

# **Les accélérateurs du CERN: aujourd'hui vers les prochaines décennies**

**Malika Meddahi**

- 1. Le programme scientifique du CERN**
- 2. L'actualité: les objectifs 2022 sont-ils déjà atteints pour les accélérateurs du CERN?**
- 3. Des projets du futur ancrés dans la coopération internationale**
- 4. Notre avenir : le pilier du savoir et de sa transmission**

# Session CERN : sujets clés pour un solide futur de la physique des accélérateurs

- Stratégie du CERN pour une recherche respectueuse de l'environnement – Benoît Delille
- Dipôles à haut champ pour les accélérateurs de particules – Ezio Todesco
- Impact sociétal de la recherche au CERN – Maurizio Vretenar

# 1- Programme scientifique du CERN

Basé sur la mise à jour 2020 de la Stratégie Européenne pour la Physique des Particules => 3 piliers CERN

1- Exploitation du LHC: RUN3 & HL-LHC

- RUN3: 2022-25; 13.6 TeV c.d.m, 250 fb<sup>-1</sup> (ATLAS et CMS), 25-30 fb<sup>-1</sup> (LHCb), 7 nb<sup>-1</sup> (ALICE, Pb-Pb);
- HL-LHC: 2029-2042, ~3000 fb<sup>-1</sup> (ATLAS et CMS).

2- Programme scientifique complémentaire aux expériences du LHC

- Expériences au Booster, PS, SPS ;
- Participation aux projets neutrinos basés sur les accélérateurs (LBNF/DUNE) à travers la Plateforme Neutrino du CERN;
- D'autres opportunités discutées dans le cadre du groupe de travail 'physique au delà des collisionneurs'.

3- Préparation du future du CERN

- Programme intense de R&D pour les accélérateurs (incl. aimants supraconducteurs à haut champ, radio fréquence, ondes de champ plasma ...);
- L'Etude de faisabilité d'un futur collisionneur circulaire (FCC) (rapport final attendu en déc. 2025);
- R&D et études de conception pour d'autres scénarii: p.ex. CLIC, collisionneurs de Muons.

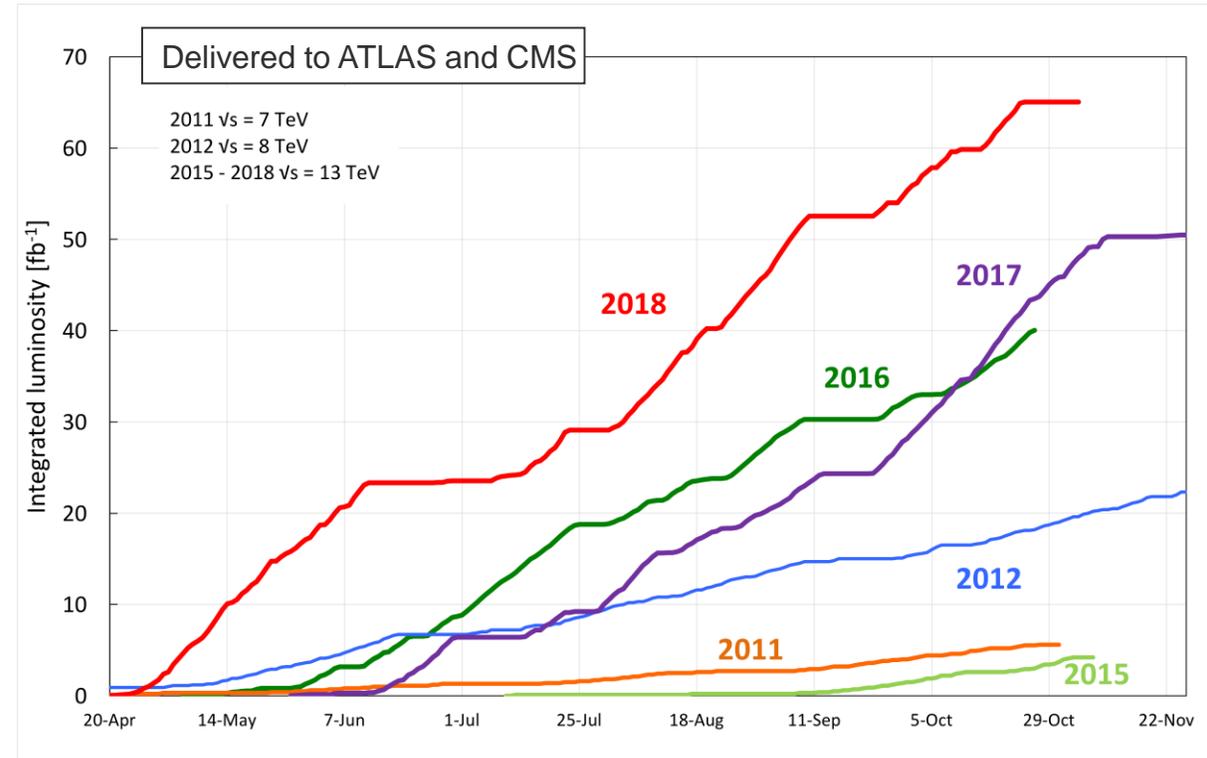
Nouvelles contributions attendues fin 2025 pour une mise à jour de la stratégie vers 2026-2027

## 2- Exploitation des accélérateurs du CERN : LHC

	Période	Luminosité intégrée	Energie c.d.m
RUN 1	2010 - 2012	~ 30 fb <sup>-1</sup>	7 - 8 TeV
RUN 2	2015 - 2018	~ 160 fb <sup>-1</sup>	13 TeV
RUN 3	2022 - 2025	~ 250 fb <sup>-1</sup> (objectif)	13.6 TeV

Luminosité pic durant le RUN 2 :  $2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (le double de la valeur de conception).

Luminosité RUN 1+2 (190 fb<sup>-1</sup>) ne représente que ~6% de la luminosité intégrée totale attendue à la fin de l'opération du HL-LHC.



RUN 3 a démarré le 5 juillet 2022 avec les 1<sup>ères</sup> collisions à 13.6 TeV – 11 fb<sup>-1</sup> intégrée aujourd'hui pour un objectif de 25 fb<sup>-1</sup> en 2022.

# 2- Exploitation des accélérateurs du CERN : injecteurs

Fournir aux utilisateurs les faisceaux d'aujourd'hui tout en préparant ceux de demain.

