

Et si nous nous concentrons sur une usine à Higgs ?

Prof. Dr hab. Aleksander Filip Żarnecki

Faculté de physique, Université de Varsovie

Résumé

Dans les recommandations présentées en décembre 2025, le Groupe sur la stratégie européenne (European Strategy Group, ESG) a clairement identifié le futur collisionneur circulaire électron-positon (FCC-ee) comme option privilégiée pour le futur collisionneur du CERN, sans alternative. Il est toutefois important de comprendre que cette conclusion résulte des objectifs physiques supposés. Le FCC-ee propose le programme de recherche le plus vaste possible, couvrant presque tous les domaines de la physique des collisionneurs. Cependant, c'est la construction d'une usine à Higgs à électrons-positons qui a été considérée comme la priorité absolue dans le domaine au cours des vingt dernières années. Si l'on se concentre uniquement sur cet objectif, une option de collisionneur linéaire doit être considérée comme une alternative attrayante, si l'intégralité du projet FCC-ee ne peut pas être réalisée.

Août 2026

Exemple simple

La physique des particules, le fonctionnement des accélérateurs de particules géants et les expériences peuvent être difficiles à comprendre. J'ai donc essayé de trouver un exemple simple de la vie quotidienne, qui pourrait m'aider à visualiser le problème.

Prenons l'exemple d'un observateur d'oiseaux professionnel qui souhaite acheter l'objectif adapté à son appareil photo. Une longue distance focale est nécessaire pour cette tâche, et un objectif dédié d'une longueur focale de 250-550 mm offre la meilleure qualité d'image. Il est cependant évident qu'il ne sera pas possible de prendre de belles photos de paysages ou de portraits avec ce type d'objectifs. Si vous souhaitez utiliser le même objectif dans différentes situations, un objectif zoom universel de 90-365 mm constituerait probablement un meilleur choix. Il est probable que le prix soit plus élevé et que la qualité des photos d'oiseaux ne soit pas optimale, mais il peut être utilisé pour prendre des photos dans diverses situations. Le choix du type d'objectif dépend donc clairement de nos priorités.

Les priorités en physique des particules

Le boson de Higgs peut être considéré comme un pilier du Modèle standard (MS), la théorie développée pour décrire les particules élémentaires et leurs interactions. Même avant la mise en service du Grand collisionneur de hadrons (LHC) au CERN et la découverte du boson de Higgs par les expériences ATLAS et CMS en 2012, il était clair que le prochain collisionneur aux frontières de l'énergie devait être une machine électron-positon. Cela s'est également reflété dans la Stratégie européenne pour la physique des particules (ESPP - European Strategy for Particle Physics) approuvée par le Conseil du CERN en 2006 : « *Il est essentiel de compléter les résultats du LHC par des mesures réalisées sur un collisionneur linéaire. Dans la gamme d'énergie de 0,5 à 1 TeV, l'ILC, basée sur la technologie supraconductrice, offrira une opportunité scientifique unique à la frontière de la précision ;* » [1].

Le boson de Higgs a été découvert en 2012 et s'est avéré relativement léger. La première mise à jour de l'ESPP, achevée en 2013, indiquait clairement la nécessité de construire l'« usine à Higgs » : « *Il existe une solide argumentation scientifique en faveur d'un collisionneur électron-positon, complémentaire au LHC, qui pourrait étudier les propriétés du boson de Higgs et d'autres particules avec une précision sans précédent et dont l'énergie pourrait être augmentée* » [2].

