant que pilier de la recherche fondamentale lui permettant d'avoir un impact sur la société. Les concepts de transfert de connaissances et de technologies bidirectionnel et leur mise en œuvre devraient faire partie intégrante de tout projet de physique des particules, y compris des collaborations pour la R&D.



Mise en œuvre de projets, coopération avec de grands laboratoires de physique des particules en Europe

L'importance des grands laboratoires nationaux pour la mise en œuvre de la stratégie européenne pour la physique des particules est reconnue depuis près de 20 ans, avec la création du Groupe des directeurs de grands laboratoires (LDG), qui réunit 11 laboratoires de physique des particules. Les membres actuels du Groupe des directeurs de grands laboratoires sont le CIEMAT (Espagne), Daresbury (Royaume-Uni), DESY (Allemagne), l'IJCLab (France), l'IRFU (France), le LNF (Italie), le LNGS (Italie), le Nikhef (Pays-Bas), le PSI (Suisse), le RAL (Royaume-Uni) et le CERN. Ces laboratoires de physique des particules et d'autres fournissent les infrastructures, les capacités et les compétences techniques essentielles, notamment des collisionneurs, des expériences utilisant ou non des accélérateurs, des faisceaux d'essai, des installations d'irradiation et de R&D sur les détecteurs, des systèmes informatiques et des plateformes de R&D avec accélérateur. Le Groupe des directeurs de grands laboratoires jouit d'une reconnaissance officielle, son président étant membre *ex officio* du Comité des directives scientifiques du CERN et rendant directement compte au Conseil du CERN. Le président du groupe est également membre du Secrétariat de la stratégie européenne pour la physique des particules, et tous ses membres sont représentés au sein du Groupe sur la stratégie européenne. L'un des principaux aboutissements de la mise à jour 2020 de la stratégie européenne pour la physique des particules a été de confier la définition et l'exécution de la feuille de route relative à la R&D sur les accélérateurs au Groupe des directeurs de grands laboratoires.

La collaboration entre le CERN et d'autres laboratoires de physique des particules est essentielle pour optimiser la mise en œuvre de la stratégie. Ces laboratoires qui, grâce à l'appui du CERN, obtiennent des ressources nationales, bénéficient d'une main-d'œuvre qualifiée qui peut apporter des contributions d'un bon rapport coût-efficacité. Les activités des laboratoires de physique des particules liées aux développements technologiques alimentent des synergies interdisciplinaires, optimisant ainsi l'impact de l'Europe.

A. Le prochain collisionneur phare du CERN devrait être mis au point sous la direction du Laboratoire, avec des contributions en nature coordonnées des laboratoires de physique des particules. La collaboration entre le CERN et d'autres laboratoires de physique des particules sur des développements technologiques stratégiques devrait être renforcée.

Il est essentiel de créer des infrastructures partagées par le réseau des laboratoires de physique des particules, à l'image de l'initiative CHART (*Swiss Accelerator Research and*

Technology) menée conjointement par la Suisse et le CERN, afin de soutenir les futurs projets de collisionneurs du CERN. De telles infrastructures pourraient offrir des capacités stratégiques essentielles permettant de développer des technologies cruciales pour le collisionneur phare, mais également servir d'autres communautés scientifiques, augmenter la diversité scientifique en physique des particules et renforcer l'écosystème de la recherche et de la technologie en Europe.

Pour répondre aux questions fondamentales sur l'infiniment petit et l'infiniment grand, les puissants collisionneurs de particules ne suffisent pas. Les approches qui élargissent le champ des recherches sur les questions de physique fondamentale sont complémentaires de l'exploration basée sur des collisionneurs. Une exploration à l'échelle européenne, qui prendrait appui sur le succès de l'initiative « Physique au-delà des collisionneurs » du CERN, est nécessaire pour poursuivre l'élaboration d'une vision européenne commune qui soutienne la diversité scientifique dans le domaine de la physique des particules, en promouvant la mise en commun des technologies, des infrastructures et des compétences. Cette initiative européenne devrait définir des axes communs de développement technologique, encourager les synergies entre la théorie et l'expérimentation et mettre en place et soutenir des échanges de personnel proactifs et la mobilité afin de renforcer la communauté européenne de la physique des particules.

B. Le Groupe des directeurs de grands laboratoires de physique des particules devrait étudier la possibilité de lancer une nouvelle initiative qui favoriserait et renforcerait la mise en œuvre et la promotion de la diversité scientifique en physique des particules, autour d'une vision européenne commune.

Le Groupe des directeurs de grands laboratoires de physique des particules devrait d'abord réaliser une étude à l'échelle de la communauté concernant les capacités des installations, des projets et du personnel existants en Europe. Cette étude devrait couvrir la recherche en physique des particules en Europe au-delà du collisionneur phare du CERN, notamment les activités menées dans les laboratoires de physique des particules dans des disciplines voisines qui soutiennent la mise en œuvre de la stratégie pour la physique des particules.

L'Europe mène une politique de R&D sur les accélérateurs de premier plan, axée sur la mise au point de technologies pour la prochaine génération d'accélérateurs de particules.

Le pilotage et le développement stratégique du Groupe des directeurs de grands laboratoires devraient être renforcés afin d'intégrer des priorités hiérarchisées, de limiter la redondance des efforts et d'optimiser l'utilisation et la disponibilité des ressources des laboratoires. Cette approche permettrait de fortifier l'identité commune des laboratoires membres du groupe et servirait l'objectif de mettre en œuvre l'intégralité de la feuille de route relative à la R&D sur les accélérateurs.

Les technologies clés des accélérateurs identifiées dans la précédente stratégie restent d'actualité, y compris les aimants à champ élevé, les systèmes d'accélération RF résistifs ou supraconducteurs à gradient élevé, l'accélération par champ de sillage plasma à gradient élevé, les faisceaux de muons de forte brillance et les linacs à récupération d'énergie. Afin de déterminer les grandes priorités pour la feuille de route relative à la R&D sur les accélérateurs,

8



Synergies avec des disciplines voisines

l'accent devrait être mis sur la R&D essentielle pour le FCC-ee, ainsi que sur une évaluation des technologies cruciales pour des collisionneurs capables de produire des collisions de partons d'une énergie dans le centre de masse de 10 TeV.

De manière générale, le renforcement de la viabilité des futures installations utilisant des accélérateurs est une composante essentielle de la stratégie européenne pour la physique des particules. Une attention particulière devrait être accordée à la mise au point d'une approche systémique pour améliorer l'efficacité énergétique des installations de physique des hautes énergies, de la conception à la mise hors service des installations, en passant par leur exploitation. De tels efforts pourraient permettre de mobiliser des financements extérieurs (par exemple, par l'intermédiaire des projets Horizon Europe en cours, iSAS et RF2.0) et devraient être alignés sur des initiatives existantes pour avoir le meilleur impact possible et éviter les doublons.

