

# Projet d'upgrade majeur pour **SOLEIL**

**Journées Accélérateurs**

**Roscoff 2-4 octobre 2019**

Alexandre Loulergue

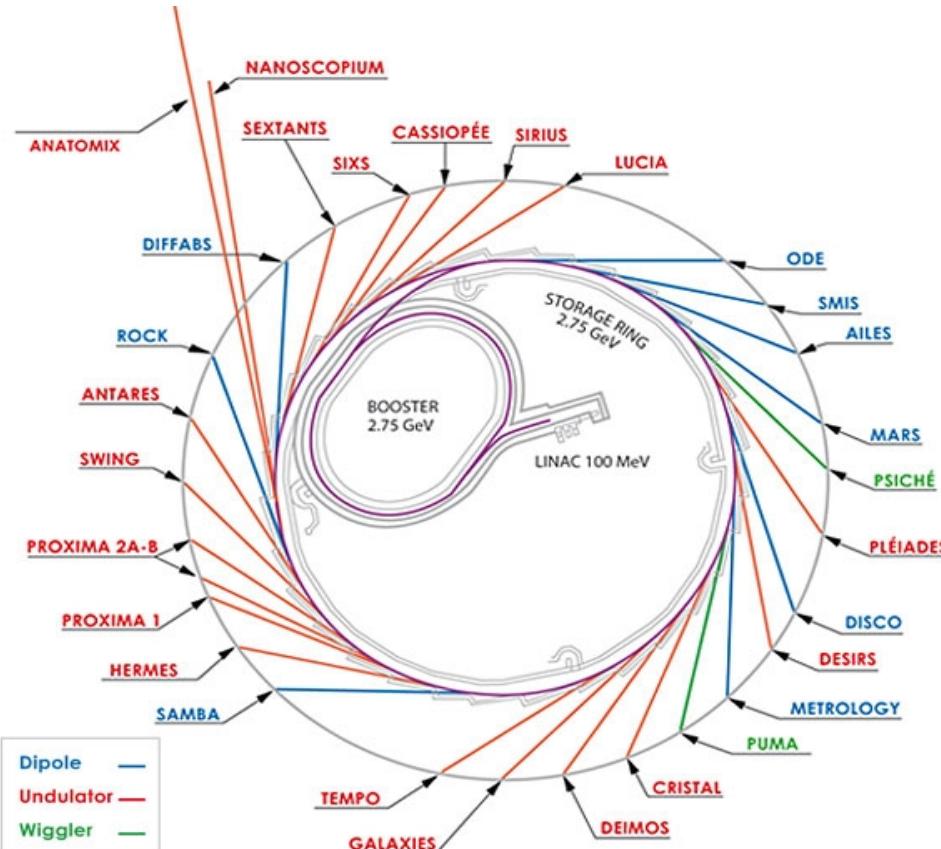
De la part de l'équipe de  
L'Avant Projet Sommaire  
(APS)



# Plan de l'exposé

- SOLEIL aujourd'hui
- Les anneaux de 4<sup>ème</sup> génération
- Les contraintes d'un upgrade
- Les solutions actuelles
- R&D équipements
- L'équipe et le planning

# SOLEIL aujourd'hui

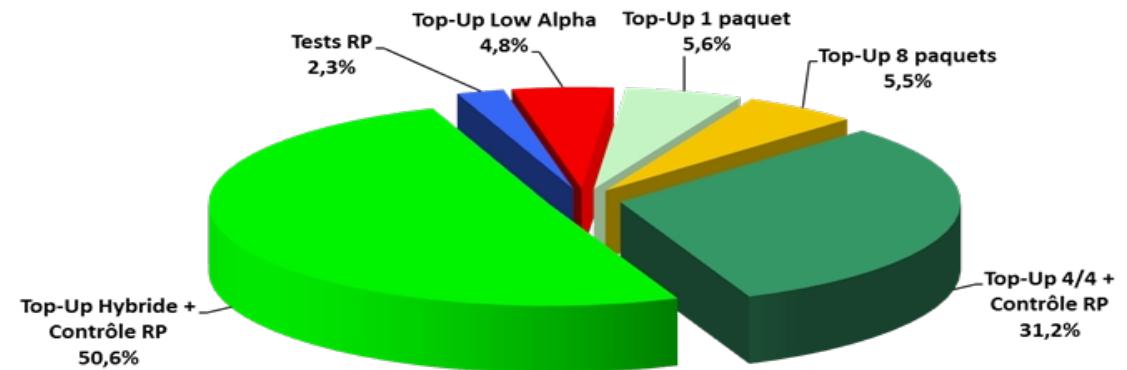


354 m de circonférence

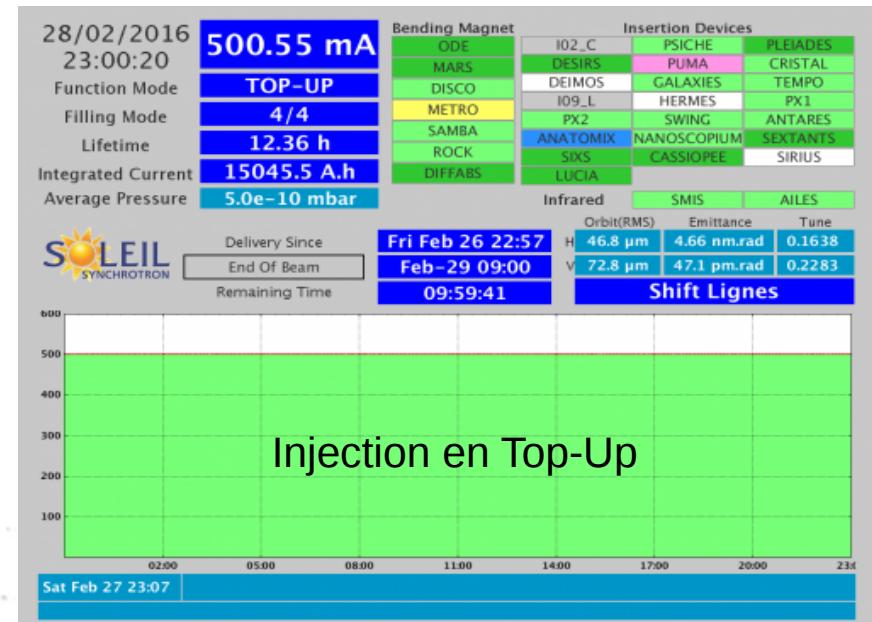
24 sections droites (12, 7 et 3.8 m)

29 lignes de lumière (**IR aux X-durs**)

Emittance naturelle de 4 nm.rad  
à 2.75 GeV



5 modes d'opérations



# Vers les anneaux de 4<sup>ème</sup> génération

Augmentation significative de la **Brillance** et de la **Cohérence** transverse des faisceaux de photons en diminuant de façon notable l'émittance horizontale  $\epsilon_x$  du faisceau d'électrons.

$$\epsilon_x \sim \frac{\text{Energie}^2}{(\text{Nbr de dipoles})^3}$$

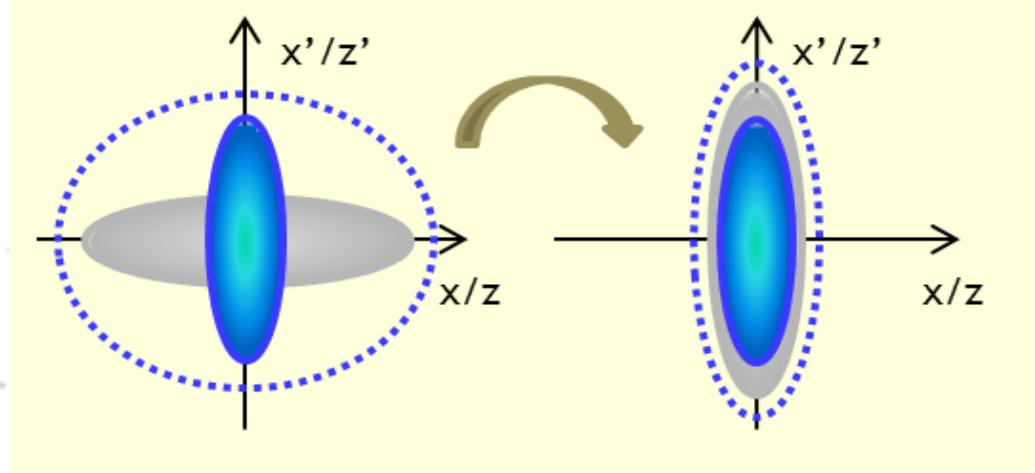
$$\text{Brillance} \sim \frac{1}{(\epsilon_x \otimes \epsilon_{\text{photon}})}$$

$$\text{Cohérence} \sim \frac{\epsilon_{\text{photon}}}{(\epsilon_x \otimes \epsilon_{\text{photon}})}$$

=> Une augmentation du nombre de dipôles par 4 ou 5, diminuerait l'émittance par **100** et augmenterait la brillance et la cohérence des faisceaux de photons par aussi **100** jusqu'à la **limite de diffraction** (quelques keV)

En limite de diffraction, lorsque les émittances des électrons et des photons sont similaires, l'adaptation de leurs ellipses est aussi importante.

=> une optique fortement focalisée aux points sources des onduleurs



## Vers les anneaux de 4<sup>ème</sup> génération

Le synchrotron MAX IV, inauguré en 2016, est le premier avec une émittance de 300 pm.rad

Depuis, d'autres projets de synchrotrons à très basses émittances voient le jour :  
au Brésil, en Chine, au Japon ...

En parallèle, les centres de rayonnement actuels proposent des « «Upgrades » :  
ESRF-EBS, SLS2, DiamondII, Elettra2.0, Petra IV, SOLEIL, Spring8-2, APS-U ...