La mise à jour de la stratégie européenne de 2020 [3] indiquait également qu'« *Une usine à Higgs électron-positon est le prochain collisionneur de plus haute priorité.* » Cela a été clairement motivé par l'intérêt scientifique :

« Compte tenu de la nature unique du boson de Higgs, il existe des arguments scientifiques convaincants en faveur d'un nouveau collisionneur électron-positon fonctionnant comme une « usine à Higgs ». Un tel collisionneur produirait de nombreux bosons de Higgs dans un environnement très propre, permettrait de réaliser des progrès spectaculaires dans la cartographie des diverses interactions du boson de Higgs avec d'autres particules et constituerait une partie essentielle d'un programme de recherche qui inclut l'exploration du puzzle des saveurs et du secteur des neutrinos. »

En réponse aux recommandations de l'ESPP, le Comité européen pour les accélérateurs futurs (ECFA - European Committee for Future Accelerators) a lancé une série d'ateliers visant à explorer plus en détail les défis du projet de l'« usine à Higgs ». L'un des objectifs de l'étude était d'approfondir notre compréhension du potentiel physique des machines considérées. L'installation a été décrite comme une « usine à Higgs, à quarks top et électrofaible », faisant référence à deux autres domaines de recherche (la physique du quark top et les études des interactions électrofaibles) où des mesures de précision à la frontière de l'énergie sont cruciales.

Après de longues discussions au sein du groupe de travail Physics Potential de l'étude, une liste de sujets dits « prioritaires » a été définie [4]. Il s'agissait de cibles prioritaires, pour lesquelles des études supplémentaires étaient nécessaires pour une compréhension complète du potentiel physique du futur collisionneur. Axés clairement sur la physique du Higgs, du top et de l'électrofaible, à la physique des particules élémentaires et à la physique électrofaible, ils ont également inclus un large éventail d'autres mesures, de la détermination de précision de la « luminosité » réelle du collisionneur à la recherche directe de phénomènes de « nouvelle physique » (effets non décrits par le SM, mais attendus dans d'autres théories). Il est important de noter que le fonctionnement du collisionneur à des énergies d'au moins 500 GeV était pertinent pour 13 des 14 sujets (voir le tableau A.1 de l'annexe). Le rapport concluant l'étude [5] a été soumis comme contribution à la mise à jour de l'ESPP de 2026.

