

Synchrotron SOLEIL : présentation d'une nouvelle machine

Marie-Agnès Tordeux
Groupe "physique machine"

La nouvelle source de rayonnement synchrotron SOLEIL va être présentée sous l'angle d'un critère aujourd'hui essentiel pour les sources de 3ème génération :

la stabilité du faisceau de photons au niveau des postes expérimentaux.

Pour satisfaire la qualité de ce critère, l'ensemble des équipements de SOLEIL sont mis à contribution. C'est l'occasion de les passer en revue.

- Introduction : présentation des accélérateurs et des lignes
- De la stabilité des photons à la stabilité des électrons :
définition d'un cahier des charges
- Les instabilités selon leur origine, et leur solution :
 - mécanique
 - thermique
 - magnétique
 - électromagnétique
- Diagnostics associés

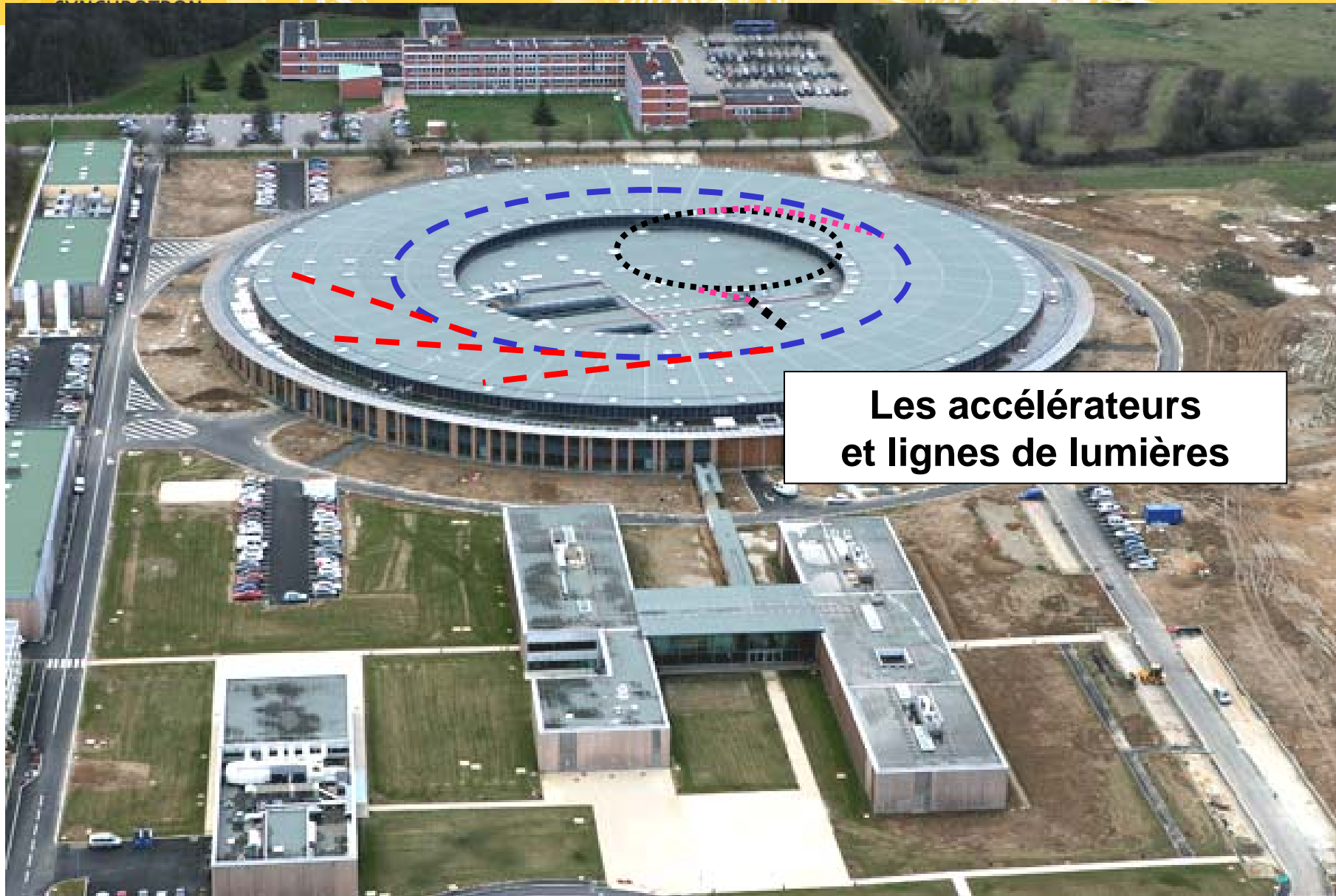
Bâtiments techniques

Bâtiment Synchrotron

Restaurant

Bâtiment central





**Les accélérateurs
et lignes de lumières**

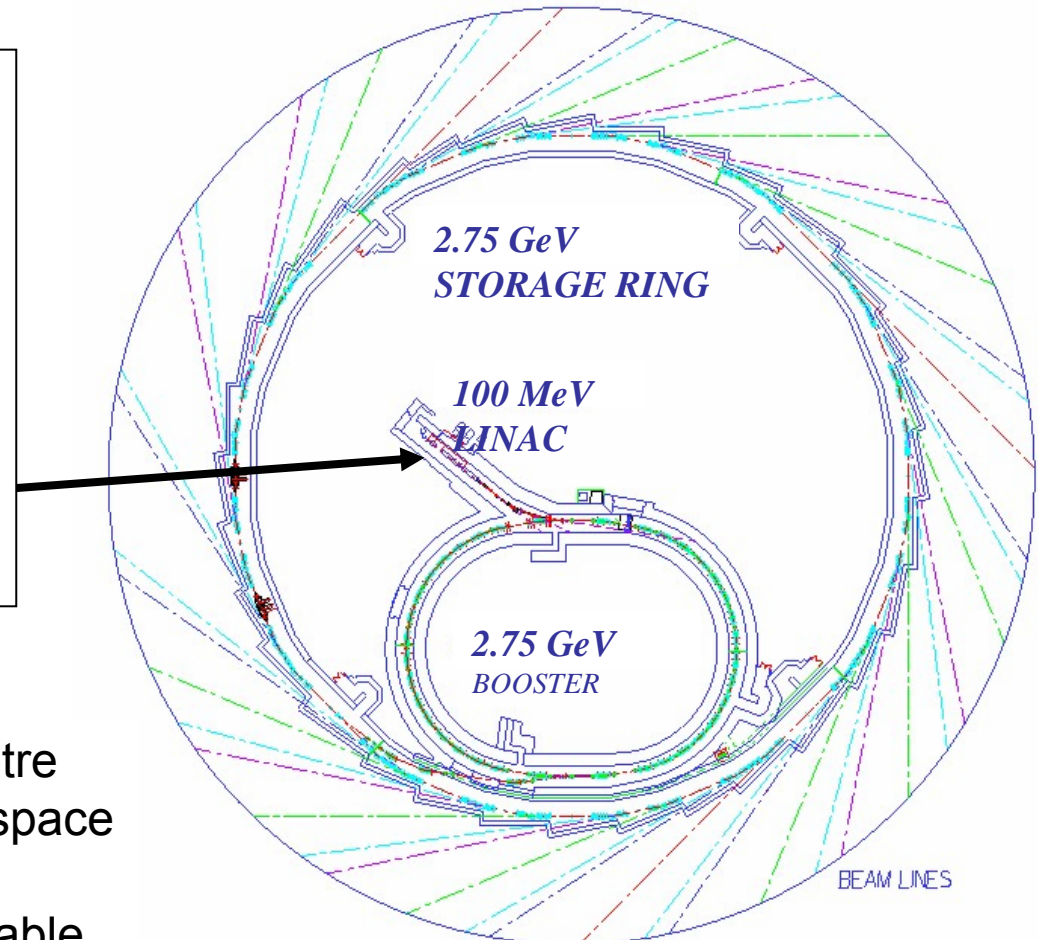
Specifications du **LINAC** :

- charge du mode multi-paquets de l'anneau (500 mA dans 416 paquets):

8 nC dans 300 ns

- Charge dans le mode structure temporelle de l'anneau : (100 mA dans 8 paquets):

1.5 nC dans 3 paquets de 2 ns



On a limité le courant crête pour être dans un régime de faible charge d'espace

→ tête de machine + simple et + fiable

BOOSTER:

