

L'ESRF:

Principe

Description

Fonctionnement au jour le jour

Upgrade aujourd'hui et demain

PLAN DE L'EXPOSÉ

Partie 1: L'ESRF

- INTRODUCTION
- Une BRÈVE histoire des accélérateurs jusqu'à l'ESRF
- LES SOURCES DE LUMIÈRE
- LES ACCÉLÉRATEURS DE L'ESRF



Partie 2: L'ESRF EN FONCTIONNEMENT

- FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE
- FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE QUOTIDIENNE

Partie 3: L'ESRF AUJOURD'HUI et DEMAIN

- COMMENT OBTENIR UNE PETITE EMITTANCE
- UPGRADE DE L'ESRF
- STATUS ET PLANNING

- Mise à niveau des électroniques des BPM ✓ **Fait**
 - Amélioration de la stabilité du faisceau ✓ **Fait**
 - Réduction du couplage ✓ **Fait (4pm)**
- Allongement à 6 mètres des sections droites ✓ **Fait (4)**
- Ondulateurs Cryogenic sous vide ✓ **Fait (2 CPMUs)**
- Allongement à 7 mètres des sections droites ✓ **Fait (1)**
- Nouveaux émetteurs RF SSA ✓ **Fait**
- Nouvelles cavités RF ✓ **3 prototypes**
- Opération en mode Top-up ✓ **Projet en cours**
- Etudes sur la réduction de l'émittance horizontale ✓ **TDS**



7 metre ID23



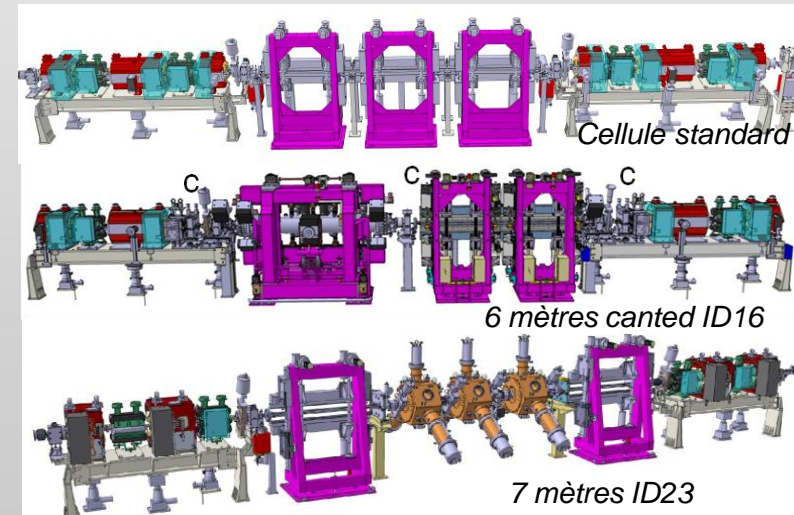
CPMU



Single cell
HOM damped
cavity



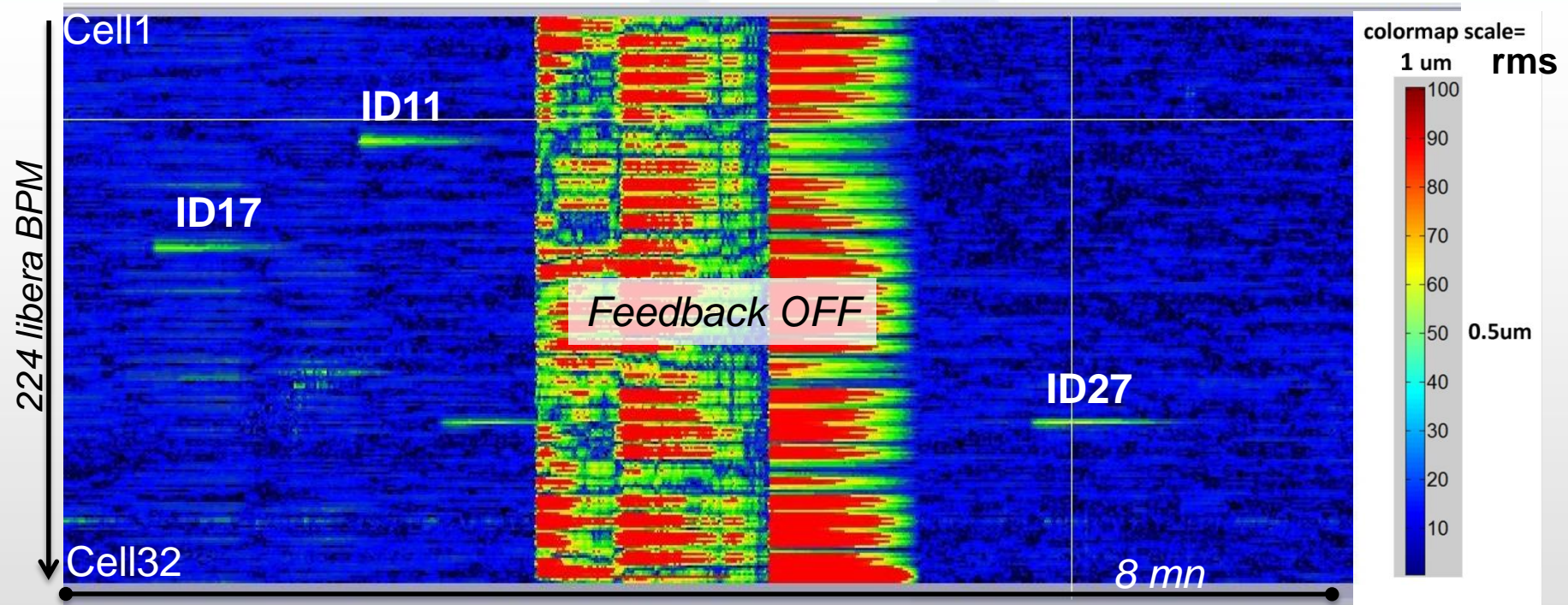
SSA



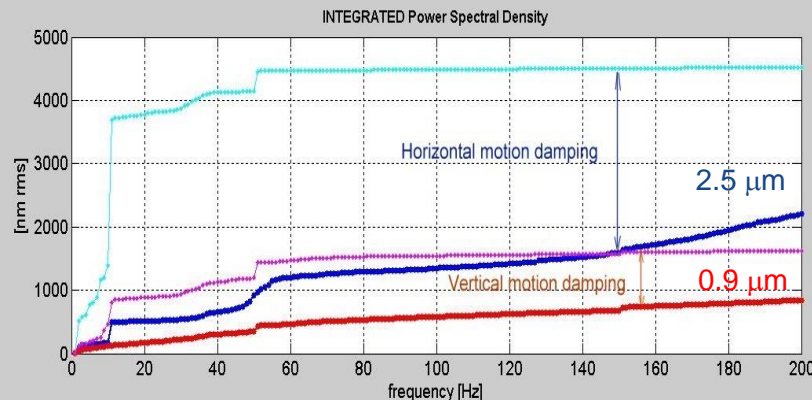
Cellule standard

6 mètres canted ID16

7 mètres ID23



- Système unique de DC à 200 Hz
 - 224 Libera BPMs
 - 96 correcteurs intégrés dans les sextupoles (jusqu'à 200 Hz)
 - Nouvelles alimentations
 - Opération 10 kHz
- Amélioration de la correction des perturbations d'orbite induites par les changements de gap des onduleurs



Horizontal OFF

↓

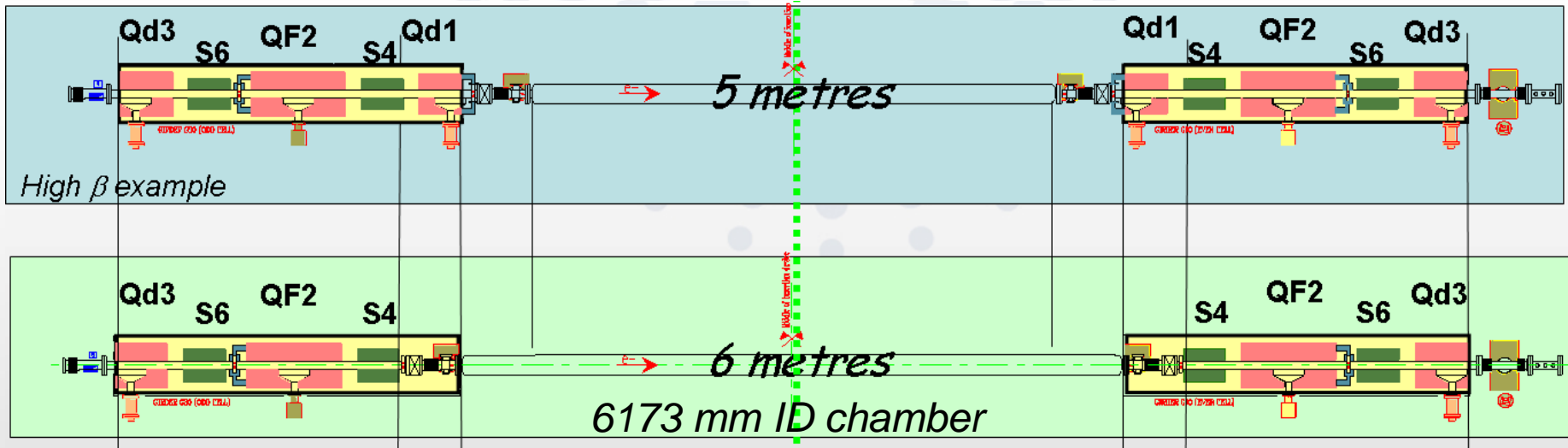
Horizontal ON

Vertical OFF

Vertical ON

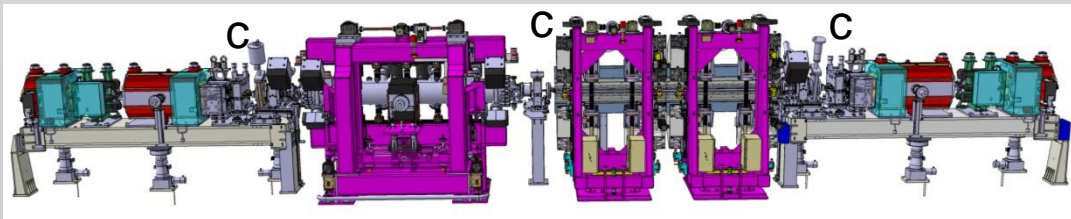
@ stabilité sub μm régulièrement obtenu en V

@ stabilité μm régulièrement obtenu en H



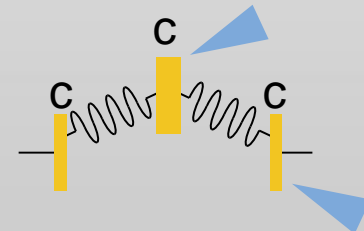
Pas de changement d'optique
 Nouvelles chambres à vide
 Modification du câblage et de la tuyauterie
 Modification des têtes de lignes pour le canting

- 6 m section no canting
 - ID18, ID14, ID1, ID32 ID31, ID15
 - ID 24 & ID20 full 6m operational with 4 carriages
- 6 m Large Angle canting



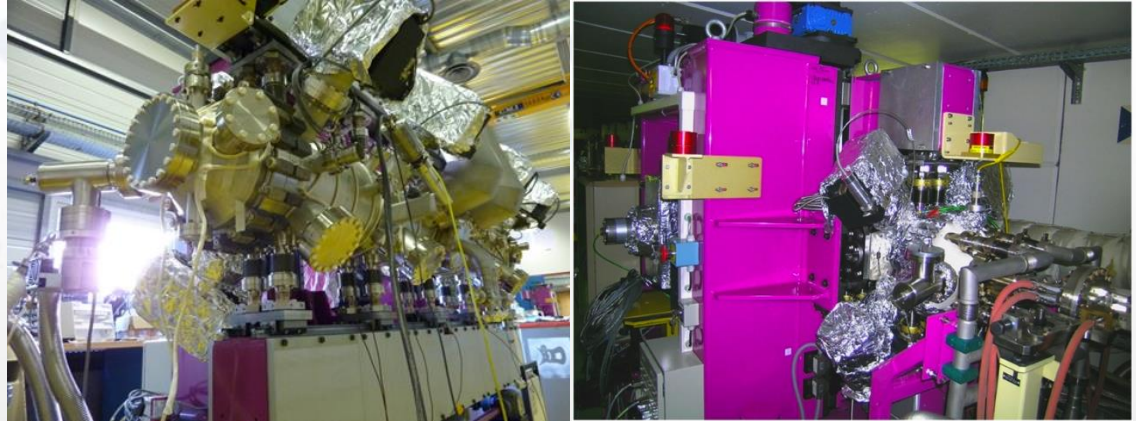
ID16

- ID30 (± 2.2 mrad)
- ID16 (± 2.7 mrad)