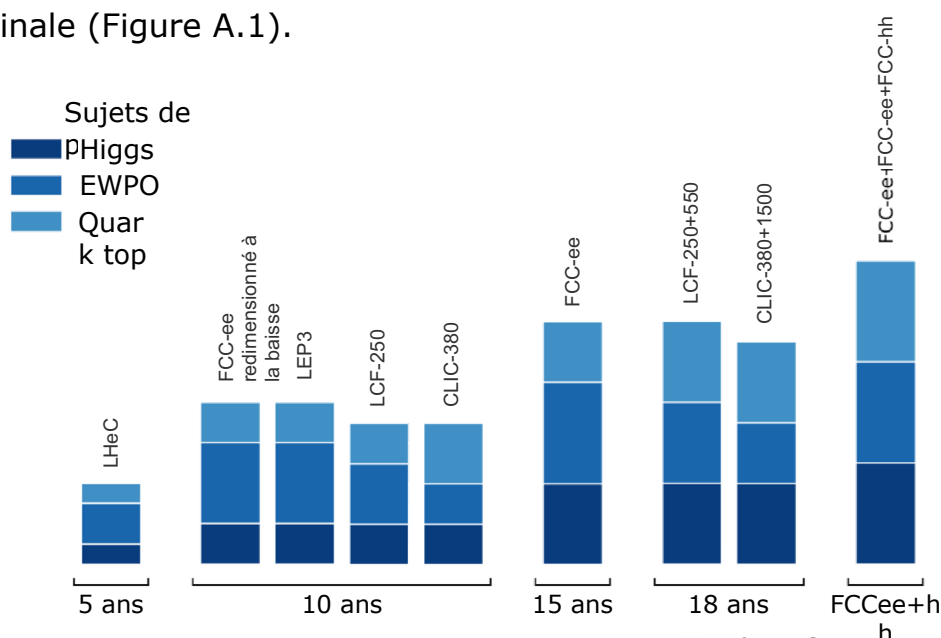
Se concentrer sur Higgs

Dans de nombreuses présentations sur le FCC-ee, l'accent a été mis sur le pôle Z fonctionnant à une intensité extrême (à une énergie de 91 GeV) et non sur la physique du boson de Higgs (usine à Higgs fonctionnant à 240 GeV et plus) ou la physique du quark top (à 350 GeV et plus). Ce changement de priorités a également été adopté pour la mise à jour de l'ESPP de 2026 et a conduit à la recommandation du FCC-ee comme option privilégiée (et également comme option alternative) pour le prochain collisionneur phare au CERN [6]. Le

document de délibération [7] confirme clairement que « *Par rapport au FCC-ee, CLIC1500 et LCF550 offriraient un programme physique plus ambitieux en physique du quark top et un programme comparable en physique du Higgs, bien qu'avec une meilleure mesure de l'auto-couplage du Higgs. En revanche, les deux collisionneurs resteraient nettement moins puissants qu'une installation de type FCC-ee en termes de production de paires de bosons électrofaibles, de physique des saveurs et de QCD de précision, qui constituent des éléments essentiels du programme physique complet pour l'exploration du Modèle standard.* »

En fait, ce sont les études de la physique des saveurs¹ et de la QCD qui permettent au FCC-ee de surpasser clairement les autres options de futurs collisionneurs sur les évaluations globales

Figure 1 : Évaluation globale des différentes options de collisionneurs futurs si seules les mesures de précision du Higgs, du quark top et de l'interaction électrofaible sont prises en compte. Figure adaptée de [8], voir l'annexe pour la figure originale (Figure A.1).



en physique par le Groupe sur la Stratégie. Si l'on ne prend en compte que les mesures de précision du Higgs, du quark top et de l'interaction électrofaible, voir la Figure 1, les options de collisionneur linéaire correspondent aux performances attendues du FCC-ee. Ce qui n'est pas encore pris en compte dans cette comparaison, c'est que les collisionneurs linéaires, lorsqu'ils fonctionnent à des énergies de 500 GeV ou plus (Linear Collider Facility (LCF) à 550 GeV ou Compact Linear Collider (CLIC) à 1 500 GeV), peuvent également mesurer directement deux paramètres SM extrêmement importants : l'auto-couplage du

¹ Branche de la physique des particules étudiant les propriétés de différents types (appelés « saveurs ») de particules fondamentales, en particulier les quarks b et c et les leptons tau.

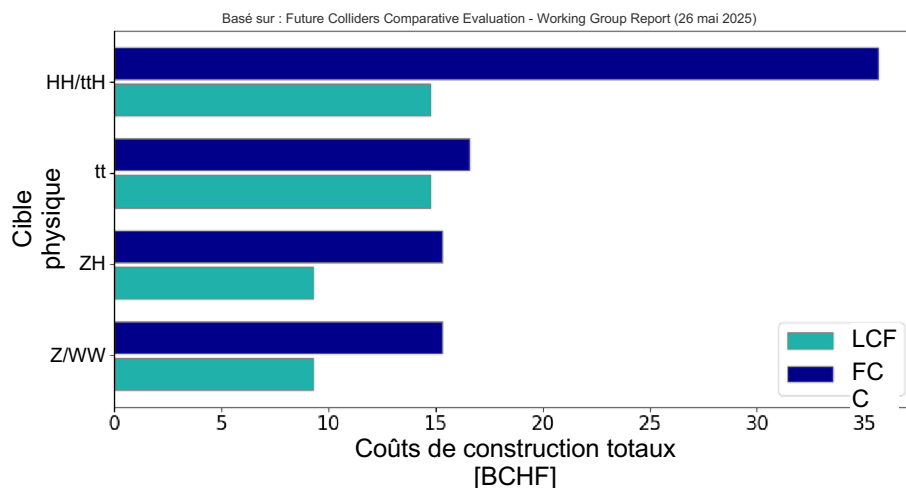
boson de Higgs et le couplage de Yukawa du quark top. Ces deux paramètres ne sont pas directement accessibles au FCC-ee (ils ne peuvent être contraints que de manière indirecte, ce qui repose toujours sur des hypothèses supplémentaires) car l'énergie de collision est trop faible.

