

## Axe 3 : accélérateurs de leptons

*Coordinateurs : A. Chancé, J. Michaud*

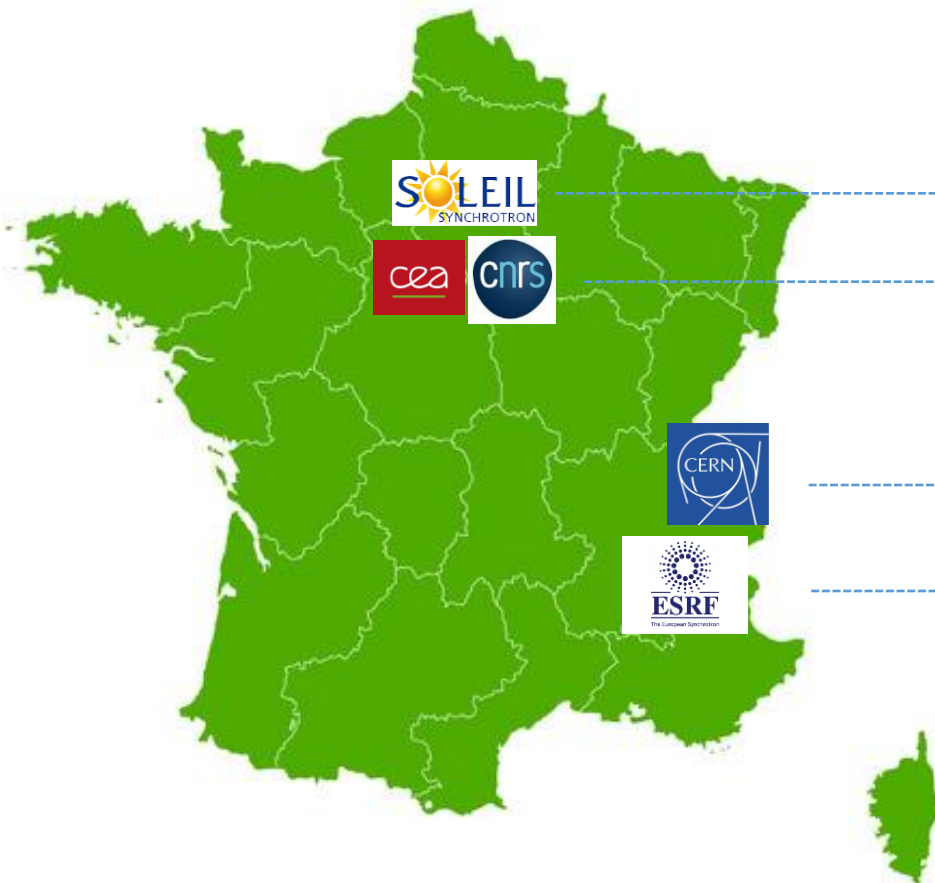


## Par particule :

- **Electrons**
  - Sources de lumière / synchrotrons
  - Collisionneurs
  - Linacs (+ ERL)
- **Muons**
  - Collisionneurs
- **Positrons**
  - Sources

## Par thématiques :

- **Collisionneurs :**
  - Sondes haute énergie (Higgs factories)
  - Sondes par diffusion d'électrons
- **Sources de lumière :**
  - Synchrotron (fortes brillances)
  - Sources compactes
- **Sources de particules :**
  - Sources de positrons haute intensité
  - Photo-injecteurs
- **Récupération d'énergie :**
  - ERLs : Linac à Récupération d'Énergie



Source de lumière (synchrotron)

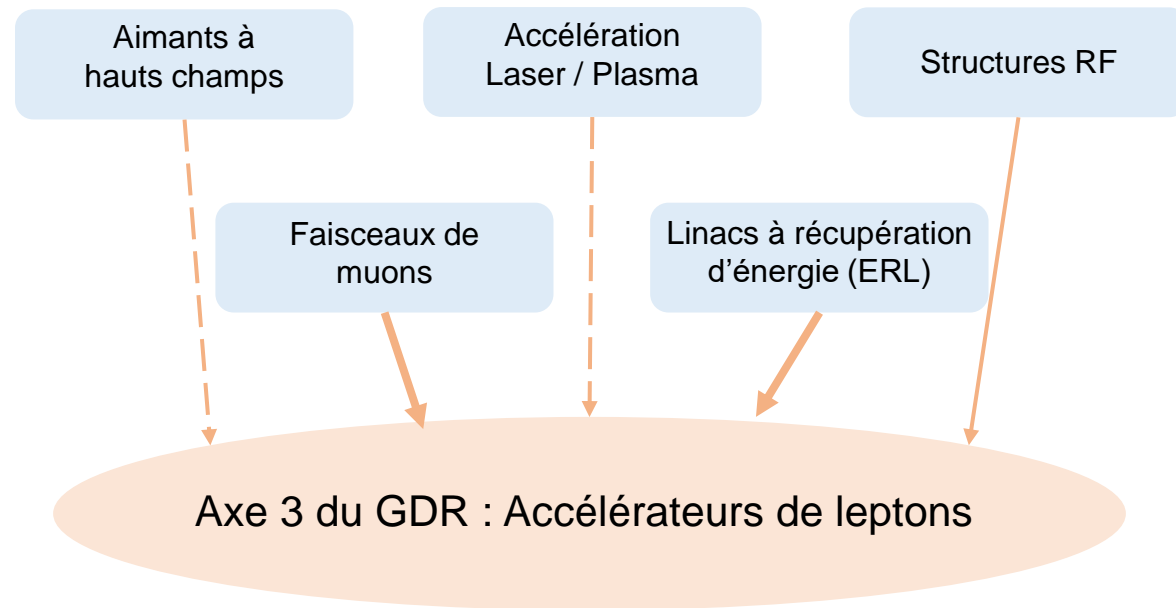
Sources de lumière (compactes)  
ERL  
Sources de positrons