L'ESRF est la première machine à opérer un upgrade majeur réduisant l'émittance de 3.8 nm.rad à 134 pm.rad (Exposé suivant de B. Roche)

On peut compter aujourd'hui environ une vingtaine de projets à travers le monde

# Anneaux 3<sup>ème</sup> et 4<sup>ème</sup> générations dans le monde

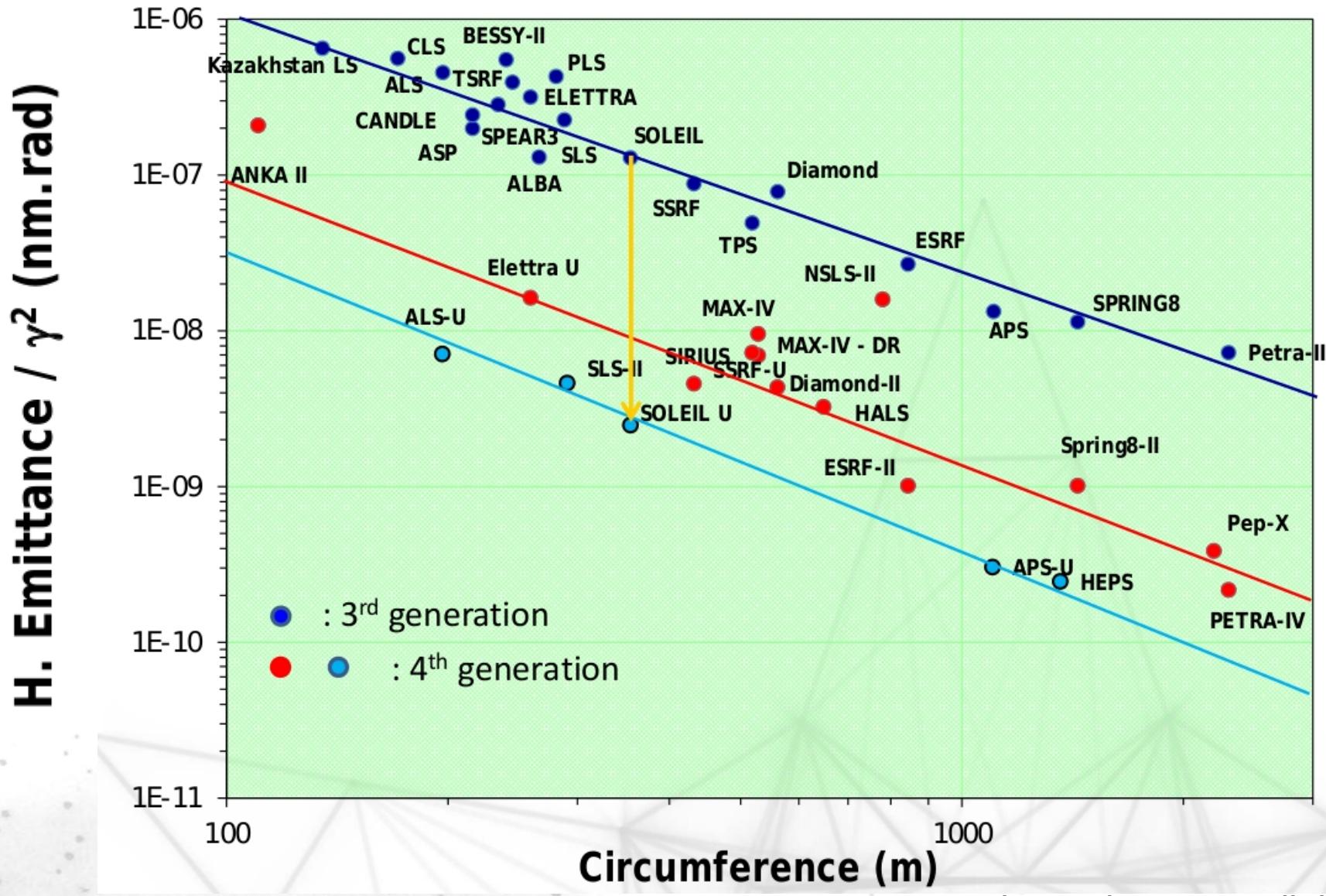
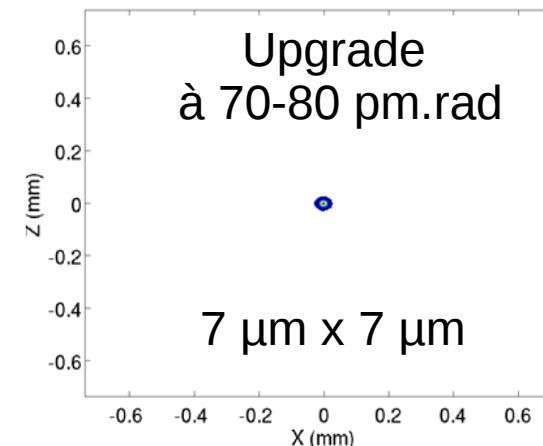
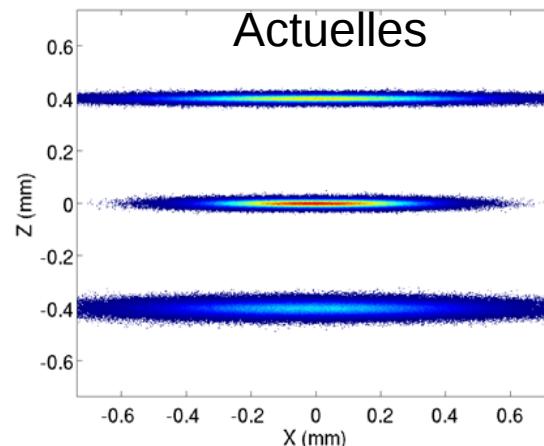


Figure de R. Bartolini mise à jour

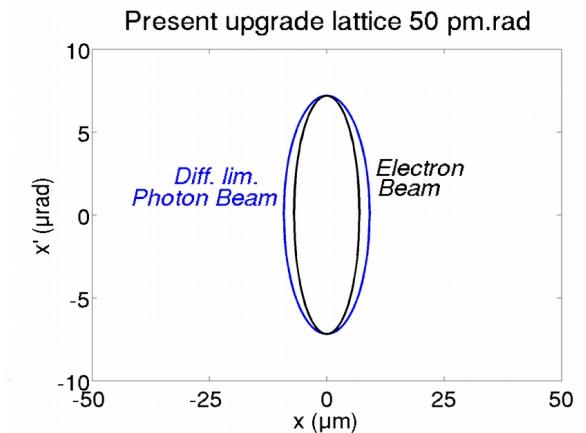
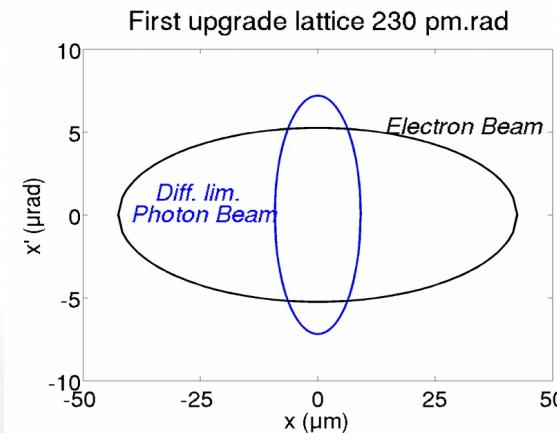
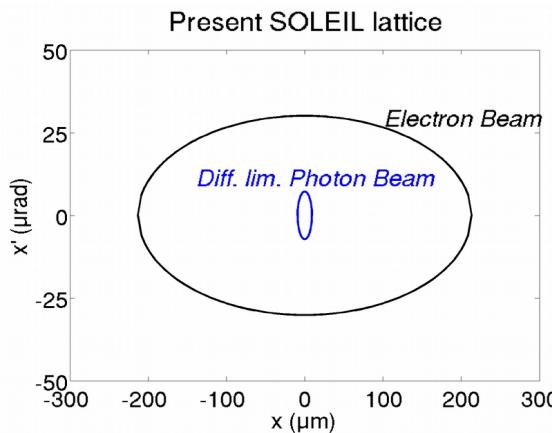
# De la 3<sup>ème</sup> à la 4<sup>ème</sup> génération pour SOLEIL

Comparaison des dimensions transverses sur sections droites (points sources)



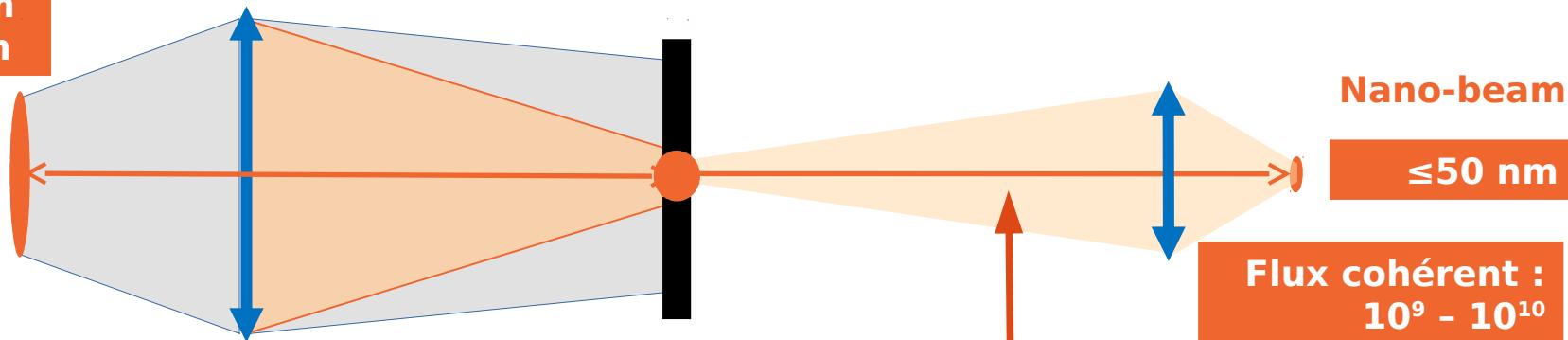
50 pm.rad dans les 2 plans en mode 100 % de couplage