Ambitieuses valeurs cibles pour les paramètres faisceaux attendus aux portes du HL-LHC:

Paramètres faisceau @ l'entrée du LHC à l'injection	$N_b$ ( $\times 10^{11}$ p/b)	$\varepsilon_{x,y}$ ( $\mu\text{m}$ )	Espacement entre les paquets	Nombre de paquets
Performance cibles du HL-LHC	2.3	2.1	25 ns	4x72 par injection
Performance avant Long Arrêt 2 (LS2)	1.3	2.7	25 ns	4x72 par injection

Projet 'Amélioration des injecteurs du LHC' (LIU) - 2011-2021: Objectifs:

- Définir les modifications nécessaires pour surmonter les limitations des performances faisceaux dans tous les injecteurs afin que le jeu de paramètres requis puisse être atteint ;
- Effectuer les modifications identifiées;
- Remettre en service les injecteurs à la performance du pré-LS2 puis graduellement aux valeurs cibles 'LIU'.

# 2- Exploitation des accélérateurs du CERN : injecteurs

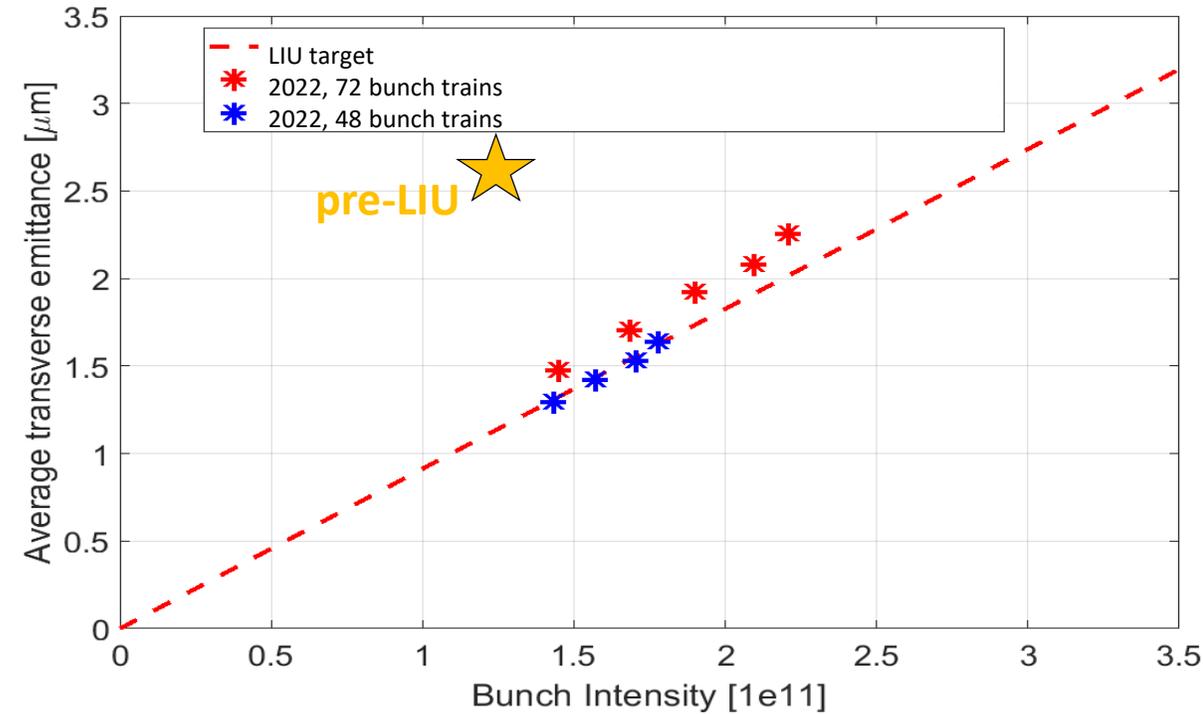
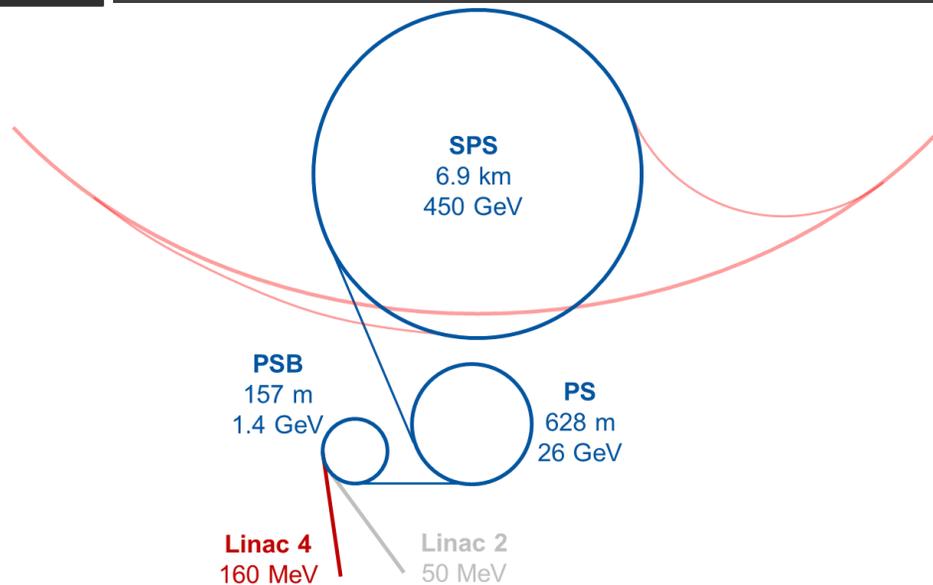
- LIU a commencé en 2010 et a été officiellement achevé en 2021
  - Les équipements de référence ont été définis jusqu'en 2016, puis conçus et produits ;
  - Les études de faisceau ont parfois nécessité des peaufinages.
- L'installation des équipements a principalement eu lieu pendant le long arrêt technique 2 (2019-2020). Pour alléger l'énorme charge de travail à effectuer dans toute la chaîne des injecteurs, quelques travaux d'installation ont été avancés aux arrêts techniques de fin d'années précédents. Cela a aussi permis de valider des hypothèses faites sur la base de simulation, par le biais de mesures faisceaux dans les accélérateurs.
- Le projet a été réalisé selon le calendrier initial, malgré la crise sanitaire.
- Le projet a été achevé en 2021, avec une économie de 2,4 MCHF sur un coût total à l'achèvement de 180 MCHF.

# 2- Exploitation des accélérateurs du CERN : injecteurs

Nouveau système d'amplificateurs à semi-conducteurs développé par le CERN avec l'entreprise Thales Gércac comprend 32 tours dans lesquelles 2560 modules RF contenant chacun quatre transistors sont installés. L'ensemble fournit une puissance RF de deux fois 1,6 mégawatt aux cavités.