Paramètres

- Période: 18 mm
- Gap: 6 mm
- Champ maximum : 1 T
- Erreur de phase : 3° RMS
- Fonctionnement à 145 K

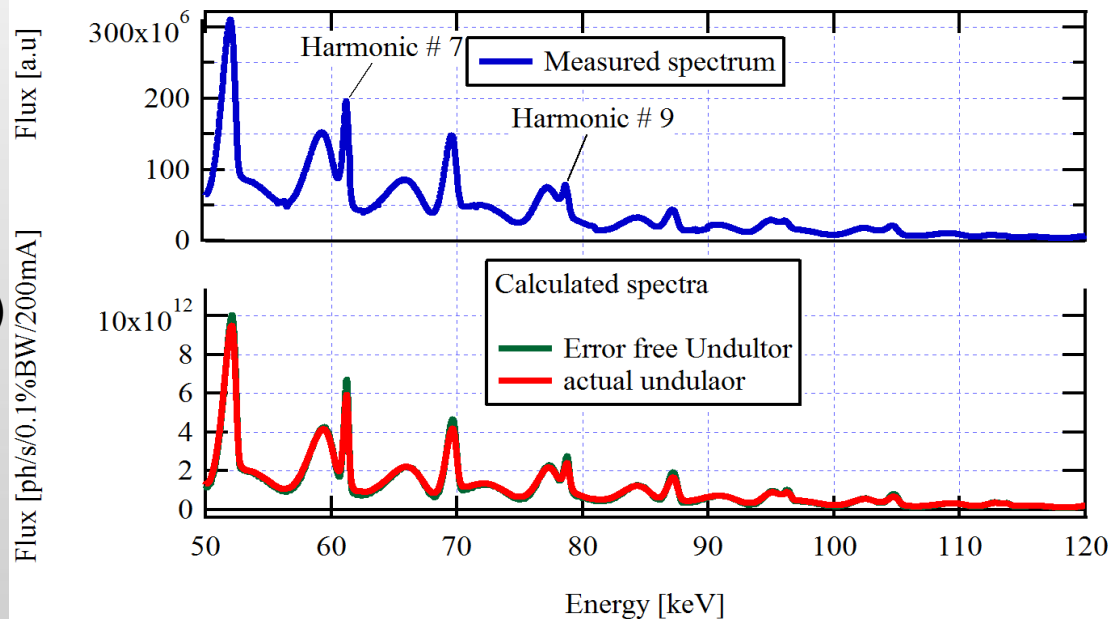


**Installés en
Janvier 2012**

Prochaine étape

- Période plus courte (14 mm)
- Aimants : PrFeB à 77 K

Gain pour le flux du photon
~ 2 @ 60 keV,
~3 au-dessus de 90 keV
versus un IVU 22
conventionnel



Spectre mesuré sur ID11 (G. Vaughan, J. Wright)
Et calculé à partir de mesures magnétiques (J. Chavanne)

Support de Joël Chavanne , Gaël LeBec

But :

Eviter le vieillissement des klystrons
Préparer les futures mises à jour

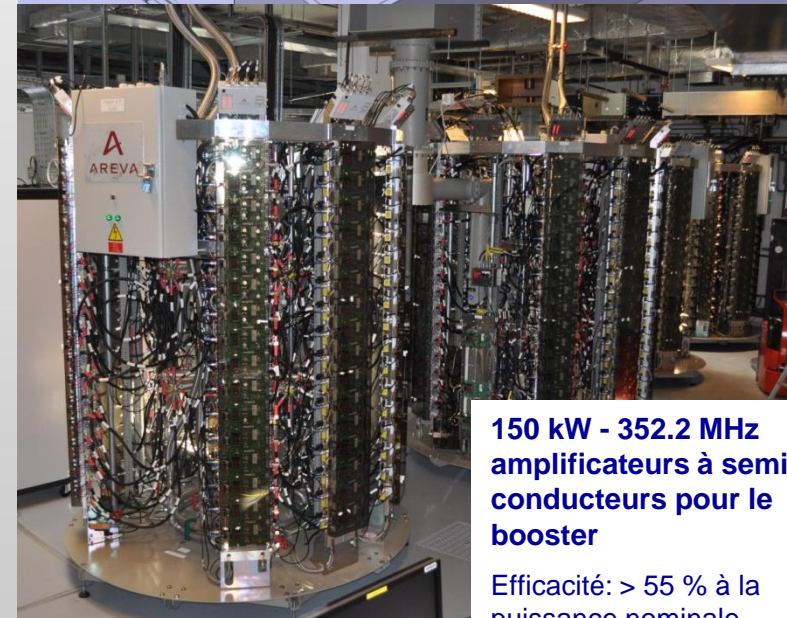
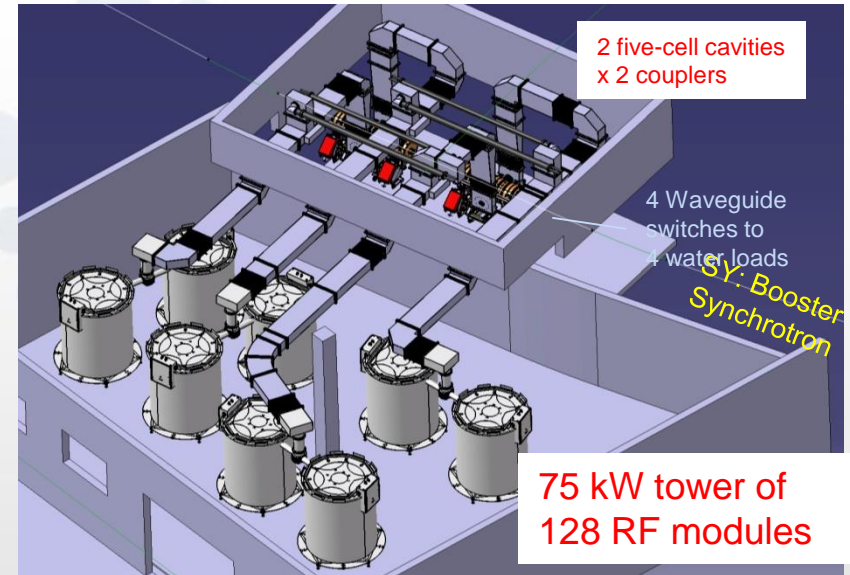
Booster RF :

4 amplificateurs solid state de 150 kW en fonction depuis Mars 2012
Mise en service sans difficultés en un temps limité, grande fiabilité pour l'opération.

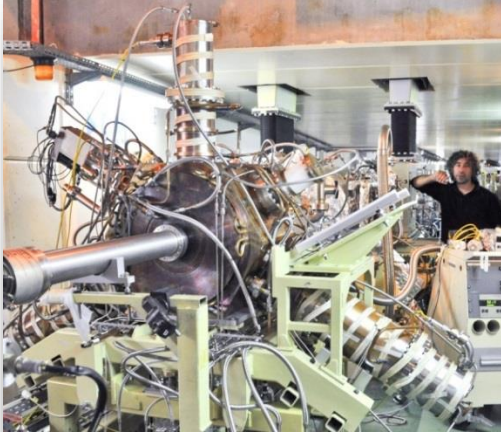
Remplace l'émetteur 352.2 MHz 1.3 MW à base de klystron du booster
SYRF prêt pour le mode TopUp, (puissance électrique réduite de 1200 à 400 kW).

3 SSA pour le SR:

☞ Alimente 3 nouvelles cavités HOM damped de L'anneau de stockage:

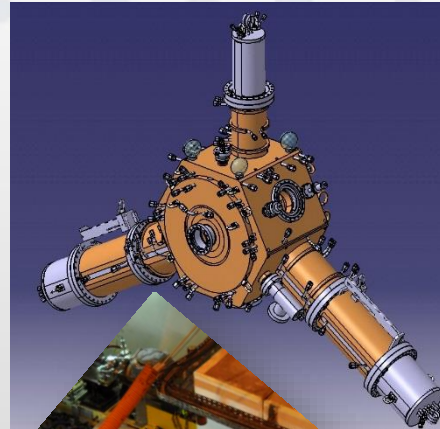


1ère cavité livrée par
Research Instrument

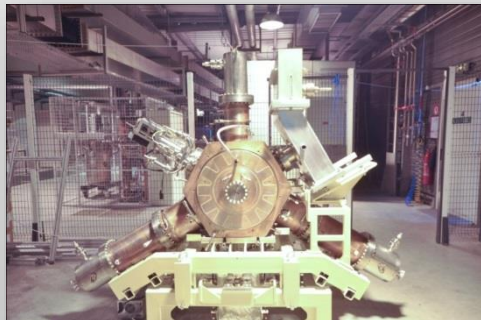


3 prototypes livrés :

- 2 testés individuellement avec le faisceau et maintenant installés en cellule 23
- Une en test de puissance RF



2ème cavité livrée par SDMS



3ème cavité livrée par CINEL



**12 cavités
commandées**

Les cavités 1&2 sont
installées en C23

Nominal 0.5 MV,
Max 0.75 MV

*Validés dans toutes les
conditions du faisceau*

@ La plupart des sources de RS fonctionnent en mode Top Up sauf l'ESRF

Pour : Réduit la variation de charge thermique sur les optiques de la ligne de lumière

→ Améliore la stabilité

Contre: Augmentation du nombre d'injections

→ Perturbe la stabilité

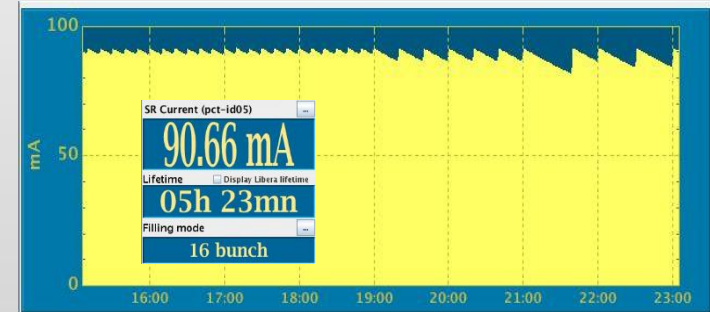
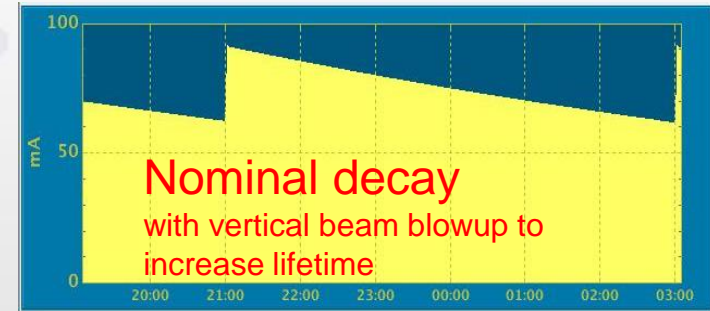
@ Etude comparative de l'opération

en "Top-up" à : ESRF/ APS/ SPRing8/ PETRA/ SOLEIL/ DIAMOND/ BESSY/ ELETTRA/ ALBA /SLS

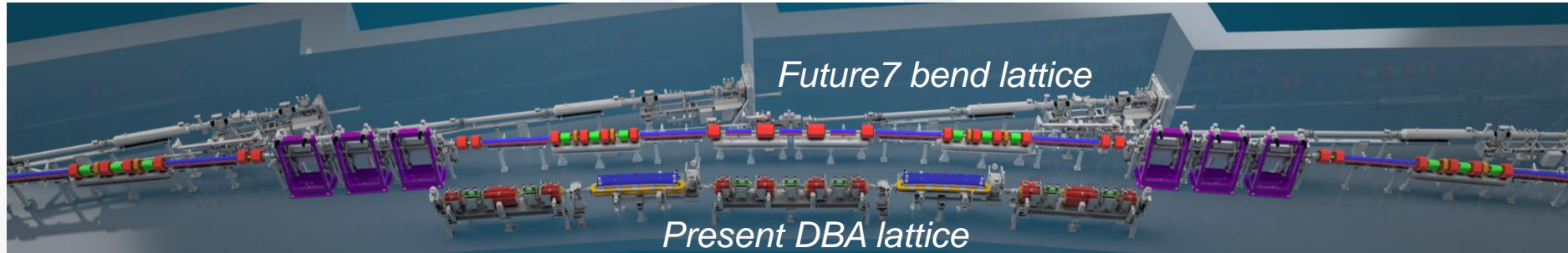
Le «Top-up » est multi-paramètres => nombreuses différences entre les instituts !

