



**GDR SCIPAC**

SCIences of Particle ACcelerators



# Les Sources de Lumière SOLEIL et l'ESRF : deux Synchrotrons de Classe Mondiale

**Laurent S. Nadolski**

Coordinateur du Programme Construction des Accélérateurs de SOLEIL II

Responsable du groupe Physique des Accélérateurs

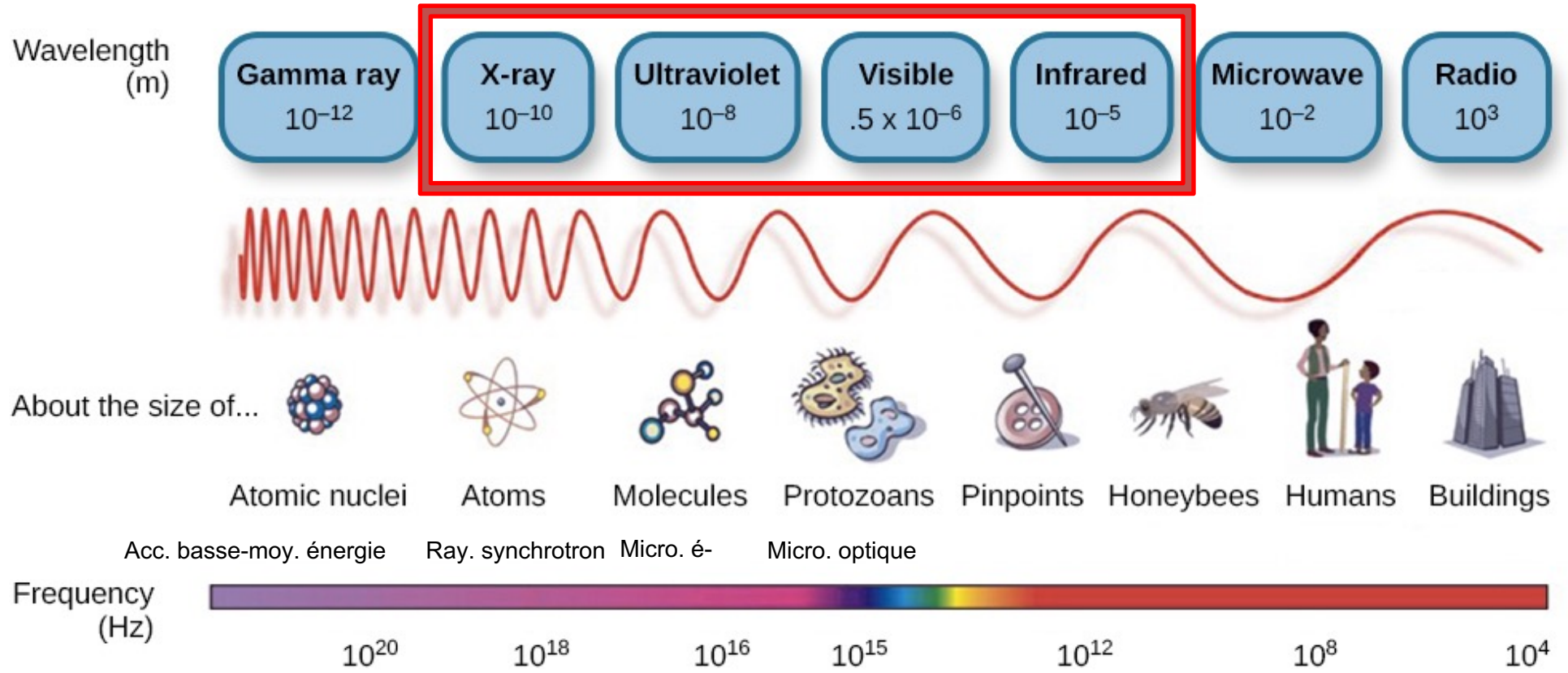
Synchrotron SOLEIL

Workshop SCIPAC « Accélérateurs, Recherche et Société » —  
Grenoble, 25 mars 2026



- Introduction
- Courte histoire du rayonnement synchrotron
- Panorama des installations
- Applications
- Production du rayonnement
- Exemples d'installations
- Focus sur deux installations : l'ESRF et SOLEIL

### Domaine des sources de lumière



$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{hc}{E\beta}$$



Louis De Broglie  
(1892-1987)

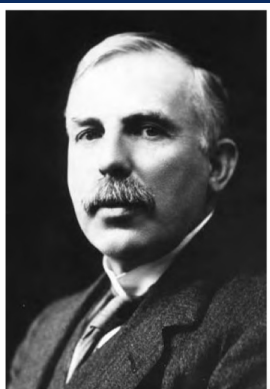
Particle	Rest Energy
proton, p	938 MeV
b quark	4735 MeV
Z <sub>0</sub>	91190 MeV
T-quark	174 000 MeV
Higgs, H <sup>0</sup>	125 250 MeV

## Citation de

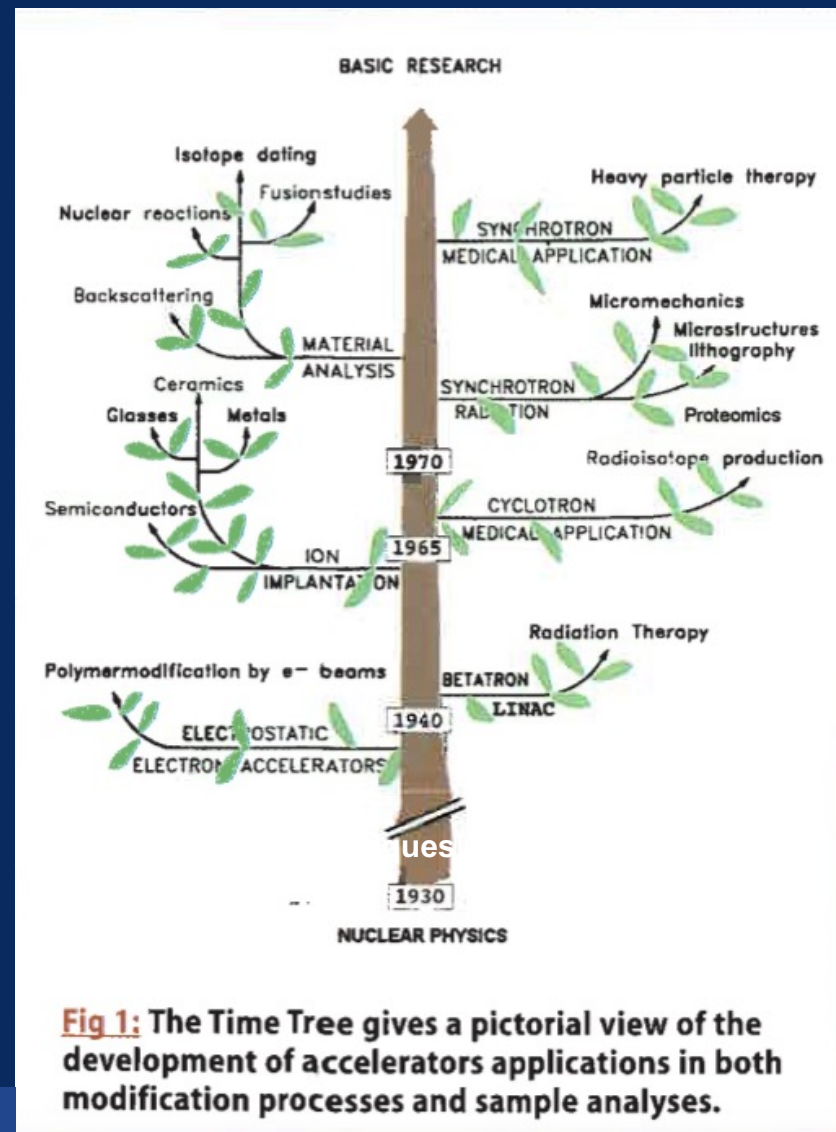
## Lord Ernest Rutherford

« La science des accélérateurs ouvrira la voie aux accélérateurs du futur pour pratiquement toutes les branches de la science et pour un large spectre d'applications répondant aux besoins de la nation »

Discours inaugural à la Royal Society of Physics

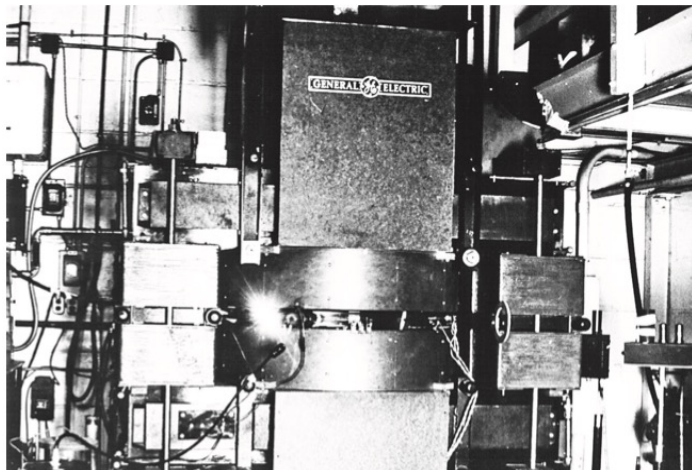


Au cours des 50 dernières années, environ un tiers des prix Nobel de physique ont récompensé des travaux fondés sur des accélérateurs ou réalisés à l'aide de ceux-ci



**Fig 1:** The Time Tree gives a pictorial view of the development of accelerators applications in both modification processes and sample analyses.

K. Bethge, Nucl. Phys. News, 9/1 (1999) 20.



Ce **synchrotron à électrons de 300 MeV** de la **General Electric Co.** à Schenectady, construit à la fin des années 1940, est le **premier synchrotron spécifiquement conçu** à cet effet. La photographie montre un faisceau de rayonnement synchrotron — le premier jamais observé — émergeant de sa chambre à vide en verre.

**Frank Goward** construit le premier synchrotron à électrons au Royaume-Uni. Il est suivi d'un synchrotron construit par General Electric aux États-Unis, où le rayonnement synchrotron est observé pour la première fois, ouvrant une nouvelle ère des sources de lumière basées sur les accélérateurs.

**Langmuir** est crédité d'avoir identifié ce phénomène comme le rayonnement synchrotron, ou, selon sa terminologie, « **rayonnement de Schwinger** ». Les mesures suivantes du groupe GE **ont permis d'établir expérimentalement ses propriétés spectrales et de polarisation**. Des mesures de caractérisation ont également été réalisées dans les **années 1950 sur un synchrotron de 250 MeV à l'Institut Lebedev de Moscou**.



*Une longue histoire, une solide tradition et une communauté scientifique reconnue...*



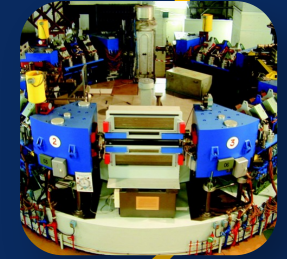
**1955**  
Construction de l'accélérateur linéaire (1,3 GeV)