Pour une exploration complète des secteurs du Higgs et du quark top, le FCC-ee doit être complété par le FCC-hh fonctionnant à des énergies beaucoup plus élevées, ce qui est clairement considéré comme une deuxième étape du projet, mais qui n'est généralement pas incluse lors de la présentation de son coût ou de son calendrier. En examinant simplement les coûts résumés dans [9], on peut se rendre compte que l'exploration complète de la physique du Higgs, de l'interaction électrofaible et du quark top au FCC (FCC-ee suivi du FCC-hh) sera beaucoup plus coûteuse que dans l'option LCF550, voir Figure 2.

À propos de la précision

Lorsqu'on envisage les objectifs physiques de la future usine à Higgs, deux facteurs supplémentaires doivent encore être pris en compte. Tout d'abord, il existe d'autres installations dans le monde, qui fonctionnent déjà ou qui sont en phase de construction, où les mesures de

Figure 2 : Coût total de la construction pour répondre aux différentes mesures de précision du boson de Higgs, du quark top et des phénomènes électrofaibles. Figure préparée par l'auteur sur la base des données de [9].



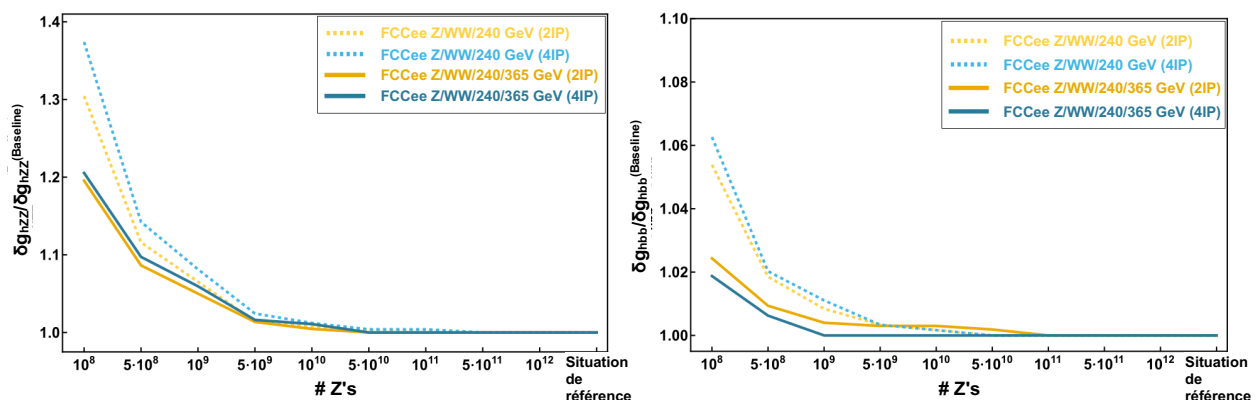
de précision en physique des saveurs et en QCD peuvent être effectuées. À noter également : l'expérience Belle II menée au collisionneur électron-positon SuperKEKB au Japon devrait fonctionner encore pendant 20 ans (y compris sa mise à niveau) et améliorer la précision de nombreuses mesures de saveur d'un ordre de grandeur, et le collisionneur électron-ion (EIC) en construction aux États-Unis, avec une large gamme d'études de précision de la QCD prévues. Également au CERN, l'expérience LHC dédiée à la physique du quark b, LHCb, améliorera considérablement la précision des mesures de saveur dans la phase

HL-LHC (High Luminosity LHC), en collectant deux ordres de grandeur d'événements impliquant des quarks lourds de plus que ce qui est possible au FCC-ee. Des progrès considérables dans ces domaines de recherche sont déjà garantis dans les prochaines décennies.