C. Le Groupe des directeurs de grands laboratoires de physique des particules doit poursuivre la coordination de la feuille de route pour la R&D sur les accélérateurs en intégrant des priorités stratégiques, en renforçant la collaboration entre les différents laboratoires de physique des particules et le CERN et en optimisant l'utilisation des ressources des laboratoires. En outre, les efforts de R&D visant à améliorer la durabilité et l'efficacité énergétique des accélérateurs à chaque étape de leur cycle de vie, de leur conception à leur mise hors service, devraient être soutenus.

De précieuses synergies existent entre la physique des particules et les disciplines voisines que sont la physique nucléaire et l'astrophysique des particules, ainsi qu'entre certains aspects de la physique atomique et de la physique médicale.

De nombreux axes de recherche en physique nucléaire sont importants pour la physique des particules et dépassent souvent la frontière de la physique des hautes énergies. Les collisions d'ions lourds, qui font partie intégrante du programme de physique des particules du LHC et du HL-LHC, possèdent des synergies importantes avec la physique nucléaire et l'astrophysique des particules. En faisant entrer en collision des noyaux lourds à une vitesse proche de celle de la lumière, ces expériences reproduisent les conditions qui régnaient quelques microsecondes après le Big Bang. Ces collisions font fondre les protons et les neutrons pour former un plasma de quarks et de gluons. Étudier le plasma quarks-gluons aide à comprendre comment l'Univers est passé d'un état chaud, déconfiné, aux noyaux atomiques stables que nous connaissons aujourd'hui. Les données de ces collisions révèlent qu'avec sa viscosité proche de zéro, le plasma quarks-gluons est le fluide le plus « parfait » que nous ayons jamais observé. Elles fournissent un modèle montrant comment la matière s'est propagée dans l'Univers primordial. Bien que les étoiles à neutrons soient beaucoup plus froides que les boules de feu créées dans les collisionneurs, elles possèdent des densités extrêmes comparables, ce qui nous permet d'étudier l'équation d'état et de fixer des limites à la présence de formes exotiques de matière, telles que des quarks déconfinés ou des hypérons stables, et d'ainsi jeter un pont entre la physique nucléaire et l'astrophysique, afin de mieux modéliser les masses, les rayons et les fusions des étoiles à neutrons et même de prédire la production d'éléments lourds.

Le collisionneur électron-ion (EIC), nouvelle grande installation de physique nucléaire en cours de construction au Laboratoire national de Brookhaven, aux États-Unis, est conçu pour scruter la structure interne des protons et des noyaux. Une communauté importante de scientifiques européens participe à sa construction en vue de la future exploitation du détecteur ePIC auprès de l'EIC.

La physique nucléaire est cruciale pour interpréter les données relatives à l'oscillation des neutrinos et lever le voile sur la hiérarchie des masses du neutrino, la violation leptonique de CP et les potentielles interactions inhabituelles des neutrinos. En particulier, les études sur la production d'hadrons sont nécessaires pour comprendre la production des neutrinos, alors que la détection des neutrinos nécessite de comprendre leurs interactions avec des cibles nucléaires et la manière dont les effets nucléaires modifient leur énergie.

Il existe un fort potentiel de progression de la recherche sur les symétries fondamentales et la physique au-delà du Modèle standard grâce à des expériences de physique nucléaire ultrasensibles. Les noyaux constituent des sortes de laboratoires sensibles uniques, permettant de tester avec une précision élevée des symétries telles que celles de CP, T et

CPT, de mener des recherches sur la matière noire et d'explorer une nouvelle physique en mesurant de subtils écarts par rapport aux prédictions du Modèle standard dans des phénomènes tels que la désintégration bêta, les moments électriques dipolaires, la diffusion cohérente neutrino-noyau et des processus ultra rares, tels que les désintégrations de protons ou la double désintégration bêta sans émission de neutrino. Ces tests de basse énergie viennent compléter les expériences de haute énergie et ont le potentiel de révéler, par exemple, une physique au-delà du Modèle standard responsable de la masse des neutrinos, de la matière noire et de l'asymétrie matière-antimatière.

Les expériences de physique atomique peuvent rechercher les effets d'une physique au-delà du Modèle standard en utilisant une spectroscopie atomique extrêmement sensible et des effets d'interférence. En particulier, l'interférométrie atomique longue distance a été proposée en tant qu'outil puissant pour la physique fondamentale, l'astrophysique et la cosmologie, en particulier pour les recherches sur la matière noire ultralégère et les ondes gravitationnelles autour de 1 Hz, une gamme de fréquences qui n'est pas accessible par interférométrie laser.

L'astrophysique des particules et la cosmologie sont des partenaires clés de la physique des particules pour l'exploration de la physique fondamentale. La découverte des ondes gravitationnelles et la première observation d'un flux extragalactique de neutrinos ont jeté les bases de l'astronomie à messagers multiples, dans laquelle des mesures coordonnées de photons, de rayons cosmiques, de neutrinos et d'ondes gravitationnelles offrent un aperçu complet des événements astrophysiques les plus violents, y compris des accélérateurs cosmiques les plus puissants. En outre, le bruit de fond stochastique de ces messagers est un moyen exceptionnel d'explorer l'Univers primordial. Cette vision intégrée, qui englobe à la fois les interactions de particules microscopiques et les phénomènes cosmiques macroscopiques, permet de surmonter les limites des approches à messageur unique et ouvre de nouvelles voies d'expérimentation pour découvrir une physique au-delà du Modèle standard.

Les expériences sur les ondes gravitationnelles, telles que le télescope Einstein, ouvrent de nouvelles voies pour répondre à des questions fondamentales, notamment concernant la nature de la matière noire et le rapprochement de la relativité générale avec la mécanique quantique. Les observations, grâce aux ondes gravitationnelles, d'un trou noir et/ou de fusions d'étoiles à neutrons peuvent révéler des candidats à la matière noire, tels que les bosons ultralégers, et sont une manière exceptionnelle de tester la relativité générale dans le domaine des champs forts et ainsi d'explorer une nouvelle physique. Ces observations donnent également des informations cruciales sur l'équation d'état des étoiles à neutrons. Or ces informations ont un rapport direct avec une question de physique nucléaire et de physique des particules encore en suspens, à savoir les propriétés de la chromodynamique quantique à de hautes densités et un potentiel chimique non nul. La possible détection des ondes gravitationnelles primordiales, produites peu après le Big Bang, donnerait des informations sur les phénomènes de haute énergie au tout début de l'Univers, notamment sur les transitions de phases. À cet égard, les ondes gravitationnelles sont des messageurs uniques, qui donnent accès aux tout premiers instants de l'Univers, lorsqu'il était encore opaque aux rayonnements électromagnétique et neutrino.