Espace des phases horizontaux des électrons et des photons pour une énergie de 3 KeV

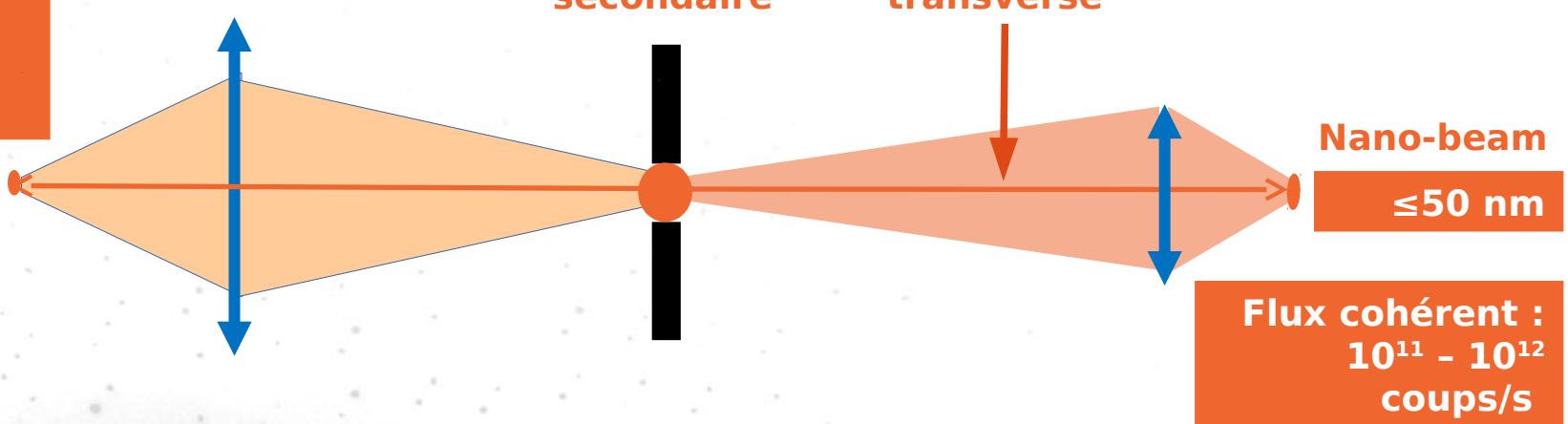


# 4<sup>ème</sup> génération côté science

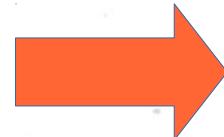
**Actuel :**  
H: 650 µm  
V: 20 µm



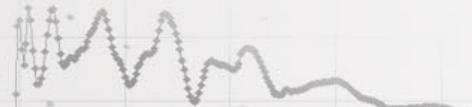
**Upgrade :**  
H: 15 µm  
V: 15 µm



**Sans modifications de l'optique et des équipements majeurs**



**2 ordres de grandeur de flux**

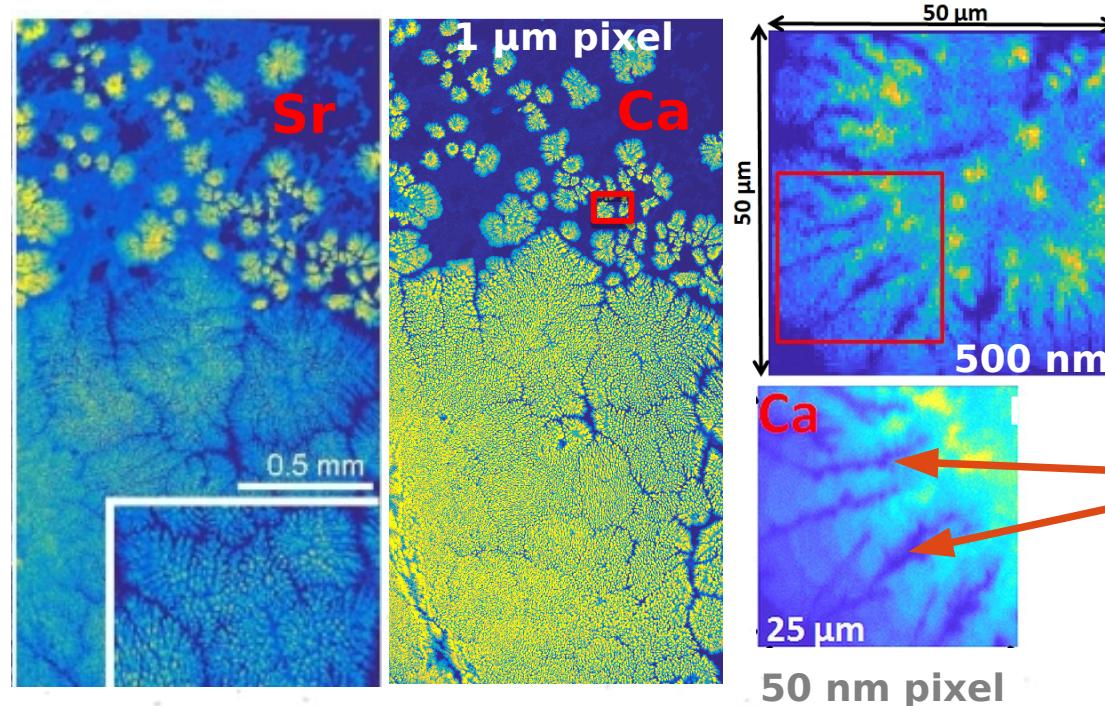


# 4<sup>ème</sup> génération côté science

## ETUDE DES PROCESSUS DE CROISSANCE DE LA NACRE D'UNE PERLE ANALYSE PAR FLUORESCENCE X & CONTRASTE DE PHASE



Couche de nacre d'une jeune perle



Collaboration  
Nanoscopium avec J.P.  
Cuif, Y. Dauphin, MNHN,  
Paris

Actuel :  
12 heures  
de faisceau



Upgrade:  
7 minutes



Ouvre la porte pour  
des analyses 3D  
uniques

# Objectifs et contraintes

Réduire l'émittance naturelle horizontale < 100 pm.rad

Garder un courant stocké de **500 mA** en remplissage multi-paquets

La géométrie de l'anneau doit préserver les points sources et les cabanes expérimentales :  
de la ligne **MARS** (ligne dédiée pour échantillons radioactifs)  
des 2 lignes longues (~ 200 m) **NANOSCOPIUM** et **ANATOMIX**

L'impact sur les autres lignes doit être minimisé au mieux

L'anneau doit proposer au moins **20** sections droites et **4** super-bend (3 T)

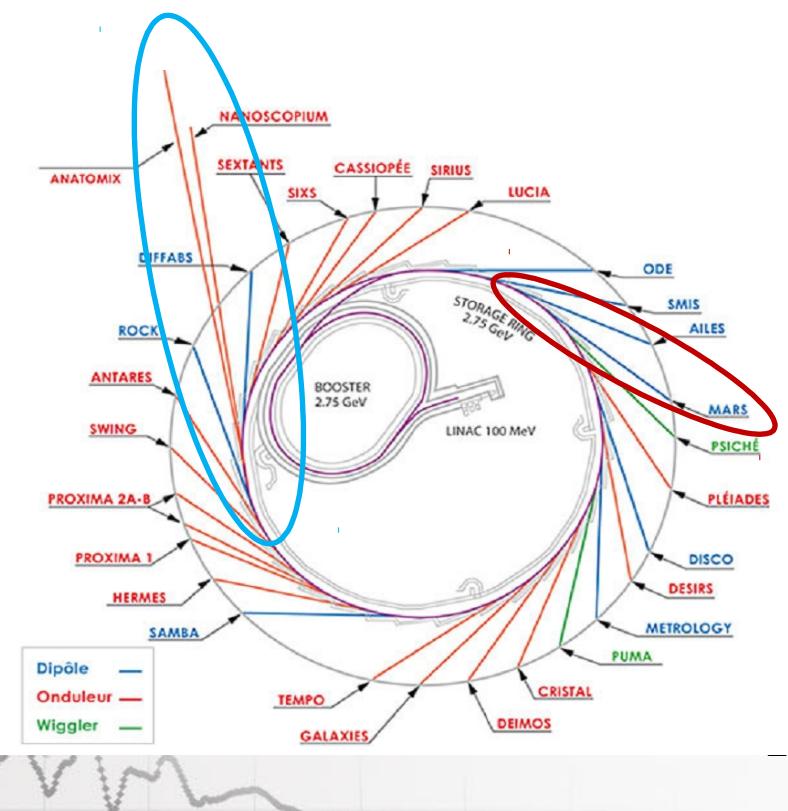
L'extraction de photons à basse énergie (quelques eV)

Les modes de remplissage de type hybride,  
8 paquets et 1 paquet devront aussi être délivrés