Collisionneurs (FCCee , muons)

Source de lumière (synchrotron)

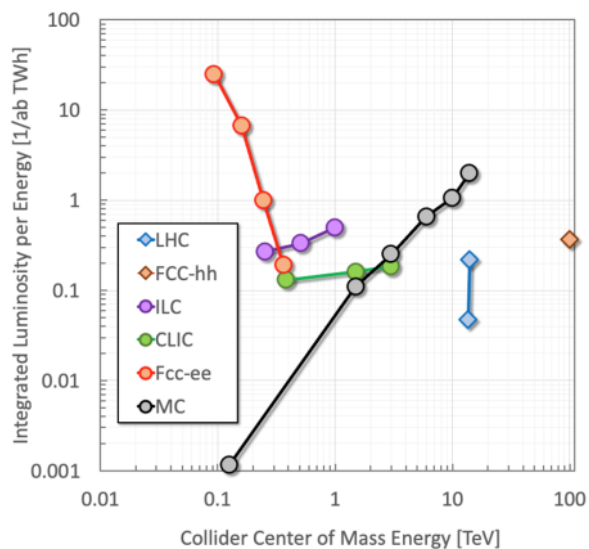
## Stratégie européenne pour la physique des particules (ESPP) Feuille de route R&D pour les accélérateurs [1]

- L'ESPP représente une vision collective de la communauté européenne sur les priorités des activités présentes et futures.
- Elle n'est pas prescriptive mais sert de guide de confiance pour les décisions et plans des activités de recherche.
- Concernant les activités accélérateurs, 5 domaines clés sont identifiés :

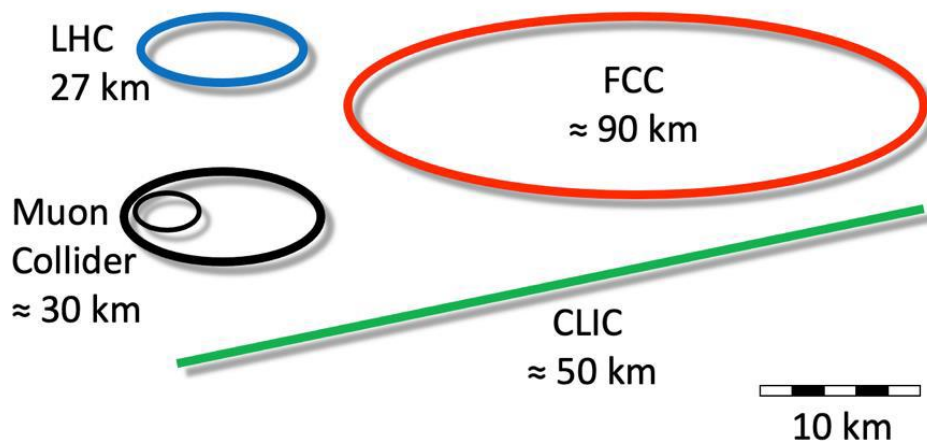


[1] European Strategy for Particle Physics - Accelerator R&D Roadmap, N. Mounet (ed.), CERN Yellow Reports: Monographs, CERN-2022-001 (CERN, Geneva, 2022)

Luminosité intégrée de plusieurs options de collisionneurs par TWh de consommation électrique, comme une fonction de l'énergie de collision au centre de masse



Empreinte au sol du collisionneur à muons, de FCC de CLIC, ou du LHC.



Source: Proposition MuCol

## Objectif: luminosité optimale

$$L = f_{coll} \frac{N_b^2}{4\pi \sqrt{\epsilon_x \beta_x^* \epsilon_y \beta_y^*}}$$

## Contraintes principales

- **Faible émittance**
  - Sources de particules de faible émittance (ILC, CLIC, collisionneurs à muons...)
  - Anneaux à faible émittance d'équilibre (FCC-ee)
- **Faible fonction  $\beta$  au point de collision**
  - Interaction machine-détecteur + protection machine (blindage)
  - Corrections des très fortes aberrations générées par la région d'interaction
- **Courants/charges élevés**
  - Besoin de sources de particules intenses (ILC, CLIC, collisionneurs à muons...)
  - Effets collectifs
  - Vide, électron cloud