La prochaine génération d'instruments, allant des télescopes à neutrinos de grande échelle aux observatoires du fond cosmologique diffus et des ondes gravitationnelles, produira une multitude de résultats susceptibles de faire avancer considérablement la physique des

particules, notamment en ce qui concerne la détermination de la masse des neutrinos, les tests de symétries fondamentales, l'observation indirecte de la matière noire et d'autres particules fossiles, et la nature de l'énergie sombre. Ces résultats ouvriront de nouvelles possibilités d'étudier les propriétés de la matière « normale » dans des conditions extrêmes non reproductibles sur Terre.

Le renforcement de la collaboration entre la physique des particules, la physique nucléaire, l'astrophysique et la cosmologie, associé à la mise en commun de développements technologiques et de l'interprétation théorique, sera crucial pour libérer le plein potentiel de ces initiatives. Les laboratoires européens sont à la pointe de la recherche dans ces domaines. L'Europe devrait continuer d'apporter un vigoureux soutien à ces activités, le CERN jouant un rôle central.

Le CERN mène un passionnant programme de recherche expérimentale en physique nucléaire, notamment le Décélérateur d'antiprotons/ ELENA, ISOLDE, n_TOF, le programme avec cibles fixes du SPS, et ALICE au LHC. Les données découlant de ces expériences jouent un rôle essentiel dans l'interprétation des observations cosmiques en réduisant les incertitudes concernant la production et la propagation des particules dans des environnements extrêmes. Le Laboratoire fournit également un appui aux initiatives d'astrophysique des particules à travers son programme d'expériences reconnues, ainsi que par l'intermédiaire de l'initiative EuCAPT pour la théorie.

L'installation de pointe MEDICIS, au CERN, contribue de manière significative aux progrès de la médecine en utilisant ISOLDE afin de produire de nouveaux isotopes rares pour des techniques avancées de diagnostic et de traitement du cancer. MEDICIS est actuellement l'installation phare dans ce domaine en Europe. C'est un excellent exemple de technologie d'accélérateur contribuant à la médecine nucléaire grâce au développement de traitements ciblés qui permettent de visualiser et de détruire les cellules malades avec le moins possible d'effets secondaires, évitant ainsi les pénuries d'isotopes cruciaux, dont certains ne peuvent être produits qu'au CERN. Cette innovation permet de proposer des traitements personnalisés, d'améliorer les traitements du cancer et de repousser les limites de la recherche radiopharmaceutique grâce aux collaborations avec des hôpitaux et des universités de toute l'Europe.

- A. [La communauté européenne de la physique des particules, en coordination avec l'APPEC et le NuPECC, devrait maintenir sa diversité scientifique à travers une collaboration étroite avec des laboratoires et infrastructures de recherche dans les domaines de la physique nucléaire et de l'astrophysique des particules en Europe et ailleurs, notamment avec le télescope Einstein en Europe et le collisionneur électron-ion aux États-Unis](#)
- B. [Le CERN devrait maintenir son niveau actuel de participation aux expériences de physique nucléaire et d'astrophysique des particules. Des activités d'expérimentation supplémentaires au-delà des programmes de physique des particules avec accélérateur du CERN ne devraient être envisagées que si des ressources suffisantes permettent de couvrir la mission première du Laboratoire.](#)

9



Durabilité et impact environnemental

Les préoccupations environnementales, en particulier celles liées au changement climatique, orientent les efforts de la communauté pour réduire l'impact environnemental de la recherche en physique des particules et mettre au point des solutions durables, susceptibles de profiter aussi à la société. L'évaluation et l'atténuation de l'impact environnemental sont importantes, que ce soit au niveau institutionnel, au niveau du projet ou au niveau individuel.

La consommation d'énergie et les émissions doivent être réduites le plus possible lors de la création et de l'exploitation des installations et des projets. Une telle démarche nécessite de mettre en œuvre des stratégies de durabilité, dont bon nombre peuvent être coordonnées entre les laboratoires de physique des particules, de protéger l'environnement, de préserver la biodiversité locale, de réutiliser l'énergie et de faire preuve de résilience face au changement climatique.

En général, c'est aux stades de la conception et de l'analyse des options que l'on peut agir au mieux sur l'impact environnemental global d'un grand accélérateur. Dans les premières phases, ces évaluations doivent être utilisées en priorité pour trouver les domaines à haut potentiel de réduction d'impact, chiffrer de manière approximative les options concurrentes et mettre en lumière les lacunes critiques en termes de connaissances. Il est important d'adapter la portée de l'analyse du cycle de vie et le niveau prévu de détails au statut du projet, afin d'améliorer sa performance environnementale, de repérer les principaux facteurs d'impact environnemental et de les traiter au cours des phases successives du projet.

Les travaux de génie civil contribuent de manière importante à l'impact environnemental des grands projets d'accélérateur. Ils sont typiquement le plus gros contributeur d'émissions pendant la phase de construction, en grande partie en raison de la très grande quantité de béton utilisée. Des mesures d'atténuation sont mises au point partout dans le monde pour réduire l'impact environnemental des travaux de génie civil de grande envergure. Les infrastructures de physique des particules devraient chercher à bénéficier de ces mesures, même si des coûts supplémentaires en découlent. Les questions de durabilité tout au long du cycle de vie doivent aussi se poser dès les premières étapes des projets en ce qui concerne les matériaux excavés en vue de l'installation des structures souterraines.

La plus grande partie de l'énergie utilisée pour faire fonctionner l'infrastructure technique et les sous-systèmes d'un accélérateur de particules est, à terme, convertie en chaleur. Cette énergie comprend, par exemple, celle utilisée pour faire fonctionner les aimants de l'accélérateur, l'énergie RF qui alimente les structures accélératrices, le rayonnement synchrotron absorbé, l'énergie pour les systèmes de gestion de l'air et le fonctionnement de l'électronique et des équipements de traitement des données. De nombreuses nouvelles infrastructures intègrent avec succès des systèmes de récupération de la chaleur, dès la naissance d'un projet, à des fins de chauffage des bureaux et des habitations voisines. Pour tous les futurs grands projets d'accélérateur, il conviendrait d'étudier attentivement les

possibilités de récupération et de réutilisation de la chaleur générée à basse température afin qu'une décision quantifiée et éclairée puisse être prise concernant une mise en œuvre la plus durable possible.

Les perspectives de réduction de l'impact environnemental de presque toutes les technologies liées aux accélérateurs sont considérables. Les ressources disponibles pour la R&D devraient être concentrées sur celles qui permettraient de réaliser le plus d'économies. Les principaux domaines concernés sont les sources d'énergie RF, les cavités RF à revêtement supraconducteur en couche mince exploitées à des températures cryogéniques élevées, les aimants permanents et les aimants à haute température critique, ainsi que l'optimisation de la luminosité grâce à une plus faible émittance pour réduire les périodes d'exploitation et l'utilisation de l'intelligence artificielle/l'apprentissage automatique pour une plus grande efficacité opérationnelle. En outre, un appui et une attention accrues devraient être apportés au développement de technologies pour les accélérateurs comportant des modalités de récupération d'énergie, en particulier les linacs à récupération d'énergie.