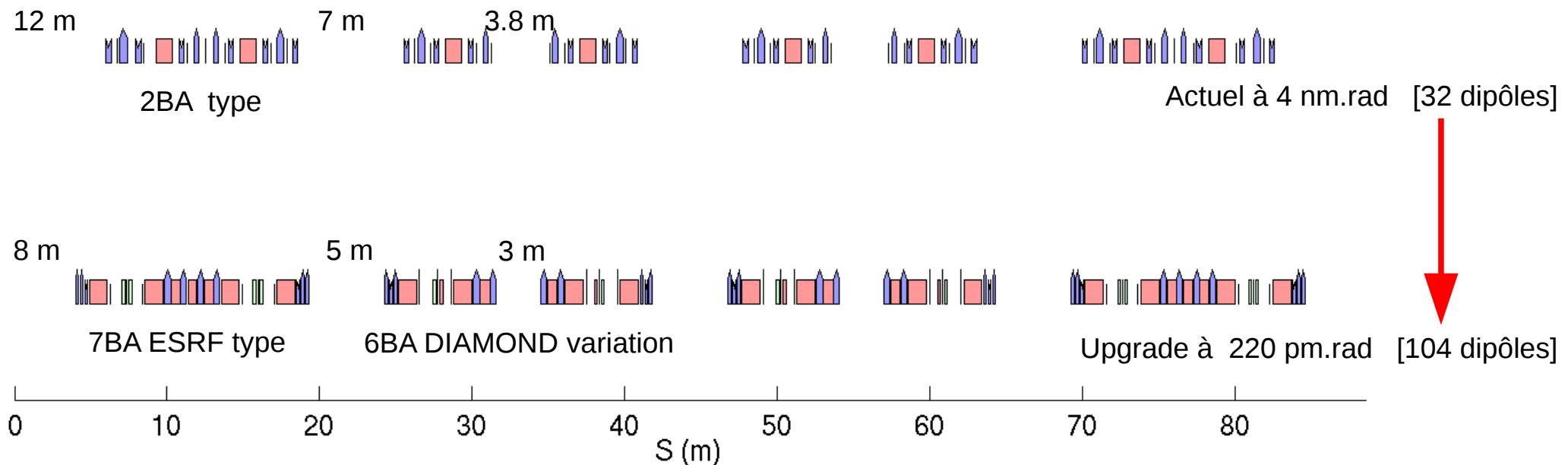
Conserver le tunnel et les blindages actuels

Réutiliser l'injecteur (Linac et Booster) au mieux

L'arrêt du faisceau (démontage et re-commissionning)  
devrait s'étaler sur 18 à 24 mois



# Evolution de l'upgrade anneau

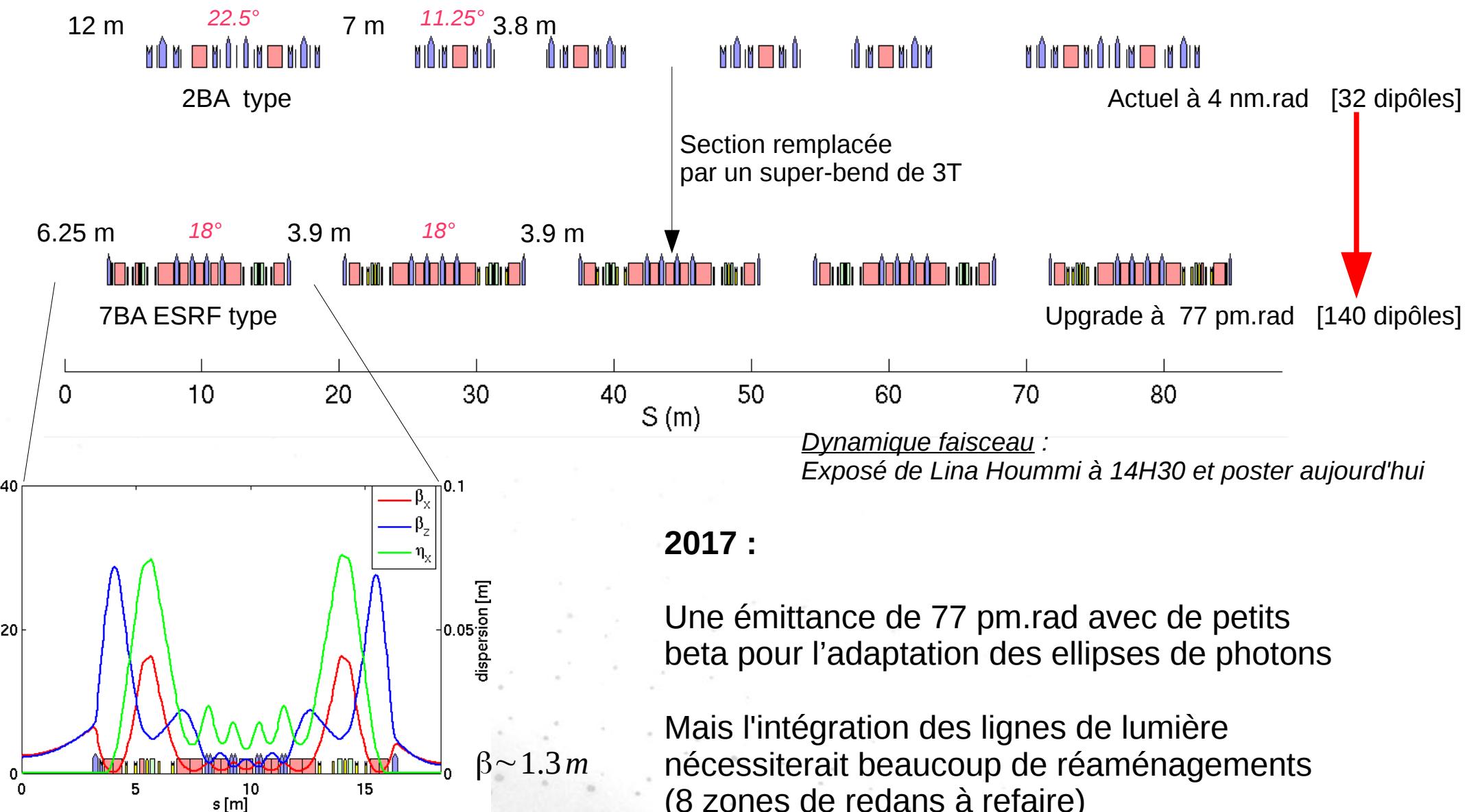


2016 :

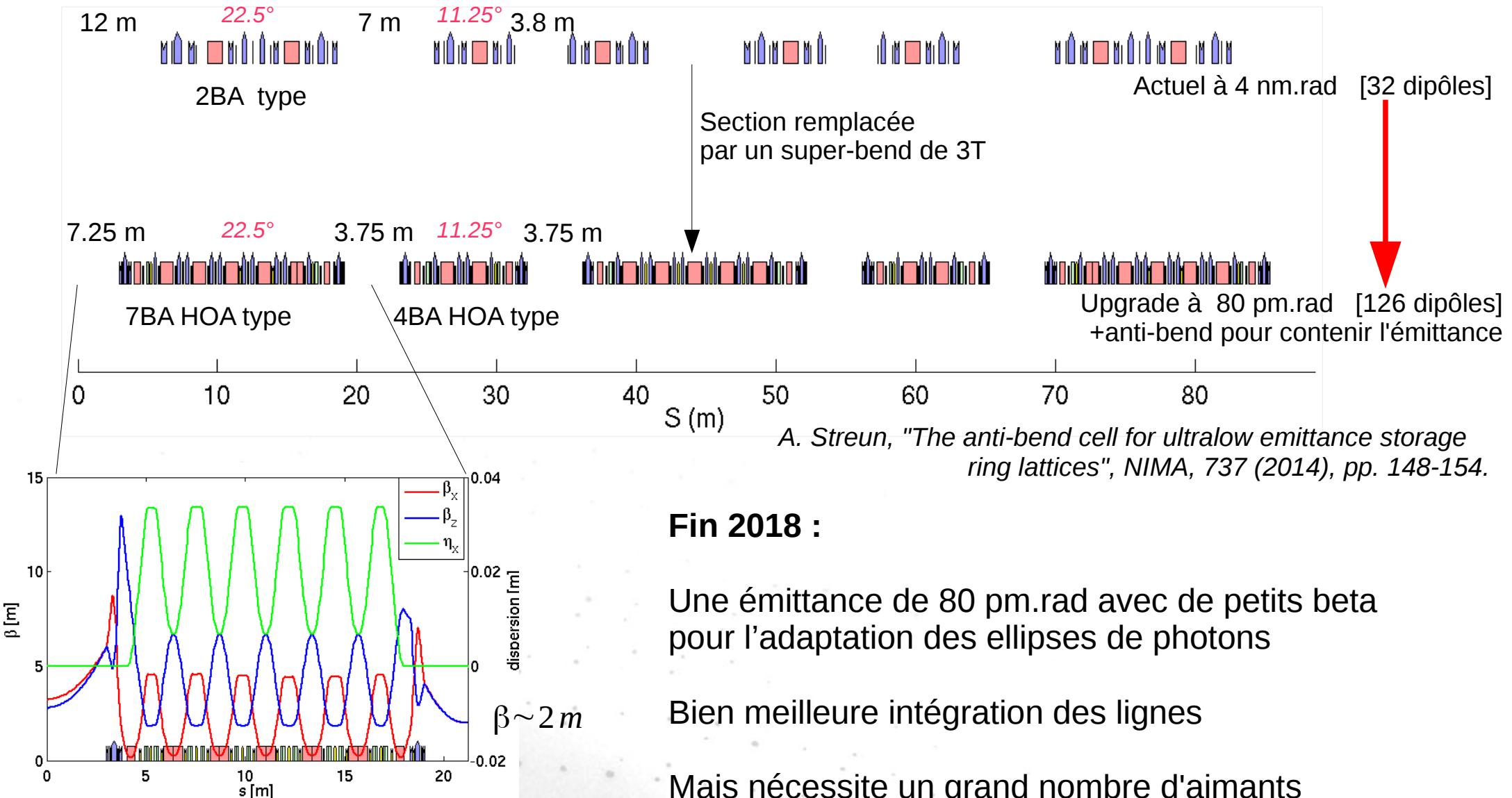
Une émittance de 220 pm.rad mais considérée comme pas **suffisamment ambitieuse** ...