**1963**  
Yvette Cauchois  
Premiers spectres utilisant le RS en mode parasite à Frascati (Italie)



**1971**  
Création du LURE



**1973-1989**  
ACO



**1990**  
Construction de l'ESRF



**1987-2003**  
SuperACO



**1976-2003**  
DCI



**2001**  
Création de la société SOLEIL



**2002**  
Construction de SOLEIL

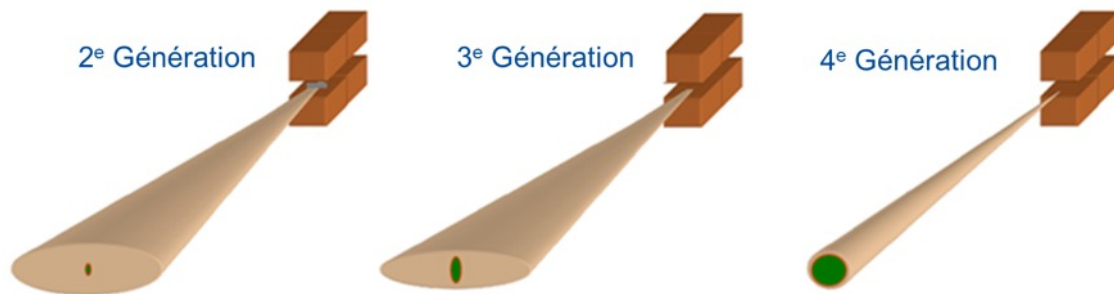


**2008**  
Ouverture aux Utilisateurs

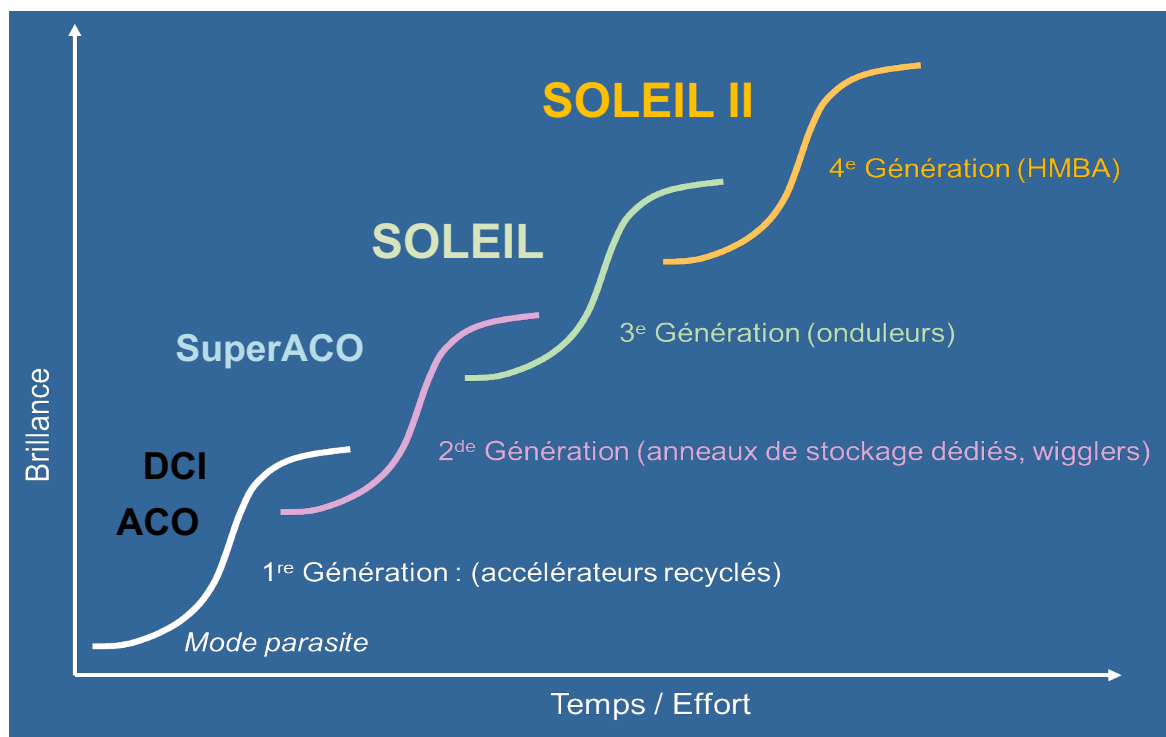


**ESRF-EBS (2019)**

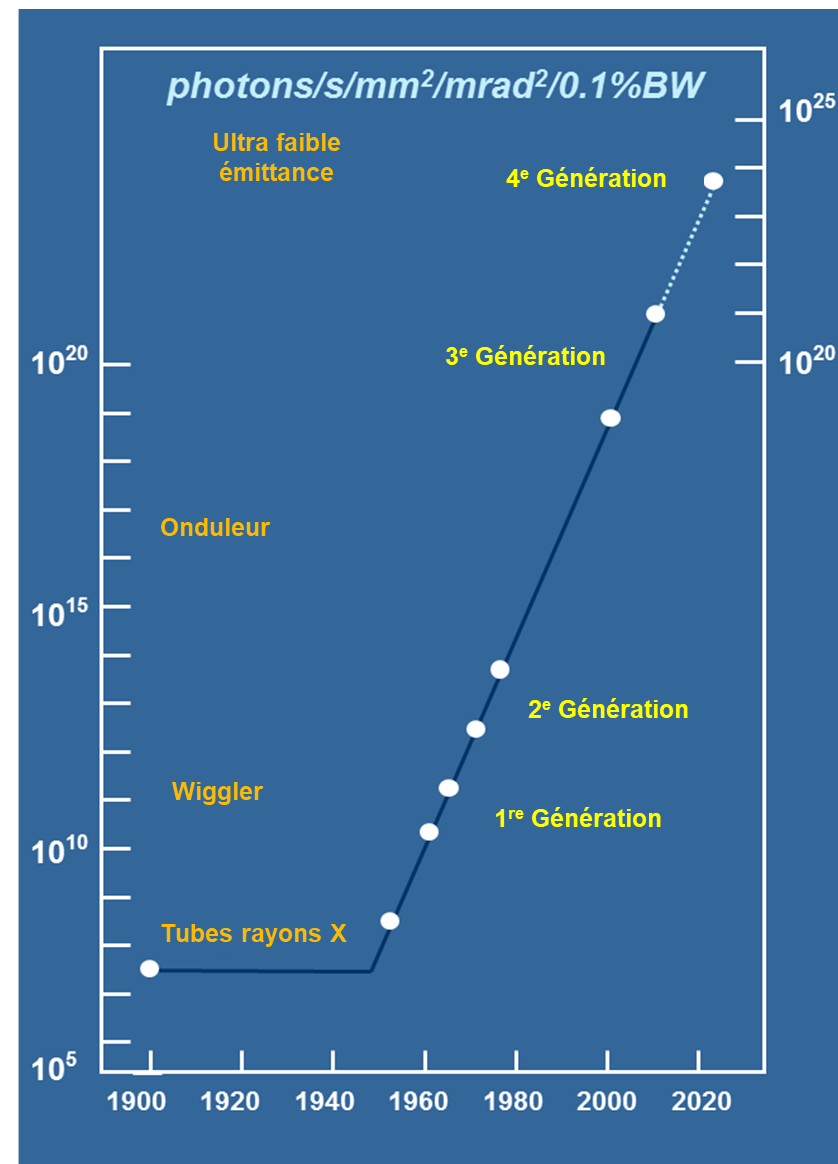




**Gain : 9 ordres de grandeur en 35 ans !**

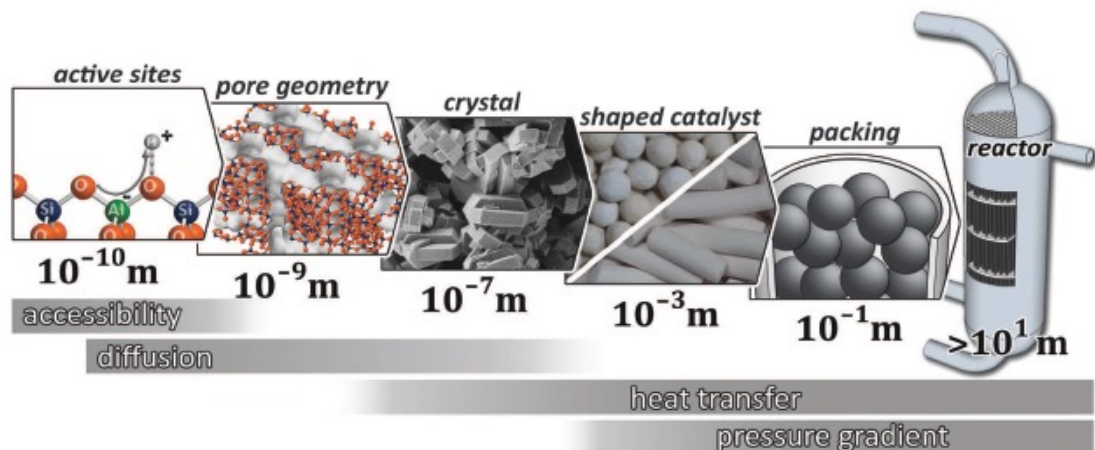


**Inégalé par toute autre technologie !**



- ❑ Ces dernières années, émergence d'une toute nouvelle classe (4<sup>e</sup> génération) de sources de lumière à anneau de stockage : Anneaux de Stockage à Limite de Diffraction (DLSR).
- ❑ Des avancées majeures attendues en imagerie haute résolution, microscopie et spectroscopie. Permet une science impossible à concevoir aujourd'hui.

## Couvrir toutes les échelles spatiales : Microscopie X avec lumière cohérente



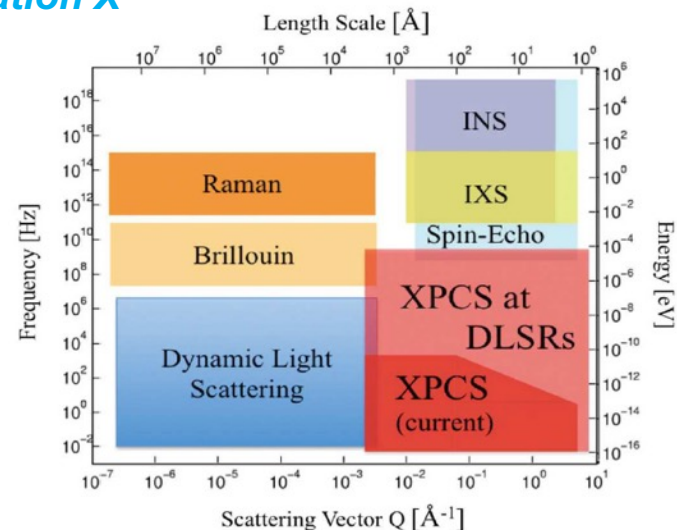
Pour comprendre une réaction catalytique dans un réacteur chimique, les processus physico-chimiques doivent être suivis dans les conditions de fonctionnement et sur une large gamme d'échelles spatiales, de l'échelle atomique aux dimensions du réacteur. (C. G. Schroer et al. JSR).  
<https://doi.org/10.1107/S1600577518008858>

$$\text{Coherent flux} \propto \frac{\text{Brilliance} \times \lambda^2}{4}$$

$$\begin{aligned} S/N &\propto \text{Brilliance} \\ S/N &\propto Fc \end{aligned}$$

$$\text{Fastest time scale} \propto \frac{1}{(\text{Brilliance})^2}$$

## Couvrir les échelles temporelles : Spectroscopies de corrélation X



Carte des techniques spectroscopiques et de leur portée en espace et en temps. Actuellement, l'XPCS couvre des échelles temporelles jusqu'à la milliseconde. Sur une source DLSR, la plage temporelle accessible s'étend jusqu'à la nanoseconde : 10 000 fois plus rapide en dynamique (C. G. Schroer et al. JSR, <https://doi.org/10.1107/S1600577518008858>)

- Formule simplifiée de la **Brillance** des photons :

$$B_n(\lambda) = \frac{F_n(\lambda)}{4\pi^2 (\epsilon_x + \lambda_n / 4\pi)(\epsilon_z + \lambda_n / 4\pi)}$$

Photons/s/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/0,1 % b.w

avec  $F_n \sim N_u I Q_n \left( \frac{nK^2}{4 + 2K^2} \right)$  Flux de photons total

$\epsilon_x$  : Émittance horizontale

$\epsilon_z$  : Émittance verticale

$\epsilon_r = \lambda_n / 4\pi$  : L'émittance donnée par la **limite de diffraction**

$\lambda_n$  : Longueur d'onde du rayonnement

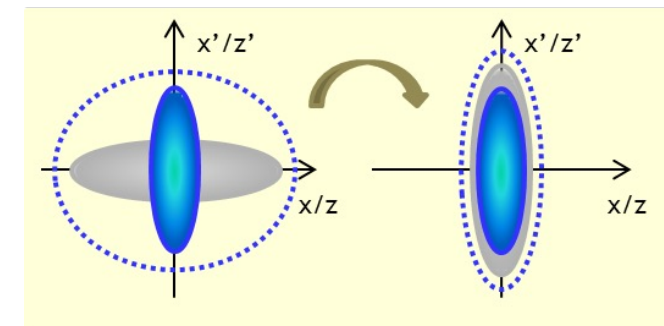
- Degré de cohérence transverse

$$f_c = \frac{\epsilon_r^2}{(\epsilon_x + \epsilon_r)(\epsilon_z + \epsilon_r)}$$

= 1 pour  $\epsilon_x \ll \epsilon_r$  et  $\epsilon_z \ll \epsilon_r$  **Cas ultime**

- Fraction de flux cohérent :

$$F_c = \frac{(\lambda_n / 4\pi)^2}{(\epsilon_x + \lambda_n / 4\pi)(\epsilon_z + \lambda_n / 4\pi)}$$



L'orientation de l'ellipse de l'espace de phase du faisceau d'électrons (en gris) correspond à celle du faisceau de photons (en bleu)

**Pour maximiser la Brillance et la Fraction de Flux Cohérent**

→ **Diminuer davantage l'émittance** → **DLSR**

## Qu'est-ce qu'un DLSR ?

PUBLIC

- Définition « stricte » : Un anneau est limité par la diffraction pour la longueur d'onde  $\lambda$ , lorsque l'émittance des électrons est négligeable devant celle des photons à cette longueur d'onde :

$$\varepsilon_{x,z}(e^-) \ll \frac{\lambda}{4\pi}$$

- Définition « usuelle » : lorsque l'émittance des électrons est (très) proche de celle des photons.