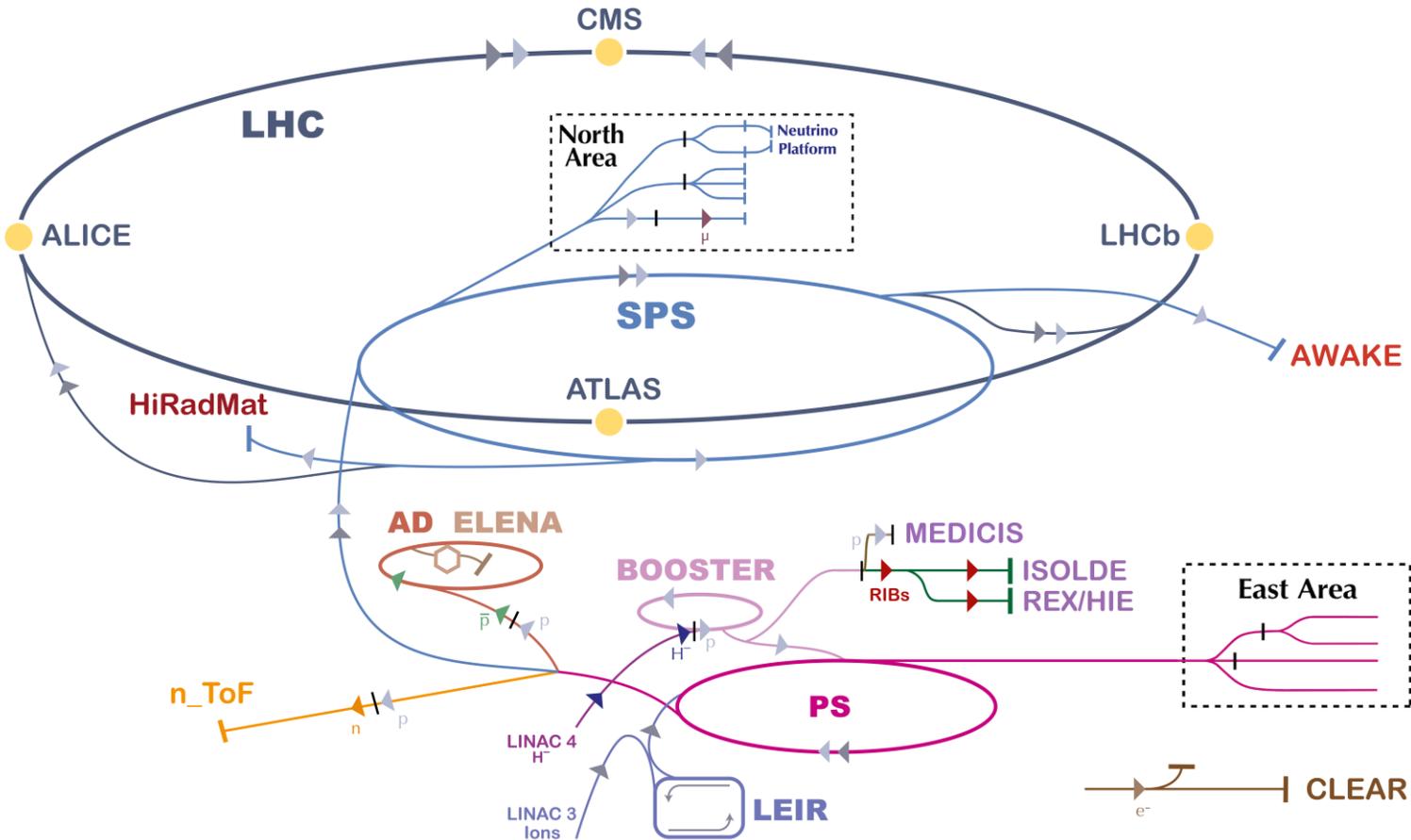


Projet d'amélioration du système d'accélération du SPS 200 MHz RF: intensité accrue nécessitant une puissance radiofréquence accrue



En 2022, le SPS a extrait  $1,8\text{e}11$  p/b avec la luminosité et la longueur de paquet requises, conformément au plan de montée en puissance du LIU.  $2.3\text{e}11$  p/b sont aujourd'hui stables sur le plateau d'énergie d'injection.

# 2- Programme scientifique complémentaire au LHC



**AD/ELENA:** Antiproton Decelerator for antimatter studies

**CAST, OSQAR:** axions

**CLOUD:** impact of cosmic rays on clouds → implications on climate

**COMPASS:** hadron structure and spectroscopy

**ISOLDE:** radioactive nuclei facility

**NA61/Shine:** heavy ions and neutrino targets

**NA62:** rare kaon decays

**NA63:** interaction processes in strong EM fields in crystal targets

**NA64:** search for dark photons

**NA65:**  $\tau$ -neutrino production from  $D_s$  decays

**Neutrino Platform:**  $\nu$  detectors R&D for experiments in US, Japan

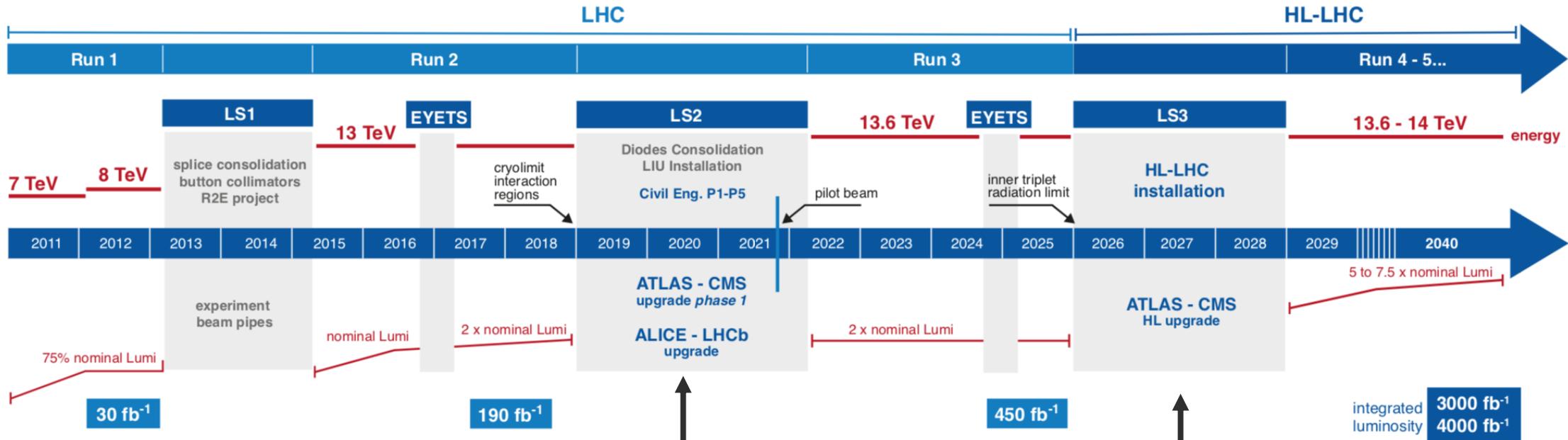
**n-TOF:** n-induced cross-sections

**UA9:** crystal collimation

~20 projets, ~ 2000 physiciens

▶  $H^-$  (hydrogen anion) ▶ p (protons) ▶ ions ▶ RIBs (Radioactive Ion Beams) ▶ n (neutrons) ▶  $\bar{p}$  (antiprotons) ▶  $e^-$  (electrons)