L. Farvacque et al. , A Low-Emittance Lattice for the ESRF,  
Proceedings of IPAC (2013)

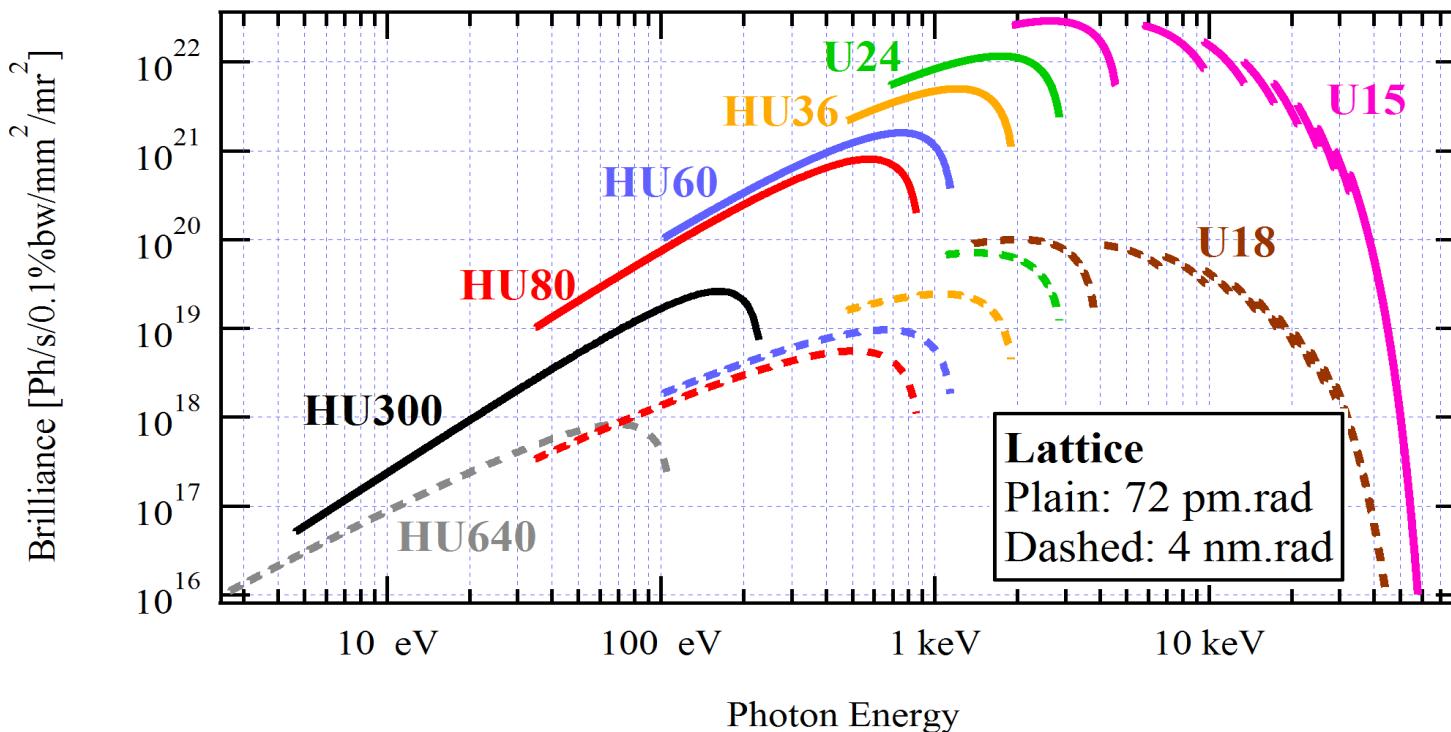
# Evolution de l'upgrade anneau



# Évolution de l'upgrade anneau



# Comparaison des brillances



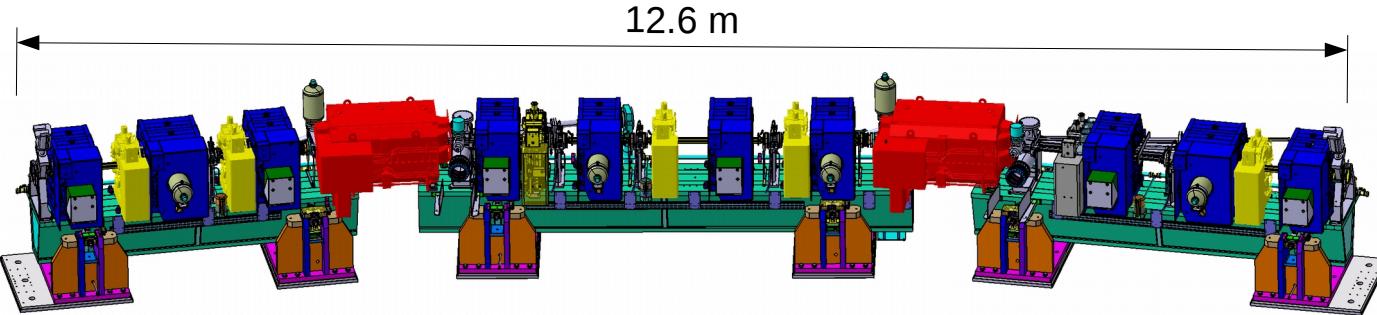
L'augmentation de la brillance est de **2 ordres de grandeur** dans notre région d'intérêt :

entre 1 et 3 keV, excédant la valeur de **10<sup>22</sup>** photons/s/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/0.1%bw

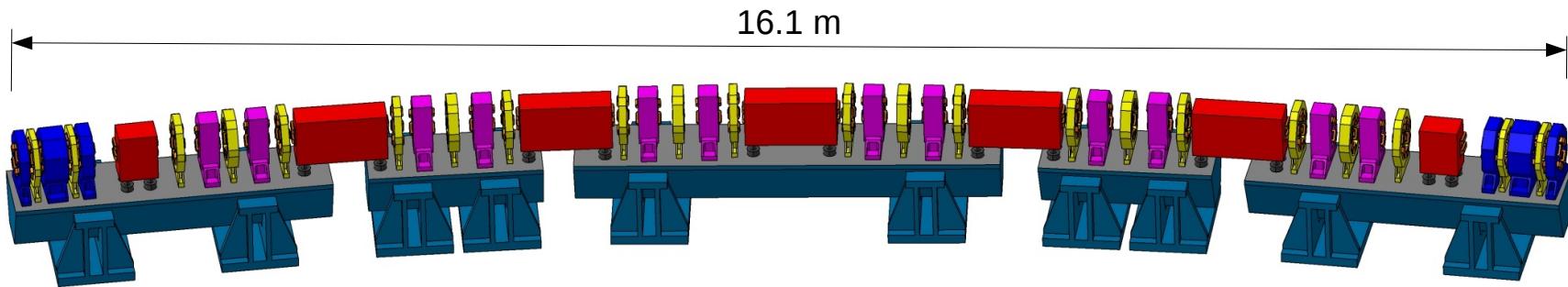
Elle peut aussi excéder **10<sup>20</sup>** photons/s/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/0.1%bw at 40 keV,

# Évolution de l'upgrade anneau

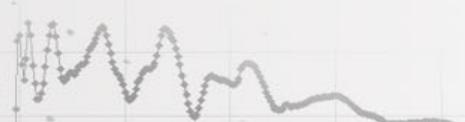
Cellule actuelle à 2 dipoles



Cellule upgradée à 7 dipoles



Le nombre d'aimants est accru de façon très notable, le total passe de 312 à 1164  
Leurs forces deviennent élevées, de 20 à 100 T/m pour les quadrupoles et de 300 à 7000 T/m<sup>2</sup> pour les sextupoles  
Les espaces entre culasses sont aussi très réduits



# Études magnétiques en cours

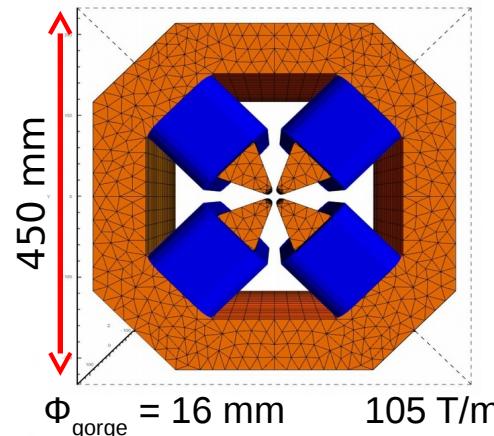
Des études en parallèle sur des aimants de type électromagnétique et sur base d'aimants permanents avec un peu de variabilité (alimentations bien plus légères) sont en cours :

## Quadrupoles :

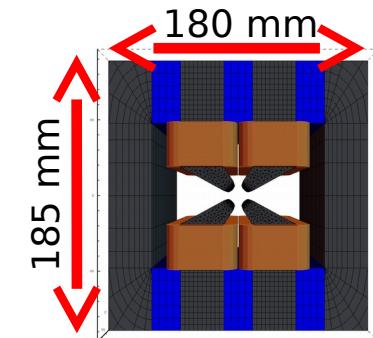
Cas sur aimant permanent sur base :

P. N'gotta, G. Le Bec, and J. Chavanne, "Hybrid high gradient permanent magnet quadrupole," Phys. Rev. Accel. Beams 19(12), 122401 (2016).