$$\varepsilon_{x,z}(e^-) \sim 100 \text{ pm.rad à } 1 \text{ keV}$$

$$\varepsilon_{x,z}(e^-) \sim 10 \text{ pm.rad à } 10 \text{ keV}$$

## Diminution de l'Émittance Horizontale avec la Structure MBA

$$\varepsilon_x \approx \frac{C_q \gamma^2 \langle H \rangle_{BM}}{J_x \rho}$$

Énergie des électrons

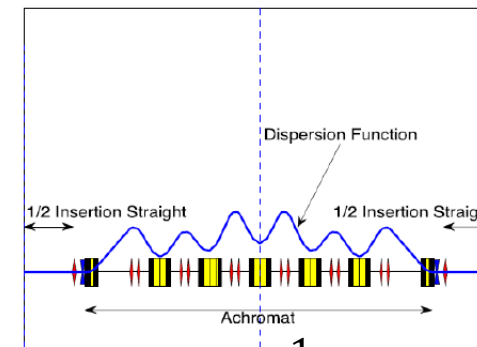
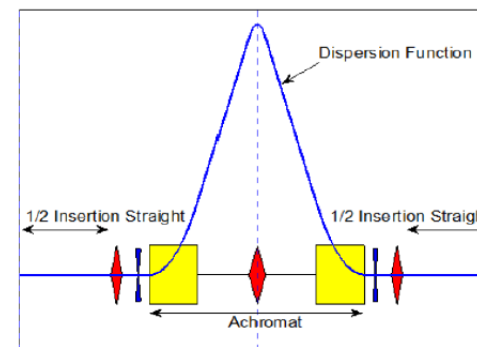
- Formule simplifiée :

$$\varepsilon_x \approx F(\text{maille}) \frac{E^2}{N^3}$$

Structure de la maille

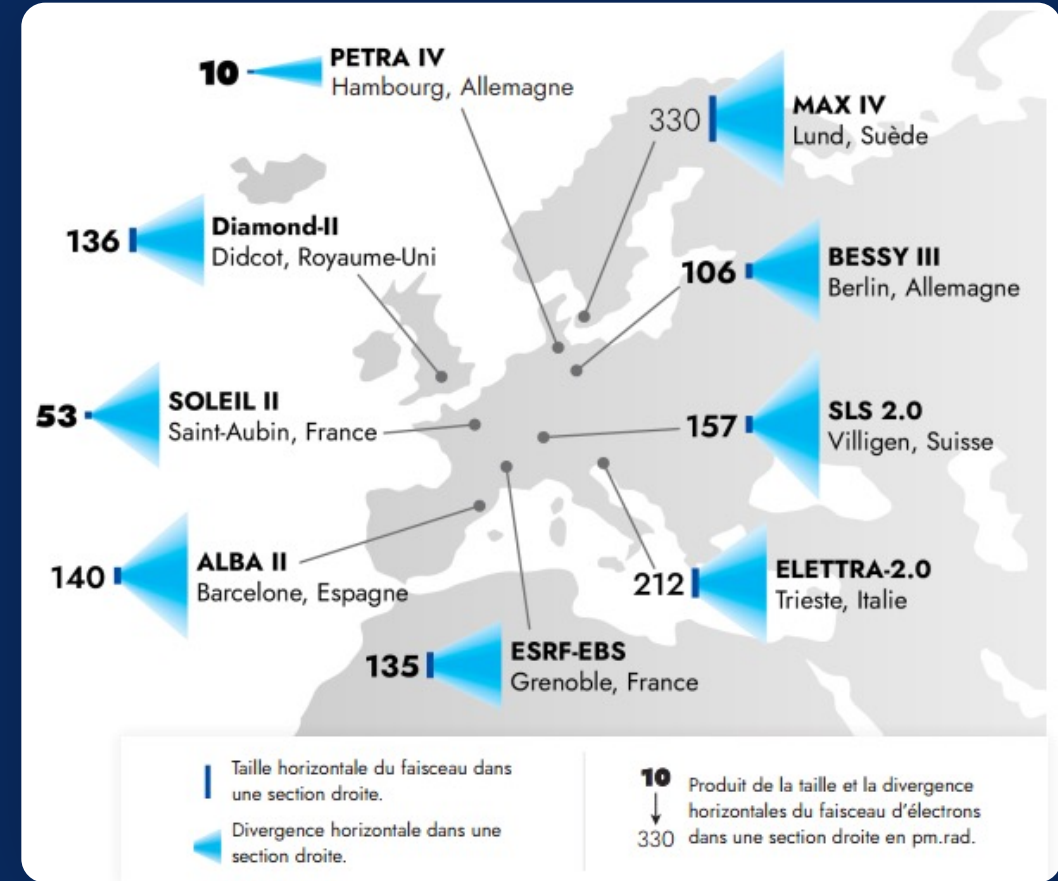
Nombre de dipôles identiques

### DOUBLE BEND ACHROMAT (DBA) MULTI BEND ACHROMAT (MBA)



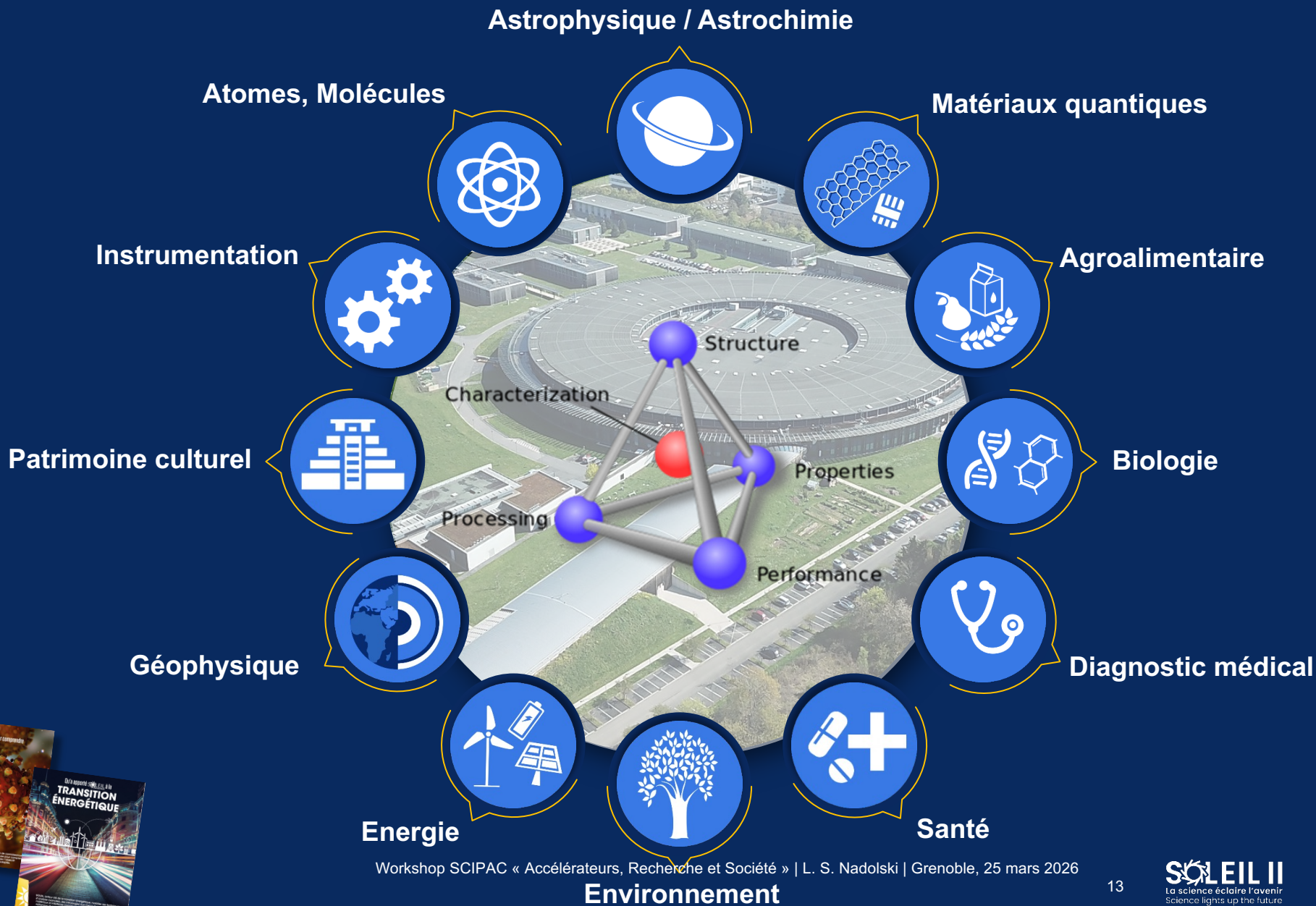
$$\Theta \text{ (angle de déviation du dipôle)} \propto \frac{1}{N}$$

Exploiter la dépendance en  $1/N^3$

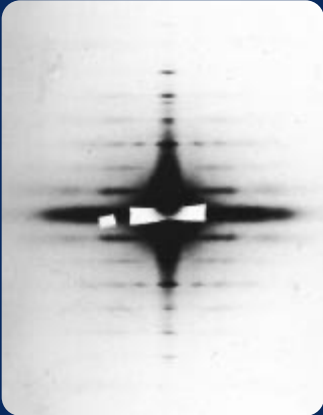


**LEAPS**  
 La *League of European Accelerator-based Photon Sources* est le réseau de toutes les sources de rayonnement synchrotron et laser à électrons libres en Europe.

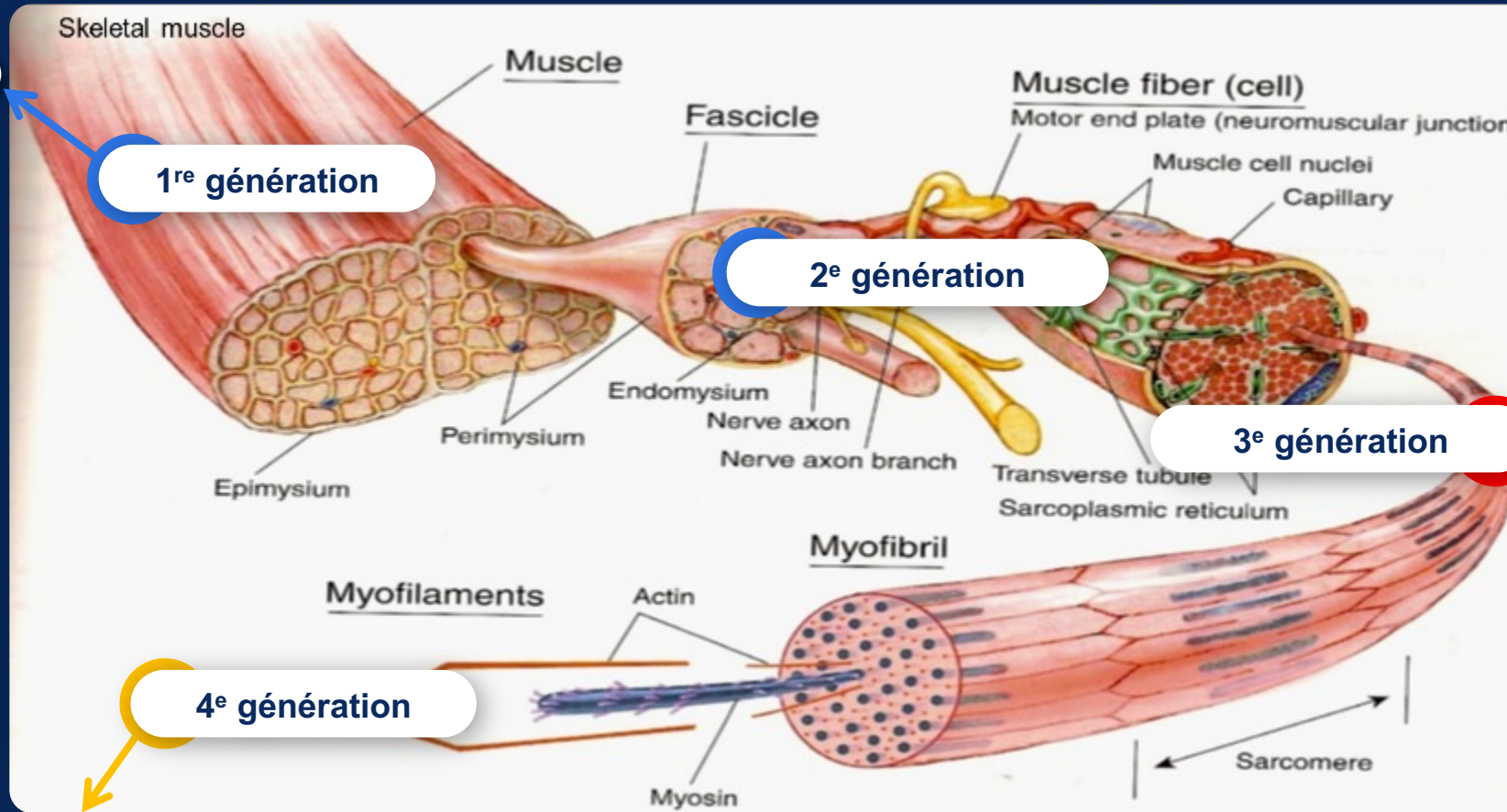
Carte des synchrotrons européens de nouvelle génération. Projets de jouvence et de modernisation



Premières expériences de diffraction des rayons X utilisant le rayonnement synchrotron, réalisées à DESY, Hambourg, en septembre 1970.



G. Rosenbaum et al.,  
Nature 230, 434 (1971)

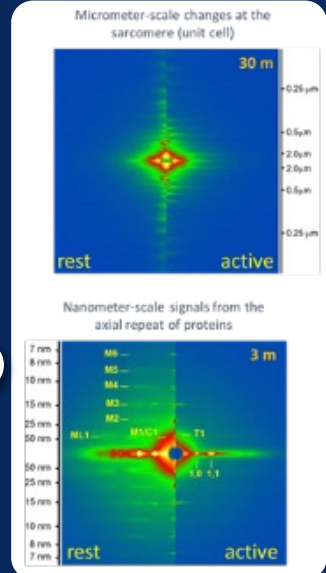


1<sup>re</sup> génération

2<sup>e</sup> génération

3<sup>e</sup> génération

4<sup>e</sup> génération



ID02-ESRF

Modèle de dynamique structurelle des domaines du filament de myosine pendant la contraction

E. Brunello et al.,  
PNAS 117, 8177 (2020)

Détermination de la structure, la fonction et la dynamique du filament de myosine à l'intérieur de chaque sarcomère, l'unité structurelle du muscle cardiaque.