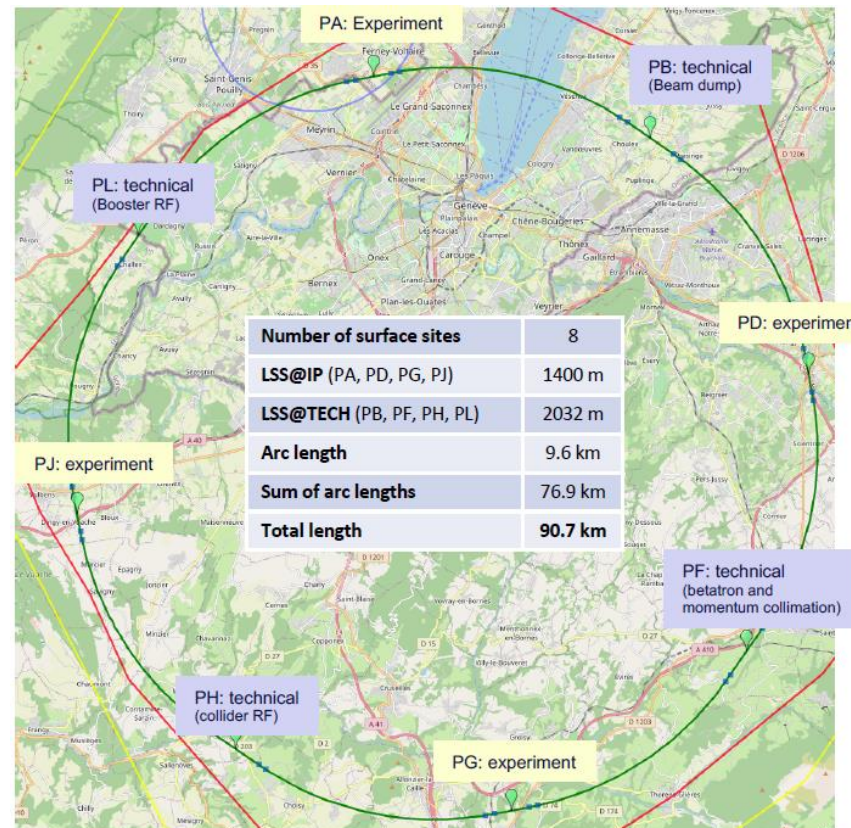
• **Physique**

- Amélioration significative des couplages Higgs
- Electrofaible et Physique des saveurs
- Exploration de 4 modes d'opérations:
  - Z: 45.6 GeV @1290 mA
  - W: 80 GeV @137 mA
  - ZH: 120 GeV @26.7 mA
  - ttbar: 182.5 GeV @4.9 mA

• **Défis :**

- Etude de faisabilité : géologique, technique, environnemental et administratif
- Détecteurs
- Au Z, machine à luminosité record de  $10^{36} \text{ cm}^{-2}/\text{s}/\text{IP}$  avec un courant à l'Ampère.
- Au ttbar, besoin de plus de 10 GV de tension RF pour compenser le rayonnement synchrotron.
- Emittance verticale d'équilibre de l'ordre du pm.

Anneau de 90.7 km, symétrie d'ordre 4  
8 points à la surface, 4 expériences

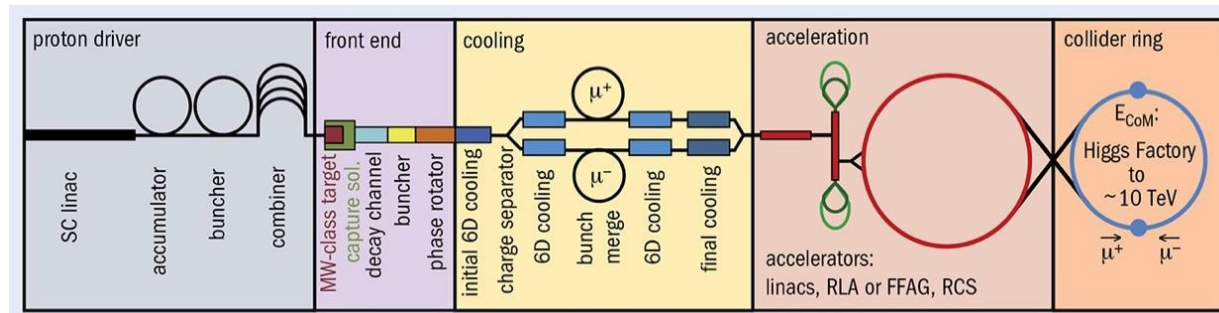


## Faisceaux de muons:

- **Voie intéressante vers des collisionneurs de leptons de haute énergie**
  - Rayonnement synchrotron très réduit
  - Potentiel de physique à comparer à un FCC-hh.
- **Beaucoup de défis technologiques**
  - Refroidissement des muons avec des solénoïdes HTS de plus de 40 T et des cavités fonctionnant sous haut champ magnétique.
  - Accélération très rapide et efficace des muons (quelques millisecondes).
  - Tenue des flux intenses de neutrinos.

## Feuille de route : faisabilité

- Examiner les principales barrières techniques
- Développer le concept des collisionneurs de muons (focus sur 10 TeV, avec 3 TeV comme potentiel stage initial)
- Aller vers des démonstrateurs





### Synchrotrons (cf talk L. Nadolski)

- Très grands accélérateurs
- Brillance extrême

### Sources de lumières compactes

- Sources compactes
- Brillance intermédiaire

#### Exemples:

- ThomX (Orsay)
- ELSA (Bruyères le Châtel)