La conception des nouvelles infrastructures de physique des particules devrait être aussi durable que possible et garantir un équilibre entre, d'une part, les aspects importants de durabilité et, d'autre part, le coût et les performances pour la physique.

A. Pour les nouveaux projets proposés, une évaluation détaillée du cycle de vie devrait être réalisée à chaque étape, de l'idée première à la conception et à la mise en œuvre, afin de quantifier et de limiter le plus possible l'impact environnemental.

Le domaine de la physique des particules devrait tout mettre en œuvre pour atténuer activement les conséquences de ses activités de recherche à grande échelle, notamment en limitant le plus possible la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre lors de la planification, de la réalisation et de l'exploitation des installations et projets de physique des hautes énergies. La mise au point de nouvelles technologies permettant d'économiser de l'énergie et le remplacement de matériaux traditionnels, en particulier les gaz, par des solutions plus propres, devraient devenir systématiques. Les solutions trouvées et les connaissances accumulées devraient être transférées à la société.

Dans le futur, les besoins en calcul continueront d'augmenter, entraînant une hausse importante des besoins d'efficacité énergétique et de refroidissement. L'amélioration de l'efficacité énergétique des centres de données, une utilisation plus large de l'IA, des processeurs graphiques et des unités centrales de traitement de pointe, ainsi qu'un recours élargi à des langages de programmation plus efficaces font partie des mesures à encourager. Une infrastructure de calcul décentralisée, en particulier la grille WLCG, est encouragée afin d'appliquer une stratégie cohérente axée sur l'efficacité énergétique et la durabilité.

Les laboratoires sont incités à élaborer des stratégies pour l'environnement et la durabilité, ainsi que des rapports périodiques sur leur mise en œuvre. Ces stratégies doivent être aussi cohérentes que possible entre les différentes infrastructures de recherche en physique des hautes énergies. Par ailleurs, des stratégies rigoureuses et transparentes concernant l'élimination des déchets de toutes sortes (béton, composants électroniques, déchets radioactifs, etc.) devraient être mises en œuvre selon la chaîne de priorités suivante : prévention,



Dialogue avec le public, éducation, communication et aspect socioprofessionnels

réduction du volume, tri, réutilisation, recyclage, récupération et élimination. Il serait souhaitable de gérer les sites de recherche existants et de concevoir les futurs sites d'une manière qui garantisse la préservation/le renforcement de la biodiversité, qui limite l'utilisation d'eau et qui prenne en considération toutes les questions environnementales pertinentes. Ces actions devraient dans la mesure du possible être menées en collaboration avec des spécialistes de la biodiversité.

Un cadre éducatif solide devrait être mis en place afin de doter les futures générations de chercheurs en physique des particules des connaissances et des compétences nécessaires pour que des pratiques durables soient appliquées. Les recherches menées en ce sens devraient être reconnues et encouragées.

La communication et la collaboration sont au cœur de la vie scientifique et de la productivité de la communauté de la physique des particules, mais elles doivent être mises en balance avec les conséquences environnementales.

B. La communauté de la physique des particules devrait poursuivre et intensifier ses efforts pour mettre au point et adopter des solutions durables.

En tant qu'activité d'échelle mondiale, la recherche en physique des particules se caractérise par un degré élevé de rencontres en personne et de mobilité et, par conséquent, par des déplacements. Il faut rappeler que, selon les estimations, les voyages en avion représentent seulement 2,5 à 3 % des émissions globales d'équivalent CO₂, mais que cette catégorie d'émission reste plus difficile à décarboner que les émissions dans les autres domaines. Étant donné que les projets actuels et futurs menés sur des accélérateurs et par des expériences à la frontière des hautes énergies sont, en grande partie, concentrés dans quelques laboratoires de premier plan, les émissions d'équivalent CO₂ associées aux déplacements professionnels devraient être optimisées. Il est de toute évidence nécessaire d'avoir une approche équilibrée, qui mette en balance la réduction des déplacements et les bénéfices des échanges lors de rencontres en personne, particulièrement importantes pour les chercheurs en début de carrière. Les interactions en personne pourraient être facilitées par un développement accru de centres régionaux de physique des hautes énergies, par des résidences de longue durée et par des moyens perfectionnés de fonctionnement à distance. Il est également conseillé d'élargir encore les capacités d'exploitation à distance des expériences.

Parmi les bonnes pratiques permettant de réduire les émissions liées aux déplacements en avion, on peut noter le recours à des déplacements terrestres, plus respectueux de l'environnement, pour les trajets courts et la prise en considération des émissions d'équivalent CO₂ dans le choix des lieux de conférence, d'atelier et de réunion. En outre, les moyens de transport respectueux de l'environnement et durables devraient être encouragés pour les trajets quotidiens domicile-travail.

C. Un équilibre réel entre les réunions en présentiel et en distanciel devrait être envisagé afin d'atténuer l'impact environnemental des déplacements fortement émetteurs de carbone.

Dans un contexte marqué par l'incertitude et une désinformation généralisée, l'éducation efficace et inclusive, la communication et le dialogue avec des publics très divers – allant des gouvernements au grand public – sont essentiels pour favoriser la pensée critique et renforcer la confiance dans la science et ses méthodes. Ces activités sont également cruciales pour inciter les futures générations à faire carrière dans le secteur des sciences, des technologies, de l'ingénierie et des mathématiques, en particulier dans le domaine de la physique des particules, mais aussi renforcer l'intérêt du public pour la discipline et soutenir celle-ci.

En physique des particules, les activités de sensibilisation du public, d'éducation et de communication sont plus efficaces lorsqu'elles sont adaptées aux besoins spécifiques de chaque public ou groupe d'interlocuteurs, à savoir les pairs scientifiques, les organismes de financement, les décideurs politiques, les médias, les étudiants et les enseignants, et le grand public.

Des efforts particuliers sont nécessaires pour toucher des publics divers et sous-représentés. En fonction des contextes nationaux et régionaux, ces efforts peuvent cibler des groupes qui ont peu de possibilités de prendre part à des activités scientifiques, par exemple en raison de facteurs socio-économiques ou géographiques. Cependant, ces publics représentent une précieuse source d'intérêt et de talent pour les disciplines scientifiques et techniques, et un dialogue plus efficace avec eux devrait à la fois être profitable à la communauté de la physique des particules et contribuer à un plus grand soutien et à une meilleure compréhension de la recherche fondamentale de la part de la société.