@ L'ESRF a développé une grande expertise dans la conception des optiques et pour l'agencement des lignes de lumière afin de gérer la variation de la charge thermique.

Le TopUp sera très bénéfique pour les modes de fonctionnement en structure temporelle qui sont pénalisés par la faible durée de vie.



Testé en Septembre 2013 avec les utilisateurs afin de déterminer le débit d'injection optimal.



Réduire l'émittance horizontale est une demande récurrente des utilisateurs de l'ESRF... avec la contrainte non négligeable de réutiliser le même tunnel et les mêmes infrastructures.

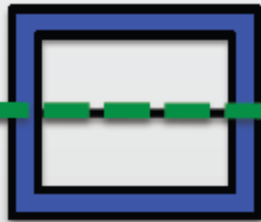
Grâce aux efforts internationaux pour développer des anneaux de stockage ultimes, l'ESRF ré-aborde la question avec les conditions suivantes :

- Réduire l'émittance d'équilibre horizontale de 4nm à moins de 200pm
- Maintenir les sections droites existantes et surtout les lignes de lumière
- Maintenir les sources sur les aimants de courbure
- Préserver le fonctionnement en structure temporelle et un courant nominal de 200mA
- Réutiliser l'injecteur actuel
- Réutiliser le plus possible le matériel existant
- Minimiser les pertes d'énergie par rayonnement synchrotron
- Minimiser les coûts de fonctionnement, principalement la puissance électrique
- Limiter le temps d'arrêt de la machine pour l'installation et la mise en service

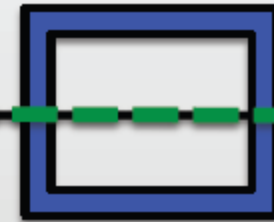
X

Pourquoi l'émittance horizontale est non nulle?

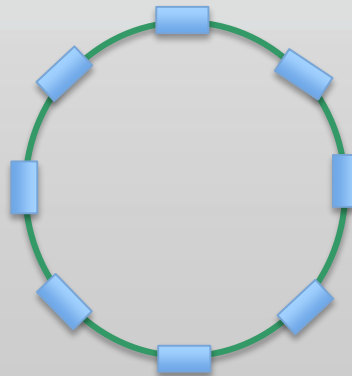
Dipole



Dipole



Trajectoire idéale du faisceau d'électrons

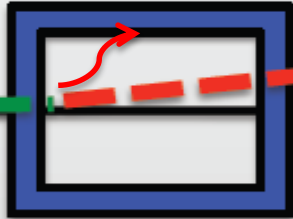


S

X

Pourquoi l'émittance horizontale est non nulle?

Dipole



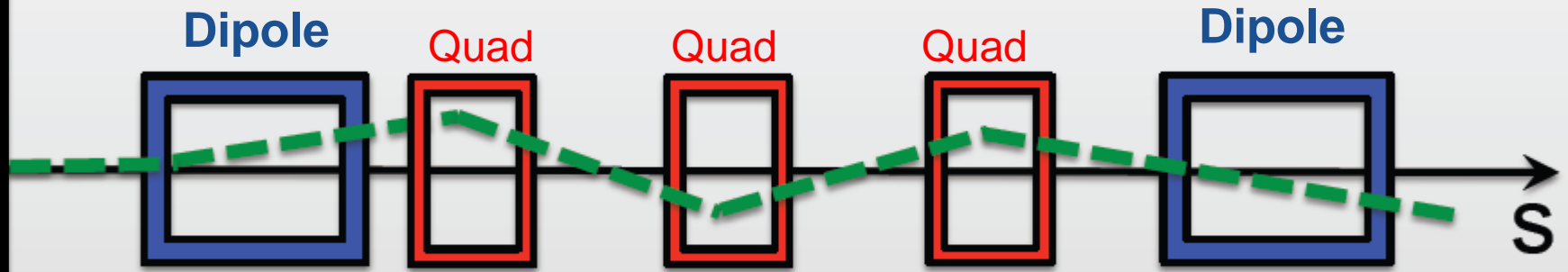
Dipole



Trajectoire d'un électron qui a émis du rayonnement synchrotron dans le premier dipole (énergie plus basse que l'énergie nominale → plus forte déviation)

X

Pourquoi l'émittance horizontale est non nulle?

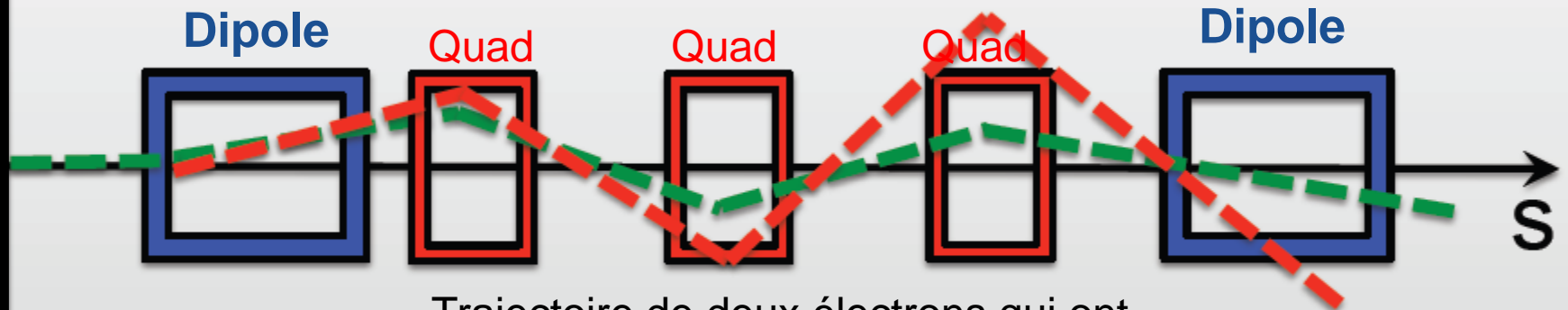


Trajectoire d'un électron qui a émis du rayonnement synchrotron dans le premier dipôle (énergie plus basse que l'énergie nominale)