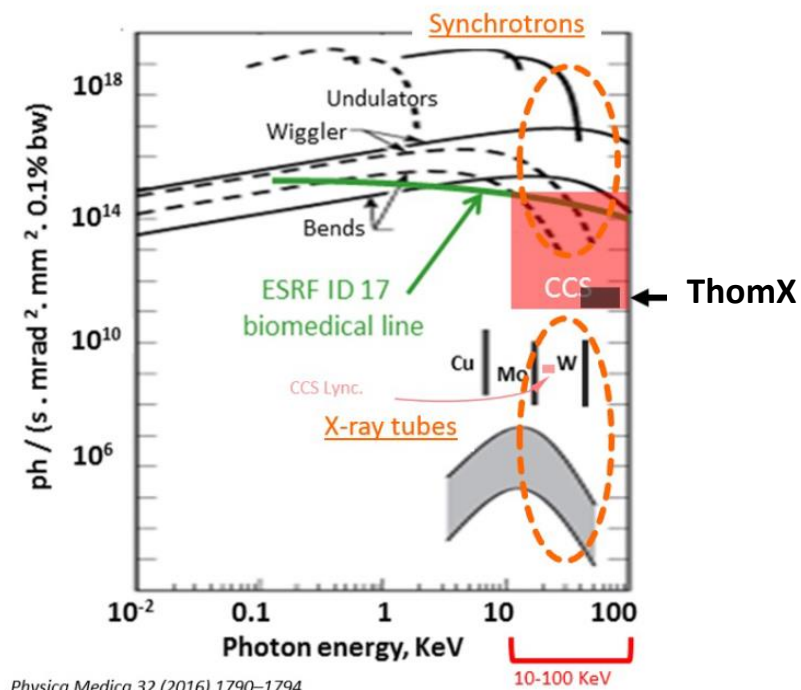
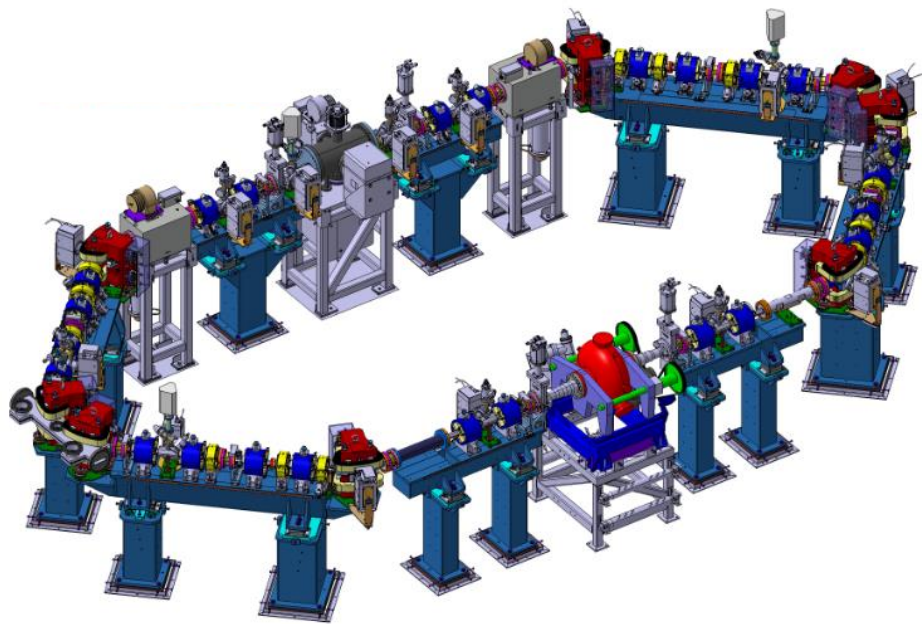
**ESRF**

**SOLEIL**

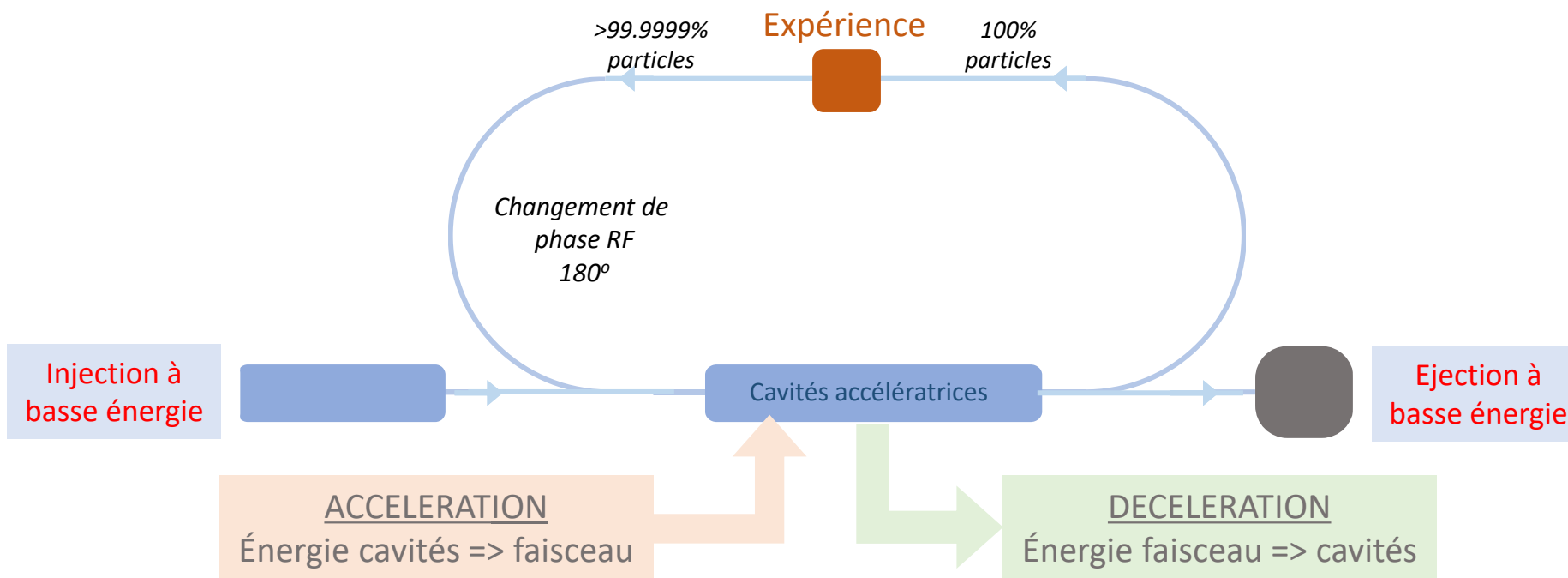


- Source de rayons X (45-90KeV) utilisant les interactions Compton
- Anneau de stockage et empilement des photons laser dans une cavité Fabry-Pérot