→ Développement de meilleures thérapies pour les pathologies cardiaques.



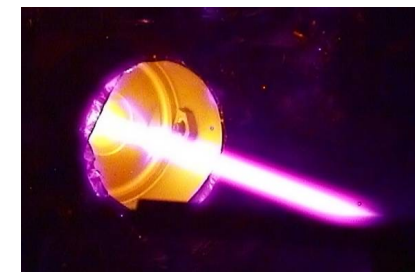
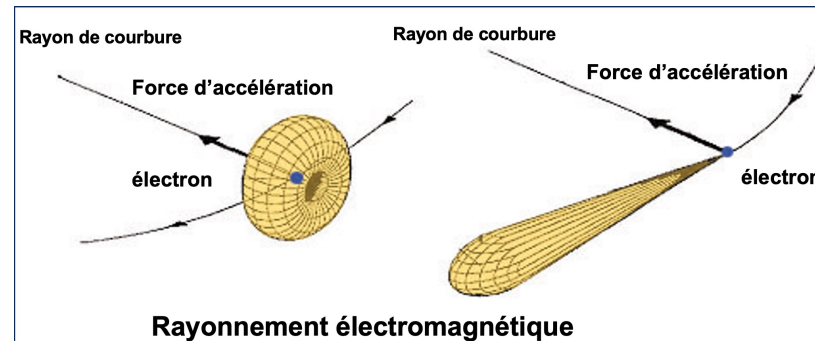
**Brillant** – plusieurs ordres de grandeur supérieurs aux techniques conventionnelles permettant d'avoir des temps courts d'expérience et de travailler sur de petits échantillons.

**Collimaté** – le faisceau peut être focalisé sur des distances inférieures au micromètre (10-6 m) : on a alors un pinceau de lumière.

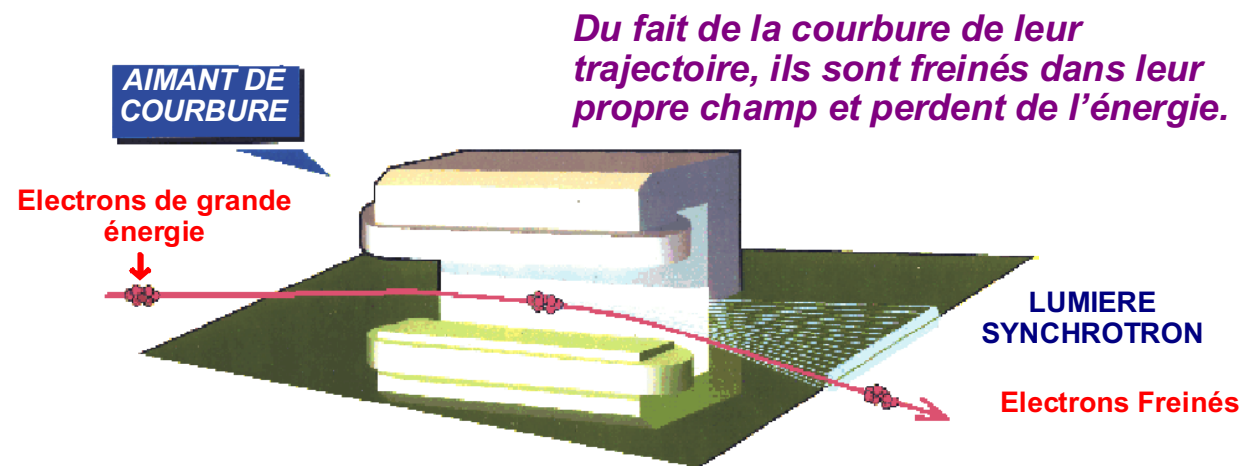
**Polarisé** – linéaire, elliptique, permettant de minimiser le bruit de fond, d'augmenter le contraste des expériences, d'explorer les phénomènes magnétiques, la symétrie des molécules.

**Pulsé** – la source est un train de paquets d'électrons produisant la lumière pulsée et permettant de suivre des réactions cinétiques par exemple en chimie.

**Spectre continu** – Du rayonnement infrarouge aux rayons X durs. Choix de l'énergie du photon selon l'expérience.



*Les électrons de grande énergie sont déviés par le champ magnétique des aimants de courbure.*

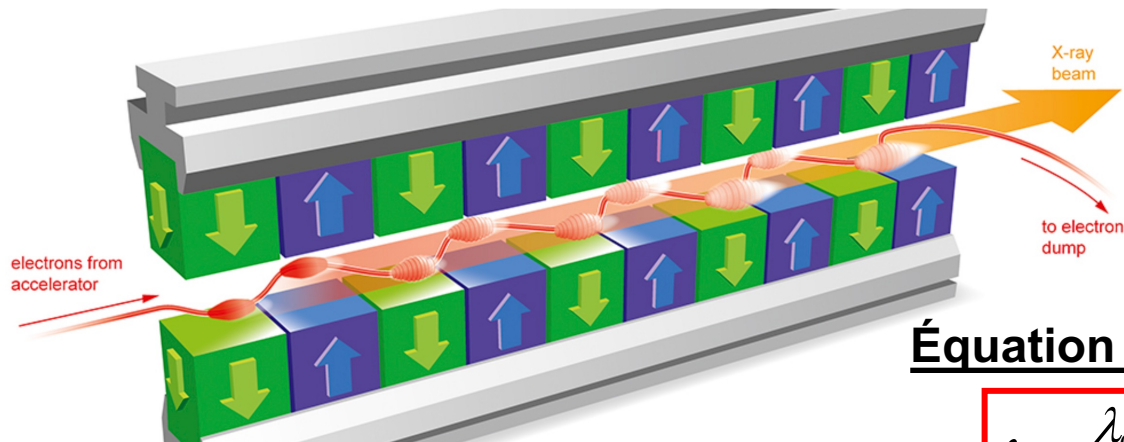


*Ils émettent des photons tangentiellement à leur trajectoire*

**C'est LE RAYONNEMENT SYNCHROTRON**

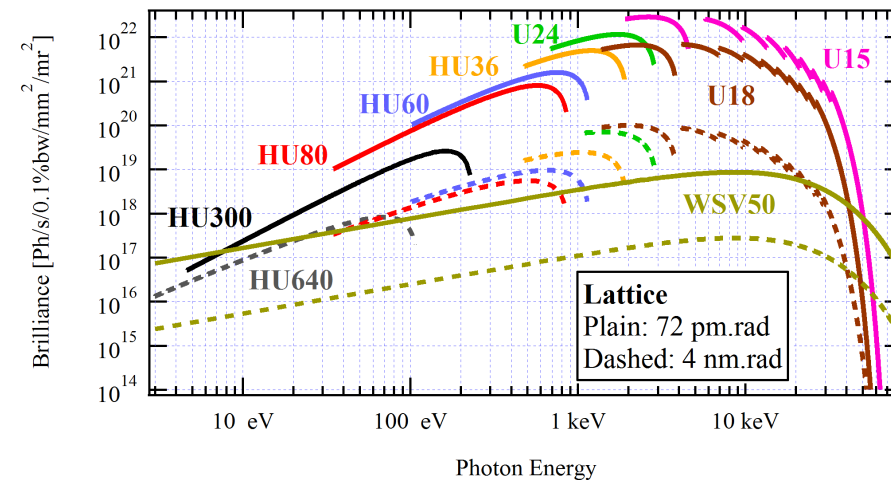
*Ces conditions sont réunies dans les Anneaux de Stockage*

PUBLIC

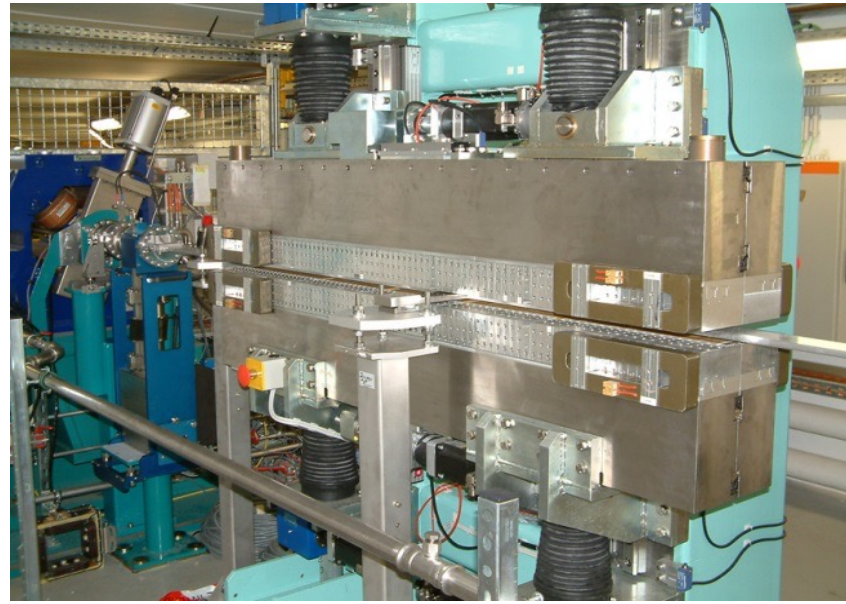


## Équation de l'onduleur

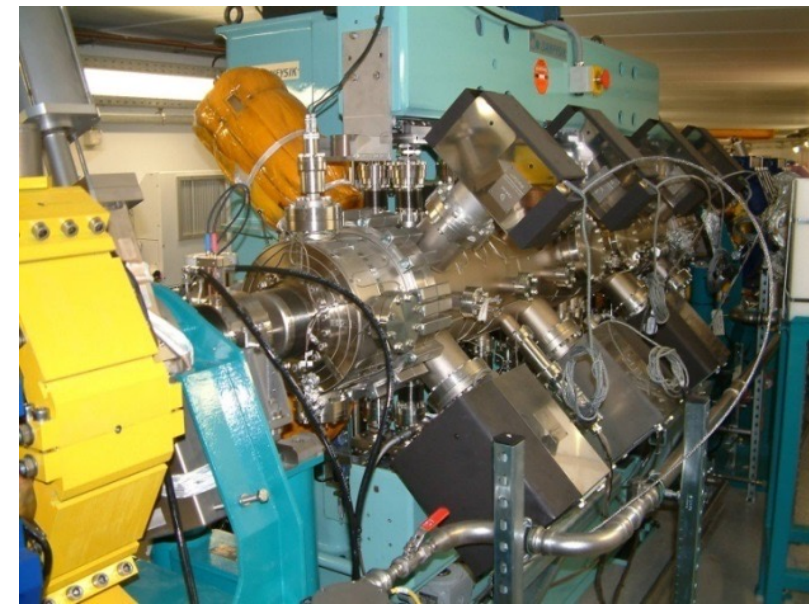
$$\lambda \approx \frac{\lambda_0}{2\gamma^2} \cdot (1 + \gamma^2 \theta^2)$$



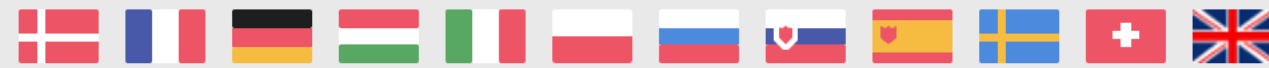
**HU 640 : ligne DESIRS**  
(5 eV – 50 eV : Ultra Violet)



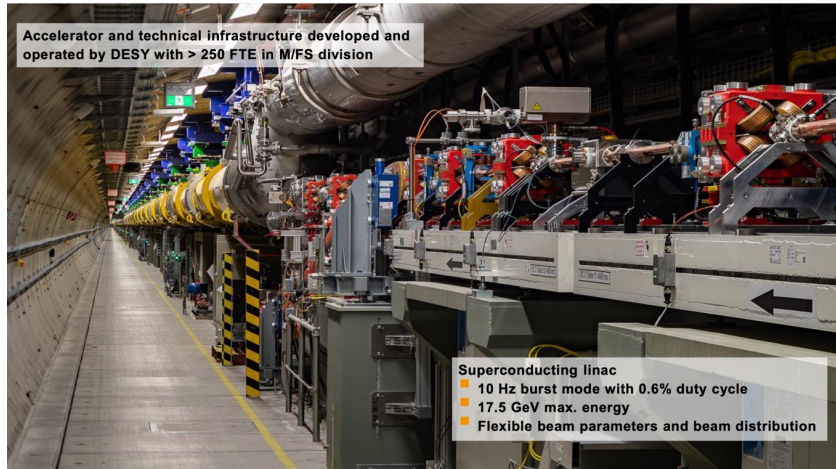
**HU 80 : TEMPO**  
(100 eV - 3 keV : Soft X rays)