Les activités de sensibilisation du public, d'éducation et de communication devraient clairement véhiculer les valeurs sociétales, économiques et technologiques de la recherche en physique des particules, et notamment faire connaître l'importance et les avantages multiples des futurs collisionneurs, à la fois pour la science et, indirectement, pour l'économie et la vie quotidienne. Il s'agit notamment de mettre en lumière les innovations mises au point pour améliorer la durabilité des installations, ainsi que l'importance d'une collaboration internationale inclusive. La recherche scientifique est l'archétype même de l'entreprise humaine collaborative et en constante évolution, et c'est de cette manière qu'elle devrait être dépeinte, en élargissant la focale au-delà des découvertes révolutionnaires pour inclure les méthodes scientifiques et le rôle des installations de recherche telles que les observatoires de particules. Les approches pratiques consistant à créer des occasions pour le public de découvrir, de manière accessible, des environnements de recherche, y compris des possibilités d'interaction directe avec des chercheurs, sont particulièrement encouragées. Lorsqu'ils sont utilisés efficacement, les médias sociaux et les plateformes numériques sont des outils de grande portée très efficaces pour atteindre les publics les plus larges et les plus divers.

Le Réseau de communication de la physique des particules en Europe (EPPCN), le Groupe international de communication grand public sur la physique des particules (IPPOG) et le Forum sur les programmes destinés aux enseignants et aux étudiants ont joué un rôle très important dans la réalisation de ces objectifs partout en Europe.

La base de données INSPIRE est l'un des piliers de l'infrastructure informationnelle de la physique des particules. Elle fournit des informations complètes, axées sur la physique des hautes énergies, pour toutes les publications et intègre des plateformes telles que PDG, arXiv, HEPData et ORCID. Alors que plusieurs sources de financement régulières ont été réduites ou interrompues, un engagement international renouvelé et des ressources suffisantes provenant de la communauté de la physique des particules européenne et d'ailleurs sont nécessaires pour garantir la viabilité à long terme d'INSPIRE.

A. L'éducation, la communication et le dialogue dans le domaine de la physique des particules devraient cibler un vaste éventail de parties prenantes, et des efforts spécifiques devraient être déployés pour toucher des publics divers et sous-représentés

Les activités de communication en physique des particules sont souvent organisées de manière descendante et bénéficient d'une solide coordination autour d'une vision et d'objectifs stratégiques européens partagés, prenant appui sur les structures et cadres de communication existants du CERN. Les activités de communication grand public, pour leur part, sont principalement ascendantes et reposent sur un vaste éventail d'initiatives de haute qualité lancées par des communautés nationales et des institutions locales basées dans les États membres et les États membres associés du CERN.

Ces programmes mis en œuvre au niveau local sont une grande force pour la discipline, car ils répondent efficacement aux besoins des publics nationaux et régionaux ; cependant, certaines initiatives sont menées de façon largement indépendante du CERN et les unes des autres, et gagneraient à recevoir un soutien supplémentaire et à être intégrées de manière cohérente au contexte européen. À cet égard, l'EPPCN, l'IPPOG et le Forum sur les programmes destinés aux enseignants et aux étudiants sont encouragés à poursuivre et à développer leur rôle d'interfaces facilitatrices au sein de l'écosystème du CERN et au-delà, en renforçant les liens entre les initiatives nationales de communication grand public, les collaborations pour les expériences et le CERN, et en préservant le caractère ascendant et l'appropriation locale des activités de communication grand public. La collaboration actuelle entre l'EPPCN, l'IPPOG et le Forum sur les programmes destinés aux enseignants et aux étudiants est très précieuse et devrait se poursuivre.

D'un point de vue opérationnel, les institutions européennes et le CERN sont encouragés à maintenir des ressources suffisantes et durables, notamment en ce qui concerne l'effort de coordination et les ressources humaines spécialisées au sein des structures organisationnelles existantes. Parmi les actions concrètes à mener se trouvent la réalisation d'une synthèse consolidée de toutes les initiatives éducatives, de communication et de sensibilisation du public dans le domaine de la physique des particules et autres disciplines connexes ; la création d'une plateforme européenne pour l'échange de bonnes pratiques et de supports, et le soutien d'une offre de formations en communication grand public et scientifique pour les chercheurs et les professionnels.

Une telle approche devrait générer des synergies importantes, amplifier les initiatives locales de sensibilisation du public, d'éducation et de communication, et renforcer la cohérence, l'impact et la visibilité de ces efforts dans toute la communauté européenne de la physique des particules.

B. Les institutions européennes et le CERN devraient encourager, intégrer et soutenir davantage les nombreuses initiatives en matière d'éducation, de sensibilisation et de communication grand public menées au sein des différentes communautés nationales d'Europe, de l'EPPCN, de l'IPPOG et du Forum sur les programmes destinés aux enseignants et aux étudiants.

La mise en œuvre effective de la stratégie européenne pour la physique des particules nécessite des effectifs durables et très qualifiés dans des domaines tels que la science des accélérateurs, les systèmes de calcul et l'instrumentation des détecteurs, afin de répondre aux défis attendus et de diriger les développements nécessaires en matière de R&D.

Créer un cadre de formation européen coordonné permettrait de proposer des formations structurées qui intègrent des considérations scientifiques, technologiques et liées à la durabilité, tout en favorisant l'échange de connaissances, la collaboration et la continuité des compétences entre les institutions européennes de premier plan. Ainsi, il est essentiel de renforcer la formation dans ces domaines, non seulement pour garantir la réussite des projets actuels et futurs, mais aussi pour maintenir la compétitivité de l'Europe en ce qui concerne les technologies scientifiques de pointe et permettre des innovations qui auront des répercussions sociétales et industrielles plus grandes.

Dans les faits, cela pourrait se traduire par la création de cursus certifiés, par exemple dans le cadre de programmes européens bien établis, tels qu'Erasmus Mundus, qui sont étroitement liés aux activités de R&D en cours et à des partenaires industriels. Les écoles sur l'instrumentation dont le programme est aligné sur la feuille de route de l'ECFA relative à la R&D sur les détecteurs et les départements de formation à la R&D sur les détecteurs veilleraient à la cohérence avec les priorités stratégiques.

Ensemble, ces mesures permettraient de renforcer les perspectives de carrière des jeunes scientifiques et chercheurs en les dotant de compétences transférables pertinentes aussi bien dans un contexte universitaire que dans l'industrie.

C. Les programmes européens de formation spécialisée dans les domaines de la science des accélérateurs, des systèmes de calcul et de l'instrumentation pour détecteurs devraient être développés davantage, notamment en ce qui concerne la durabilité et l'exposition directe aux nouvelles technologies, pour les niveaux master et doctorat. Les écoles internationales existantes dans ces domaines devraient bénéficier d'un appui afin de proposer un programme de formation élargi et cohérent.

Outre le fait de former la future génération de spécialistes des accélérateurs, des outils de calcul et de l'instrumentation pour détecteurs, il est essentiel pour l'avenir de la discipline de conserver ces compétences tout au long du cycle de vie des projets de physique des particules. Compte tenu de la complexité croissante et du niveau de spécialisation dans les domaines de la science et de la technologie des accélérateurs, du calcul et de l'instrumentation pour détecteurs, il est essentiel de créer des filières de carrière claires dans chaque domaine pour attirer et fidéliser les meilleurs talents au niveau mondial.