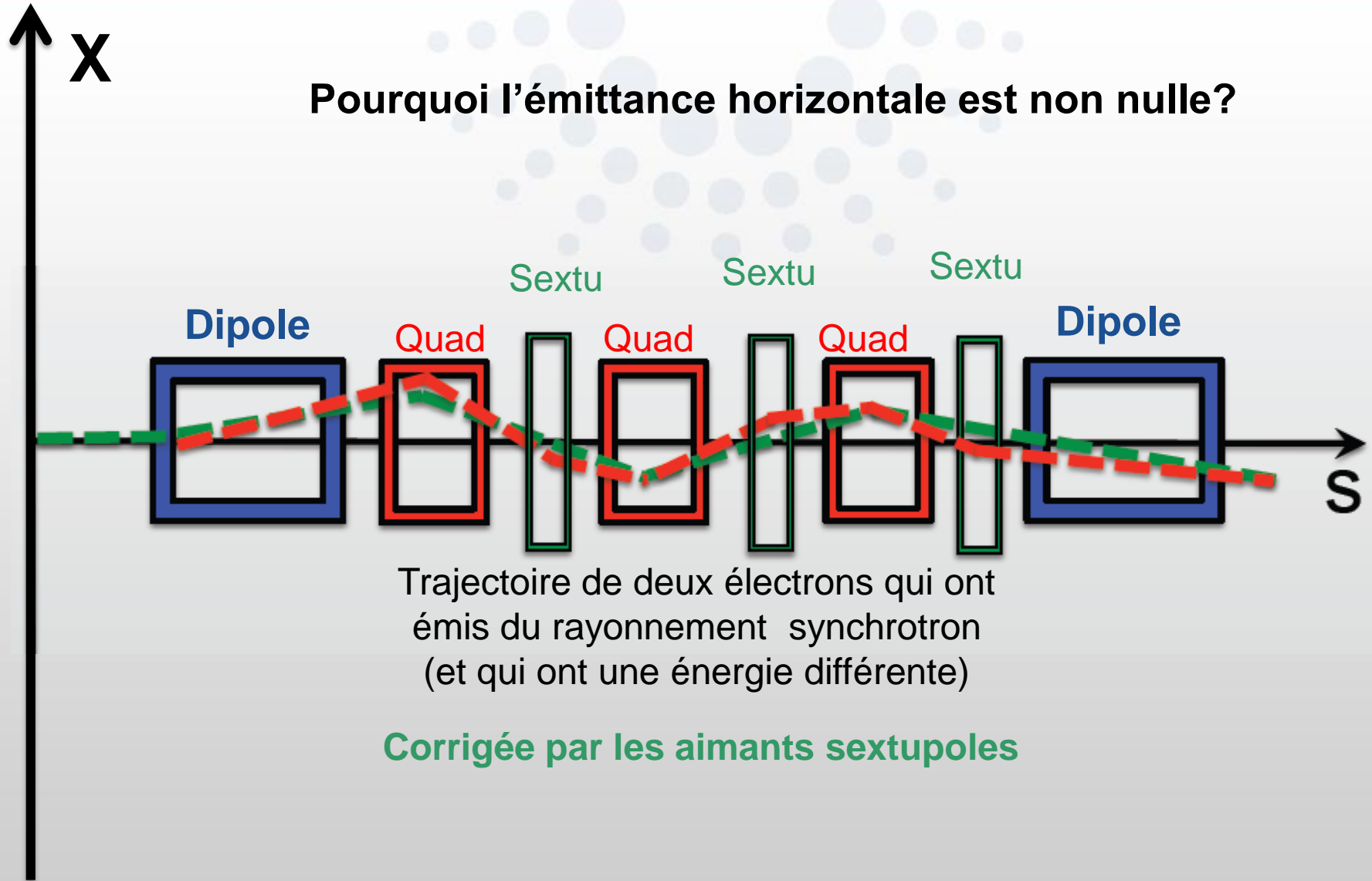
Corrigée par les aimants quadrupoles

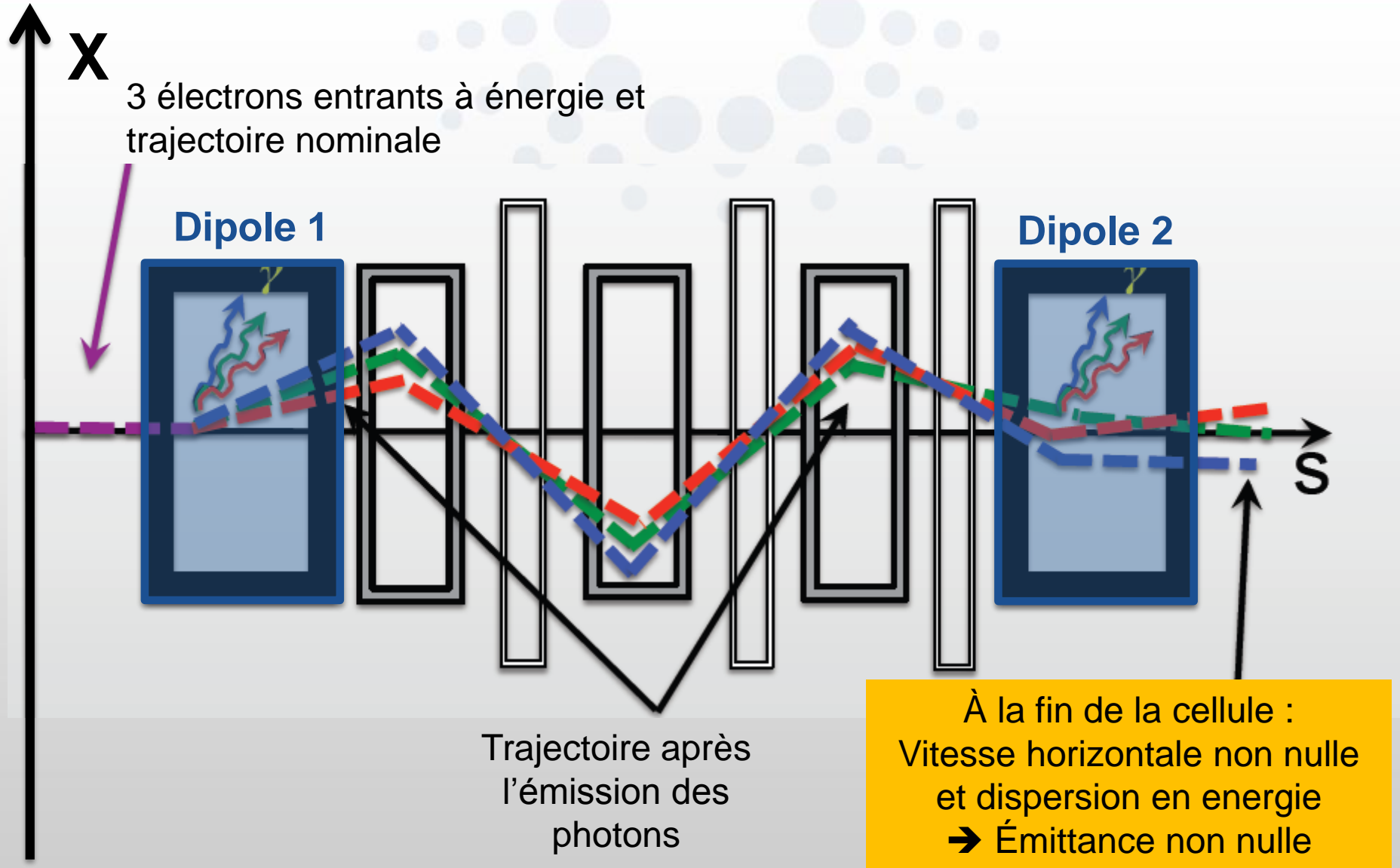
X

Pourquoi l'émittance horizontale est non nulle?

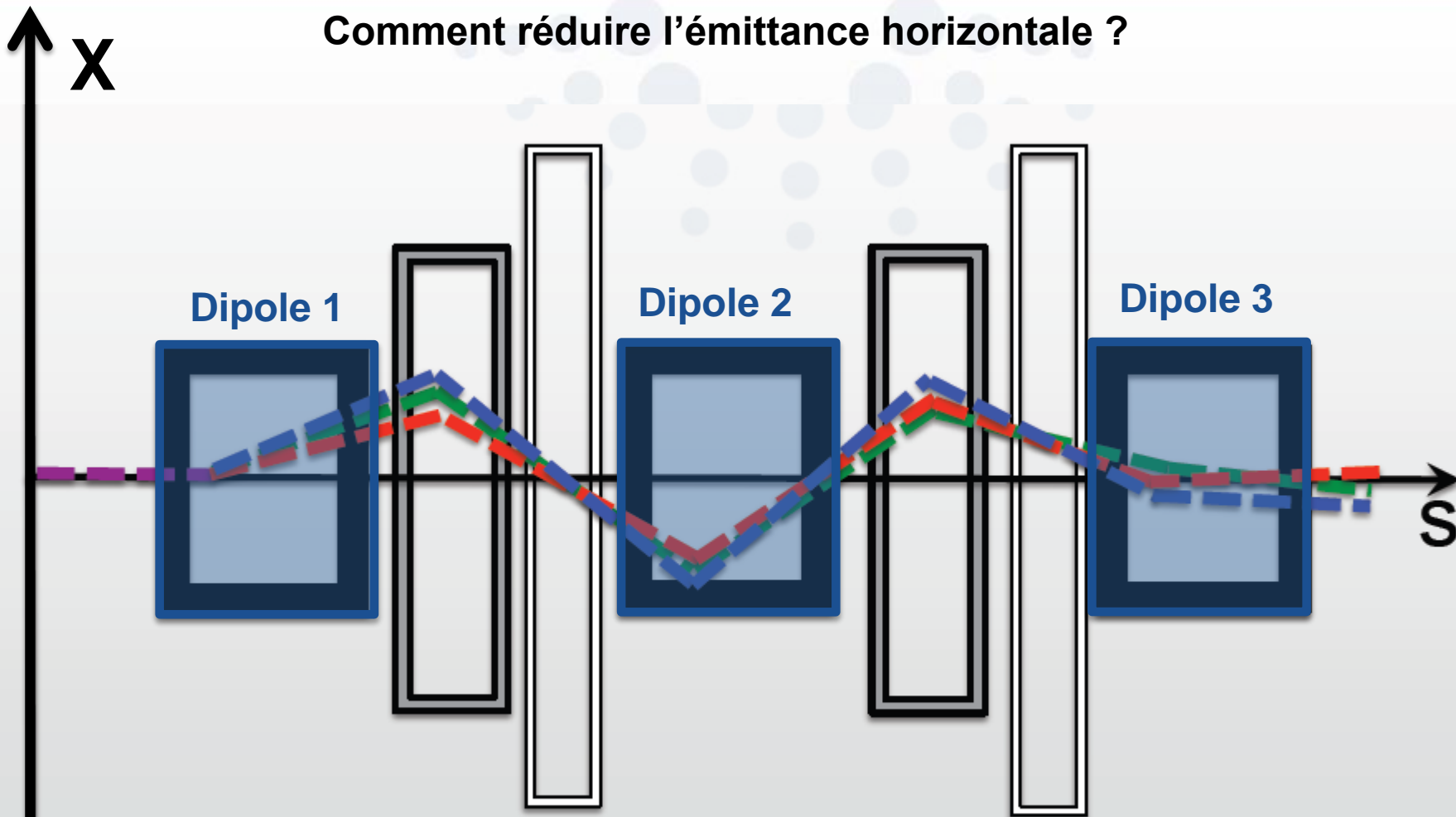


Trajectoire de deux électrons qui ont émis du rayonnement synchrotron (et qui ont une énergie différente)





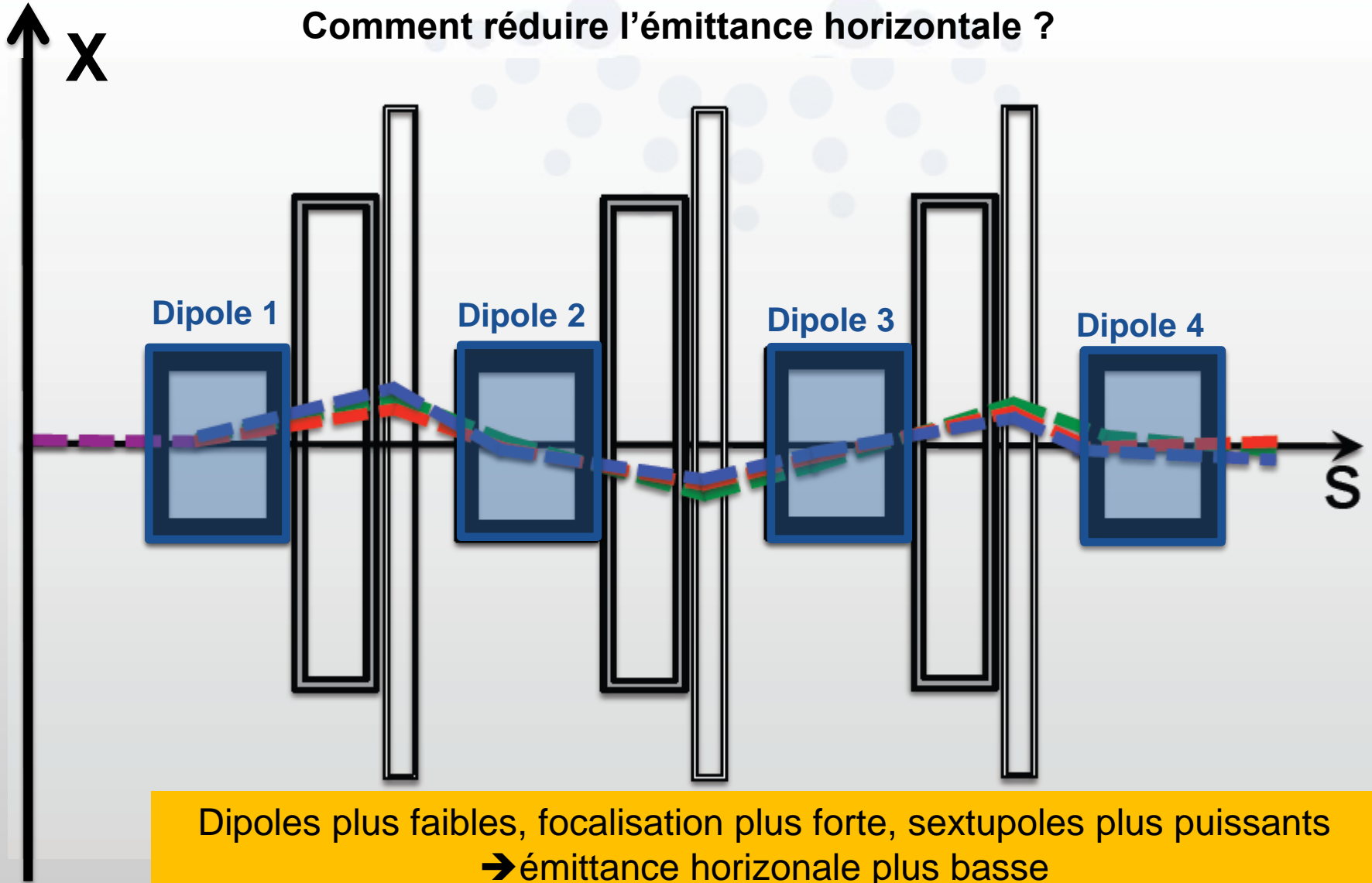
Comment réduire l'émittance horizontale ?



Plus de dipôles plus faibles, focalisation plus forte, sextupôles plus puissants

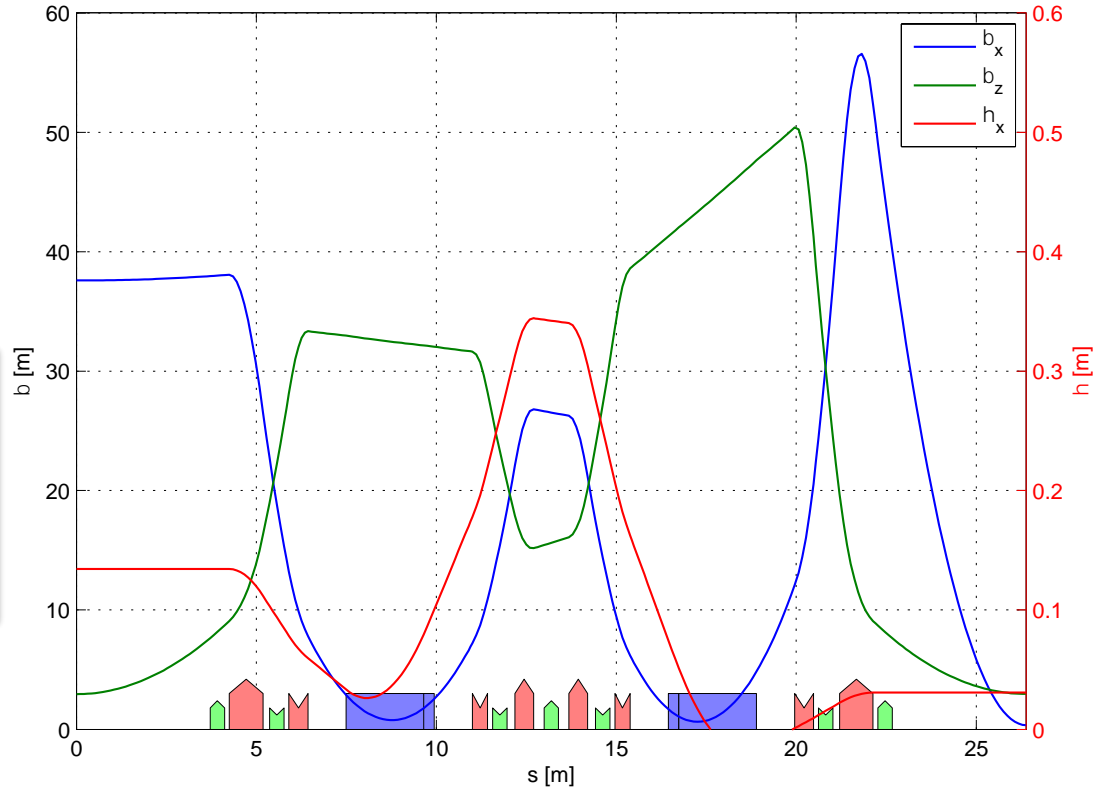
→ émittance horizontale plus basse

Comment réduire l'émittance horizontale ?