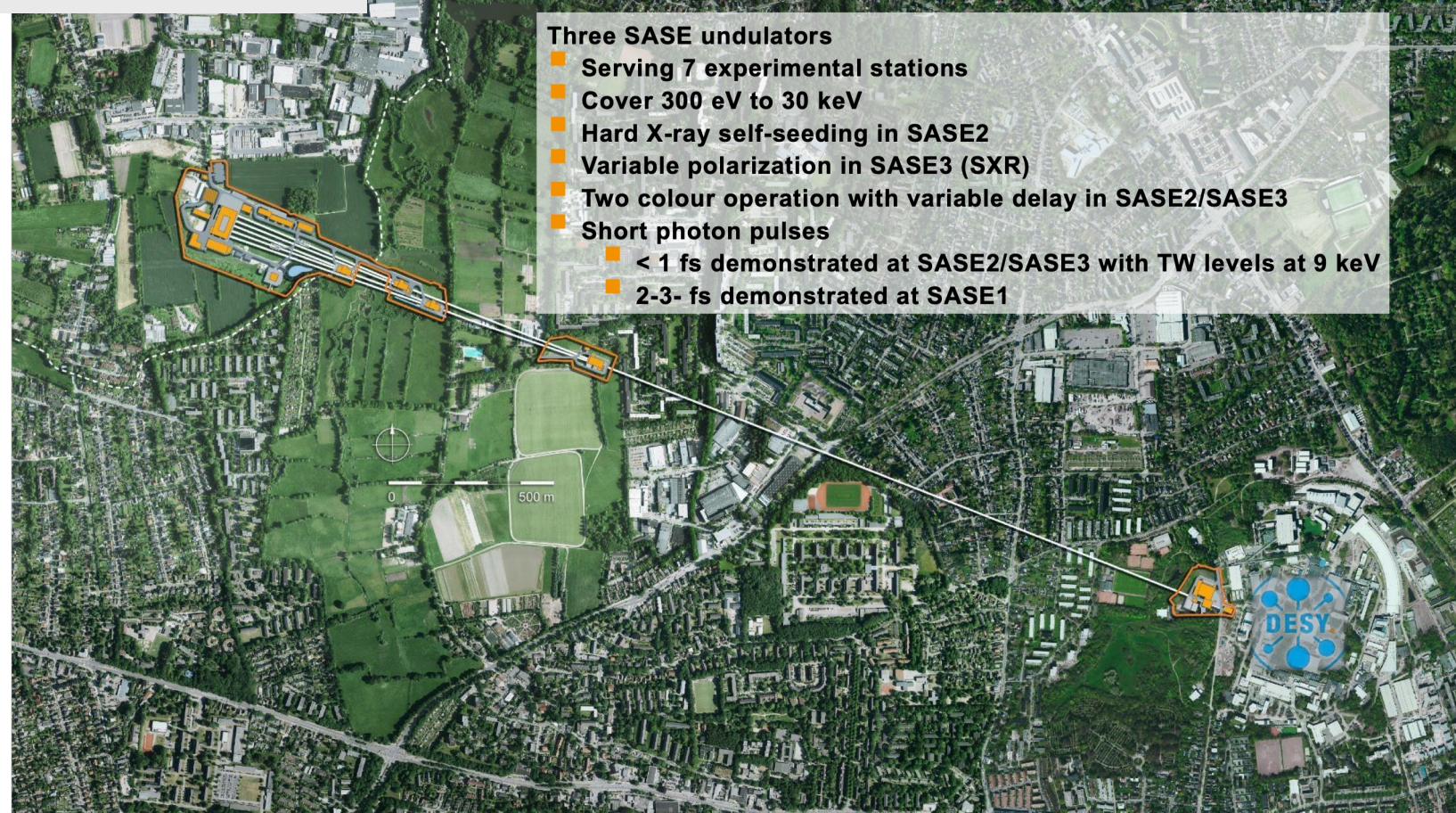
**U 20 : ligne PROXIMA**  
(4 keV - 30 keV : Hard X rays)



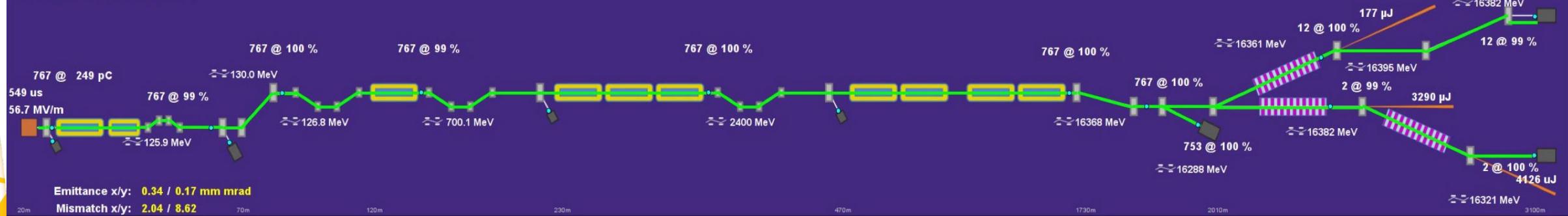
## Accélérateur linéaire - Laser à électrons libres



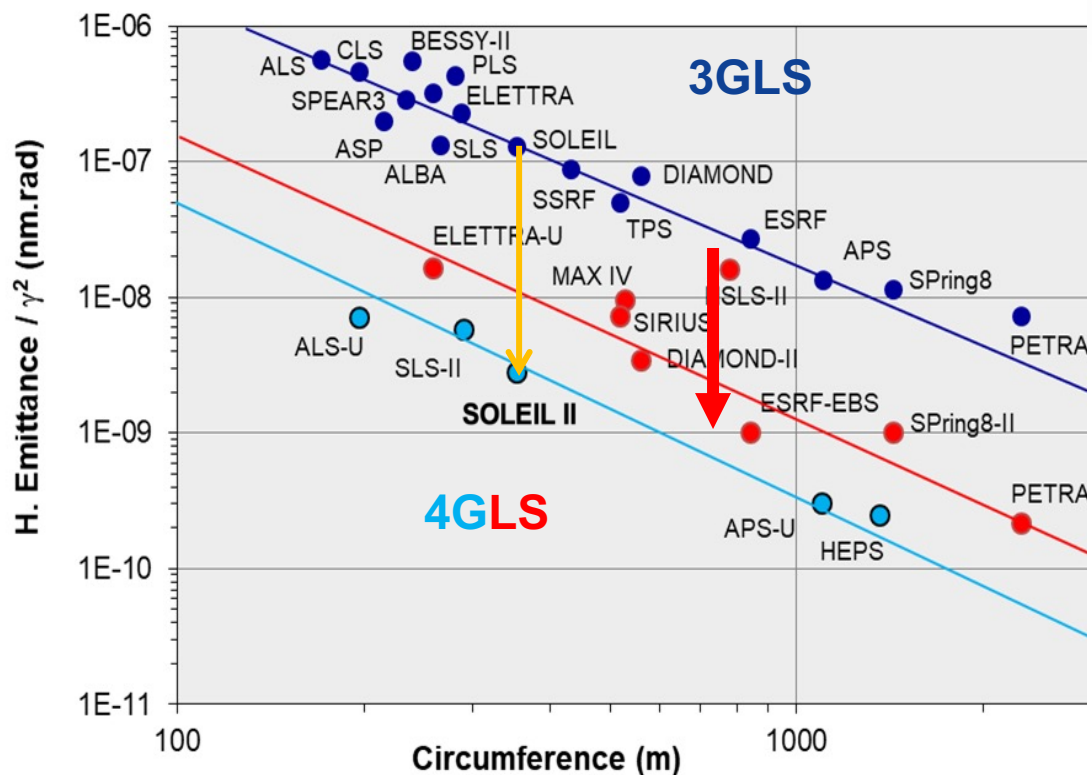
Accélérateurs : 2,1 km



OVERVIEW - SUBTRAIN: ALL



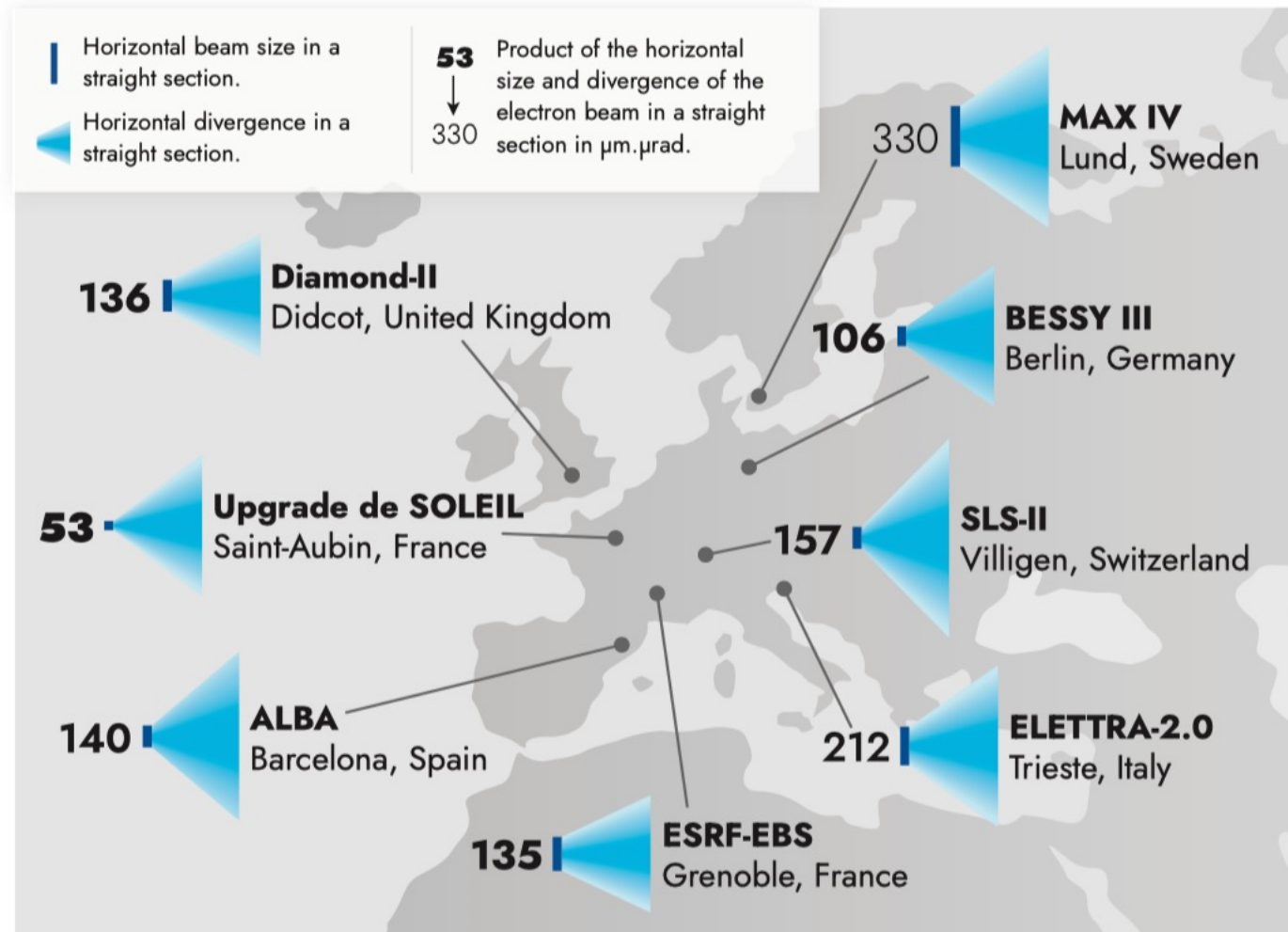
## ESRF-EBS : première mise à niveau d'une source de lumière synchrotron vers la quatrième génération



## SOLEIL, THE MOST AMBITIOUS PROJECT OF ITS KIND IN A RAPIDLY CHANGING ECOSYSTEM

Map of European next-generation synchrotrons.

LEAPS (League of European Accelerator-based Photon Sources)



## L'upgrade EBS (Extremely Brilliant Source)

- Nouveau concept d'anneau : **Hybrid Multi-Bend Achromat (HMBA)**
- Travaux de reconstruction : 2018–2020 — ouverture aux utilisateurs : **août 2020**
- 90% de l'infrastructure existante réutilisée — projet dans les délais et le budget

## Gains de performances

- **×100 en brillance et cohérence** des faisceaux X
- Émittance horizontale : **de 4 000 → 140 pm·rad**
- **–30% de consommation énergétique**