Des mesures complémentaires sont encouragées afin de renforcer la mobilité professionnelle entre les secteurs et entre l'université et l'industrie, en reconnaissant les avantages mutuels du transfert de connaissances bidirectionnel. Il pourrait s'agir de postes de boursiers dans l'industrie, de nominations conjointes, de programmes de mobilité structurés et de programmes de doctorat et de postdoctorat incluant des stages en entreprise. Encourager les chercheurs en début de carrière à s'impliquer dans la R&D sur les accélérateurs, les systèmes de calcul et l'instrumentation pour détecteurs et intégrer ces activités à des collaborations étroites entre l'université et l'industrie contribuera à attirer et à fidéliser les talents, à créer de nouvelles compétences et perspectives pour la discipline et à renforcer les perspectives de carrière dans les universités et au-delà.

D. La communauté devrait promouvoir activement la création de postes à long terme pour des ingénieurs et des techniciens, ainsi que pour des physiciens ayant des compétences technologiques dans les domaines des accélérateurs, des détecteurs et des systèmes de calcul. Les transferts de connaissances bidirectionnels devraient également être encouragés à travers la mobilité entre l'industrie et l'université.

Il est largement reconnu qu'un engagement continu en faveur de l'égalité, de la diversité et de l'inclusion est un moteur de créativité, d'innovation, de qualité dans la prise de décisions et de réussite à long terme pour les organisations. Des processus justes, transparents et fondés sur le mérite sont essentiels pour attirer et fidéliser les meilleurs talents. Ainsi, l'intégration des principes d'égalité, de diversité et d'inclusion à l'ensemble des activités de physique des particules correspond parfaitement aux valeurs européennes et aux attentes des organismes de financement nationaux et européens.

Dans les faits, la communauté est encouragée à appliquer un principe de tolérance zéro à l'égard du harcèlement, de la discrimination et des comportements inappropriés, conformément aux codes de conduite et aux mécanismes de signalement et d'appui en vigueur. Les programmes et les bureaux de défense de l'égalité, de la diversité et de l'inclusion jouent un rôle essentiel en assurant le suivi des progrès, en proposant des formations et des actions de sensibilisation et en fournissant conseils et soutien confidentiels. Une attention particulière devrait être accordée à l'instauration d'un environnement de travail inclusif et respectueux vis-à-vis des minorités de genre, des minorités ethniques, des personnes LGBTQ+, des personnes en situation de handicap, des personnes neurodivergentes et des autres personnes qui pourraient être sous-représentées ou exposées à un risque d'exclusion ou aux préjugés.

Les institutions sont encouragées à intégrer les considérations liées à l'égalité, à la diversité et à l'inclusion dans leurs processus de gouvernance, de recrutement, de formation et d'évaluation, en procédant à des contrôles réguliers, conformément aux politiques d'égalité, de diversité et d'inclusion en vigueur au CERN et dans d'autres institutions. Une telle démarche suppose un accès à des canaux confidentiels de signalement et de soutien, afin de garantir une mise en œuvre efficace et une amélioration continue.

E. La communauté de la physique des particules devrait continuer indéfectiblement à mettre les principes d'égalité, de diversité et d'inclusion au cœur de toutes ses activités.

Pour aborder les questions fondamentales de la physique des particules, en particulier, dans le contexte de la préparation du prochain projet de collisionneur phare du CERN et ses expériences, il est nécessaire de recruter et de fidéliser les jeunes talents les plus brillants. Pour cela, il est indispensable d'offrir un environnement de travail et des conditions d'emploi qui correspondent aux attentes des jeunes chercheurs d'aujourd'hui.

La communauté est encouragée à renforcer les structures de mentorat qui soutiennent les évolutions de carrière, notamment grâce à des orientations sur les compétences transférables et entrepreneuriales applicables à la fois dans le monde universitaire et au-delà.

La mobilité internationale dans les plus prestigieux centres de recherche et universités est une composante très valorisée dans une carrière. Des mesures telles que la promotion de contrats de travail d'une durée minimale d'au moins deux ans et l'existence de bureaux d'aide à la mobilité et d'un appui administratif et financier peuvent considérablement faciliter la mobilité des jeunes chercheurs.

Les processus d'évaluation professionnelle et de sélection sont encouragés afin de reconnaître un vaste éventail de compétences, notamment des activités de développement technologique, de communication, d'éducation et de transfert de connaissances, en parallèle des accomplissements scientifiques. La mobilité devrait être reconnue comme une occasion précieuse d'acquérir des compétences, de l'expérience et de l'indépendance, et non comme une obligation en soi.

En plus de l'appui scientifique qu'elles apportent, les institutions sont encouragées à mettre en œuvre des mesures spéciales visant à promouvoir la santé mentale et un environnement de travail sain. Ces mesures peuvent inclure l'accès à un soutien psychologique professionnel, par exemple auprès de thérapeutes sur place ou rattachés à l'organisation, ainsi que des initiatives de prévention, des formations pour les superviseurs et des informations claires concernant les services de soutien disponibles. De telles mesures sont particulièrement importantes dans un environnement de recherche international et très concurrentiel, où les chercheurs en début de carrière peuvent être confrontés à un certain isolement, à des déménagements fréquents ou à une incertitude prolongée.

Enfin, il est essentiel d'apporter de la clarté en ce qui concerne l'avenir à long terme de la discipline. Une décision rapide s'agissant du prochain projet phare réduira les incertitudes, soutiendra la planification stratégique de la carrière des jeunes chercheurs et contribuera à maintenir la confiance dans les perspectives à long terme de la physique des particules. Ensemble, ces mesures permettront de créer un environnement de recherche sain, favorable et attractif, qui offrira aux jeunes chercheurs la possibilité de développer tout leur potentiel et contribuera efficacement à la mission scientifique de la discipline.

F. Les actuels efforts de mentorat, de facilitation de la mobilité entre institutions et de promotion du bien-être des chercheurs en début de carrière devraient être renforcés. Outre les accomplissements scientifiques, l'évaluation professionnelle devrait également tenir compte des activités menées dans les domaines de la technologie, de la communication grand public et du transfert de connaissances.

ANNEXES

_Annexe 1 : Groupe sur la stratégie européenne

Le Groupe sur la stratégie européenne (ESG) est un organe spécial mis sur pied par le Conseil du CERN, qui a pour mandat d'élaborer une proposition de mise à jour périodique de la stratégie européenne pour la physique des particules à moyen et à long termes, laquelle est soumise au Conseil du CERN pour approbation. Le Groupe sur la stratégie européenne est assisté dans cette tâche par le Groupe préparatoire sur la physique (PPG), et élabore sa proposition de mise à jour de la stratégie compte tenu, entre autres, des contributions scientifiques soumises par le Groupe préparatoire sur la physique. Le Groupe sur la stratégie européenne comprend des représentants de l'ensemble des parties prenantes de la stratégie européenne pour la physique des particules.