# 3- Préparer le futur immédiat : HL-LHC



**LS2**  
 Phase d'installation du projet LIU achevée  
 Phase-1 de l'amélioration des détecteurs: majeure pour LHCb et ALICE

**LS3**  
 Installation des équipements HL-LHC  
 Phase-2 de l'amélioration des détecteurs ATLAS et CMS

LHCb et ALICE prévoient de nouvelles améliorations majeures en LS4 (2033-2034)

# 3- Préparer le futur immédiat : HL-LHC

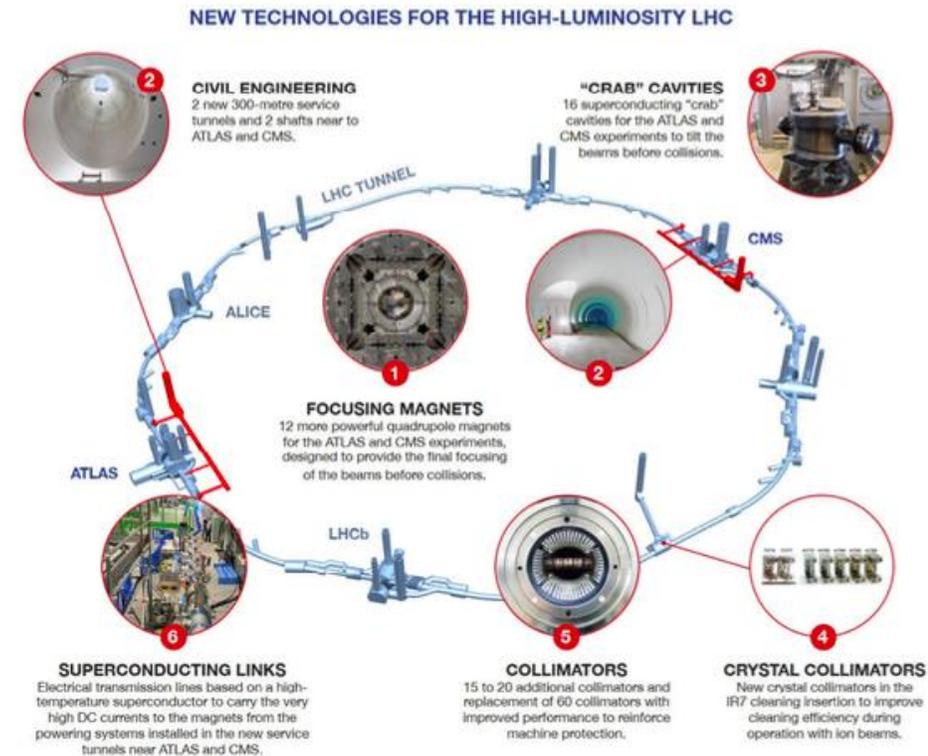
~1,2 km de machine en cours de modernisation avec de nombreuses nouvelles technologies.

- ~ 50% du projet réalisé, avec en particulier, tous les travaux de génie civil souterrains achevés pendant le LS2
- Prototypes achevés et production lancée pour de nombreux composants

**Nouveaux quadripôles en Nb<sub>3</sub>Sn (12 T) pour les triplets de focalisation finale au niveau des détecteurs de physique:**

- 4 aimants de pleine longueur (4,2 m) construits et testés avec succès aux États-Unis;
- 2 aimants de longueur finale (7,2 m): un énorme travail est en cours au CERN pour atteindre les objectifs et ce processus est aussi fondamental pour les projets du futur. Encourageants résultats avec 16.5 kA atteint (cible à 1.9K) pour le prototype MQXFBP3.

**Une étape essentielle vers des aimants de ~ 16T pour les futurs collisionneurs de hadrons et pour d'autres applications.**

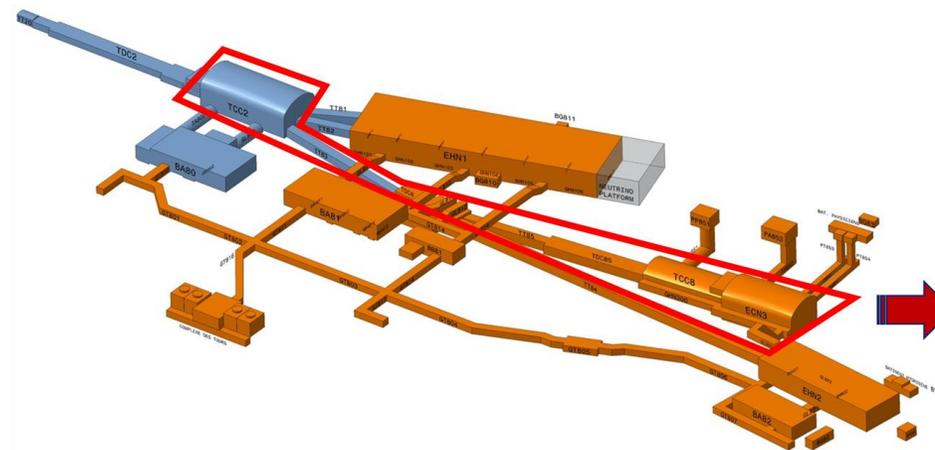


# 3- Préparer le futur immédiat : Explorer de nouvelles opportunités

Rénovation de la Zone Nord pour l'opération de faisceaux de plus haute intensité :

- jusqu'à  $\sim 4e19$  POT/an (extraction lente) disponibles après le LS3
- Intérêt actuel : physique des kaons (HIKE), expériences d'extraction de faisceaux vers des absorbeurs pour le domaine du 'secteur sombre' et autres études (SHADOW, SHiP...)