Dipoles plus faibles, focalisation plus forte, sextupoles plus puissants
 → émittance horizontale plus basse

$n_x = 2.277$ 1 period
 $n_z = 0.837$ C= 52.774



Emittance basse :
Optimization de β_x and η_x dans les dipôles (ou est générée le rayonnement synchrotron)
 β_x : envelope function
 η_x : dispersion

Optimisation de la lattice

Energie

$$\varepsilon_x = F(\text{Lattice}) \frac{E^2}{N^3}$$

Nombre de dipôles identiques

Réduction de l'émittance
→ grand nombre d'aimants de déviation



- Augmenter le nombre de cellules
 → circonférence plus large
- Mettre plus de dipôles par cellule
 → machine très compacte

Performance des anneaux de stockage (sources actuelles et futures)

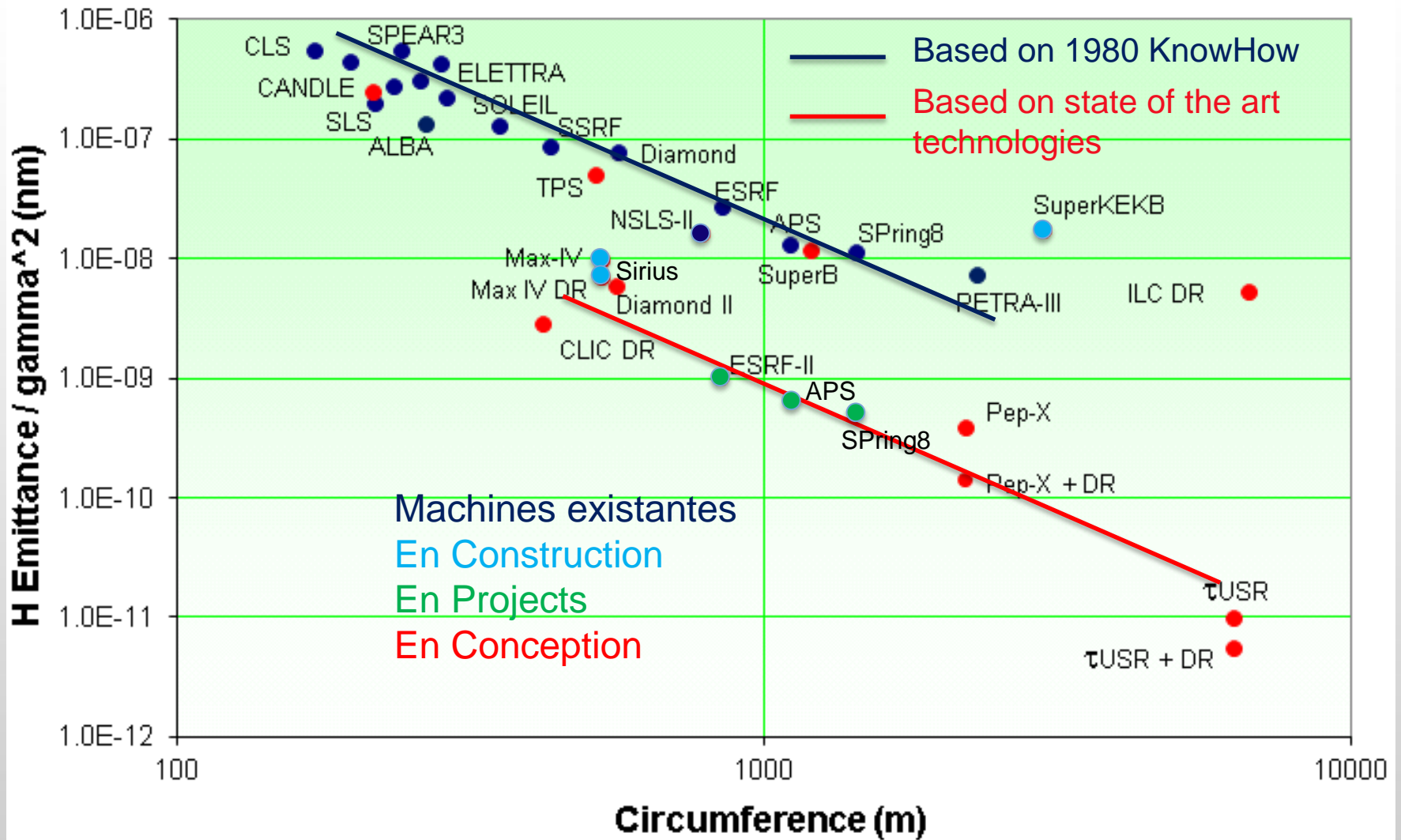
Émittance horizontale

- ESRF 2BA **4000** pm – 6 GeV, Opérationnel
- PETRA III 2BA **1000** pm – 6 GeV, Opérationnel
- NSLS II 2BA **~350** pm – 3 GeV, en operation
- MAX IV 7BA **~300** pm – 3 GeV, en demarrage
- Sirius 5BA **~250** pm – 3 GeV, au programme
- Spring-8 6BA **~70** pm – 6 GeV, au programme
- ESRF 7BA **<150** pm – 6 GeV, en cours

Augmentation presque linéaire de la luminosité jusqu'à 50-100 pm

Pour des émittances plus faibles, le gain devient moins linéaire à cause :

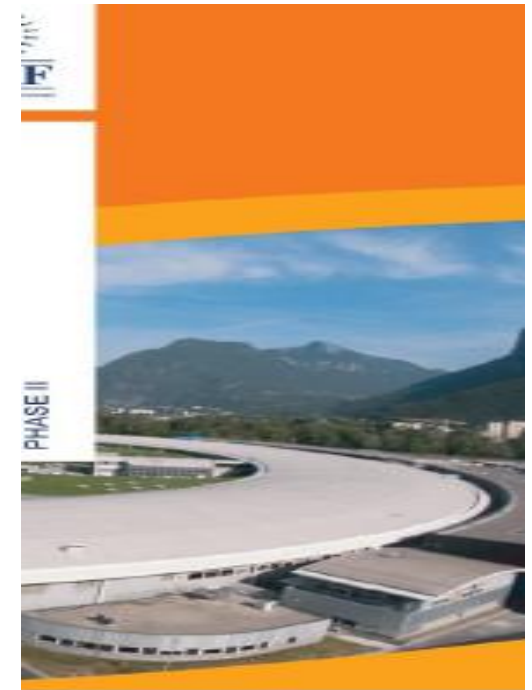
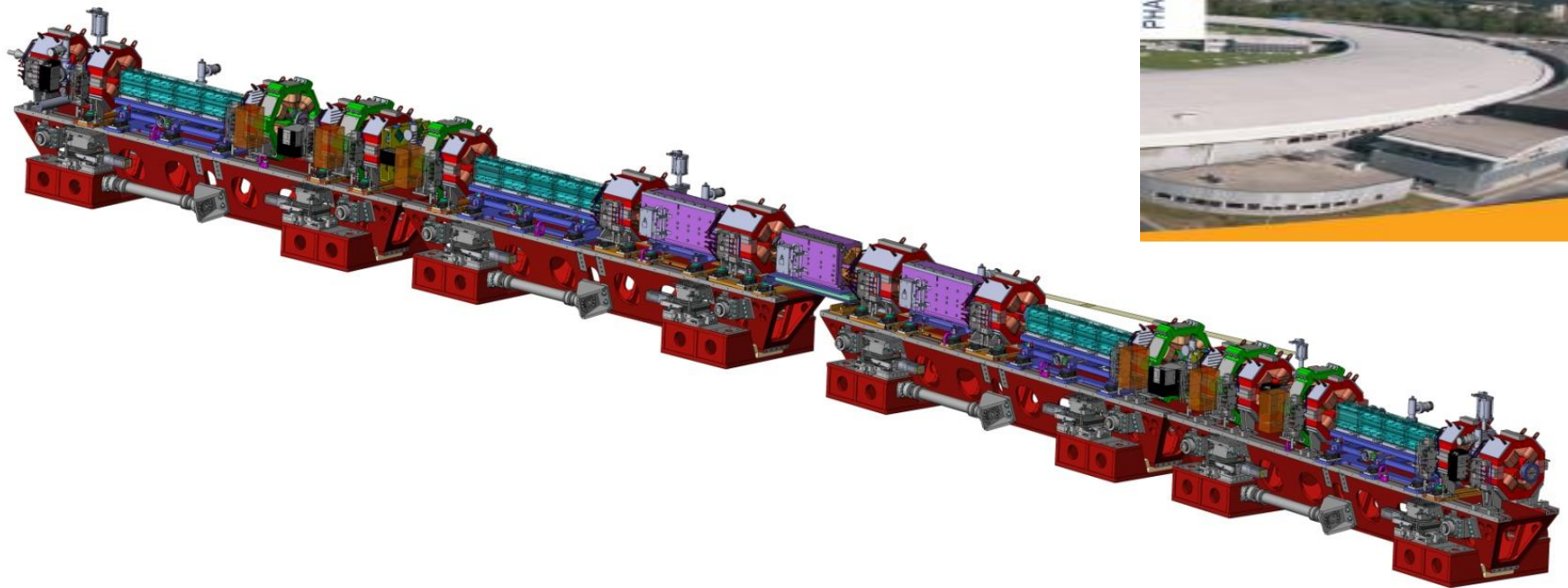
- de la limite de diffraction
- du "'mismatch' du faisceau d'électrons et du faisceau de rayonnement X



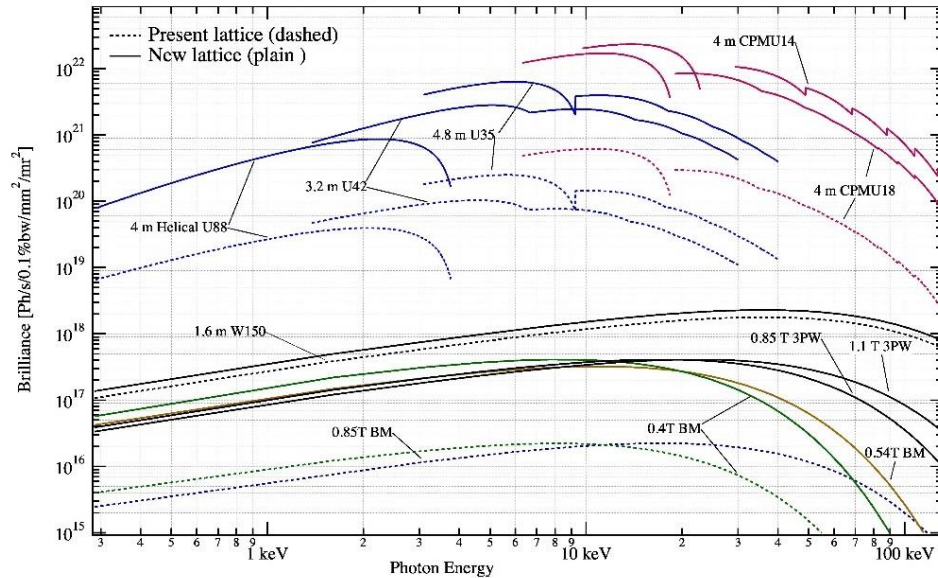
De nombreux sources vont implementer des optiques basse emittance au cours de la prochaine decade