Le FCC-ee pourrait très probablement améliorer encore la précision de nombreuses mesures de la QCD et des saveurs, ainsi que des observables de précision électrofaibles. Cependant, il reste à savoir si cette augmentation est cruciale. La plus grande précision des mesures envisagées aura-t-elle un impact réel sur notre compréhension de l'Univers ? Pour chaque mesure, il existe un seuil de précision au-delà duquel notre compréhension de l'Univers est à peine affectée. Avec six mille milliards (6×10^{12}) de bosons Z produits, le FCC-ee devrait être en mesure de mesurer la masse du boson Z (91,2 GeV) avec une précision statistique de 4 keV. Mais c'est comme mesurer la distance entre Orléans et Paris (111 km) avec une précision de 5 mm. C'est possible (avec un choix approprié de points de référence dans les deux villes), mais ce n'est clairement pas pertinent pour la plupart des applications.

Nous revenons à la question des priorités. Comme le montre le rapport à mi-parcours du FCC-ee [10], voir la Figure 3, du point de vue de l'analyse des couplages de Higgs, il suffit de collecter quelques milliards (10^9) d'événements Z pour saturer approximativement la précision attendue du programme physique. Voilà aussi la raison pour laquelle

Figure 3 : Diminution estimée de la précision des couplages HZZ (à gauche) et Hbb (à droite) en raison d'une réduction du nombre d'événements Z collectés. Figure extraite du rapport intermédiaire du FCC [10].



le calendrier de fonctionnement de base pour LCF au CERN suppose la collecte de seulement 5 milliards d'événements au pôle Z. En se concentrant sur la physique du Higgs, c'est tout ce dont nous avons besoin.

Conclusions

Le programme de recherche le plus vaste possible offert par le FCC-ee a conduit à la recommandation de l'installation comme option privilégiée pour le prochain accélérateur phare du CERN. Cela dit, je pense que la recommandation d'une option alternative ne devrait pas reposer sur le même choix d'objectifs de recherche. Si nous ne parvenons pas à obtenir les ressources nécessaires au projet FCC, nous devrions plutôt reconsidérer nos priorités et réduire la liste de nos objectifs. Le futur collisionneur électron-positon est la seule option pour les mesures les plus précises du boson de Higgs et cela devrait être adopté comme objectif principal pour toute option de collisionneur alternative.

Si nous nous concentrons uniquement sur la physique du Higgs, mais aussi lorsque nous incluons le programme de recherche sur le quark top et l'électrofaible, l'option du collisionneur linéaire doit être considérée comme une alternative attrayante au FCC-ee. Le projet est abouti et techniquement réalisable, et offre un programme physique comparable à celui de FCC-ee, à un coût initial et une empreinte environnementale nettement inférieurs.

L'option LCF pour le CERN permet également une bien plus grande flexibilité. Une fois le programme physique initial achevé, différentes options de mise à niveau (tant en luminosité qu'en énergie) peuvent être envisagées, en fonction des développements technologiques, mais aussi des résultats physiques obtenus jusqu'alors (y compris les résultats finaux du HL-LHC !). Dans 25 ans, nous devrions être en mesure de prendre une décision beaucoup plus fondée sur les connaissances concernant le prochain collisionneur et l'avenir de notre domaine.

À propos de moi

Professeur titulaire à la Faculté de physique de l'Université de Varsovie, je possède 40 ans d'expérience en physique des particules expérimentale et en phénoménologie des interactions fondamentales. Mon aventure avec la physique des particules a commencé en 1986 lorsque j'ai rejoint une collaboration internationale de l'expérience ZEUS au DESY, à Hambourg. J'ai participé aux tests du prototype, à la construction et à la mise en service du détecteur. Une fois l'expérience lancée et les données collectées, mes activités se sont concentrées sur la recherche de phénomènes de « nouvelle physique » (signatures d'effets non décrits par le SM). Ceci constitue encore aujourd'hui l'un de mes principaux sujets d'intérêt.