Consolidation Phase 1 (funded): 2019 – 2027



Consolidation Phase 2 (not yet funded): 2028 – 2033

# 3- Préparer le futur immédiat : La Plateforme Neutrino du CERN

Établie en 2014, suite à la mise à jour de l'ESPP en 2013 :

*"Le CERN devrait élaborer un programme pour les neutrinos afin d'ouvrir la voie à un rôle européen substantiel dans les futures expériences neutrinos à longue distance. L'Europe devrait explorer la possibilité d'une participation majeure aux projets de pointe sur les neutrinos à longue distance aux États-Unis et au Japon."*

~ 900 collaborateurs de ~30 pays

## Principales activités de la Plateforme

### Neutrino :

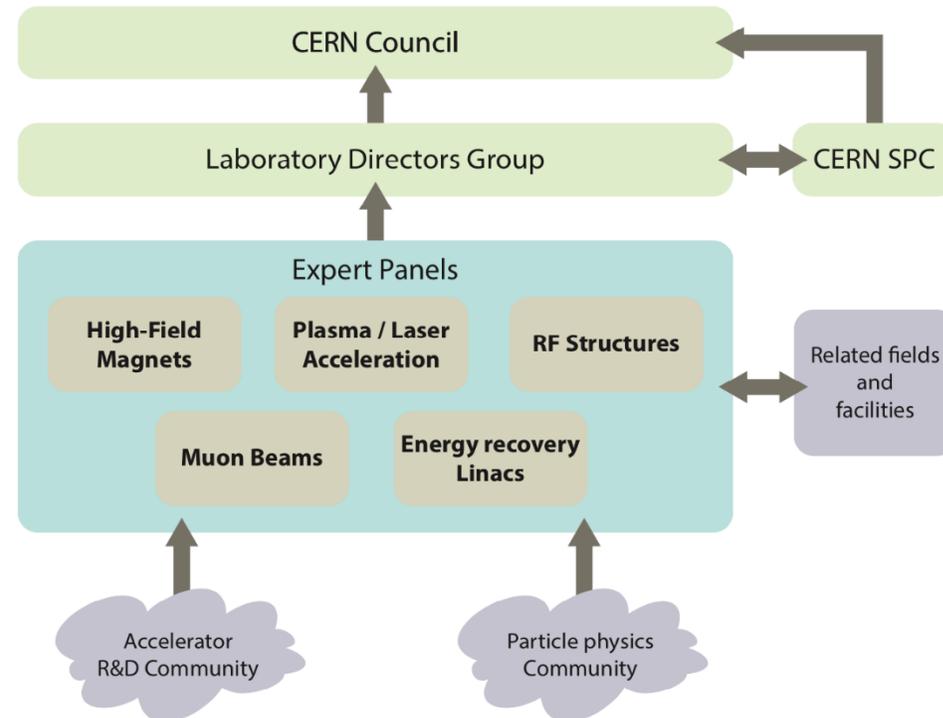
- Extensions du hall EHN1 dans la zone Nord pour fournir de l'espace et des installations de faisceau pour les détecteurs  $\nu$ .
- Remise à neuf du détecteur ICARUS pour le programme de neutrino à courte distance de Fermilab.
- Construction et exploitation de deux prototypes pour DUNE -> crucial pour établir la faisabilité du détecteur, valider la technologie et finaliser les choix techniques
- Construction de cryostats pour deux (sur quatre) modules de DUNE.
- Construction des détecteurs Baby-Mind et ND280 pour l'expérience T2K au Japon.



# 3- Préparer le futur ‘plus lointain’

Suite à la recommandation du ESPP, les feuilles de route ont été élaborées en Europe et approuvées par le Conseil du CERN en décembre 2021.

Plans de mise en œuvre en cours d’élaboration ainsi que les structures organisationnelles ->L’investissement dans la R&D est essentiel pour l’avenir du domaine.



# 3- Etude de Faisabilité du FCC – 2021 - 2025

## Mise à jour de 2020 de la stratégie Européenne pour la Physique des Particules :

*« Une usine de Higgs électron-positon est le prochain collisionneur prioritaire. À plus long terme, la communauté européenne de la physique des particules a l'ambition d'exploiter un collisionneur proton-proton à la plus haute énergie possible. »*

*“L'Europe, en collaboration avec ses partenaires internationaux, devrait étudier la faisabilité technique et financière d'un futur collisionneur de hadrons au CERN avec une énergie c.d.m. d'au moins 100 TeV et avec une usine à Higgs électron-positon et une usine électrofaible comme première étape possible.*

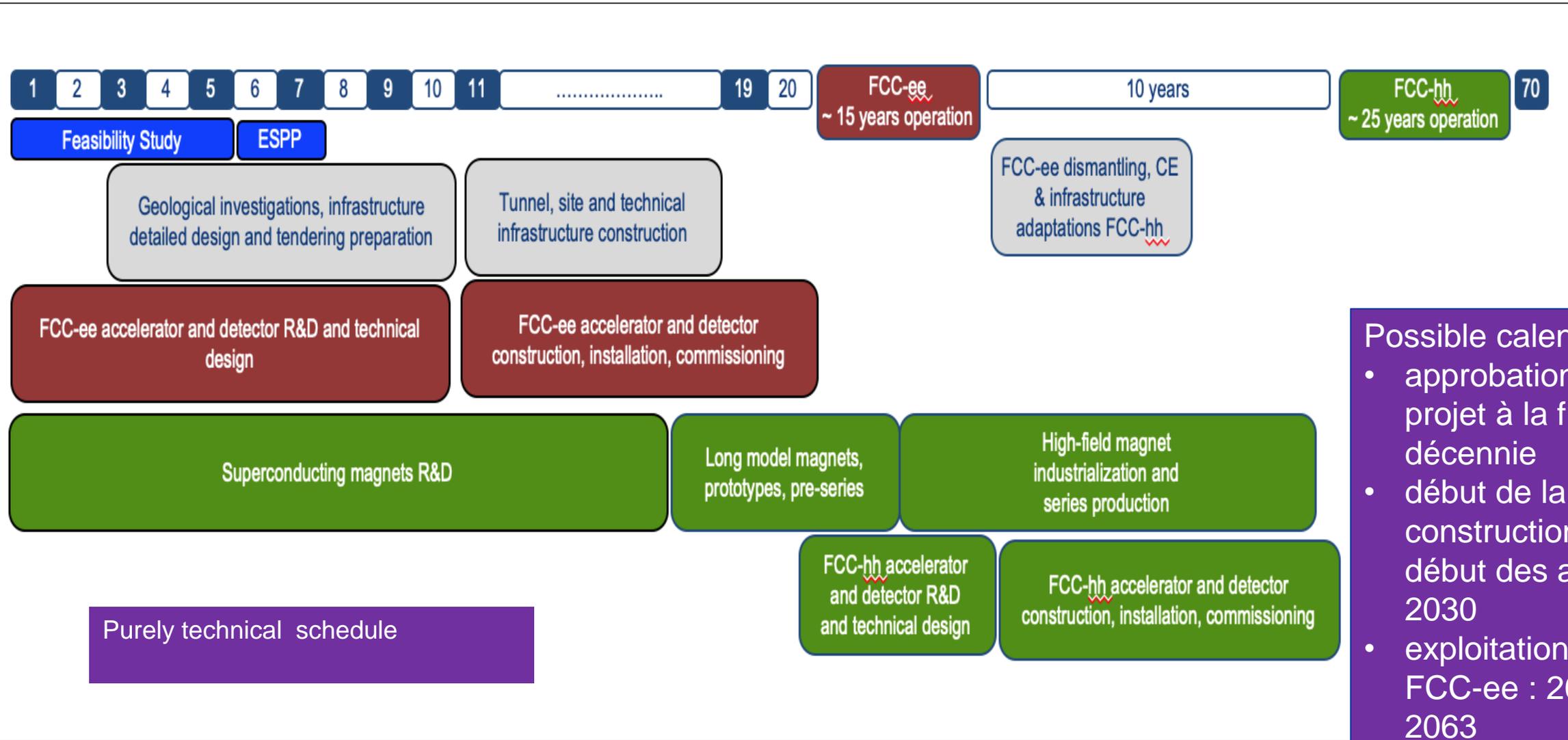
*« Une telle étude de faisabilité des collisionneurs et de l'infrastructure connexe devrait être établie dans le cadre d'une entreprise mondiale et être achevée dans les délais de la prochaine mise à jour de la Stratégie. »*