Un nouvel anneau de stockage basse émittance pour l'ESRF

Au nom de l' équipe du programme ESRF-EBS



OBJECTIFS

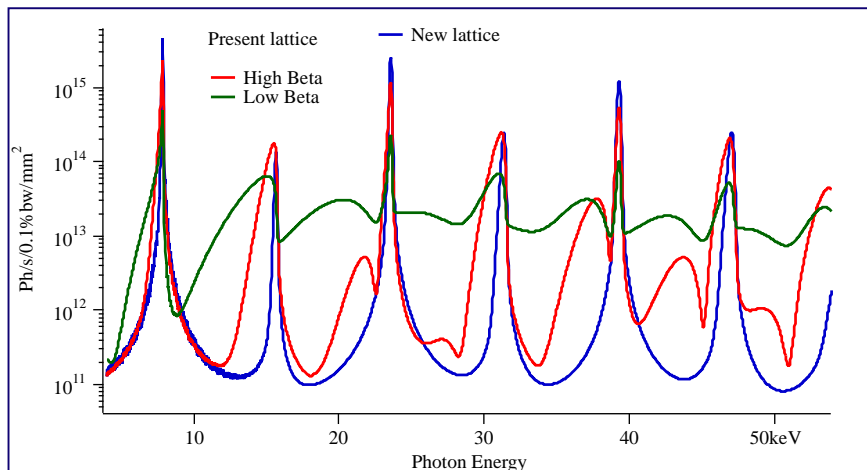


- **Le programme ESRF-EBS (*Extremely Brilliant Source*) a pour but:**
 - Fortement réduire l'émittance d'équilibre horizontale
 - Augmenter la brillance et la cohérence de la machine

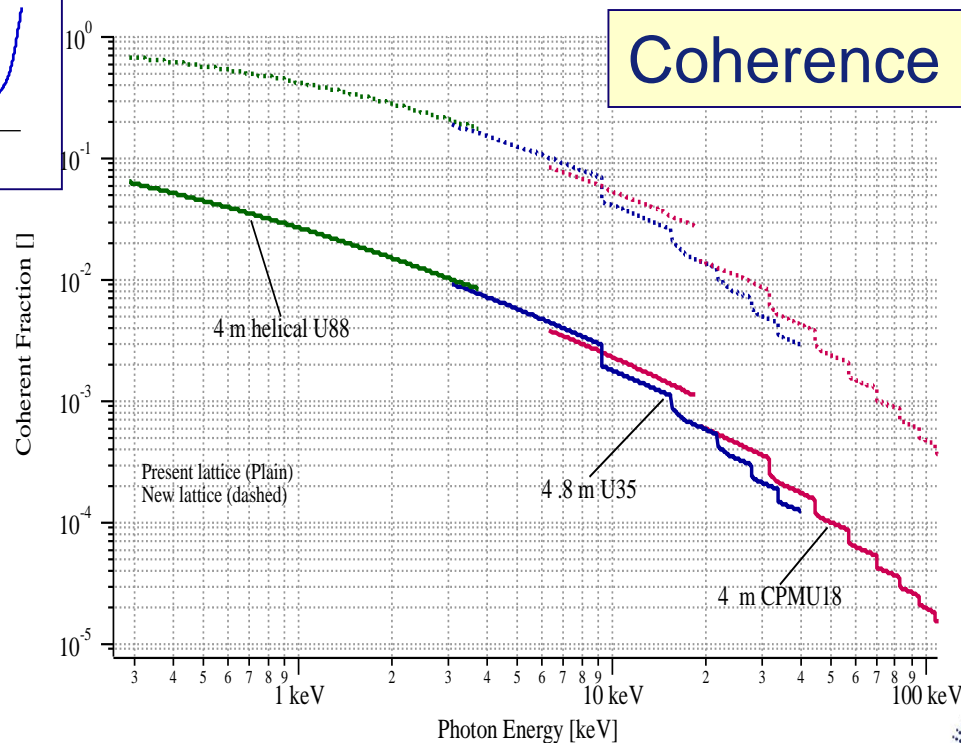
	ESRF	upgrade
Hor. Emittance [pmrad]	4000	134
Vert. Emittance [pmrad]	3	2
Energy spread [%]	0.1	0.09
$\beta_x[m]/\beta_z[m]$	37/3	6.9/2.6

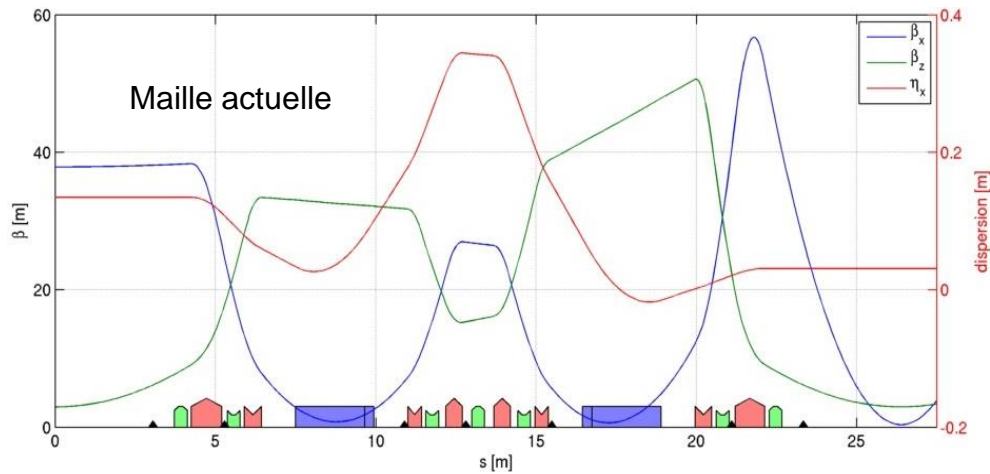
- **Principales contraintes liées aux performances de la machine actuelle et aux lignes de lumière:**
 - Conserver les lignes de lumière actuellement en opération dans les sections droites et dans les dipôles
 - Conserver la structure temporelle des paquets et un courant total de 200mA
 - Réutiliser le complexe d'injecteurs actuellement en opération ainsi que le tunnel de l'anneau de stockage actuel
 - Limiter la durée d'installation et de mise en service à 19.5 mois

18mm Undulator spectrum



Les performances de la source vont augmenter d'un facteur 50 à 100





- **Principales propriétés:**

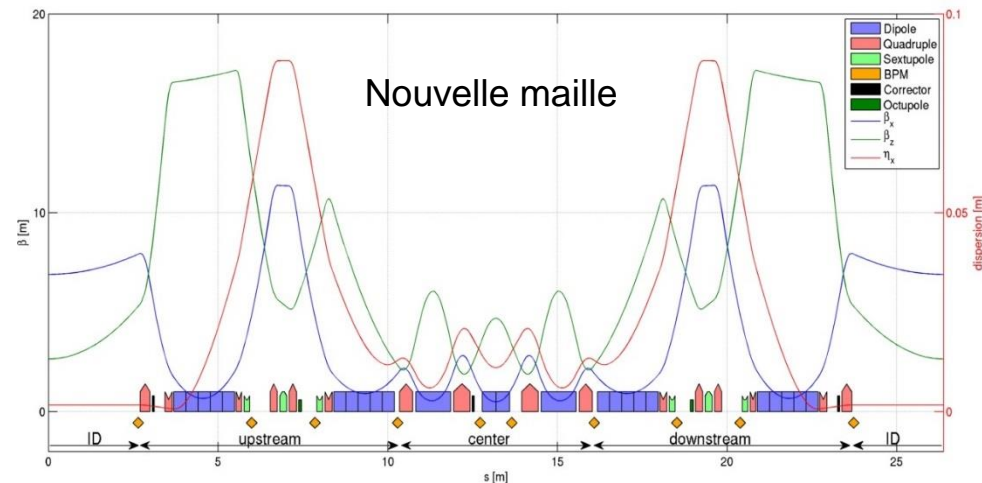
- 2 zones de dispersion élevée: corrections de chromaticité plus efficaces
- $\Delta\phi \sim \pi$ entre les sextupôles chromatiques: compensation partielle des résonances sextupolaires
- Gradient longitudinal dans les dipôles: réduction de l'émittance

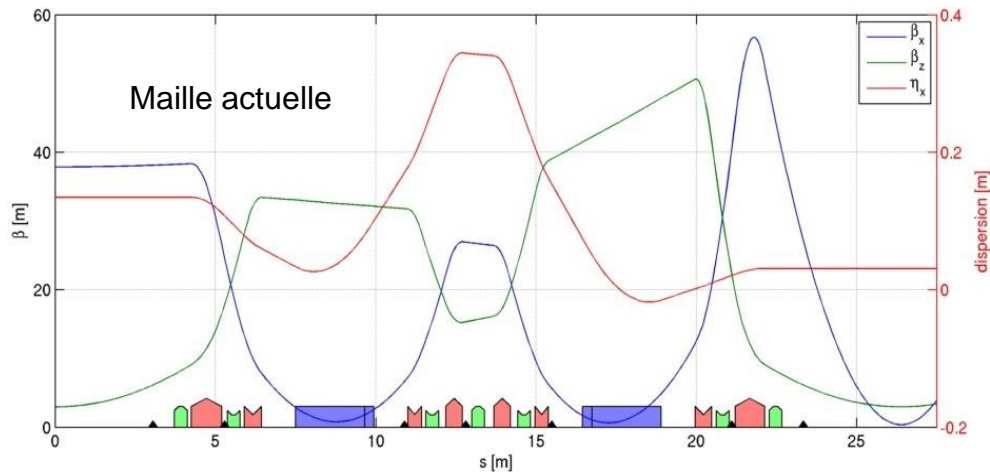
- **Maille actuelle:**

- 16 super-périodes (32 cellules au total)
- 2 dipôles par cellule
- Emittance $\epsilon_x \sim 4\text{nm}$

- **Nouvelle maille:**

- 32 super-périodes
- 7 dipôles par cellule
- Emittance $\epsilon_x \sim 135\text{pm}$





Principales propriétés:

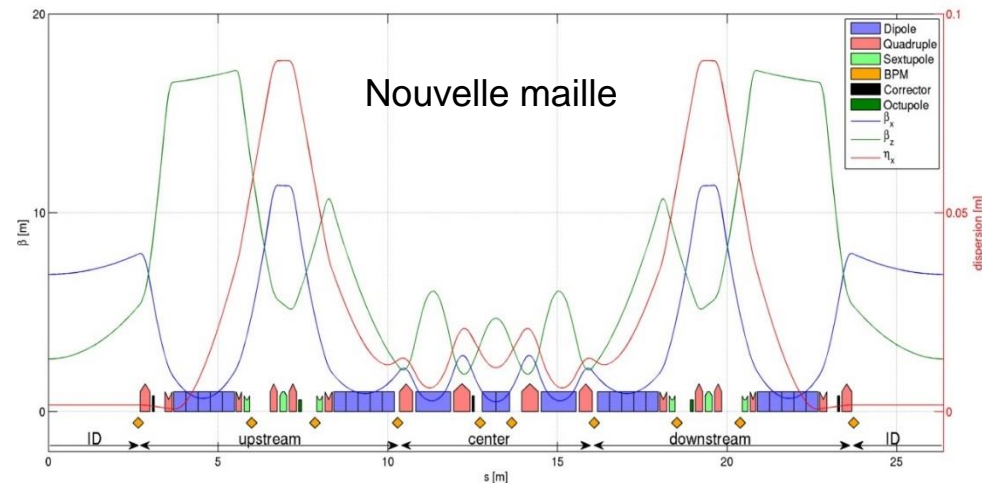
- 2 zones de dispersion élevée: corrections de chromaticité plus efficaces
- $\Delta\phi \sim \pi$ entre les sextupôles chromatiques: compensation partielle des résonances sextupolaires
- Gradient longitudinal dans les dipôles: réduction de l'émittance

Maille actuelle:

- 16 super-périodes (32 cellules au total)
- 2 dipôles par cellule
- Emittance $\varepsilon_x \sim 4\text{nm}$