## Gains en brillance et cohérence

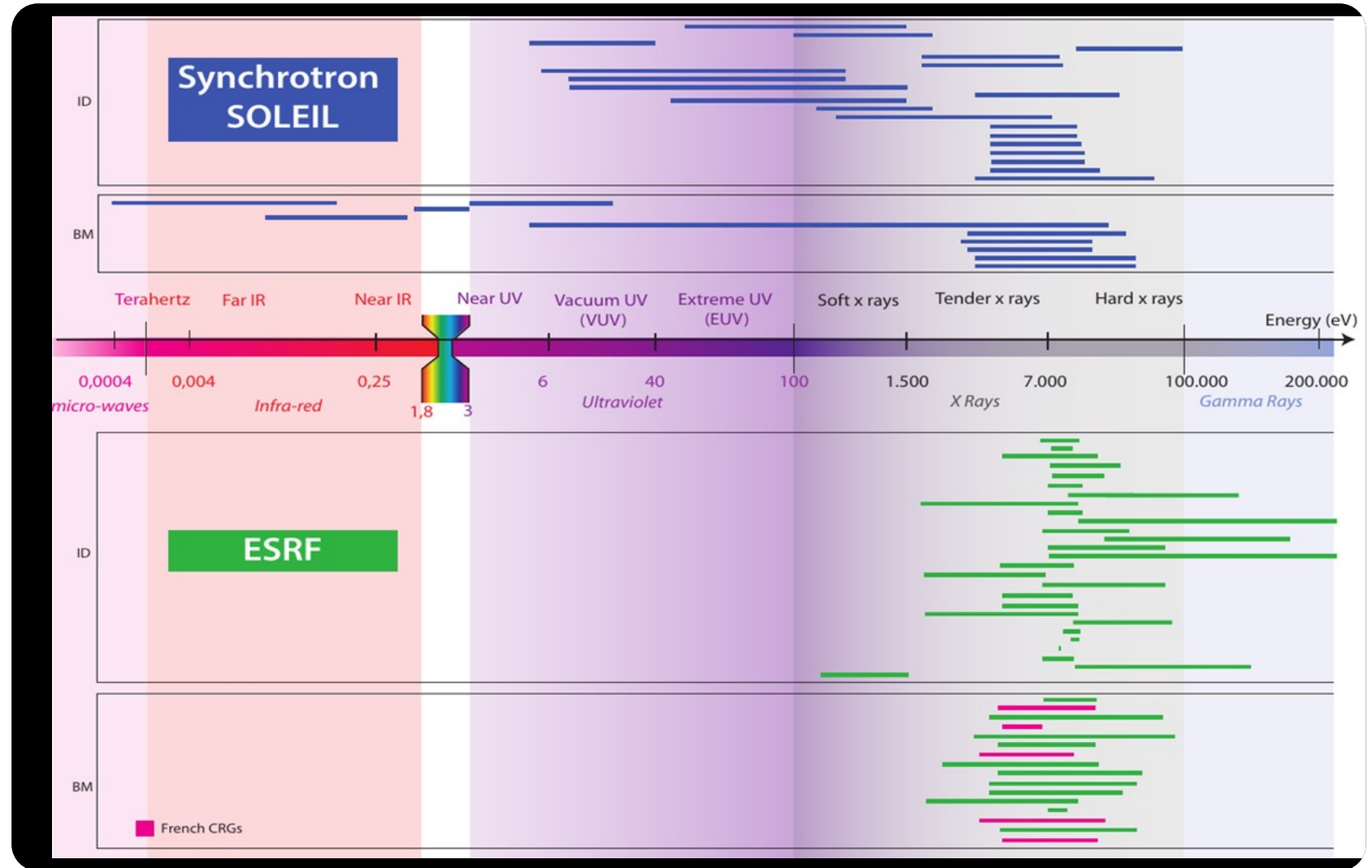
- **×100 en brillance** dans le domaine d'excellence (X mous et tendres)
- **Expériences jusqu'à 10 000 fois plus rapides**
- Émittance : **~80 pm·rad** (vs 4 000 pm·rad actuels) → ×50 de réduction
- Taille de faisceau : **<10 μm RMS** dans les sections droites

## Sobriété énergétique — un avantage différenciant

- Aimants permanents → **−40% de consommation électrique**
- Nouvelle station eau glacée → **−80% de consommation d'eau potable**

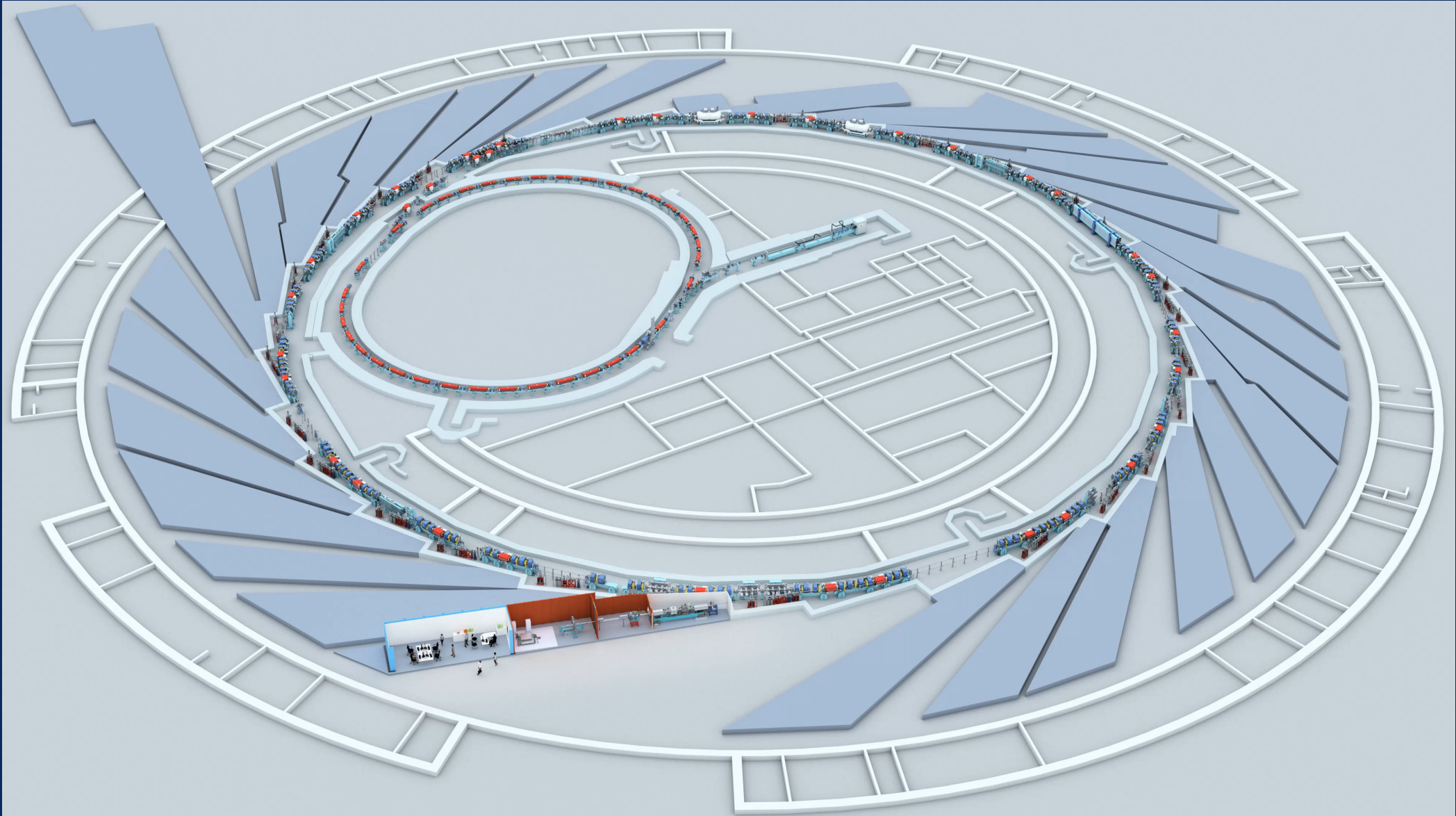


PUBLIC



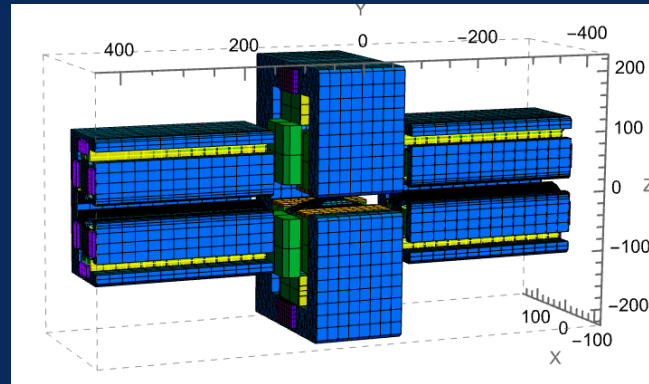
# Techniques de Rayonnement Synchrotron — Quelques Définitions

Technique	Définition
<b>Diffraction des rayons X (XRD)</b>	Mesure de la structure cristalline des matériaux par diffraction d'un faisceau X monochromatique
<b>Absorption X (XAS / XANES / EXAFS)</b>	Sonde l'environnement local d'un atome en mesurant son absorption des rayons X en fonction de l'énergie
<b>Fluorescence X (XRF)</b>	Détection des éléments chimiques par émission de rayons X caractéristiques après excitation
<b>Photoémission X (XPS / HAXPES)</b>	Mesure de l'énergie des électrons éjectés pour analyser la composition et l'état chimique de surface
<b>XPS angle-résolu</b>	Variante de l'XPS mesurant la structure de bande électronique en fonction de l'angle d'émission
<b>XPS résolu en spin</b>	XPS avec analyse de la polarisation de spin des électrons émis
<b>XPS résolu en temps</b>	XPS avec résolution temporelle pour suivre des dynamiques ultrarapides
<b>XMCD (dichroïsme magnétique circulaire X)</b>	Mesure des propriétés magnétiques des matériaux via la différence d'absorption entre deux polarisations circulaires
<b>XMLD (dichroïsme magnétique linéaire X)</b>	Variante du XMCD sensible à l'antiferromagnétisme, utilisant la polarisation linéaire
<b>SAXS (diffusion X aux petits angles)</b>	Caractérisation de structures nanométriques (taille, forme, organisation) par diffusion à faible angle
<b>Diffusion X inélastique (IXS)</b>	Sonde les excitations dynamiques (phonons, magnons) par transfert d'énergie des photons X
<b>Diffusion X résonante</b>	SAXS/XRD combiné à l'absorption pour obtenir un contraste chimique et magnétique
<b>Tomographie (absorption)</b>	Reconstitution 3D d'un objet par mesure de l'atténuation des rayons X sous différents angles
<b>Tomographie (contraste de phase)</b>	Tomographie 3D exploitant le déphasage du faisceau X pour imager des matériaux à faible contraste
<b>Microscopie X</b>	Imagerie à l'échelle nanométrique par focalisation d'un faisceau de rayons X (résolution < 100 nm)
<b>Microscopie X douce</b>	Microscopie utilisant des rayons X mous pour l'imagerie chimiquement sélective de surfaces
<b>Spectroscopie IR &amp; THz</b>	Identification des liaisons moléculaires et des modes vibrationnels par absorption infrarouge et térahertz
<b>Microscopie IR</b>	Cartographie chimique d'un échantillon à l'échelle micrométrique par spectroscopie infrarouge
<b>Spectroscopie UV</b>	Mesure de l'absorption UV pour étudier les transitions électroniques de molécules et matériaux
<b>Microscopie UV-visible</b>	Imagerie optique à haute résolution exploitant les photons UV pour sonder des structures biologiques
<b>Fluorescence UV</b>	Détection de l'émission de fluorescence après excitation UV, sensible aux molécules biologiques
<b>Dichroïsme UV / VUV</b>	Mesure de la différence d'absorption entre polarisations pour étudier la chiralité moléculaire
<b>Absorption VUV / VUV-X mous</b>	Spectroscopie d'absorption dans le vide-UV et le domaine des X mous pour l'étude des liaisons électroniques
<b>Raman</b>	Diffusion inélastique de photons visibles révélant les modes de vibration moléculaire
<b>Biocristallographie (XRD)</b>	Détermination de la structure 3D de protéines et macromolécules biologiques par diffraction X