**L'étude de faisabilité a commencée en 2021 et sera terminée fin 2025.**

# 3- Etude de Faisabilité du FCC - Objectifs principaux

1. Démonstration de la faisabilité géologique, technique, environnementale et administrative du tunnel et des surfaces et optimisation de l'emplacement et de l'aménagement de l'anneau et des infrastructures connexes
2. Poursuite, en collaboration avec les États hôtes, des processus administratifs préparatoires requis pour l'approbation d'un éventuel projet afin d'identifier et d'éliminer tout obstacle
3. Optimisation de la conception des collisionneurs FCC-ee et FCC-hh et de leurs chaînes d'injecteurs, soutenue par la R&D pour développer les technologies clés nécessaires
4. Élaboration d'un modèle opérationnel durable pour la machine et expériences en termes de besoins en ressources humaines et financières, ainsi que d'aspects environnementaux et d'efficacité énergétique
5. Élaboration d'une estimation consolidée des coûts, ainsi que des modèles de financement et d'organisation nécessaires pour permettre l'achèvement, la mise en œuvre et l'exploitation de la conception technique du projet (accent mis sur FCC-ee)
6. Identification de ressources substantielles en dehors du budget du CERN pour la mise en œuvre du projet de la première phase (tunnel et FCC-ee)
7. Consolidation des concepts de cas physique et de détecteur (en particulier les exigences et les technologies de détection FCC-ee)
8. Collaboration FCC : 147 instituts (dont 12 des États-Unis) de 34 pays. De nombreuses opportunités de travail intéressant (nouveaux concepts de détecteurs, technologies d'accélérateur, impact environnemental et durabilité, etc.)

# 3- Etude de Faisabilité du FCC – Possible calendrier



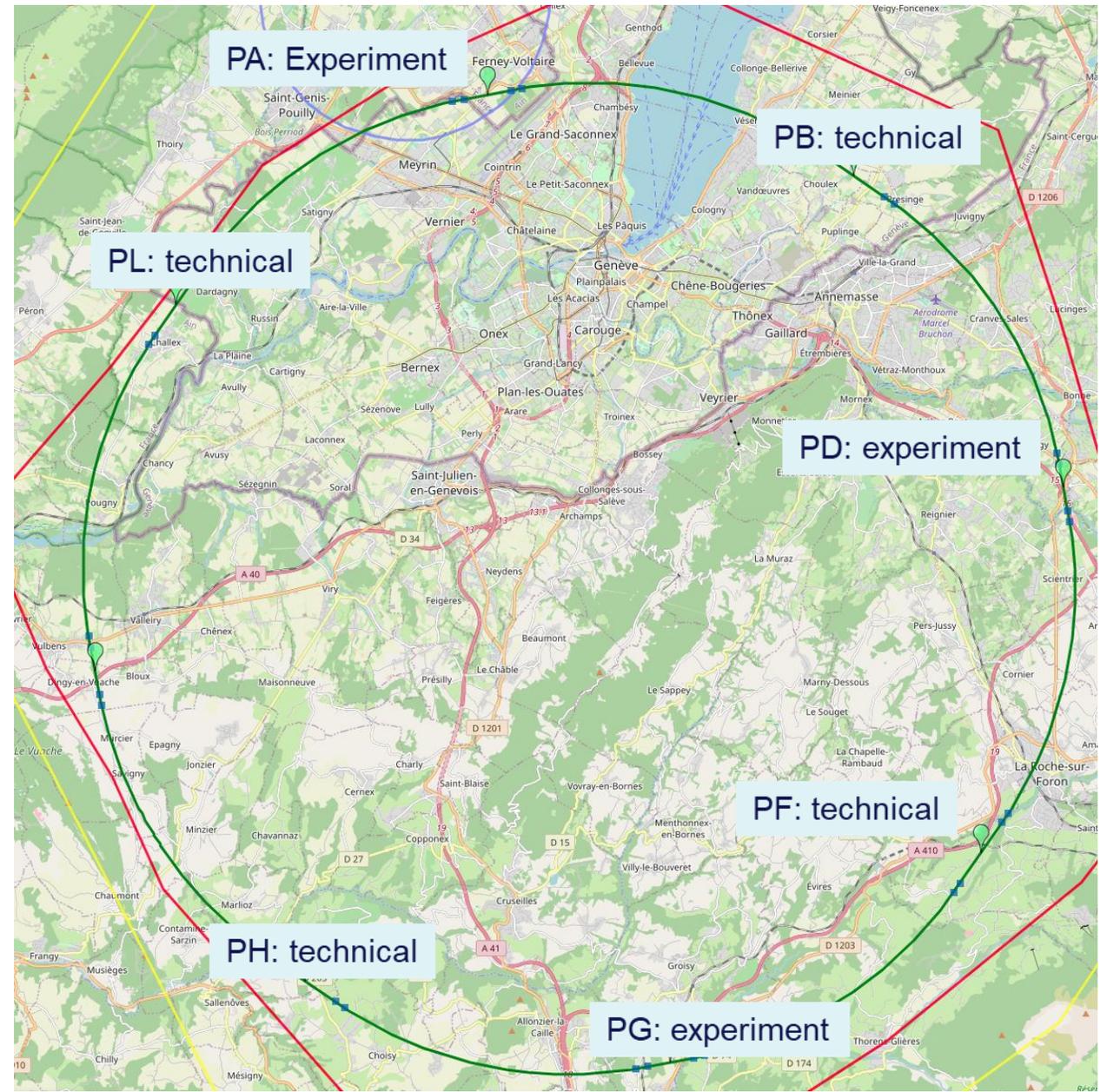
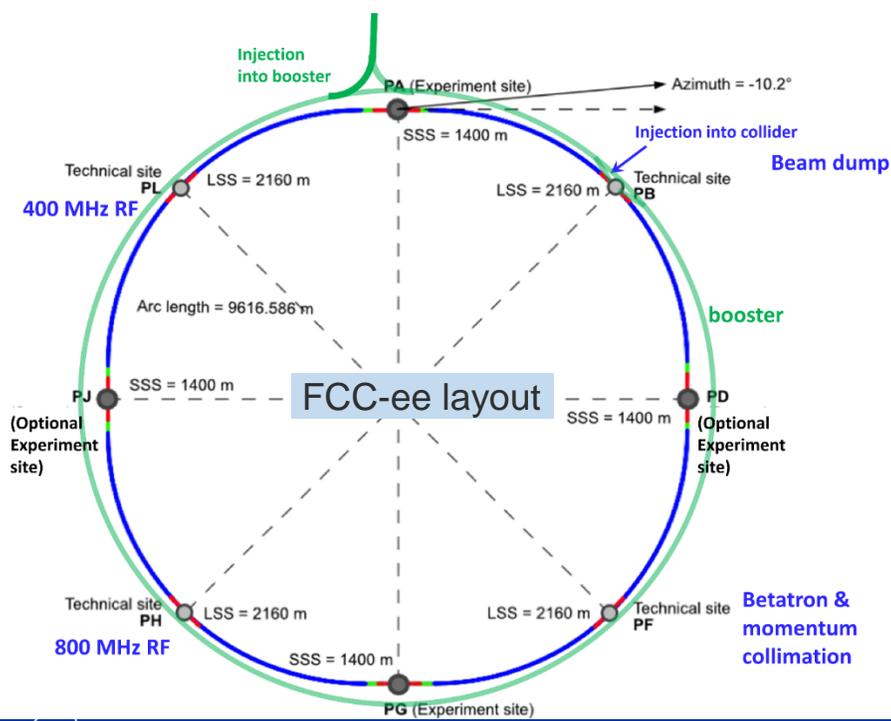
Possible calendrier :