Au fil des ans, j'ai contribué à de nombreuses études portant sur le potentiel physique de différents projets de collisionneurs futurs, notamment des collisionneurs électron-positon linéaires, des collisionneurs électron-proton et photon-photon. Depuis 2010, je suis impliqué dans les activités du groupe d'étude du concept International Large Detector (ILD). Le détecteur ILD a été initialement proposé pour le collisionneur linéaire international (ILC) au Japon, mais est désormais envisagé également pour le FCC-ee et le collisionneur linéaire au CERN. En 2015, je suis également devenu membre de la collaboration CLIC (Compact Linear Collider) et physique (CLICdp) au CERN. J'ai été nommé coordinateur du groupe de travail sur la physique de l'ILD et coordinateur du groupe de travail sur l'analyse du CLICdp, ce que je considère également comme une reconnaissance de ma contribution à ces deux collaborations.

Mes contributions à la stratégie européenne

Je participe aux discussions sur la Stratégie européenne pour la physique des particules (ESPP) depuis le « Symposium ouvert » qui s'est tenu à Orsay en 2006. En 2009-2014, j'ai été sélectionné comme représentant de la communauté polonaise des hautes énergies au sein du CEFA restreint (Comité européen pour les accélérateurs futurs). Nommé par le RECFA, j'ai participé à la première mise à jour de l'ESPP en 2013 en tant que membre du Groupe préparatoire. J'ai contribué à l'organisation du deuxième symposium ouvert à Cracovie en 2012, en rédigeant le Physics Briefing Book comme contribution au groupe sur la stratégie pour rédiger la mise à jour, et à la session de rédaction de la stratégie à Erice, en janvier 2013. J'ai également participé à la préparation des contributions de la communauté polonaise aux discussions initiales sur le PEI et aux mises à jour suivantes, y compris la dernière [11].

Mon groupe de l'Université de Varsovie a contribué au rapport final de l'étude ECFA Higgs / Top / Electroweak factory [5] soumis comme contribution à la mise à jour de l'ESPP 2026 avec les résultats de sept études différentes. J'ai

également contribué aux données soumises par le groupe d'étude ILD [12] et la collaboration LC Vision [13-14]. J'ai aussi soumis ma contribution individuelle [15] résumant mes remarques critiques sur la manière dont le processus de stratégie se déroulait.

Glossaire des acronymes

CLIC (Compact Linear Collider - Collisionneur linéaire compact) : concept d'accélérateur linéaire d'électrons et de positons développé au CERN, basé sur des cavités d'accélération à conduction normale. Trois étapes de construction/énergie ont été proposées pour CLIC : 380 GeV (**CLIC380**), 1 500 GeV (**CLIC1500**) et 3 000 GeV (**CLIC3000**).

EWPO (ElectroWeak Precision Observables - Observables de précision électrofaibles) : paramètres décrivant les interactions électrofaibles, qui peuvent être mesurés avec une grande précision dans une expérience et comparés à des calculs théoriques très précis pour contraindre les paramètres du Modèle standard ou rechercher d'éventuels écarts par rapport à ses prédictions.

ECFA (European Committee for Future Accelerators - Comité européen pour les accélérateurs futurs) : comité consultatif de la direction du CERN, du Conseil du CERN et de ses comités. L'ECFA restreint (RECFA) est composé d'un membre par pays issu de chaque État membre du CERN et agit principalement comme canal de communication avec chaque pays participant.

ESPP (European Strategy for Particle Physics - Stratégie européenne en matière de physique des particules) : élaborée pour la première fois en 2006, puis mise à jour tous les 6 à 7 ans, elle définit les grandes lignes de la physique des particules en Europe, qu'elles soient basées sur des accélérateurs ou non, et fixe les priorités à moyen et long terme du domaine.