- Brillance intermédiaire entre tubes Xrays et synchrotrons
- Compacte: ~200m2



Premiers rayons X produits

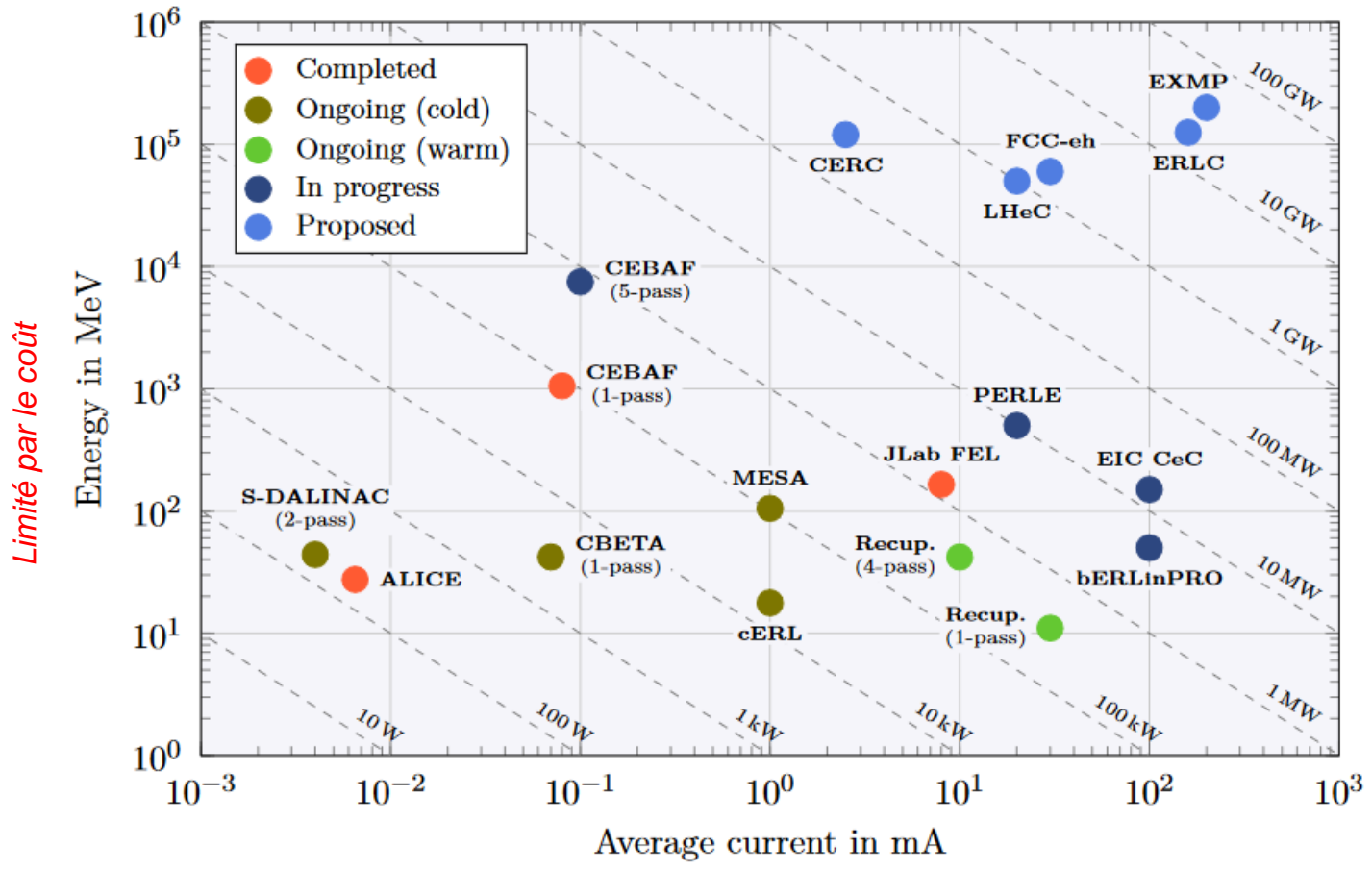


## Re-circulation de la puissance du faisceau au lieu du faisceau lui-même

- **Luminosité optimale**
- **Consommation fortement réduite**

*Déjà utilisé dans des installations existantes (à plus basse puissance)*

*Courtesy : J. D'Hondt*



→ Futures machines

→ Frontière des 10MW

La montée en puissance (→ consommation énergétique) ne peut pas se faire de manière réaliste sans nouvelles technologies : ERLs