Dans la mise à jour 2026 de la stratégie européenne, sa composition était la suivante :

MEMBRES

Représentants des États membres du CERN

M. Jochen Schieck (Autriche)
M. Pierre Van Mechelen (Belgique)
M. Venelin Kozhuharov (Bulgarie)
M. Rupert Leitner (Tchéquie)
M. Jens-Jørgen Gaardhøje (Danemark)
M. Martti Raidal (Estonie)
M^{me} Katri Huitu (Finlande)
M^{me} Christelle Roy (France)
M. Klaus Desch (Allemagne)
M. Panagiotis Kokkas (Grèce)
M. Dezső Varga (Hongrie)
M. Marek Karliner (Israël)
M. Antonio Zoccoli (Italie)
M. Eric Laenen (Pays-Bas)
M^{me} Heidi Sandaker (Norvège)
M. Tadeusz Lesiak (Pologne)
M. Mário Pimenta (Portugal)
M. Calin Alexa (Roumanie)
M^{me} Lidija Zivkovic (Serbie)
M. Marek Bombara (Slovaquie)
M. Borut Paul Kerševan (Slovénie)
M^{me} Maria Jose Costa (Espagne)
M. Richard Brenner (Suède)
M. Ben Kilminster (Suisse)
M. Mark Lancaster (Royaume-Uni)

Directrice générale du CERN

M^{me} Fabiola Gianotti

Directeur général désigné du CERN

M. Mark Thomson

Grands laboratoires nationaux européens

M. Nicanor Colino (CIEMAT)
M. Ulrich Husemann (DESY)
M. Achille Stocchi (IJCLab)
M. Franck Sabatié (IRFU)
M^{me} Sandra Malvezzi (LNF)
M. Ezio Previtali (LNGS)
M. Jorgen D'Hondt (NIKHEF)
M. Klaus Kirch (PSI)
M^{me} Sinead Farrington (STFC-RAL)
M. Jim Clarke (STFC-Daresbury Lab.)

Membres du Secrétariat de la stratégie

M. Karl Jakobs (secrétaire de la stratégie, président du Groupe sur la stratégie européenne)
M. Hugh Montgomery (président du Comité des directives scientifiques)
M. Mike Seidel (président du Groupe des directeurs de grands laboratoires)
M. Paraskevas Sphicas (président de l'ECFA)

INVITÉS DU GROUPE SUR LA STRATÉGIE EUROPÉENNE

Président du Conseil du CERN

M. Costas Fountas (Grèce)

Coordinateur du groupe de travail 2a du Groupe sur la stratégie européenne

M. Philip Burrows

États membres associés en phase préalable à l'adhésion

M. Panos Razis (Chypre)

États membres associés

M. Leandro Salazar de Paula (Brésil)
M. Budimir Kliček (Croatie)
M^{me} Antra Gaile (Lettonie)
M. Andrius Juodagalvis (Lituanie)
M. Masood Iqbal / M. Zafar Yasin (Pakistan)
M. Suat Özkorucuklu (Turquie)
M. Borys Grynyov (Ukraine)

États observateurs

M. Kazunori Hanagaki (Japon)
M. Michael Tuts (États-Unis d'Amérique)

Organisations ayant le statut d'observateur

M^{me} Patricia Postigo McLaughlin (Commission européenne)

Autres invités

M. Carlos Peña Garay (président de l'APPEC)
M. Eberhard Widmann (président du NuPECC)
M. José Luis Martínez (président de l'ESFRI)
Autres membres du Groupe préparatoire sur la physique (en sus du Secrétariat de la stratégie)

_Annexe 2 : Groupe préparatoire sur la physique

Secrétariat de la stratégie

M. Karl Jakobs (Allemagne), secrétaire de la stratégie, président
M. Hugh Montgomery (États-Unis d'Amérique), président du Comité des directives scientifiques
M. Paraskevas Sphicas (Grèce), président du Comité européen sur les futurs accélérateurs
M. Mike Seidel (Suisse), président du Groupe des directeurs de grands laboratoires

Comité des directives scientifiques (SPC)

M^{me} Pilar Hernandez (Espagne)
M. Gino Isidori (Suisse)
M. Fabio Maltoni (Belgique/Italie)
M^{me} Jocelyn Monroe (Royaume-Uni)

Comité européen sur les futurs accélérateurs (ECFA)

M. Thomas Bergauer (Autriche)
M. Tommaso Boccali (Italie)
M. Cristinel Diaconu (France)
M^{me} Monica Dunford (Allemagne)

CERN

M. Gianluigi Arduini

ASIE/AMÉRIQUES

M^{me} Anadi Canepa (États-Unis d'Amérique)
M. Xinchou Lou (Chine)
M. Rogerio Rosenfeld (Brésil)
M. Yuji Yamazaki (Japon)

_Annexe 3 : Groupes de travail du Groupe préparatoire sur la physique

Neuf groupes de travail ont été formés pour couvrir l'éventail complet des questions de physique, ainsi que les domaines des technologies pour accélérateurs, des technologies pour détecteurs et du calcul. Chaque groupe compte deux coordinateurs et un chercheur en début de carrière joue le rôle de secrétaire scientifique.

Physique électrofaible :	Monica Dunford (DE), coordinatrice, membre du Groupe préparatoire sur la physique Jorge de Blas (ES), coordinateur Emanuele Bagnaschi (IT), secrétaire scientifique
Interactions fortes :	Cristinel Diaconu (FR), coordinateur, membre du Groupe préparatoire sur la physique Andrea Dainese (IT), coordinateur Chiara Signorile-Signorile (DE), secrétaire scientifique
Physique des saveurs :	Gino Isidori (CH) coordinateur, membre du Groupe préparatoire sur la physique Marie-Hélène Schune (FR), coordinatrice Maria Piscopo (NL), secrétaire scientifique
Physique au-delà du Modèle standard :	Fabio Maltoni (BE/IT), coordinateur, membre du Groupe préparatoire sur la physique Rebeca Gonzalez Suarez (SE), coordinatrice Benedikt Maier (UK), secrétaire scientifique
Physique des neutrinos et messagers cosmiques :	Pilar Hernandez (ES), coordinatrice, membre du Groupe préparatoire sur la physique Sara Bolognesi (FR), coordinatrice Ivan Esteban (ES), secrétaire scientifique
Matière noire et secteur sombre :	Jocelyn Monroe (UK), coordinatrice, membre du Groupe préparatoire sur la physique Matthew McCullough (CERN), coordinateur Yohei Ema (CERN), secrétaire scientifique
Science et technologie des accélérateurs :	Gianluigi Arduini (CERN), coordinateur, membre du Groupe préparatoire sur la physique Philip Burrows (UK), coordinateur Jacqueline Keintzel (CERN), secrétaire scientifique
Instrumentation des détecteurs :	Thomas Bergauer (AT), coordinateur, membre du Groupe préparatoire sur la physique Ulrich Husemann (DE), coordinateur Dorothea vom Bruch (FR), secrétaire scientifique
Calcul :	Tommaso Boccali (IT), coordinateur, membre du Groupe préparatoire sur la physique Borut Kersevan (SL), coordinateur Daniel Thomas Murnane (DK), secrétaire scientifique