ESG (European Strategy Group - Groupe sur la stratégie européenne) : mandaté par le Conseil du CERN pour établir une proposition pour l'ESPP (ou sa mise à jour), qui sera approuvée par le Conseil.

FCC (Future Circular Collider) : futur collisionneur circulaire proposé au CERN. Deux étapes sont envisagées pour le FCC : un collisionneur électron-positon (**FCC-ee**) avec une énergie pouvant atteindre 365 GeV et un collisionneur proton-proton (**FCC-hh**) avec une énergie pouvant atteindre 100 TeV.

ILC (International Linear Collider - Collisionneur linéaire international) : concept de collisionneur linéaire électron-positon basé sur des cavités d'accélération supraconductrices envisagé pour la construction au Japon. Deux étapes de construction/énergie ont été proposées pour l'ILC : 250 GeV (ILC250) et 500 GeV (ILC500), avec une mise à niveau possible jusqu'à 1 TeV.

LHC (Large Hadron Collider - Grand collisionneur de hadrons) : collisionneur circulaire proton-proton au CERN, en fonctionnement depuis 2009, actuellement en cours de mise à niveau pour la phase de haute luminosité (**HL-LHC**), et qui devrait fonctionner jusqu'au début des années 2040.

LCF (Linear Collider Facility - Installation de collisionneur linéaire) : concept de collisionneur linéaire électron-positon pour le CERN, basé sur des cavités d'accélération supraconductrices envisagées auparavant pour l'ILC. Deux étapes de construction/énergie ont été proposées pour LCF@CERN : 250 GeV (**LCF250**) et 550 GeV (**LCF550**).

QCD (Quantum Chromodynamics - Chromodynamique Quantique) : théorie décrivant les interactions fortes. Les interactions fortes sont responsables de la liaison des quarks à l'intérieur des protons et des neutrons (et de nombreuses autres particules appelées hadrons) et de la liaison des protons et des neutrons à l'intérieur des noyaux atomiques.

SM (Standard Model - Modèle standard) : la théorie qui combine la description des interactions électromagnétiques, faibles et fortes, et résume notre compréhension des particules fondamentales et de la structure de la matière.