- approbation du projet à la fin de la décennie
- début de la construction au début des années 2030
- exploitation du FCC-ee : 2048-2063

# Étape majeure récente : l'optimisation du placement des anneaux. "Éviter, réduire, compenser"

- Faite sur la base de ~ 50 variantes initiales, basées sur la géologie et les contraintes de surface (disponibilité des terrains, accès aux routes, etc.), environnement (zones protégées), infrastructures (eau, électricité, transports), etc.
- Enquête sur le site : 9 zones à haut risque identifiées (à étudier plus avant avec ~ 40 forages et 100 km de lignes sismiques)

Anneau de base: anneau de 91,1 km, 8 points de surface – travail en cours.



# 3- CLIC et Collisionneur Muons – Objectifs 2021-25

## CLIC:

- finaliser la technologie RF en bandes X pour être prêt pour la production (conditionnement de la structure accélératrice et fabrication)
- améliorer l'efficacité énergétique (p.ex. klystrons)
- optimiser la luminosité (études de dynamique des faisceaux, alignement et stabilité de la machine, etc.)
- ->« Rapport sur l'état de préparation des projets » rendu d'ici la fin de 2025 (en tant que contribution à la prochaine ESPP)

## Collisionneur de muons :

- travailler sur les principaux défis, y compris la source et le refroidissement des muons, les aimants avec montée en champ rapide, les anneaux d'accélérateur et de collisionneur, le bruit de fond neutrinos et le génie civil
  - > déterminer d'ici la fin de 2025 (en tant que donnée pour la prochaine ESPP) si l'investissement dans des tests plus poussés pour un collisionneur de muons et un CDR est justifié d'un point de vue scientifique
- étude initialement hébergée par le CERN.

# 4- Le pilier du savoir et de sa transmission: Opportunités pour les étudiants

Opportunités pour étudiants	Domaines	Durée	Eligibilité	Caractéristiques	Ouverture à candidatures
Stagiaires (100/an)	Physique appliquée, ingénierie, informatique	Max. 6 mois	Etudiant à plein temps, 1 <sup>er</sup> cycle universitaire	Projet avec superviseur CERN	11/2022
Etudiants techniques (200/an)	Physique appliquée, ingénierie, informatique	4 à 12 mois	Avoir accompli 18 mois d'études de 1 <sup>er</sup> cycle	Projet avec superviseur CERN	08/2022 au 7/11/2022
Etudiants d'été (300/an)	Physique, ingénierie, informatique	8 à 13 semaines en été	Avoir accompli 3 ans d'études de 1 <sup>er</sup> cycle	Conférences, visites, ateliers	11/2022 à 01/2023
Doctorants (80/an)	Physique appliquée, ingénierie, informatique	6 mois à 3 ans	Inscrit dans un programme de doctorat	Projet menant à une thèse, 2 directeurs de thèse (Université /Ecole et CERN)	08/2022 – 7/11/2023

# 4- Le pilier du savoir et de sa transmission: Opportunités pour les nouveaux diplômés – ORIGIN et QUEST

*ORIGIN: le point où l'on prend son élan professionnel.*

## Donner un véritable élan à sa carrière.

Continuer son apprentissage avec un emploi offrant le soutien et les conseils du superviseur et d'une l'équipe CERN.

Durée: 6 – 36 mois

Comité de sélection: 4x/an: novembre – mars – mai – août

### Eligibilité:

- Candidats des Etats membres et des Etats membres associés
- Études spécialisées/diplôme de technicien ou Bachelor ou Master; moins de 2 ans d'expérience

*QUEST: une quête plus approfondie de la connaissance.*

## Approfondir ses connaissances et son expertise.

Travailler sur un projet proposé bien précis, sous la supervision d'expert, au sein d'une équipe. Développement du réseau professionnel dans les domaines d'intérêt. Possibilité de superviser un étudiant.