2 super-periodes

36 Dipoles : 0.67 T / 2.17 m

44 Qpoles: 10.3 T/m/0.4 m

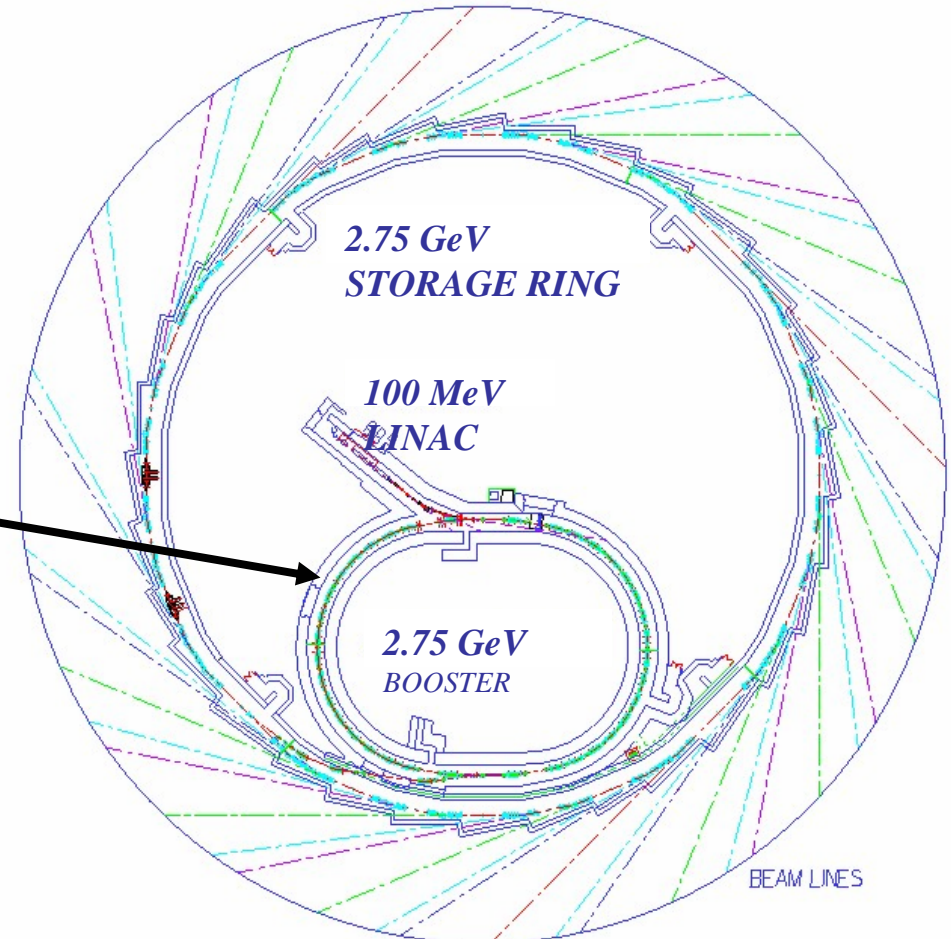
Sections droites: 3.17 m

Circonférence: 157 m