Références

- [1] Strategy Brochure 2006, CERN-ESU-001, juillet 2026, <https://cds.cern.ch/record/2690118> également disponible sur le site <https://council.web.cern.ch/en/content/2006-2013>.
- [2] 2013 Update of the European Strategy for Particle Physics, préparée par le Groupe sur la stratégie européenne, CERN-Council-S/106, mai 2013, https://council.web.cern.ch/sites/default/files/European_Strategy/esc-e-106.pdf, également incluse dans la brochure de stratégie CERN-BROCHURE-2013-004-ENG, <https://cds.cern.ch/record/1553936>.
- [3] 2020 Update of the European Strategy for Particle Physics, préparée par le Groupe sur la stratégie européenne, CERN-ESU-013, juin 2020, <https://cds.cern.ch/record/2720129> également incluse dans la brochure de stratégie CERN-ESU-015, <https://cds.cern.ch/record/2721370>.
- [4] Focus topics for the ECFA study on Higgs / Top / EW factories, Jorge de Blas, Patrick Koppenburg, Jenny List, Fabio Maltoni (editors), <https://cds.cern.ch/record/2886851>, <https://arxiv.org/abs/2401.07564>.
- [5] ECFA Higgs, electroweak, and top factory study, Aidan Robson, Christos Leonidopoulos (eds.), CERN Yellow Reports: Monographs, CERN-2025-005, <https://cds.cern.ch/record/2936148>, <https://arxiv.org/abs/2506.15390>, <https://doi.org/10.23731/CYRM-2025-005>.
- [6] The European Strategy for Particle Physics: 2026 Update - Recommendations by the European Strategy Group, CERN-ESU-2025-002, <https://cds.cern.ch/record/2950671>, <http://dx.doi.org/10.17181/CERN.423R.S20Z>.
- [7] The European Strategy for Particle Physics: 2026 Update - Deliberation document by the European Strategy Group, CERN-ESU-2026-003, <https://cds.cern.ch/record/2957411>, <http://dx.doi.org/10.17181/CERN.F5VS.K3VW>.
- [8] Towards a Future Flagship Collider at CERN - The European Strategy for Particle Physics, Karl Jakobs (Strategy Secretary) for the European Strategy Group, CERN Colloquium, 26 février 2026, <https://indico.cern.ch/event/1650119/>.
- [9] Comparative evaluation of future collider options, G. Arduini et al. (Future Colliders Comparative Evaluation Working Group), CERN Yellow Reports: Monographs, CERN-2025-011, <https://cds.cern.ch/record/2952921>, <https://arxiv.org/abs/2511.20417>, <https://doi.org/10.23731/CYRM-2025-0011>.
- [10] FCC Midterm Report, B. Auchmann et al., CERN, mai 2024, <https://repository.cern/records/511pr-rd590> (accès restreint).
- [11] Polish national input to the 2026 update of the European Strategy for Particle Physics, K. Adamczyk et al., <https://arxiv.org/abs/2504.20257>.
- [12] The ILD Detector: A Versatile Detector for an Electron-Positron Collider at Energies up to 1 TeV, H. Abramowicz et al., submitted to the 2026 ESPP Update, <https://arxiv.org/abs/2506.06030>.
- [13] A linear collider vision for the future of particle physics, H. Abramowicz et al. (Linear Collider Vision Collaboration), submitted to the 2026 ESPP Update, Eur.Phys.J.ST 235 (2026) 6, 1641-1796, <https://doi.org/10.1140/epjs/s11734-026-02153-w>, <https://arxiv.org/abs/2503.19983>.
- [14] The Linear Collider Facility (LCF) at CERN, H. Abramowicz et al. (Linear Collider Vision Collaboration), submitted to the 2026 ESPP Update, <https://arxiv.org/abs/2503.24049>.
- [15] To build or not to build: FCC, A.F. Żarnecki, submitted to the 2026 ESPP Update, <https://arxiv.org/abs/2504.20267>.

Annexe

Tableau A.1 : Aperçu des thèmes d'étude de l'ECFA et des énergies de centre de masse pertinentes. Les énergies applicables au sujet considéré sont indiquées par un « ✓ ». Tableau tiré de [4].

Thème	Groupe de référence	Relevant $\sqrt{s}$ [GeV]				
		91	161	240-250	350-380	≥ 500
1 HtoSS	HTE			✓	✓	✓
2 ZHang	HTE (GLOB)			✓	✓	✓
3 Hself	GLOB			✓	✓	✓
4 Wmass	PREC		✓	✓	✓	✓
5 WWdiff	GLOB			✓	✓	✓
6 TTthres	GLOB (HTE)				✓	✓
7 LUMI	PREC	✓	✓	✓	✓	✓
8 EXscalar	SRCH			✓	✓	✓
9 Sociétés à responsabilité limitée (SARL)	SRCH	✓	✓	✓	✓	✓
10 EXtt	SRCH				✓	✓
11 CKMWW	FLAV		✓	✓	✓	✓
12 BKtautau	FLAV	✓				
13 TwoF	HTE (PREC)	✓	✓	✓	✓	✓
14 BCfrag et Gsplit	PREC (FLAV)	✓	✓	✓	✓	✓

Figure A.1 : Évaluation globale de la physique des différentes options de collisionneurs futurs en termes de physique de précision, telle que présentée par Karl Jakobs lors du Colloque sur la stratégie européenne au CERN, en février 2026 [8]. Également inclus dans [7].