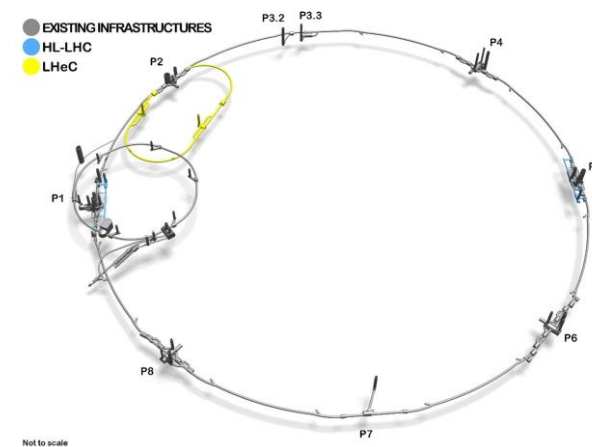
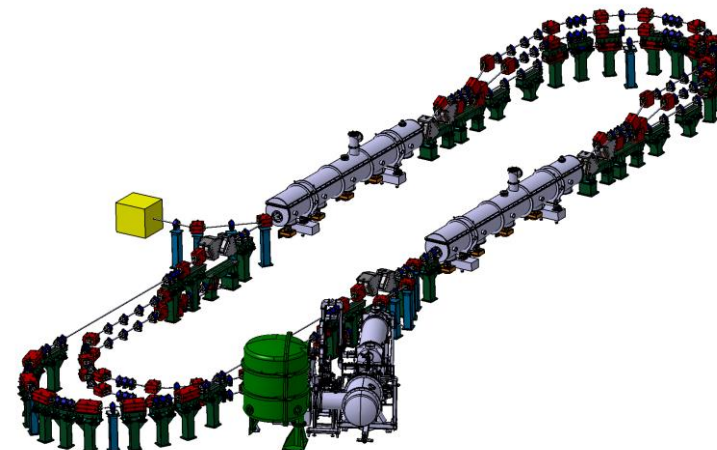
PERLE : Powerful Energy Recovery Linac For Experiments

- Projet d'ERL porté par IJCLab
- Collaboration internationale
- Démonstrateur d'ERL à forte puissance
- Multi-pass (6 tours)

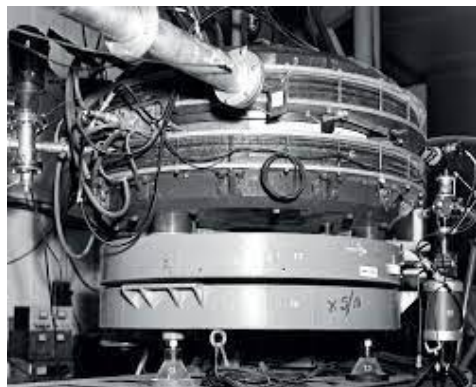
↓ **Preuve de principe**

LHeC : Large Hadron electron Collider

- Projet d'ERL potentiel du CERN
- Paramètres partagés avec PERLE
- ERL à très forte puissance
- Collisions électrons-ions (LHC)



Les premières collisions électrons-positrons sur anneau de stockage sont observées au LAL en 1963-64



AdA installé au LAL  
Anello di Accumulazione  
(AdA)

Source de positrons au LAL (ACO, DCI). Premières collisions  $e^-/e^+$  @LAL (1963)

1960

Construction et implémentation du pré-injecteur du LEP (LIL)

1984

Nouvelle idée : radiation canalisée dans un cristal -> haut rendement photon  
(expériences à Orsay, CERN et KEK)

1989

Design de l'injecteur positrons de SuperB

2010

Design d'une source positrons pour CLIC – CDR 2012 "hybrid target" (et études pour ILC) Sources de positrons polarisées basées sur la diffusion Compton

2012

R&D sur les sources de positrons haute intensité.  
Design d'une source de positrons/pre-injecteur pour FCC-ee  
(en cours)

2017

2023

Très forte visibilité internationale  
→ toujours en développement

Collaboration avec KEK, PSI, CERN, INFN (LNF, Ferrara, Milano)

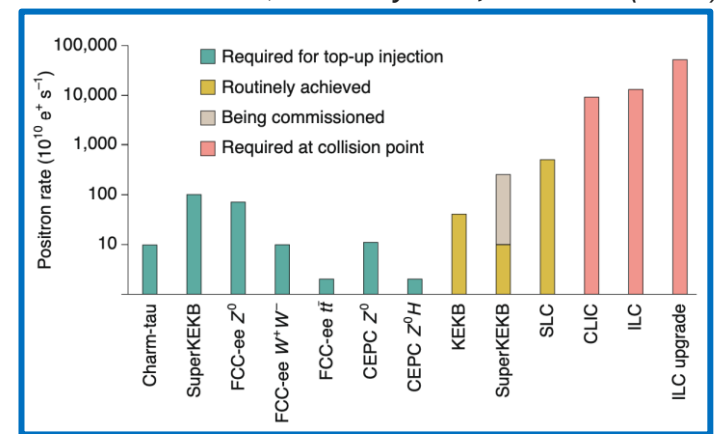
Une haute intensité et basse émittance  $e^+$  sont nécessaires pour atteindre une haute luminosité (ILC/CLIC  $10^{14}$ - $10^{15}$   $e^+$ /s, FCC-ee  $\sim 10^{13}$   $e^+$ /s)

$$L = f_{coll} \frac{N_b^2}{4\pi \sqrt{\epsilon_x \beta_x^* \epsilon_y \beta_y^*}}$$

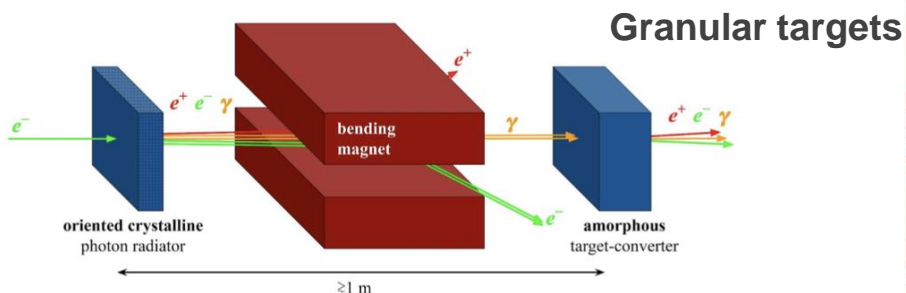
→ design, construction et opération **de cibles innovantes, systemes de capture, damping rings**