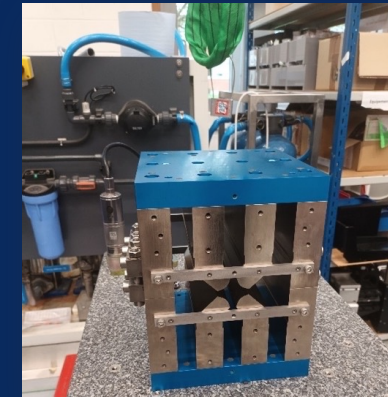




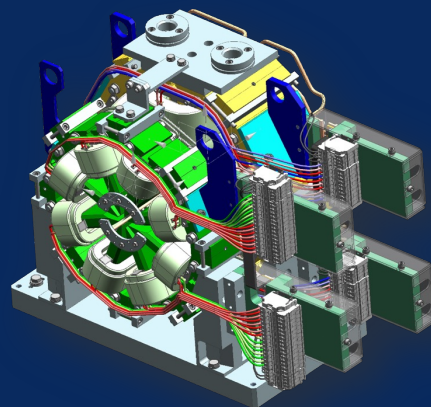
Prototype aimant 3T



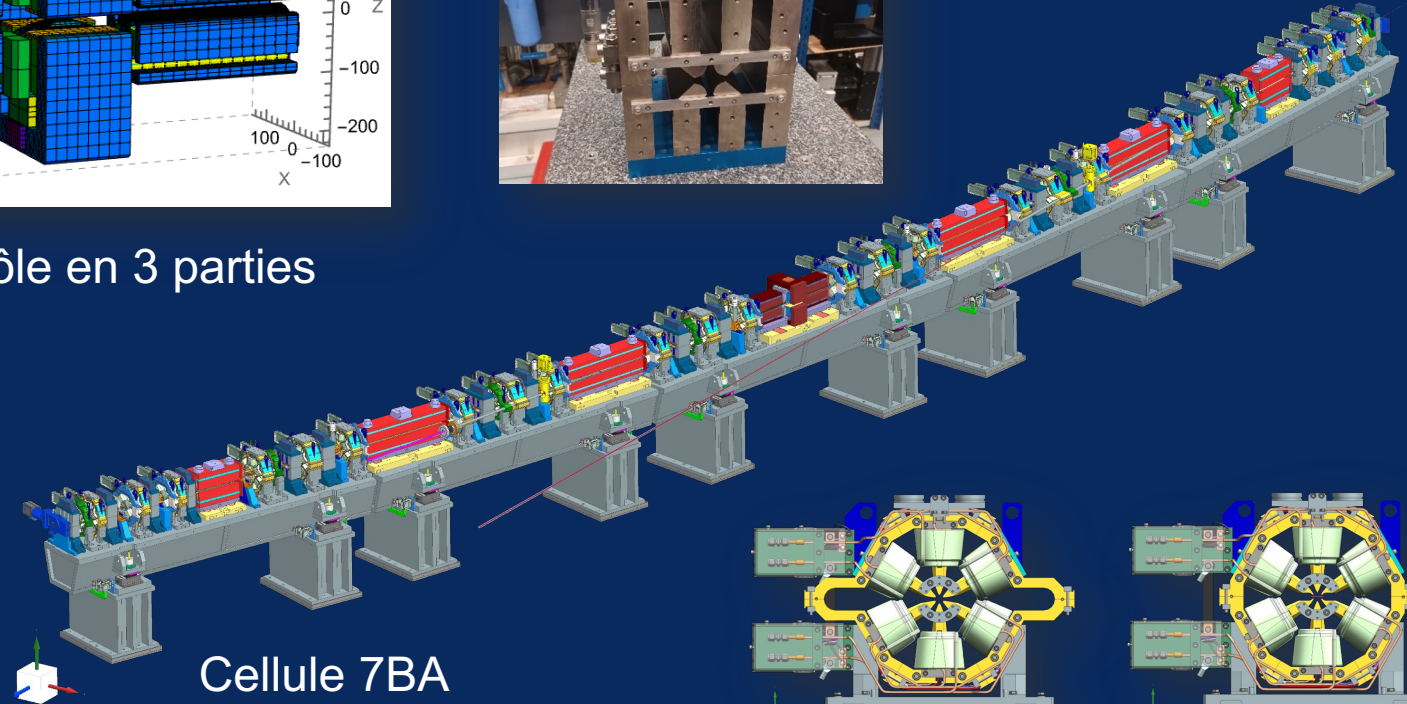
Aimant dipôle en 3 parties



Quadrupôle  
À aimants permanents

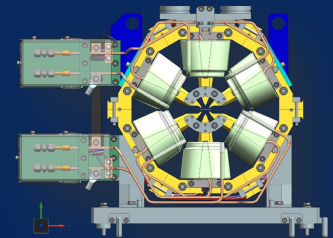
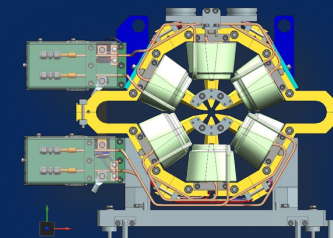


Doublet :  
sextupôle / correcteur  
quadrupolaire



Cellule 7BA

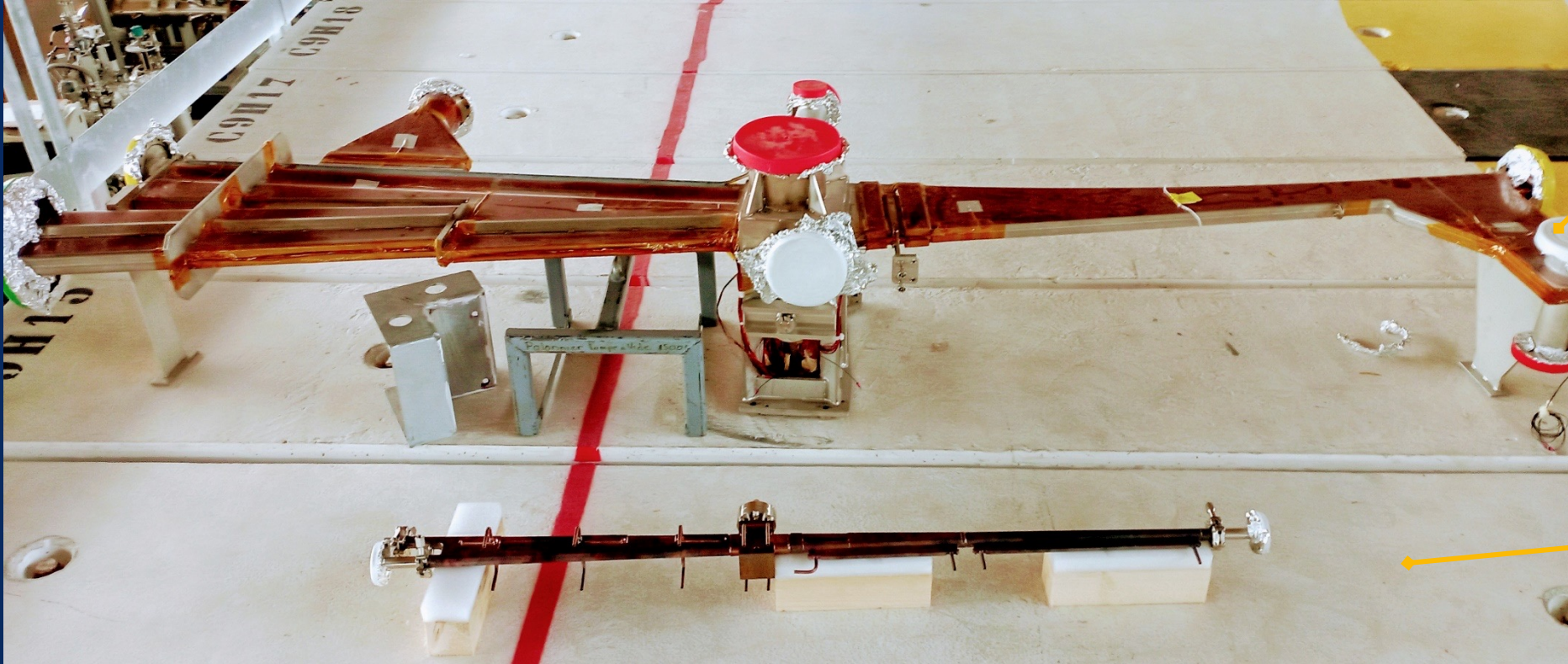
Version à oreilles  
Version à encoches



Sextupole

Octupole

# Exemple de Miniaturisation : Chambre à Vide Dipolaire



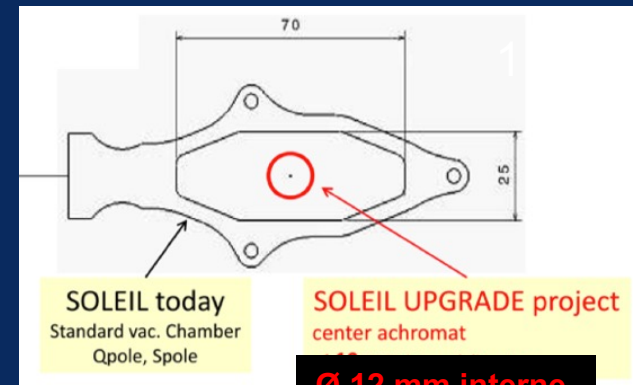
Chambre à vide d'un arc de **SOLEIL**  
 → 2005  
 [316LN]



[C. Herbeaux,  
 N. Bechu]



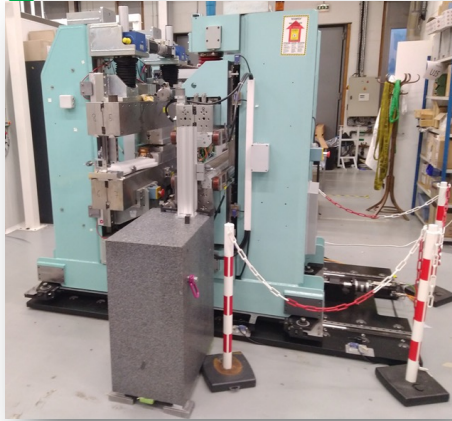
Chambre à vide d'un dipôle de **SOLEIL II** -  
 2024  
 [Cu / OFS+CuCrZr]



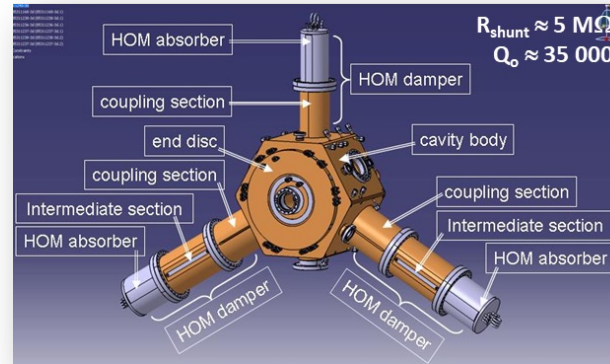
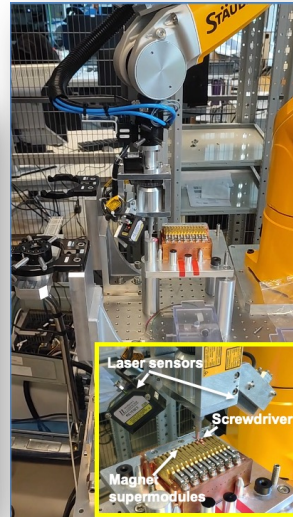
me d'euro : Ø 16,25 mm



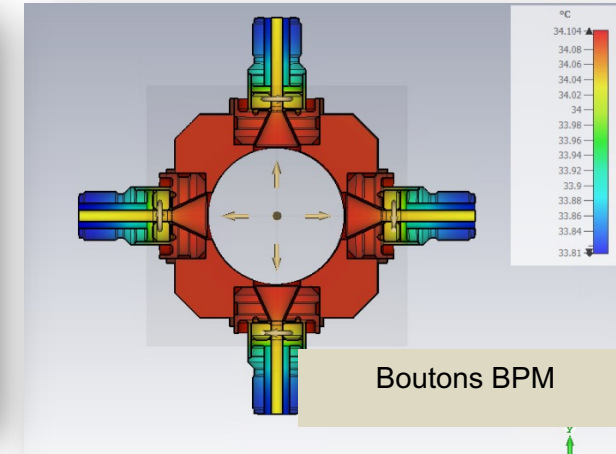
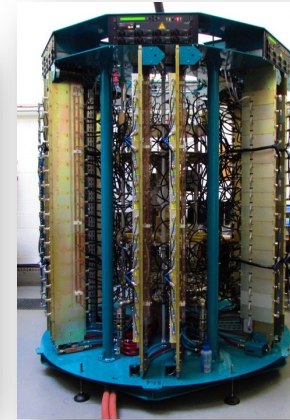
**Ø 12 mm interne**



Onduleurs Compacts  
Automatisation/robotisation



Cavités EBS-type 352 MHz (HOM amortis)