### Électromagnétique



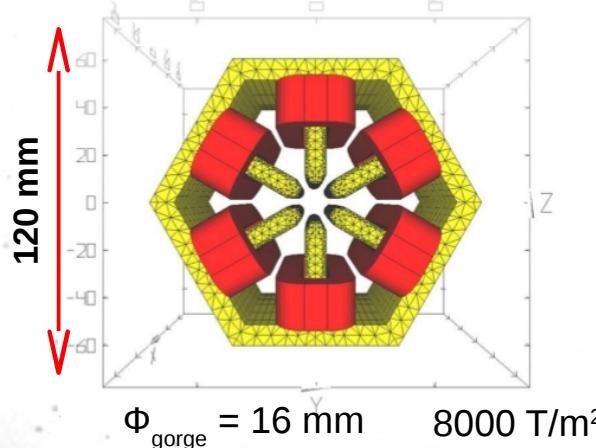
### Aimants permanents



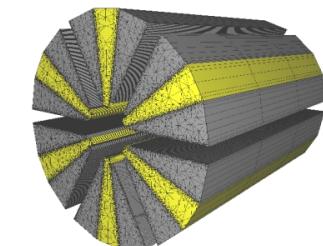
110 T/m  
+ Variable sur  $\pm 5\%$

## Sextupoles :

Un cas hybride (bobine + AP) est aussi à l'étude



OU



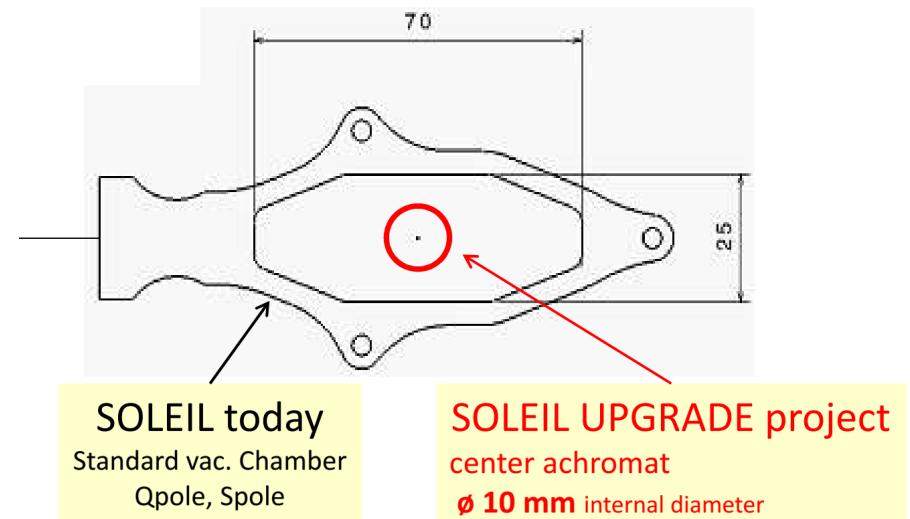
16000 T/m<sup>2</sup>  
+ Variable sur  $\pm 5\%$

# Études ultra-vides en cours

Réduction importante des dimensions des chambres à vide : **10 mm** de diamètre interne

Pompage standard par pompe ionique très limité

Environs **95 %** de l'anneau devra comporter un dépôt NEG



Nécessité d'augmenter les capacités (test et savoir faire) en dépôt NEG de SOLEIL

2 bancs de tests sont déjà lancés

S'associer avec des partenaires ayant des compétences clés avec les Technologies NEG (SAES Getter ou autres synchrotrons)

# Études radio-fréquences en cours

## RF principale à 352 MHz

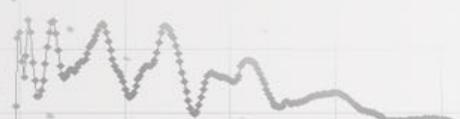
En assumant 1.5 MV de tension max et des pertes par tour de l'ordre de 500 keV

- Réutiliser 1 de nos cryo-modules actuels serait suffisant mais ils sont trop longs pour les sections de 4 m proposées.
- 4 cavités chaudes « HOM free » de type (ESRF-EBS) qui peuvent se loger dans une section dédiée est actuellement l'option favorite.
  - Conditions nominales réalisables avec 3 des 4 cavités opérationnelles (redondance)
  - Devrait permettre de répondre aux besoins de « l'injection longitudinale ».

## RF harmonique ( $h = 3$ ou $4$ )

- Nécessaire pour allonger les paquets et préserver les faibles émittances (vs IBS) et aussi garantir une durée de vie acceptable.
- Toutes les options, chaude ou supra, active ou passive sont ouvertes. Une possibilité serait d'utiliser un cryomodule du type Super3hc en opération sur SLS et ELETTRA, adapté pour  $h = 4$  de SOLEIL.
- Dans tous les cas, minimiser l'effet destructif du « transient beam loading », dû au gap en mode hybride, reste un challenge

**Un accord de collaboration avec ESRF, PSI et KEK est en cours de discussion**



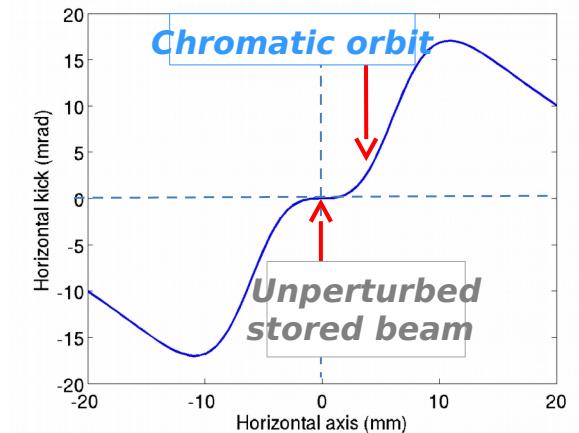
# Étude de l'injection

L'injection de paquets d'électrons par accumulation devient plus délicate avec des acceptances dynamiques réduites (faible émittance = forts champs non-linéaires )

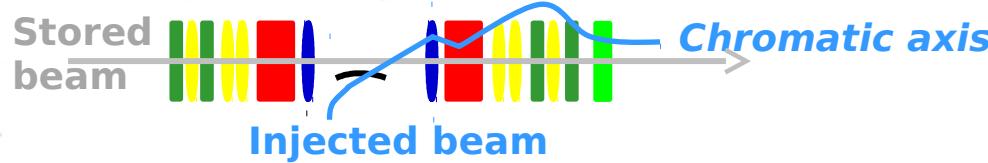
Des études sont menées sur des aimants pulsés (Multipole Injection Kicker MIK) les plus compacts possibles

J. Da Silva Castro, P. Alexandre, R. Ben El Fekih, and T. S. Thoraud, "Multipole Injection Kicker (MIK), a Cooperative Project SOLEIL and MAX IV", in Proc. 10th Mechanical Engineering Design of Synchrotron Radiation Equipment and Instrumentation Int. Conf. (MEDSI'18), Paris, France.

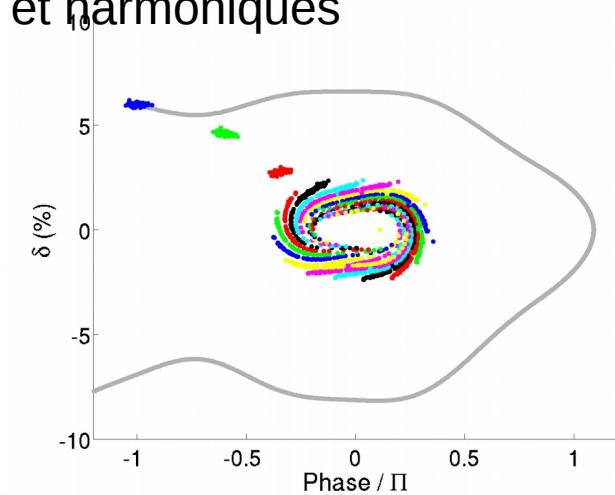
MIK transverse kick for 10 kA



En parallèle, une injection « off momentum » sur axe chromatique est aussi investiguée au moyen d'un kick RF additionnel fourni par les cavités principales et harmoniques



M. A. Tordeux, "Longitudinal injection into low-emittance ring, a novel scheme for SOLEIL upgrade", Topical workshop on injection. Berlin, 28-30 August 2017.



# L'équipe APS SOLEIL

Un groupe de travail est constitué depuis janvier 2019, il comporte 44 Work-Packages

## Transverses :

Coordination générale  
Planification  
...  
...

## Budget-achats-RH :

RH  
Budget  
...  
...

## Machine :

Injection  
Diagnostics  
Alimentations  
...  
...

## Infrastructure :

Alignement  
Génie civil  
Stabilité  
...  
...

## Informatique :

Stockage de données  
Calculs intensifs  
...  
...

## Expériences :

Cas scientifique

## Optiques :

Détecteurs  
Nano-positionnement  
...  
...



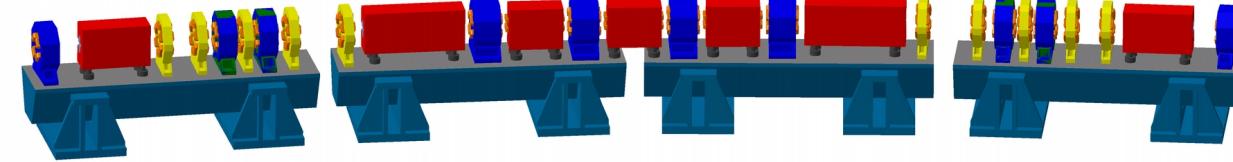
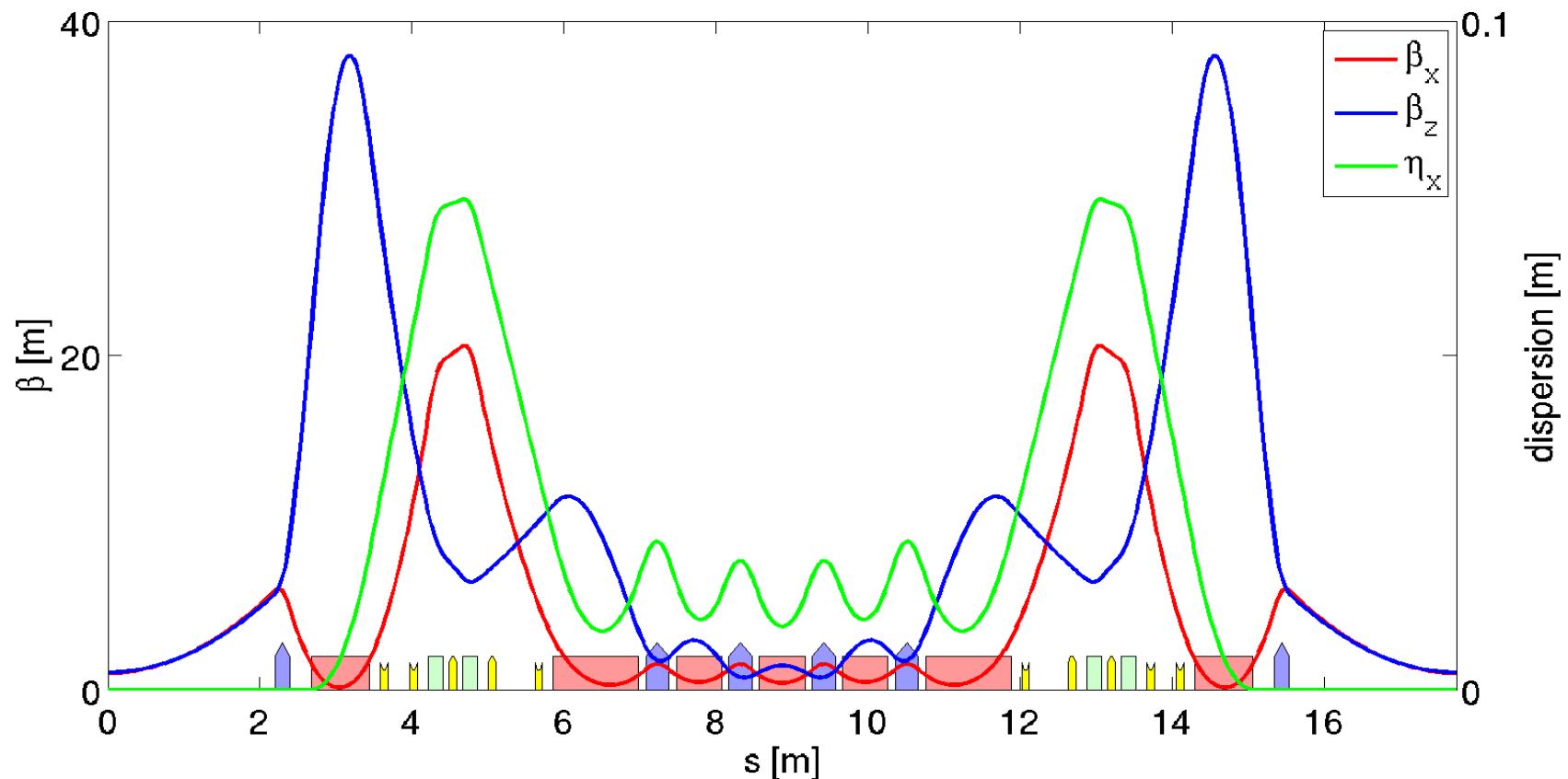
# Le planning