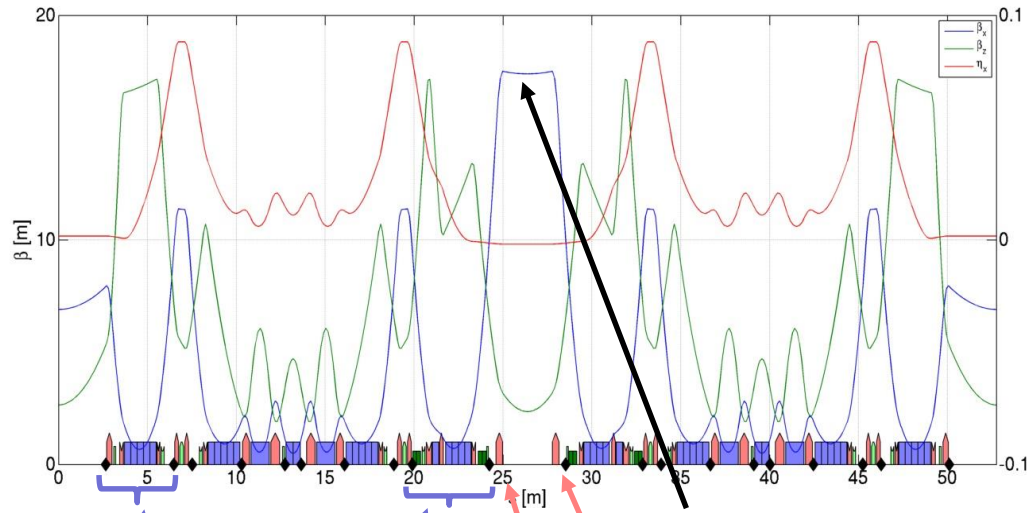
Nouvelle maille:

- 32 super-périodes
- 7 dipôles par cellule
- Emittance $\varepsilon_x \sim 135\text{pm}$



CELLULE D'INJECTION

$v_x = 4.763$
 $v_z = 1.709$
 $\delta p/p = 0.000$
 1 period, C= 52.749



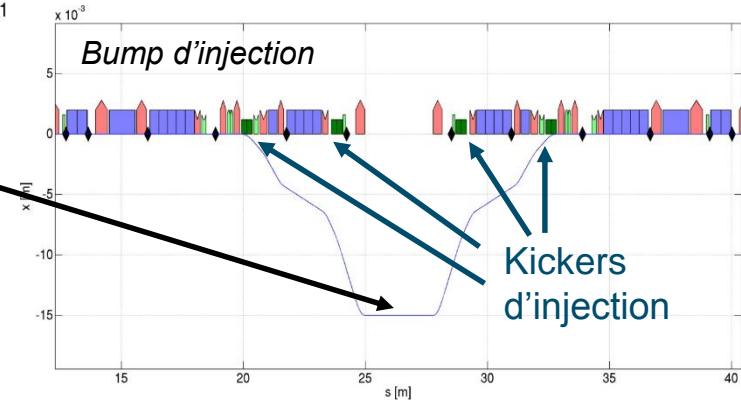
Dipôles de la cellule standard

Dipôles de la cellule d'injection

QF1s: distance détermine β d'injection

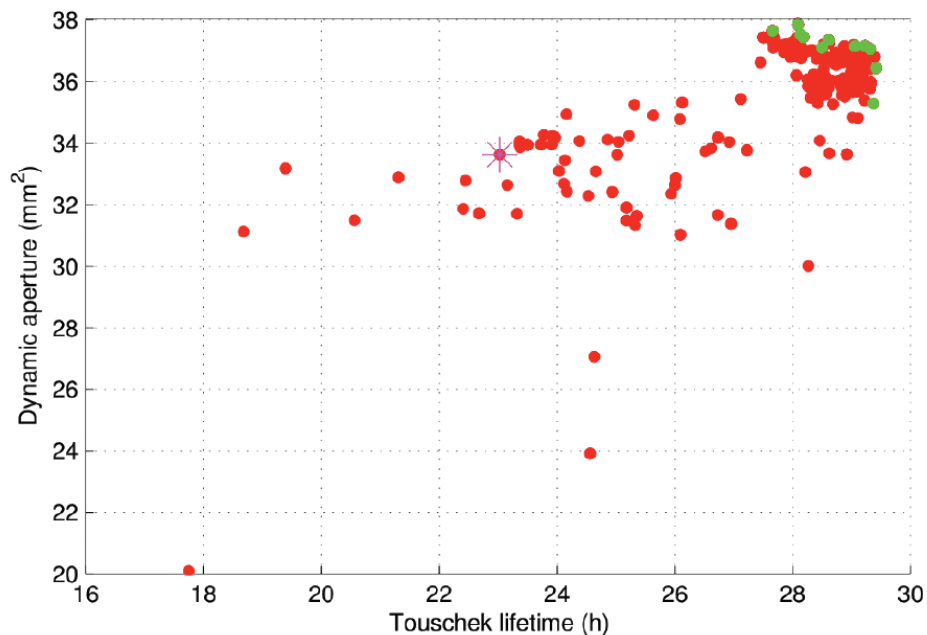
Point d'injection

- Fonction β au point d'injection augmentée à 17.4 m afin d'améliorer l'efficacité d'injection: cellule sensiblement modifiée autour de la section droite, symétrie non conservée
- Avance de phase et fonctions β aux sextupôles constantes + optimisation non-linéaire: impact sur la durée de vie limité



OPTIMISATIONS NON LINÉAIRE

Energy [GeV]	6
Circumference [m]	843.978
Natural emittance [pm]	134
Damping time (H/V/L) [ms]	8.5/13/8.6
$E_{\text{loss}}/\text{turn}$ [MeV]	2.61
Momentum compaction	$0.84 \cdot 10^{-4}$
Tunes (H/V)	76.21/27.34
Natural chromaticity (H/V)	-109/-82
Operation chroma. (H/V)	6/4
Oper. Emittance (H/V) [pm]	110/5
Lifetime multibunch [h]	19
Lifetime 16bunch [h]	1.8
Lifetime 4bunch [h]	1.2



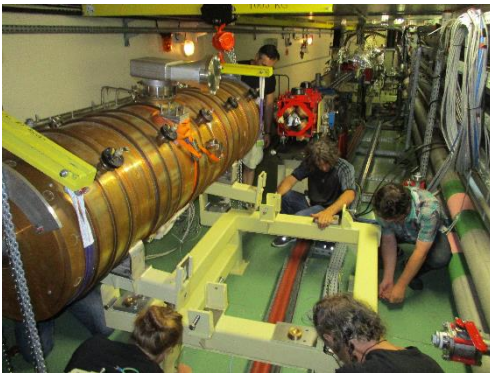
- L'optimisation non-linéaire réalisée grâce à l'algorithme génétique multi-objectif NGSA-II
- Les objectifs sont la durée de vie et l'ouverture dynamique

MISE A NIVEAU DES INJECTEURS



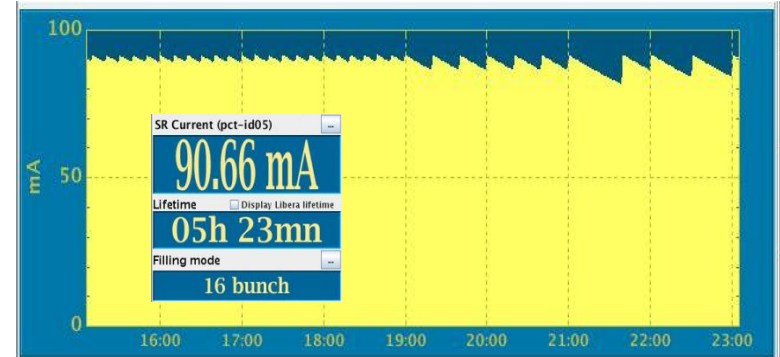
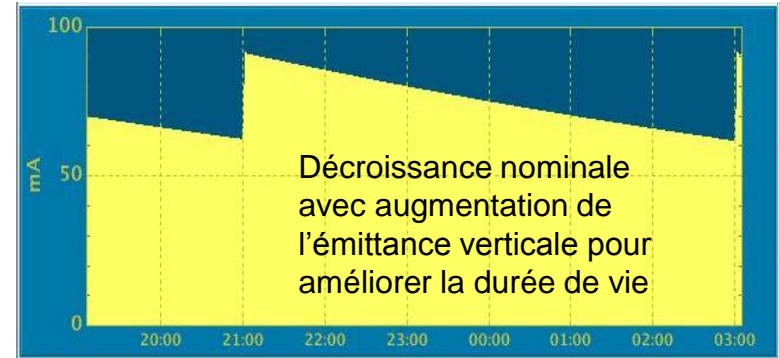
- Mise en place de l'opération en mode 'top-up' en 2016:

- Nouveau système d'alimentation pour le booster (4Hz)
- 2 cavités supplémentaires dans le booster



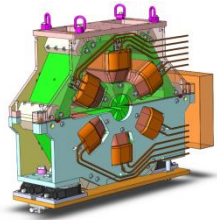
- Changements liés au nouvel anneau de stockage:

- Réduction de la circonférence du booster
- Adaptation des lignes de transfert



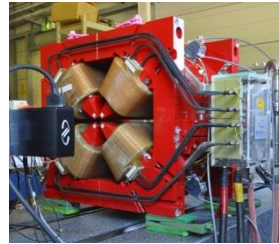
Test du top-up avec les systèmes actuels

AIMANTS



192 Sextupôles

Longueur 200mm
 $900\text{-}2200\text{ Tm}^{-2}$
Aussi utilisé comme dipôle
et quadrupôle tourné

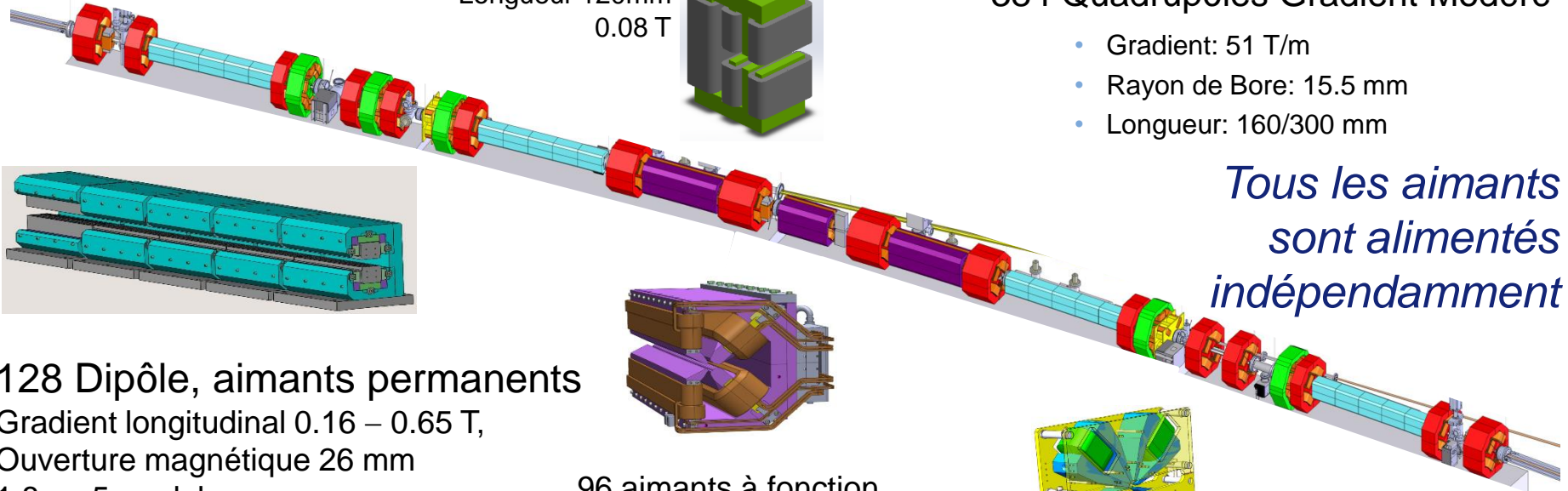
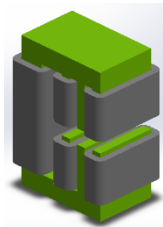


128 Quadrupôles Gradient Elevé

- Gradient: 85 T/m
- Rayon de Bore: 12.5 mm
- Longueur: 390/490 mm

96 Correcteurs (H/V)

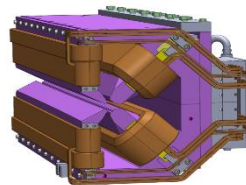
Longueur 120mm
0.08 T



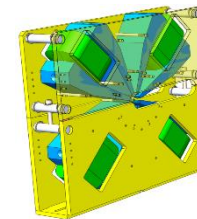
*Tous les aimants
sont alimentés
indépendamment*

128 Dipôle, aimants permanents

Gradient longitudinal 0.16 – 0.65 T,
Ouverture magnétique 26 mm
1.8 m, 5 modules
Hybride Sm₂Co₁₇ / Strontium Ferrite