_Annexe 4 : Groupes de travail du Groupe sur la stratégie européenne

Contributions nationales, diversité au sein de la physique des particules européenne

Calin Alexa (Roumanie), président

Groupe chargé de comparer les projets

(a) Groupe chargé d'évaluer les projets
Gianluigi Arduini (CERN), Philip Burrows (Royaume-Uni), coprésidents

(b) Potentiel pour la physique
Monica Dunford (Allemagne), présidente

Mise en œuvre de la stratégie / Caractère livrable des projets plus grands

Achille Stocchi (IJCLab, France), président

Relations avec d'autres domaines de physique

Marek Karliner (Israël), président

Durabilité et impact environnemental

Tadeusz Lesiak (Pologne), président

Dialogue avec le public, éducation, communication et aspects socioprofessionnels pour la future génération

Pierre van Mechelen (Belgique), président

Transfert de connaissances et de technologies

Ulrich Husemann (DESY, Allemagne), président

_Annexe 5 : GLOSSAIRE

AD	Décélérateur d'antiprotons	ISOLDE	Séparateur d'isotopes en ligne
IA	Intelligence artificielle	IRFU	Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers, Paris-Saclay
APPEC	Consortium européen de physique des astroparticules au-delà du Modèle standard	JUNO	Observatoire souterrain de neutrinos de Jiangmen
BSM	au-delà du Modèle standard	J-PARC	Complexe de recherche de l'accélérateur de protons japonais
CEVNS	Diffusion élastique cohérente neutrino-noyau	KATRIN	Karlsruhe Tritium Neutrino
CEPC	Collisionneur circulaire électron-positon	KM3NeT	Cubic Kilometre Neutrino Telescope
CHART	Swiss Accelerator Research and Technology initiative	LANL	Laboratoire national de Los Alamos
CIEMAT	Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, institut de recherche, Madrid (Espagne)	LBNF	Installation neutrino longue distance du Fermilab
cLFV	Violation de la saveur leptonique dans le secteur des leptons chargés	LCA	Life Cycle Assessment (évaluation du cycle de vie)
CKM	Cabibbo-Kobayashi-Maskawa	LCF	Collisionneur linéaire au CERN
CLIC	Collisionneur linéaire compact	LCLS-II	Linac Coherent Light Source II
CP	Conjugaison de charge, parité	LDG	Groupe des directeurs de grands laboratoires de physique des particules
CPT	Conjugaison de charge, parité, inversion du temps	LEP	Grand collisionneur électron-positon
DRD	R&D sur les détecteurs	LEP3	Grand collisionneur électron-positon 3
DESY	Deutsches Elektronen Synchrotron, Hambourg, Allemagne	LFU	Universalité de la saveur leptonique
DUNE	Deep Underground Neutrino Experiment	LHC	Grand collisionneur de hadrons
ECE	Education, Communication and Engagement (activités de sensibilisation du public, d'éducation et de communication)	LHeC	Grand collisionneur électron-hadron
ECFA	Comité européen sur les futurs accélérateurs	LNF	Laboratoire national de Frascati, Italie
EIC	Collisionneur électron-ion	LNGS	Laboratoire national de Gran Sasso, Italie
ELENA	Anneau d'antiprotons de très basse énergie	LOFAR	Low Frequency Array (radiotélescope)
EPPCN	Réseau de communication de la physique des particules en Europe	MEDICIS	Medical Isotopes Collected from ISOLDE
ERL	Linac à récupération d'énergie	NEG	Getter non évaporable
ESG	Groupe sur la stratégie européenne	Nikhef	Institut national néerlandais de physique subatomique, Pays-Bas
ESPP	Stratégie européenne pour la physique des particules	NuPECC	Comité européen de collaboration pour la physique nucléaire
ESS	Source européenne de spallation	n_TOF	source de neutrons pulsés associée à une trajectoire de 200 mètres
EuCAPT	Consortium européen pour la physique théorique des astroparticules	PDG	Particle Data Group
EuroHPC	Entreprise commune européenne pour le calcul à haute performance	PERLE	installation à récupération d'énergie haute puissance à l'IJCLab
FCC	Futur collisionneur circulaire	PPG	Groupe préparatoire sur la physique
FCC-ee	Futur collisionneur circulaire électron-positon	PPLs	laboratoires de physique des particules
FCC-hh	Futur collisionneur circulaire hadron-hadron	PSI	Institut Paul Scherrer
FPGA	Dispositif logique programmable	RAL	Rutherford Appleton Laboratory, Royaume-Uni
FNAL	Laboratoire national de l'accélérateur Fermi	R&D	recherche et développement
FORM	Code public pour la manipulation symbolique largement utilisé par la communauté de la physique théorique des particules (https://github.com/form-dev/form?tab=readme-ov-file#readme)	RF	Radiofréquence
FRM II	Installation de recherche à neutrons Heinz Maier-Leibnitz	SKA	Square Kilometre Array
GPU	Processeur graphique	SLAC	Laboratoire national de l'accélérateur SLAC – Université de Stanford (États-Unis)
HEP	Physique des hautes énergies	SLC	Collisionneur linéaire de Stanford
HFM	Aimants à champ élevé	SPC	Comité des directives scientifiques
HL-LHC	LHC à haute luminosité	SPS	Supersynchrotron à protons
HTS	Supraconducteur à haute température critique	SRF	RF supraconductrice
IceCube	Observatoire de neutrinos au pôle Sud	STEM	Sciences, technologie, ingénierie et mathématiques
IJCLab	Laboratoire de Physique des 2 Infinis Irène Joliot-Curie, Paris-Orsay	TRIUMF	Tri University Meson Facility, centre de recherche national du Canada pour la physique des particules
ILL	Institut Laue-Langevin	WLGC	Grille de calcul mondiale pour le LHC
IPPOG	Groupe international de communication grand public sur la physique des particules	XFEL	X-ray Free-Electron Laser

<https://europeanstrategy.cern>

Réalisation éditoriale et graphique :
Groupe Éducation, communication et activités grand public du CERN

CERN-ESU-2026-003
ISBN : 978-92-9083-730-5 (version papier)
978-92-9083-731-2 (version électronique)
DOI : <http://dx.doi.org/10.17181/CERN.F5VS.K3VW>
Copyright © CERN 2026
CC-BY-4.0