Date	Phase
2019	Décision de lancer l'Avant Projet Sommaire (APS ou CDR)
2019-2020	APS basé sur des études préliminaires et des prototypages
2020	Décision de lancer l'Avant Projet Détailé (APD ou TDR)
2021-2022	APD
2023	Décision de démarrer le projet
2025-2026	Réinstallation de l'anneau et des lignes de lumière et commissioning
2027	Redémarrage de l'opération pour les utilisateurs

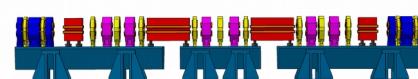
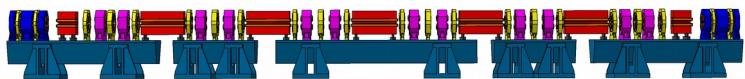
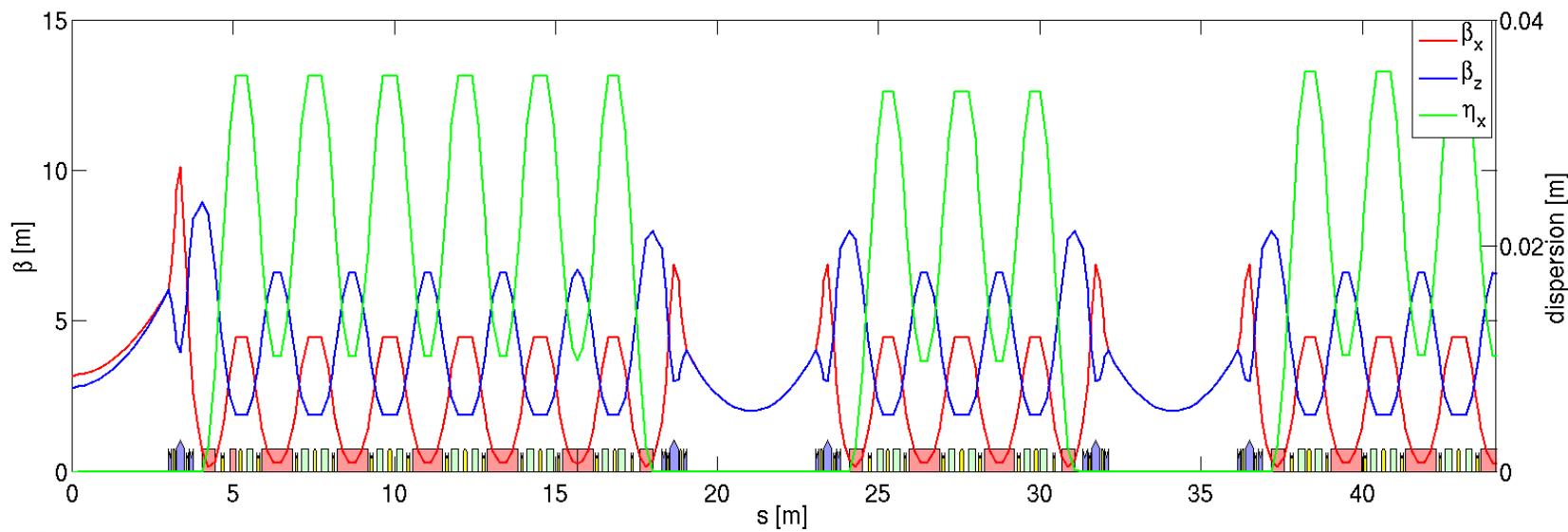
Merci pour votre attention



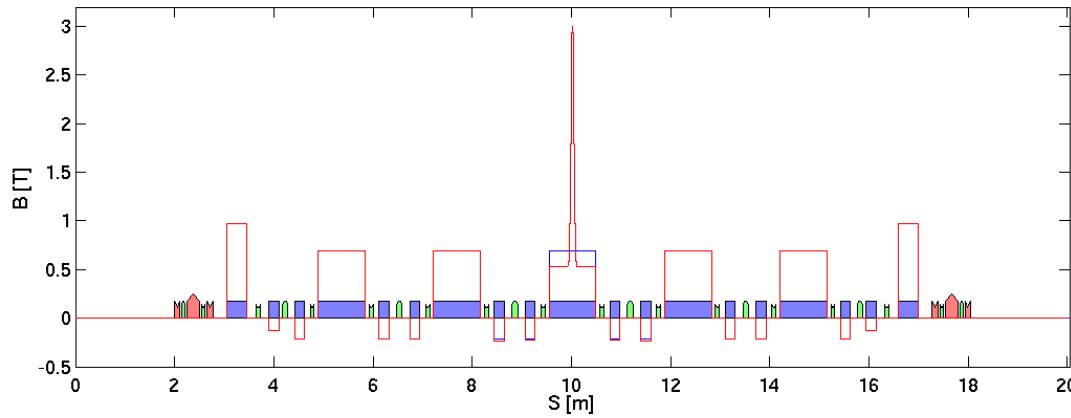
## Maille 07BA-HYB



## Maille 74BA-HOA

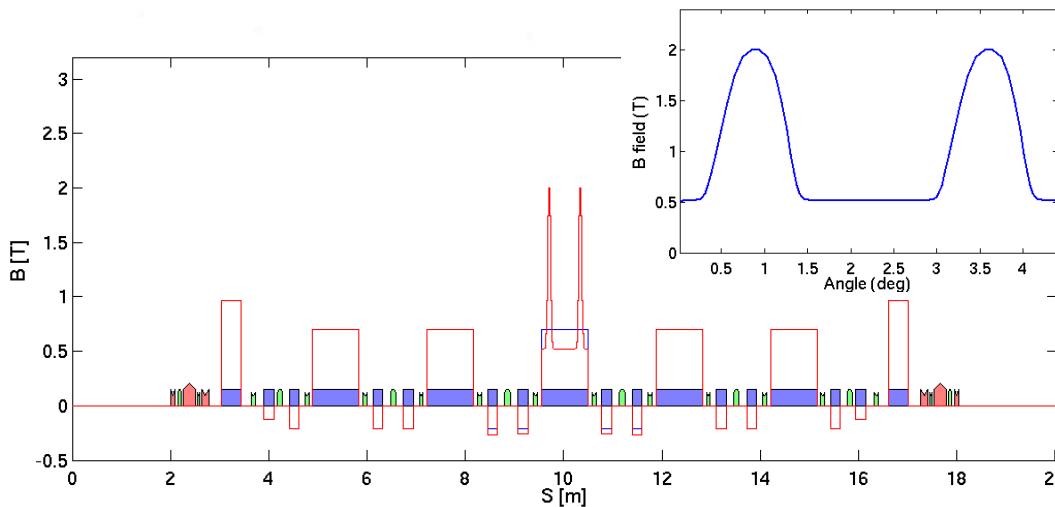


# Cas des lignes sur dipôle



Un champ pic centré  
pour une nouvelle ligne

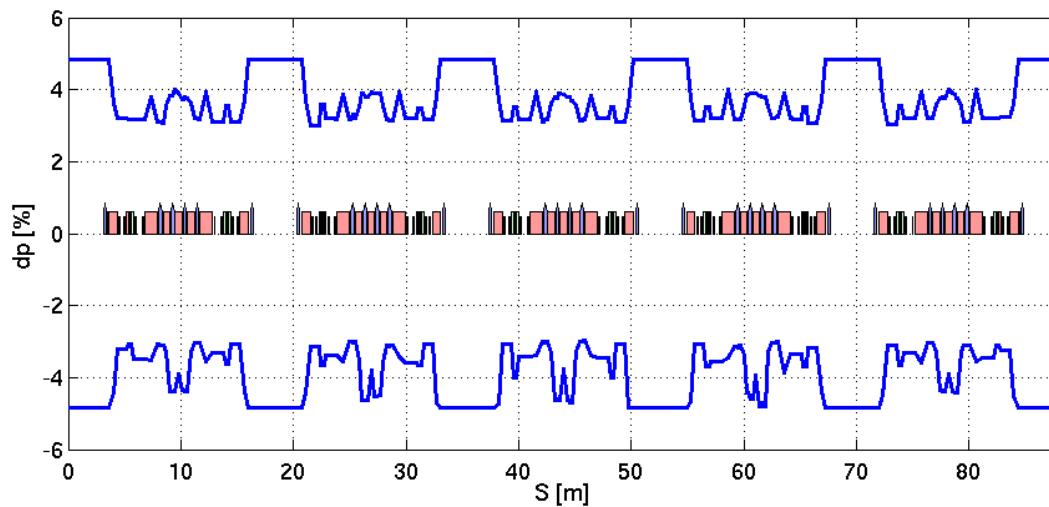
$$B_{\max} = 3 \text{ T} \quad (\text{super-bend})$$