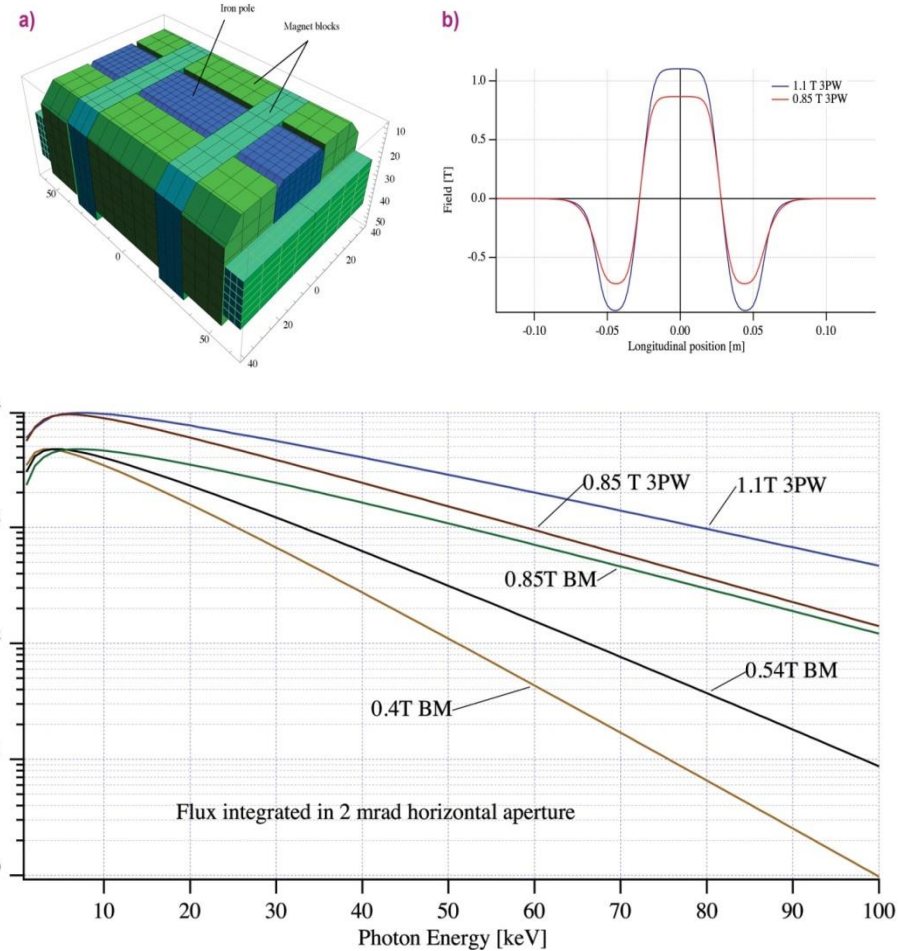
96 aimants à fonction
combinée dipôle-quadrupôle
 $0.54\text{ T} / 34\text{ Tm}^{-1}$
& $0.43\text{ T} / 34\text{ Tm}^{-1}$



64 Octupôles
 $51.2 \cdot 10^3\text{ T/m}^{-3}$

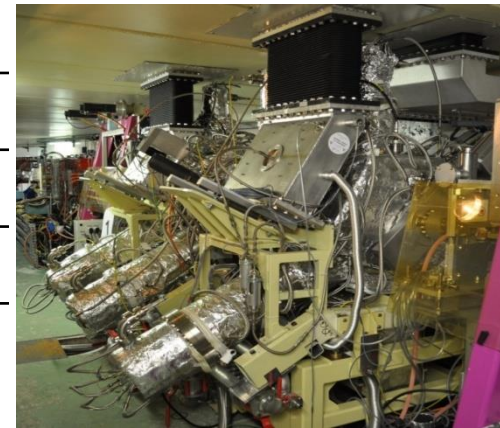
RAYONNEMENT DANS LES DIPÔLES

- Les nouvelles sources de rayonnement s'approchant de la limite de diffraction doivent s'adapter à:
 - Augmentation du nombre de dipôles: champ plus faible
 - Conflit avec les lignes de lumière de ces mêmes dipôles qui demandent des X durs
 - L'ESRF va réduire le champ de ses dipôles de 0.85T à 0.54T
- Cette source de rayonnement peut être remplacée par un wiggler:
 - Champ adapté aux besoins avec un large portion constante
 - Aimant compact ($l < 150\text{mm}$)
 - Une version à 2 pôles est considérée pour l'ESRF



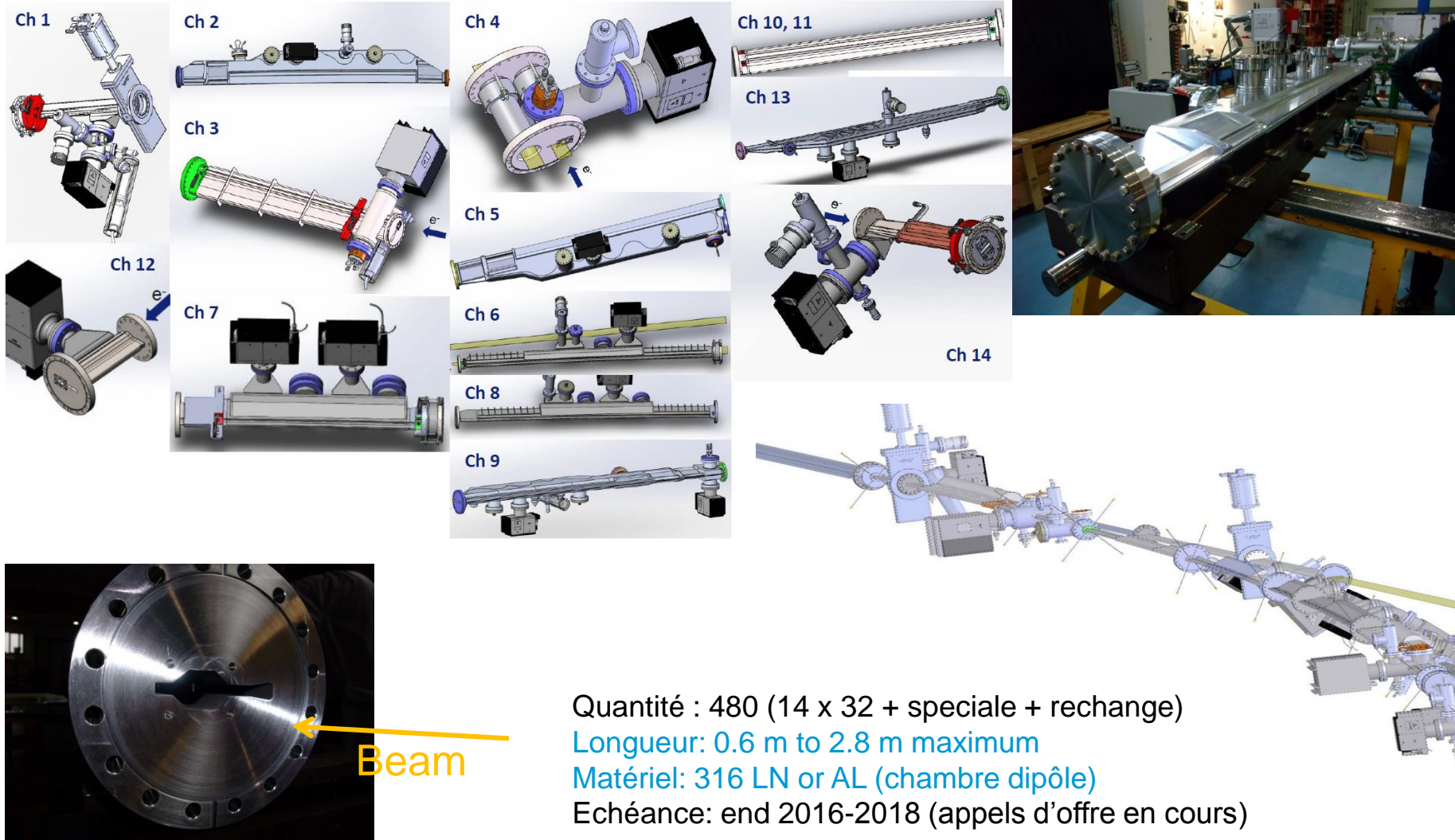
RADIO- FRÉQUENCE

Paramètres RF	Présent	Nouvelle
Perte d' énergie (+ 0.5 MeV/tour des IDs)	5.4 MeV/tour	3.1 MeV/tour
Temps d'amortissement longitudinal	3.5 ms	8.86 ms
Fréquence RF	352.200 MHz	352.371 MHz
Nombre harmonique	992	992
Voltage RF nominal	8 MV	6 MV
Acceptante en énergie	2.9%	4.9%
Nombre de cavités	5 cavités 5 cellules	14 cavités mono-cellule HOM amortis



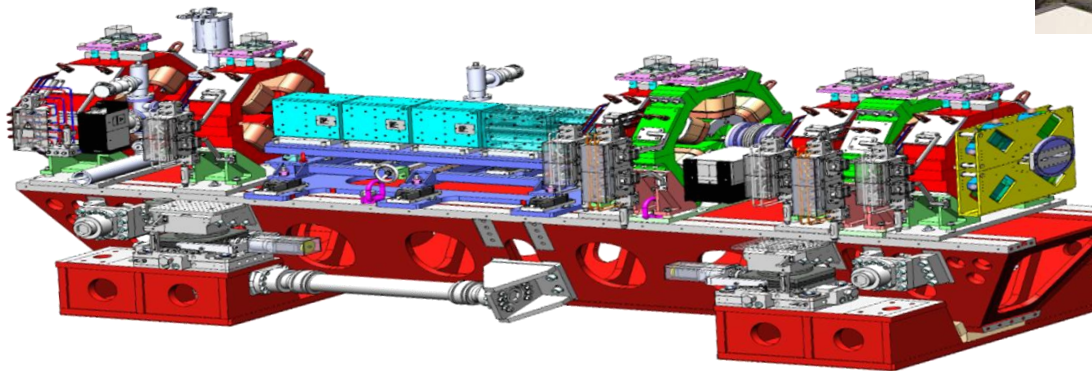
- **3 cavités prototypes ont été installées, alimentées par SSA**
- **12 cavités supplémentaires ont été commandées**

CHAMBRES Á VIDE



SUPPORTS

Longueur= 5.1m
poids des aimants = 3.500kg
Ajustement en Y motorise résolution= 5 μ m
Ajustement en X manuel résolution= 5 μ m
1ere fréquence naturelle = 50Hz

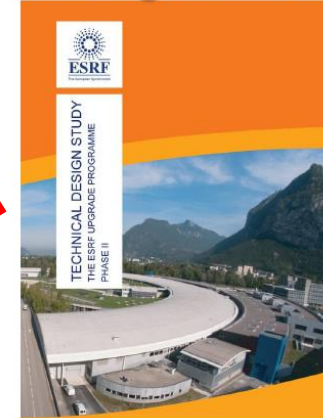


128 girders, 10-12t each
À assembler avant le
shutdown pour l'installation



Nov. 2012 **White paper**
Nov. 2012-Nov. 2014 **Technical Design Studies**
Juin 2014 **Approbation par le conseil**

Orange Book



Jan 2015-Oct 2018 **Conception détaillée & achats**
Dec 2018-Nov 2019 **Fermeture pour installation**
Sep 2019-Juil 2020 **Mise en service**
Aout 2020 **Opération standard 'User mode'**

- **Le programme ESRF-EBS est officiellement lancé et budgétisé:**
 - Construction d'une nouvelle source haute brillance
 - Conservation des infrastructures, injecteurs et ligne de lumières actuellement en opération
- **Dynamique faisceau:**
 - La maille et les principaux paramètres faisceau sont maintenant fixés
 - Optimisation non linéaire, injection, effet collectifs sont en cours d'étude
- **Conception technique:**
 - Conception des principaux éléments (aimants, chambre à vide, etc...) finalisés
 - Les premiers appels d'offre ont été envoyés et les premiers prototypes arrivent

MERCI POUR VOTRE ATTENTION



Remerciements:

Laurent Hardy le créateur de ce cours

Tous les collègues de l'ESRF dont en particulier ceux de la
Division Accélérateurs et Sources.