Durée: 6 – 36 mois

Comité de sélection: 2x/an: mars et octobre

### Eligibilité:

- Candidats des Etats membres et des Etats membres associés - (exceptionnellement possible pour des candidats des Etats non membres)
- Master 2 à 6 ans d'expérience
- Doctorat avec 3 ans maximum d'expérience

**CERN recrute environ 250 nouveaux diplômés chaque année**

# 4- Le pilier du savoir et de sa transmission: Opportunités pour les nouveaux diplômés – Boursiers de recherche

## Approfondir ses connaissances et son expertise.

Travailler avec des experts de classe mondiale. Possibilité d'obtenir une visibilité internationale et de développer un réseau dans la communauté scientifique. Ce programme doit avoir un impact sur l'ensemble de la carrière universitaire.

Durée: 6 – 36 mois

Comité de sélection: 2x/an: novembre et mai

Eligibilité:

- Sujet de recherche postdoctorale à soumettre, soit en physique des particules, soit en physique appliquée ou en ingénierie
- Candidats des Etats membres et des Etats membres associés - (exceptionnellement possible pour des candidats des Etats non membres)
- Doctorat avec 6 ans maximum d'expérience

# Mots de conclusion

Le CERN dispose d'un programme scientifique vaste et passionnant :

- Avec le LHC qui fonctionnera jusqu'en ~2042;
- Avec les installations et les expériences du complexe des injecteurs, complémentaires du collisionneur, au service d'une large communauté;
- Grâce à une R&D vigoureuse et des études de conception pour les futures installations.

Le programme ESPP 2020 a identifié le Futur Collisionneur Circulaire comme l'option préférée au CERN pour un prochain collisionneur post-LHC.

- Un potentiel physique immense, mais aussi un projet très difficile et ambitieux;
- L'étude de faisabilité a commencé et sera achevée à la fin de 2025;
- L'accent est mis sur le FCC-ee et la R&D sur les aimants.

D'autres options sont également étudiées.

Pour maintenir l'intérêt pour le CERN et motiver la communauté (en particulier les jeunes), il est crucial de :

- Eviter un temps trop important entre la fin du HL-LHC vers 2042 et le début de la physique dans une nouvelle installation (vers ~2045)
- Construire une nouvelle installation parallèlement à l'exploitation du HL-LHC où la nouvelle génération pourra travailler sur l'analyse des données du HL-LHC et la R&D pour la construction de la nouvelle installation.

Les accélérateurs d'aujourd'hui forment notre patrimoine et notre socle de demain.

Le succès de la physique des accélérateurs se construit ensemble, avec des collaborations et partenaires internationaux, la France ayant une position clé aussi du fait de son statut d'Etat hôte;

Il n'y aura pas de futur projet scientifique d'envergure sans une politique réfléchie de maîtrise de l'énergie, incluant une incitation forte à l'efficacité énergétique et à la récupération d'énergie parmi les objectifs majeurs. Une première étape est en place avec une sélection de programmes spécifiques de consolidation des infrastructures/machines existantes, permettant aussi d'acquérir une expertise dans ce domaine.



# La science au service de la paix

## Le CERN a été fondé en 1954 avec 12 États membres européens

### 23 États membres

Allemagne, Autriche, Belgique, Bulgarie, Danemark, Espagne, Finlande, France, Grèce, Hongrie, Israël, Italie, Norvège, Pays-Bas, Pologne, Portugal, République tchèque, Roumanie, Royaume-Uni, Serbie, Slovaquie, Suède et Suisse.

### 3 États membres associés en phase préalable à l'adhésion

Chypre, Estonie, Slovaquie

### 7 États membres associés

Croatie, Inde, Lettonie, Lituanie, Pakistan, Turquie, Ukraine

### 6 Observateurs

États-Unis, Japon, Russie  
Union européenne, JINR, UNESCO



### Plus de 50 accords de coopération avec des États et territoires non-membres

Afrique du Sud, Albanie, Algérie, Arabie Saoudite, Argentine, Arménie, Australie, Azerbaïdjan, Bangladesh, Bélarus, Bolivie, Bosnie-Herzégovine, Brésil, Canada, Chili, Colombie, Costa Rica, Égypte, Émirats Arabes Unis, Équateur, Géorgie, Iran, Islande, Jordanie, Kazakhstan, Lettonie, Liban, Macédoine du Nord, Malte, Maroc, Mexique, Mongolie, Monténégro, Népal, Nouvelle Zélande, Palestine, Paraguay, Pérou, Philippines, Qatar, République de Corée, République populaire de Chine, Sri-Lanka, Thaïlande, Tunisie, Vietnam.

Le budget annuel du CERN s'élève à 1 200 MCHF (l'équivalent du budget d'une université européenne de taille moyenne)

Au 31 décembre 2020

Employés :  
**2 635** titulaires, **756** boursiers

Associés :  
**11 399** utilisateurs, **1 687** autres

# Un laboratoire pour le monde

Répartition des utilisateurs du CERN selon le pays de l'institut dont ils dépendent, au 31 décembre 2020



Diversité géographique et culturelle  
Des utilisateurs de 110 nationalités différentes  
~ 23 % de femmes

## États membres 6632

Allemagne 1185 – Autriche 82 – Belgique 122 – Bulgarie 37  
Danemark 35 – Espagne 325 – Finlande 79 – France 794  
Grèce 138 – Hongrie 67 – Israël 63 – Italie 1388 – Norvège 78  
Pays-Bas 166 – Pologne 272 – Portugal 80 – Roumanie 99  
Royaume-Uni 875 – Serbie 35 – Slovaquie 66  
Suède 96 – Suisse 329 – Tchéquie 221

## États membres associés 27

en phase préalable à l'adhésion  
Chypre 11 – Slovénie 16

## États membres associés 390

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

## Observateurs 3071

États-Unis d'Amérique 1839 – Japon 211 – Russie 1021

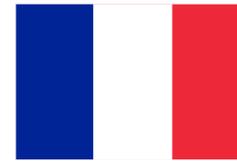


## Les chiffres pour la FRANCE

- Le personnel par nationalité, au 31 décembre 2020
  - 756 utilisateurs
  - 972 membres du personnel
  - 93 boursiers

## Autres pays 1279

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



# Retour industriel et retombées pour la région



## Économie

### Industrie

Des technologies innovantes sont développées en étroite collaboration avec l'industrie

Des contrats d'une valeur totale de 645 MCHF ont été conclus avec des entreprises françaises pendant la construction du LHC (p.ex. ALSTOM)

La contribution de la France au budget du CERN 14 % ~160 MCHF

Retour direct pour l'industrie française ~130 MCHF/an

Importantes retombées économiques positives dans la zone locale (~470 MCHF/an)

**Retour total: 600 MCHF/an**

### Activités grand public

Le CERN est l'une des attractions touristiques les plus populaires dans l'Ain et contribue ainsi à l'économie locale

[http : voisins.cern.fr](http://voisins.cern.fr)