Ou un double pic pour ajuster  
L'angle d'émission sur une  
ligne existante

$$B_{\max} = 1.7 \text{ T}$$

# Acceptance en énergie et durée de vie

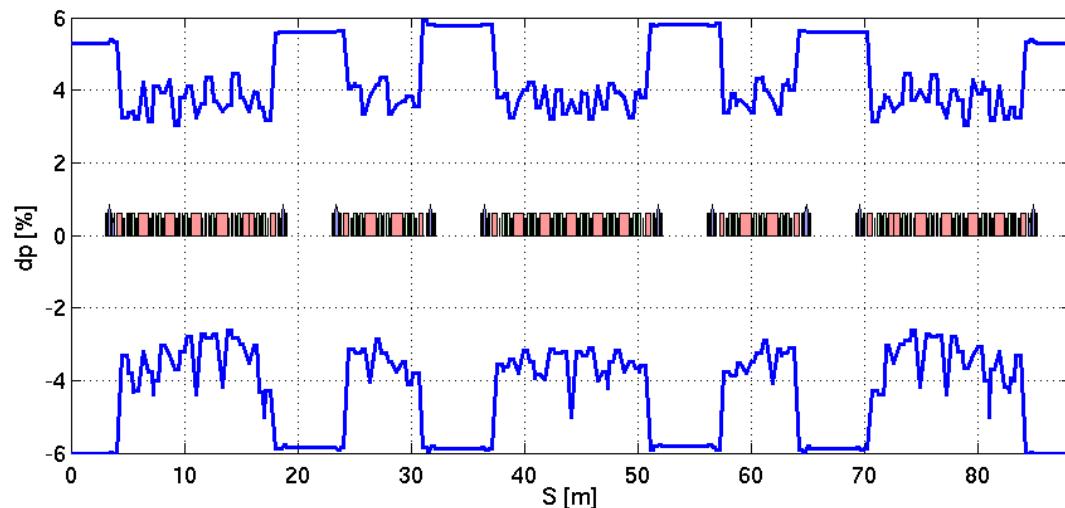


Baseline lattice 07BA-HYB

Energy acceptance between 3 and 5 %

Touschek beam lifetime ~ 3.8 h

- full coupling
- perfect bare lattice, without harmonic RF cavity for lengthening
- 500 mA over 416 bunches
- zero current bunch length (12.4 ps RMS)

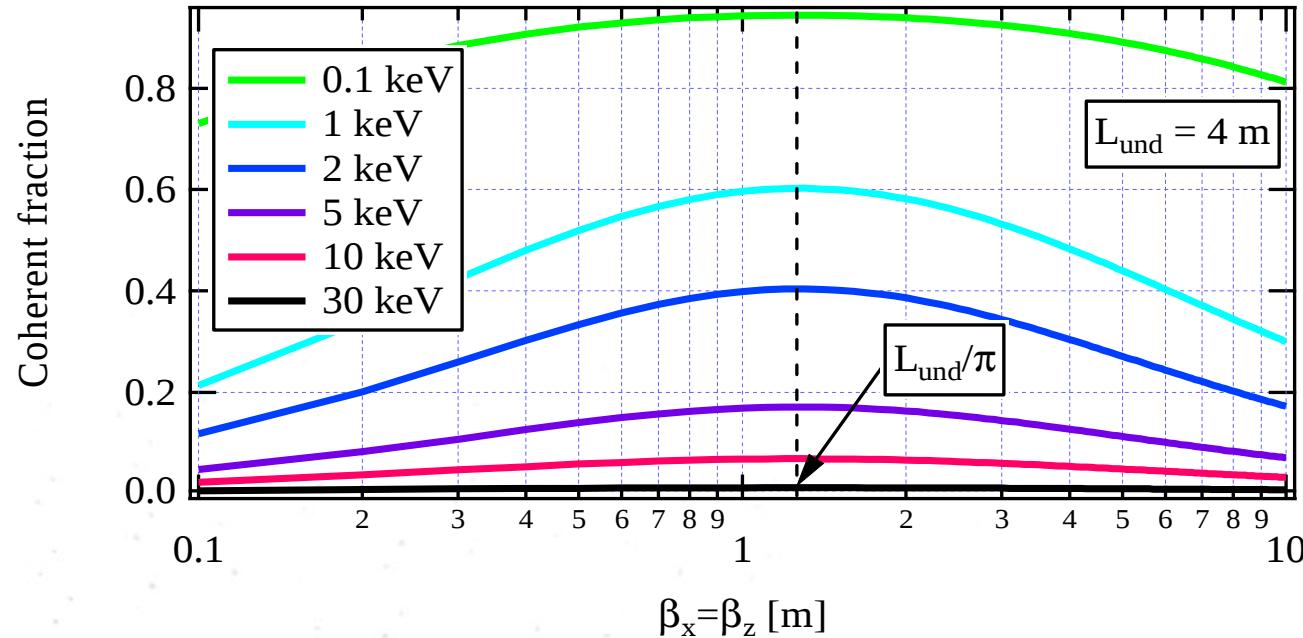


Alternative lattice 7BA-4BA-HOA

Energy acceptance between 3 and 6 %

Touschek lifetime ~ 3.5 h

- full coupling
- perfect bare lattice, without harmonic RF cavity for lengthening
- 500 mA over 416 bunches
- zero current bunch length (9.6 ps RMS)

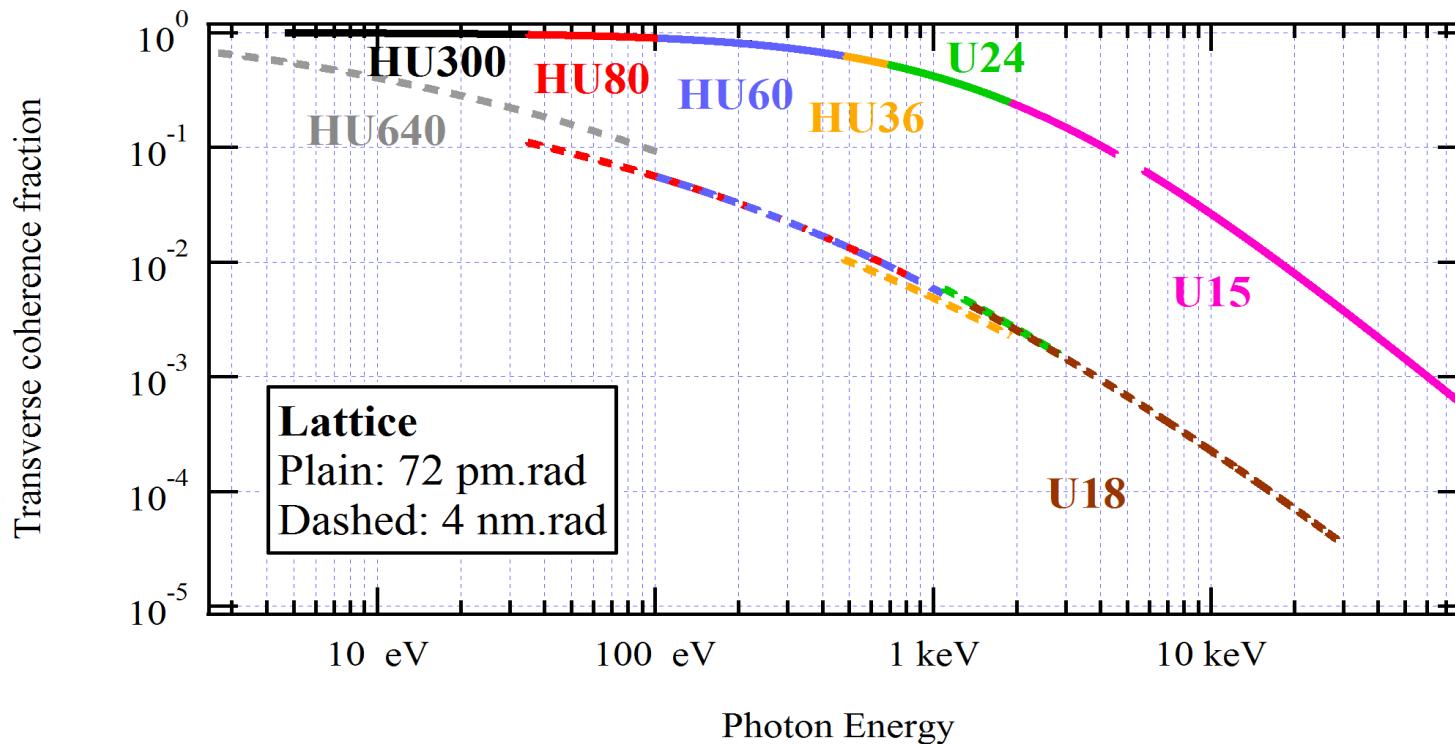


$$TCF = \frac{\left[ \frac{\lambda}{2\pi} \right]^2}{\Sigma_x \Sigma_z \Sigma_x' \Sigma_z'}$$

For a undulator of 4 m, the matched beta function is :

$$\beta \simeq \frac{L_{\text{und}}}{\pi} = 1.27 \text{ m}$$

# Fraction de cohérence transverse



The photon beam should be fully coherent up to almost 200 eV, exceeding 40 % at 1 KeV and reaching 14 % at 3 KeV