- Nouveaux schémas de production de positrons
- Etudes R&D et de faisabilité pour l'utilisation de systems de captures innovants (solenoides superconducteurs)
- Intelligence artificielle (IA) pour l'optimisation globale des paramètres des injecteurs de positrons

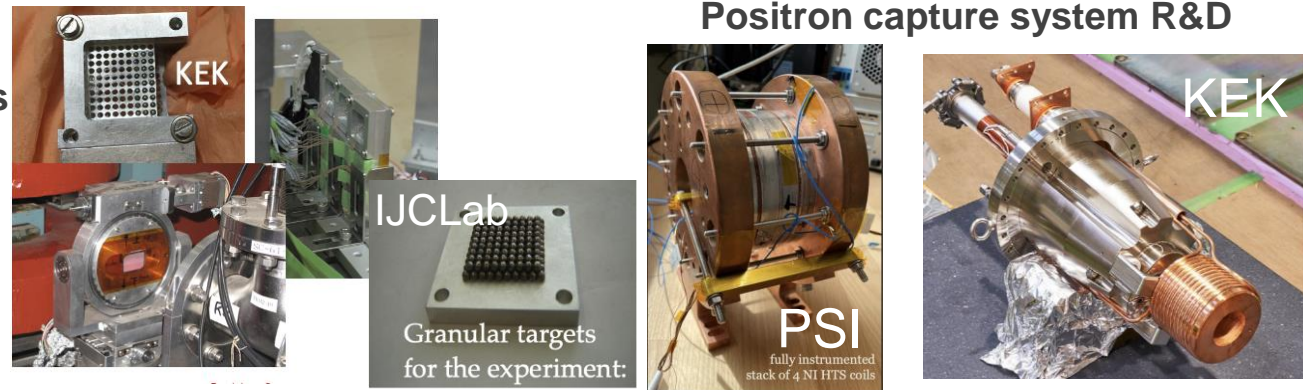
M. Benedikt et al., Nat. Phys. 16, 402–407 (2020)



## Crystal-based positron production



## Granular targets



## Défis

- **SRF, HOMs**
- **Aimants**
  - Aimants permanents
  - Haute température critique (muons)
- **Consommation**
  - Electrique
  - Cryogénique
- **Optique**
- **Stabilité multi-tours**
- **Vide**

## Liens avec les autres axes/thématiques

- **Calculs :**
  - Charge d'espace, effets collectifs
  - Intelligence artificielle
  - Vide
- **Diagnostics :**
  - BPM, BLM
  - Energie et emittance (!)
  - Longueur de paquet
- **Accélération laser :**
  - Injecteurs
- **Cavités SRF:**
  - Haut gradient et haut facteur de qualité



# Merci de votre attention !

Support discussions :

- Un injecteur d'e- par accélération laser ?
- Partage de compétences (diags ...)
- Empreinte carbone des accélérateurs
- Code de simulation universel

**Purple Book**  
January 2008

**Orange Book**  
January 2015

**ESRF UPGRADE PHASE I**  
180 M€ (2009-2015):  
ESFRI ROADMAP 2006-2016  
ON TIME – WITHIN BUDGET

- 19 new beamlines, many specialised in *nano*-beam science
- Upgrade and renewal of facilities and support laboratories

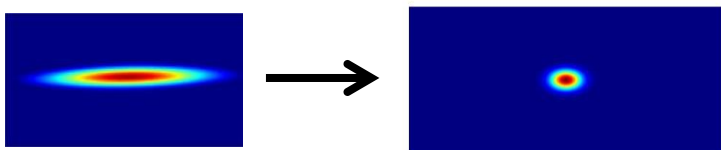
**ESRF-EBS**  
Extremely Brilliant Source  
150 M€ (2015-2022):  
ESFRI LANDMARK (2016)

Revolutionary design for a new generation of synchrotron source storage rings

ESFRI

## The ESRF Extremely Brilliant Source upgrade:

- Decrease the horizontal emittance
- Increase the source brilliance
- Increase the source coherence