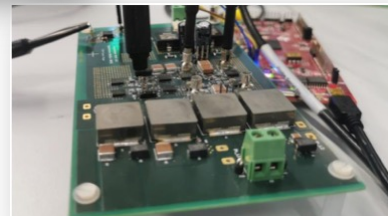
Boutons BPM



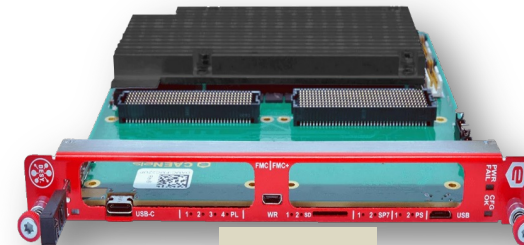
Performance des  
Chambres à vide



Carte / alimentations



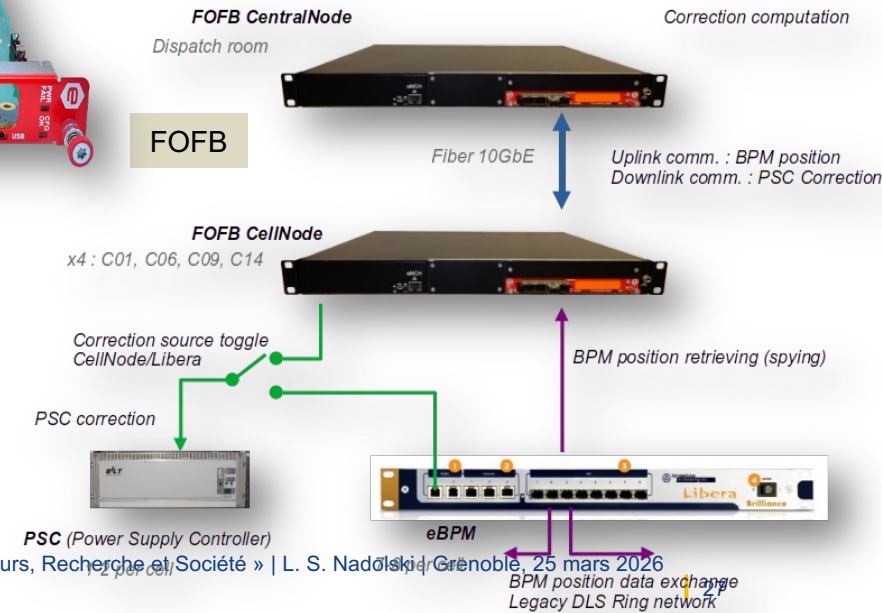
Optimisation énergétique



LLRF



Feedback rapide d'orbite



## Chiffres clés

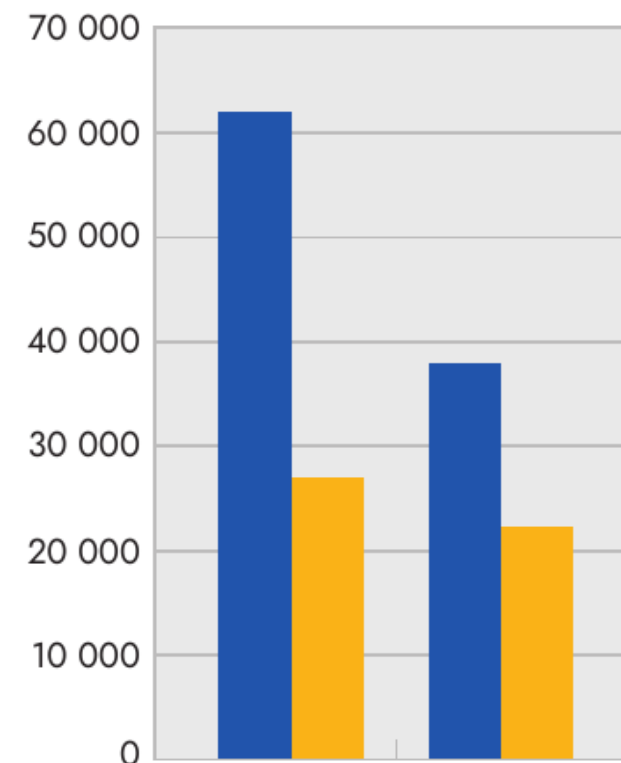


## Évaluation des émissions de gaz à effet de serre



- **Les photons synchrotron : des sondes uniques pour explorer la matière**
  - Expériences *in operando* et multimodales : cartographier, comprendre, agir à toutes les échelles
  - Des capacités analytiques sans équivalent, inaccessibles en laboratoire conventionnel
- **Les synchrotrons : bien plus que des accélérateurs**
  - Au service de la recherche, des industriels et de la société
  - Moteurs d'innovation : santé, matériaux, énergie, environnement, patrimoine
- **La France, en première ligne de la 4<sup>e</sup> génération synchrotron**
  - ESRF-EBS (opérationnel depuis 2020) + SOLEIL II (construction 2025-2030) : deux outils complémentaires
  - ×100 en brillance · ×50 en réduction d'émission
- **Science et sobriété : un modèle pour les accélérateurs du futur**
  - Aimants permanents, récupération d'eau : -80 % d'eau potable, -50 % d'électricité
  - La preuve que haute performance et durabilité vont de pair

Réduction de l'empreinte environnementale SOLEIL II vs. SOLEIL actuel



■ SOLEIL actuel ■ SOLEIL II

Eau (m<sup>3</sup>)      Electricité (MW.h)

→ Rendez-vous à IPAC 2026 · Deauville, 17–22 mai 2026

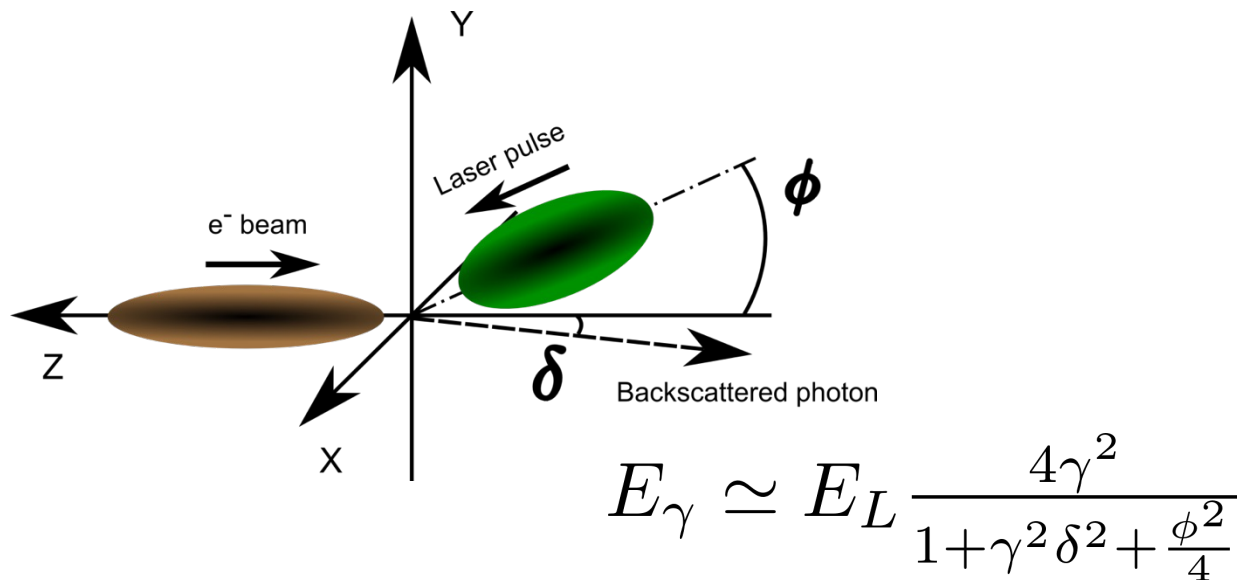


# Merci!



PUBLIC

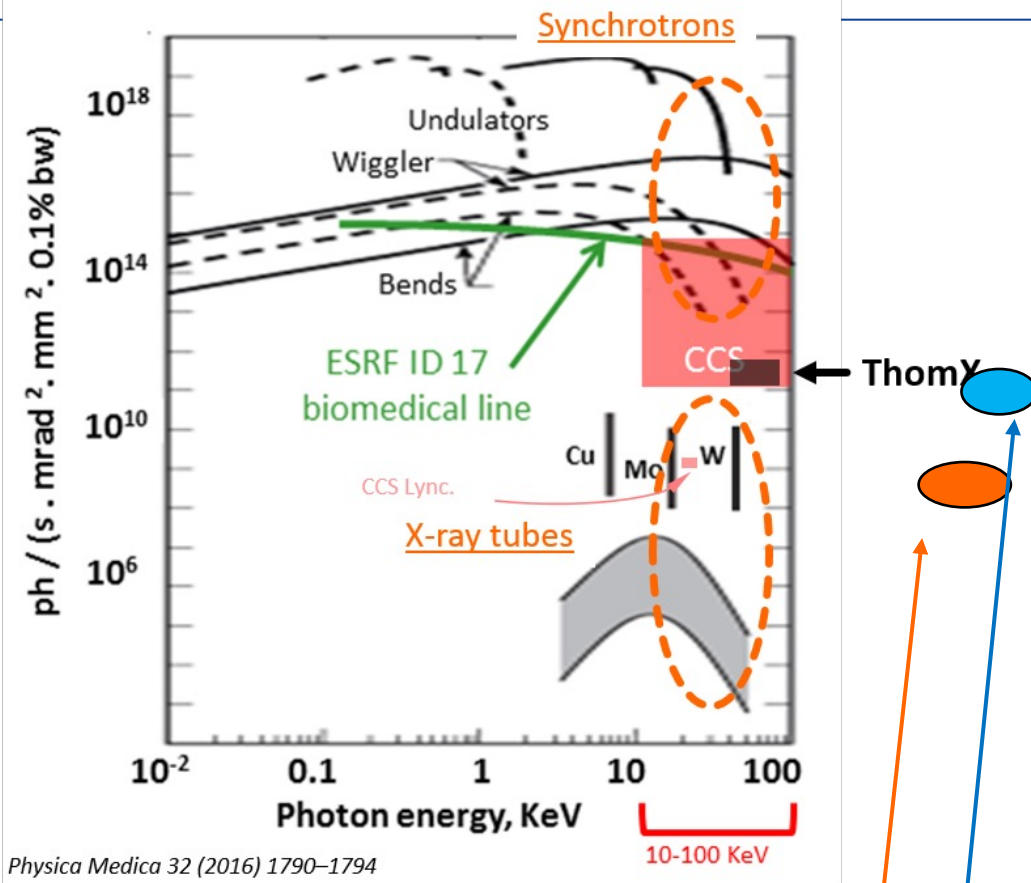
X-rays produced by Compton interaction



**High brightness beam on the laboratory-scale facilities** (hospitals, labs, museums...)

**Beam is produced in a untypical way**

- Compactness (footprint ~ 100 m<sup>2</sup>)
- Tunable X-ray beam energy
- Large X-ray energy range (keV to MeV)
- High brightness 10<sup>11</sup> – 10<sup>13</sup> ph/(s.mm<sup>2</sup>.mrad<sup>2</sup>) in 0.1% BW
- Flux 10<sup>12</sup> - 10<sup>13</sup> ph/s



Physica Medica 32 (2016) 1790–1794

nominal	energy	flux	brightness
ThomX (Orsay, FR)	45-90 keV	10 <sup>13</sup> ph/s	~ 10 <sup>11</sup>
MuCLS	15-35 keV	10 <sup>10</sup> - 10 <sup>11</sup> ph/s	10 <sup>8</sup> - 10 <sup>9</sup>
Lync. Tech (Munich, DE)			

\*Only 2 "high-flux" Compton sources currently in the world

**Principle:**

X Compton : 10- 100 keV

Energie : 50 MeV

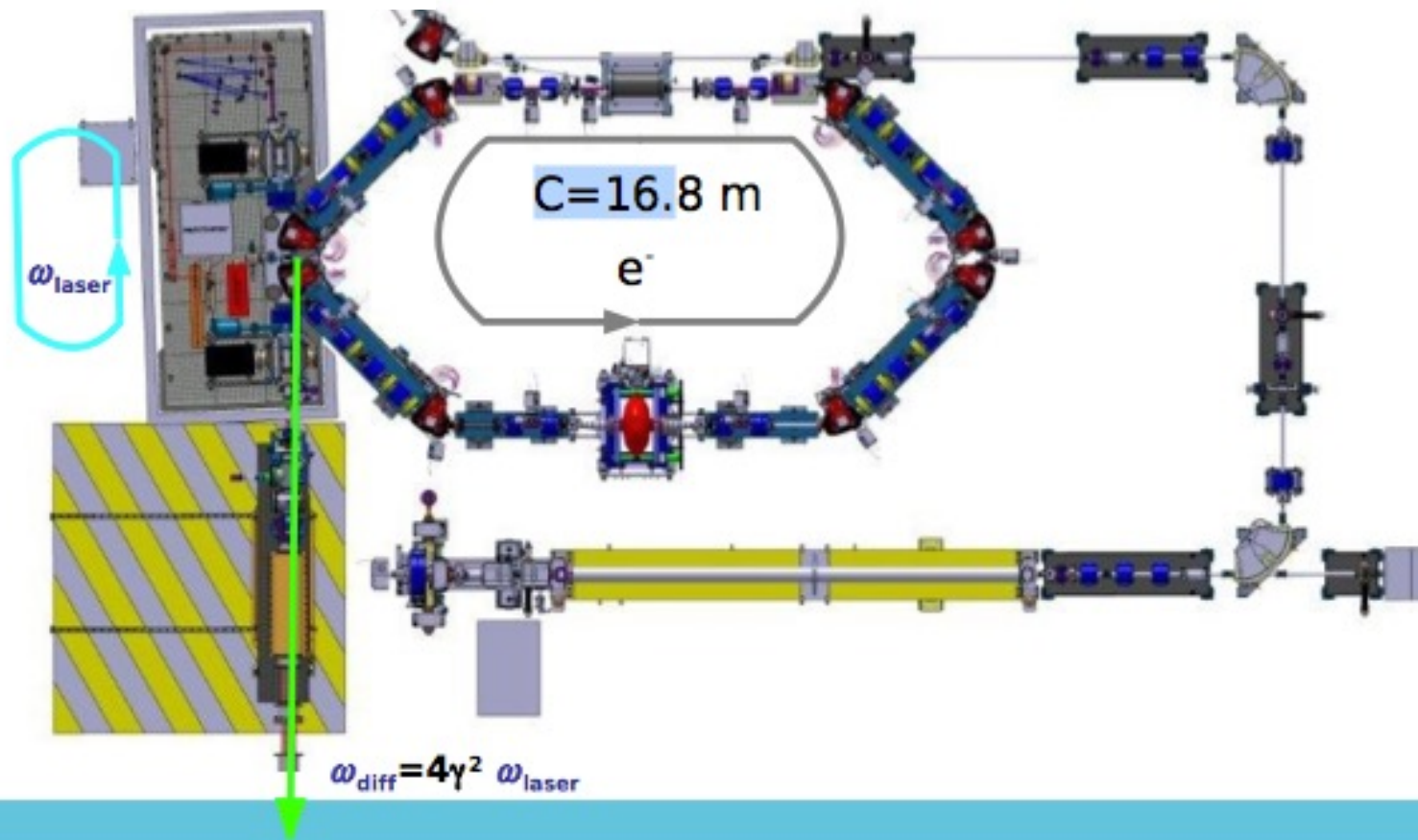
Fabry-Pérot cavity

Flux:  $10^{12}$ - $10^{13}$  ph/s

Démonstrateur  $10^{13}$  ph/s

~ 90 keV @ 70 MeV

100 m<sup>2</sup>



PUBLIC



APPLICATIONS OF  
PARTICLE ACCELERATORS  
IN EUROPE



<http://eucard2.web.cern.ch>

- More **COMPACT** accelerators, using **SC** and **NOVEL** acceleration Techniques
- **SIMPLER** cost-effective designs, more **EFFICIENT**, **ROBUST** and **RELIABLE**, **CHEAPER** to run and more **MOBILE**
- Further development of combined **IRRADIATION** and **IMAGING**
- Improved **ACADEMIA-INDUSTRY** interactions
- Improved **STUDENT TRAINING** and **KNOWLEDGE TRANSFER**
- Improved **R&D COLLABORATION** within **EU**
- Improved **PUBLIC UNDERSTANDING** of accelerators and their science