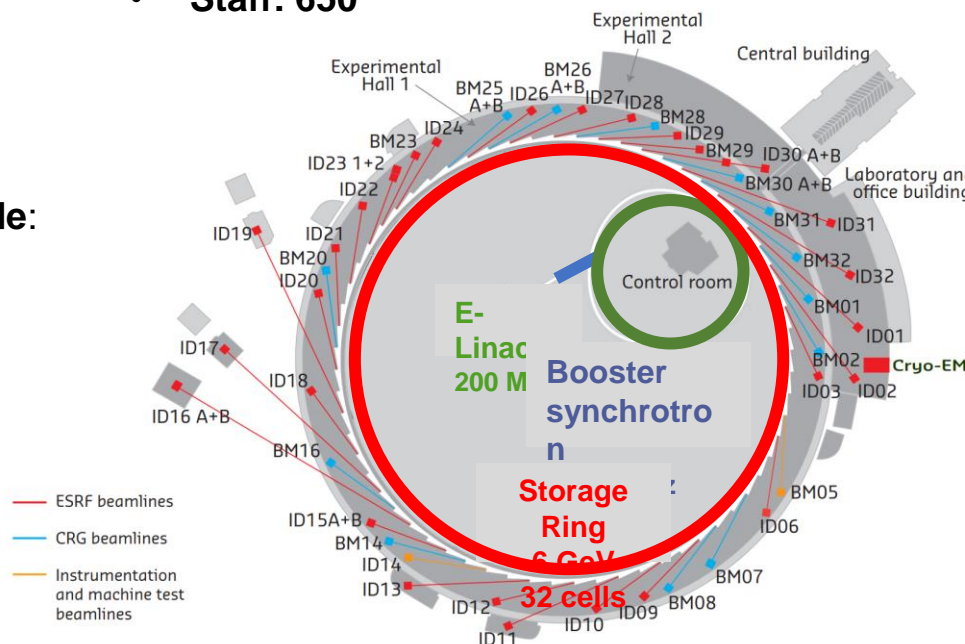


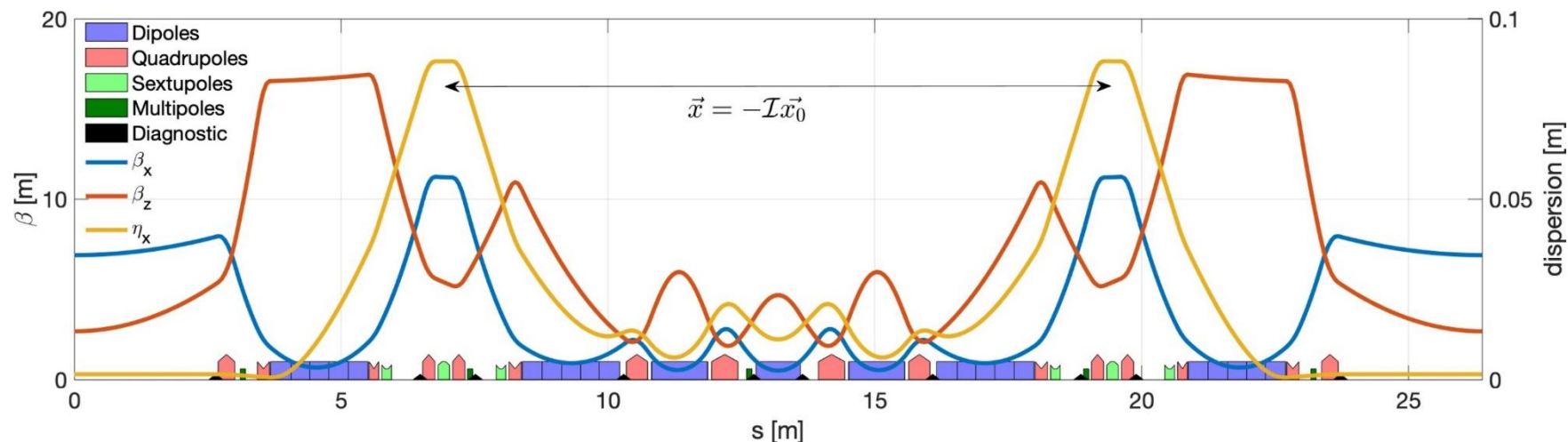
Light source in operation since 1994 located in Grenoble, France:

- 33 Insertion Devices (ID) end stations
- 16 Bending Magnets (BM) end station
- 1 Cryo-Electron Microscope (Cryo-EM)

22 partner nations:

- Annual budget: 100 million euros
- Staff: 650



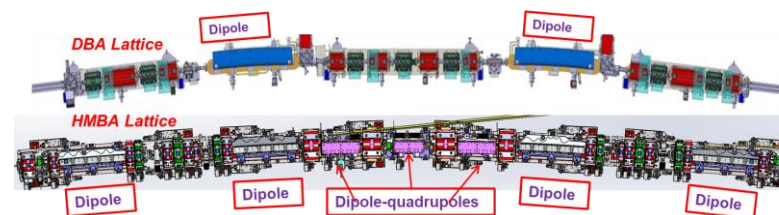


### Main design constraints are:

- Horizontal equilibrium emittance of <150 pm.rad
- Fit existing tunnel and infrastructure and maintain beamlines
- Use existing injectors chain
- Minimize energy loss and power consumption

### HMBA technical solutions:

- Longer and weaker “Multi-Bends”: combined function magnets with low
- dispersion + longitudinal gradient permanent dipoles
- Dispersion bump with -I transform: weaker, fewer sextupoles with partial compensation of aberrations for improved lifetime and acceptance



**31 magnets per cell instead of 17**

### ESRF-EBS design:

- **Horizontal emittance ~135 pm.rad**
- **Touschek Lifetime ~20h**
- **Injection efficiency >90%**

**Now running with design parameters**

Injectors upgrade was not part of the ESRF-EBS project, several actions initiated to support operation and improve performance

Operation support:

- refurbishment of aging component / procurement of spare parts
- **Pulsed elements:** booster extraction in-vacuum septum
- **Linac:** accelerating sections + power source
  
- **Performance improvement:**
- **Injection perturbations during top-up:** new injection systems for the storage ring using non-linear kickers
- **Injection efficiency:** reduction of injection oscillations amplitude using fast stripline kicker
  
- **Strongly limited by characteristics of injected beam:** complete renewal of injectors in the long term?

Continuous improvement of photon source characteristics is part of the long term strategy

### Storage ring optics:

- **Optimize optics functions in straight sections:** lower ID gaps better matching of electron and photon beams
- **Reduction of electron beam halo:** maintain present loss levels for lower ID gaps operation

### Source design:

- **Small period undulators:** R&D on methods and technology (HTS)
- **Advanced optimization methods for magnetic assembly:** automation and machine learning