Emittance: 150 nm

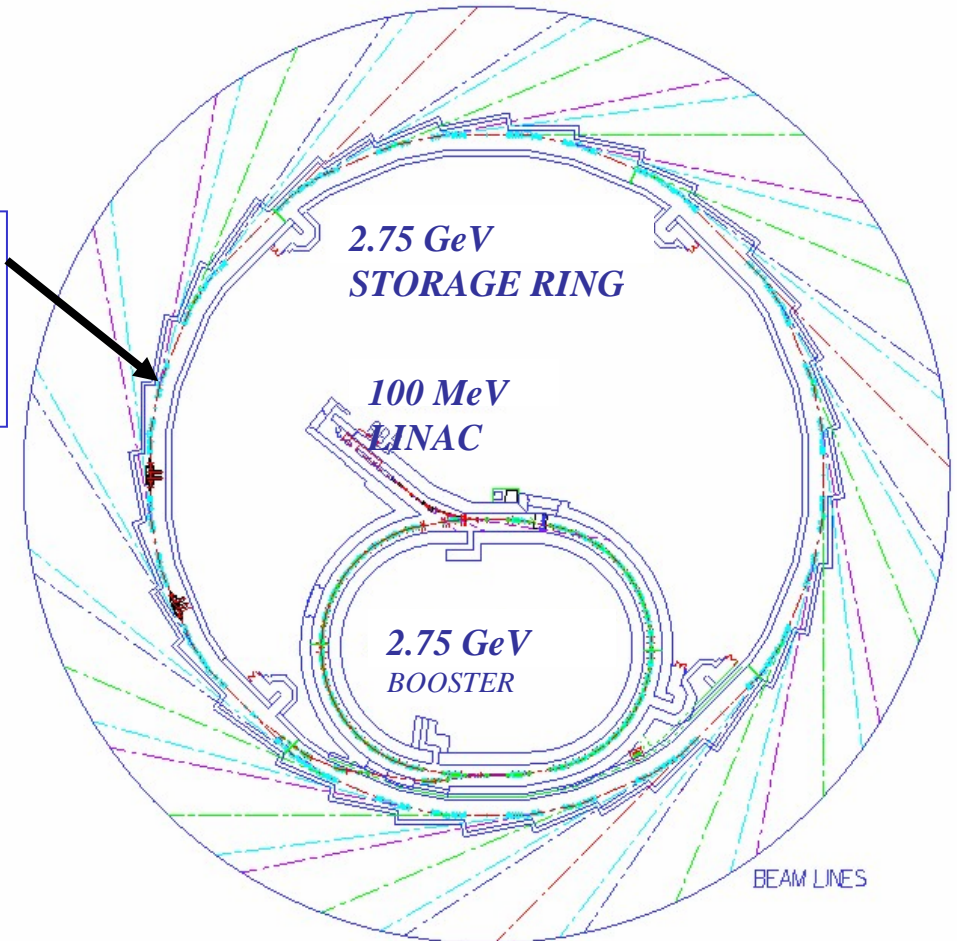
Cyclage des alimentations à 3 Hz

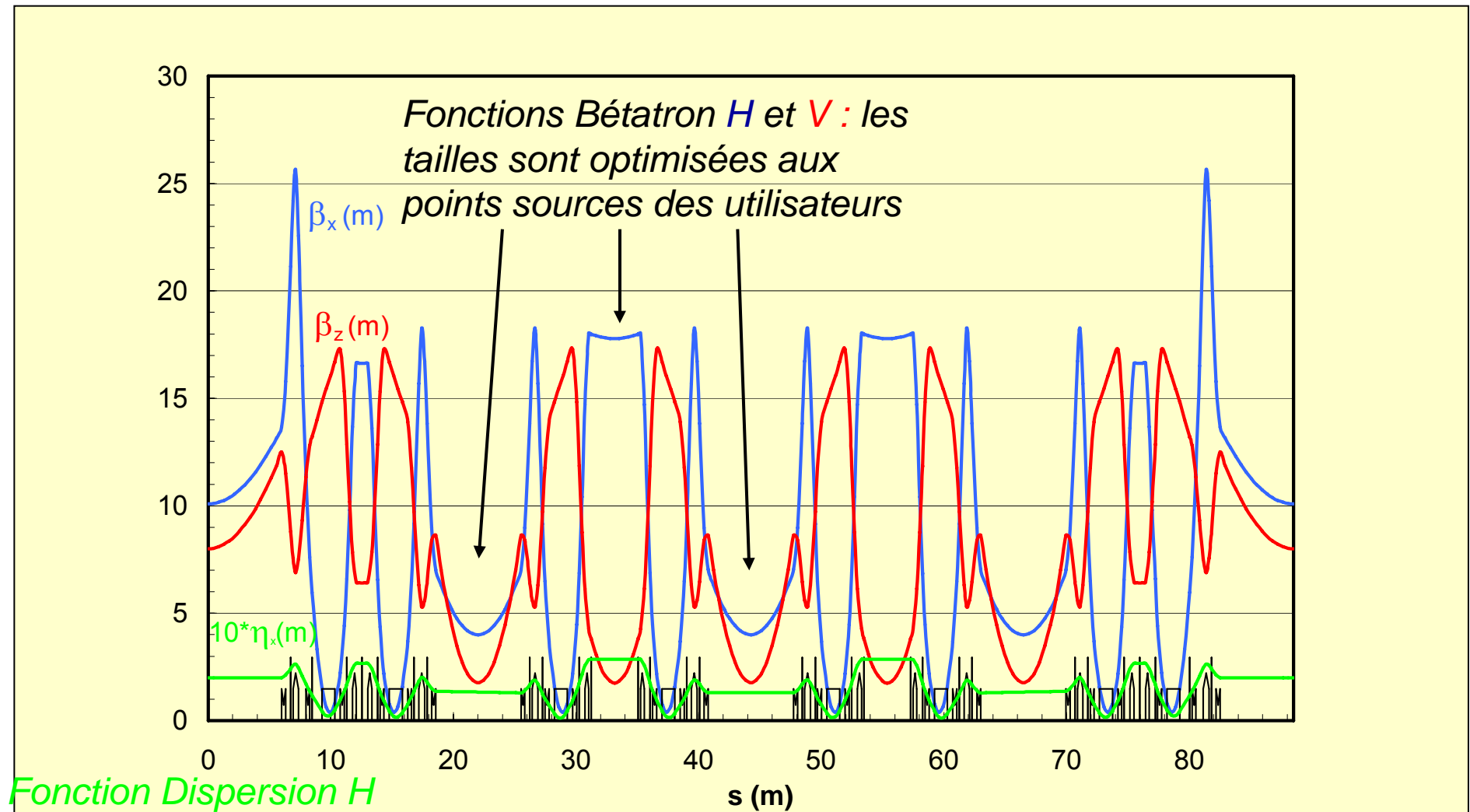
(concept SLS)



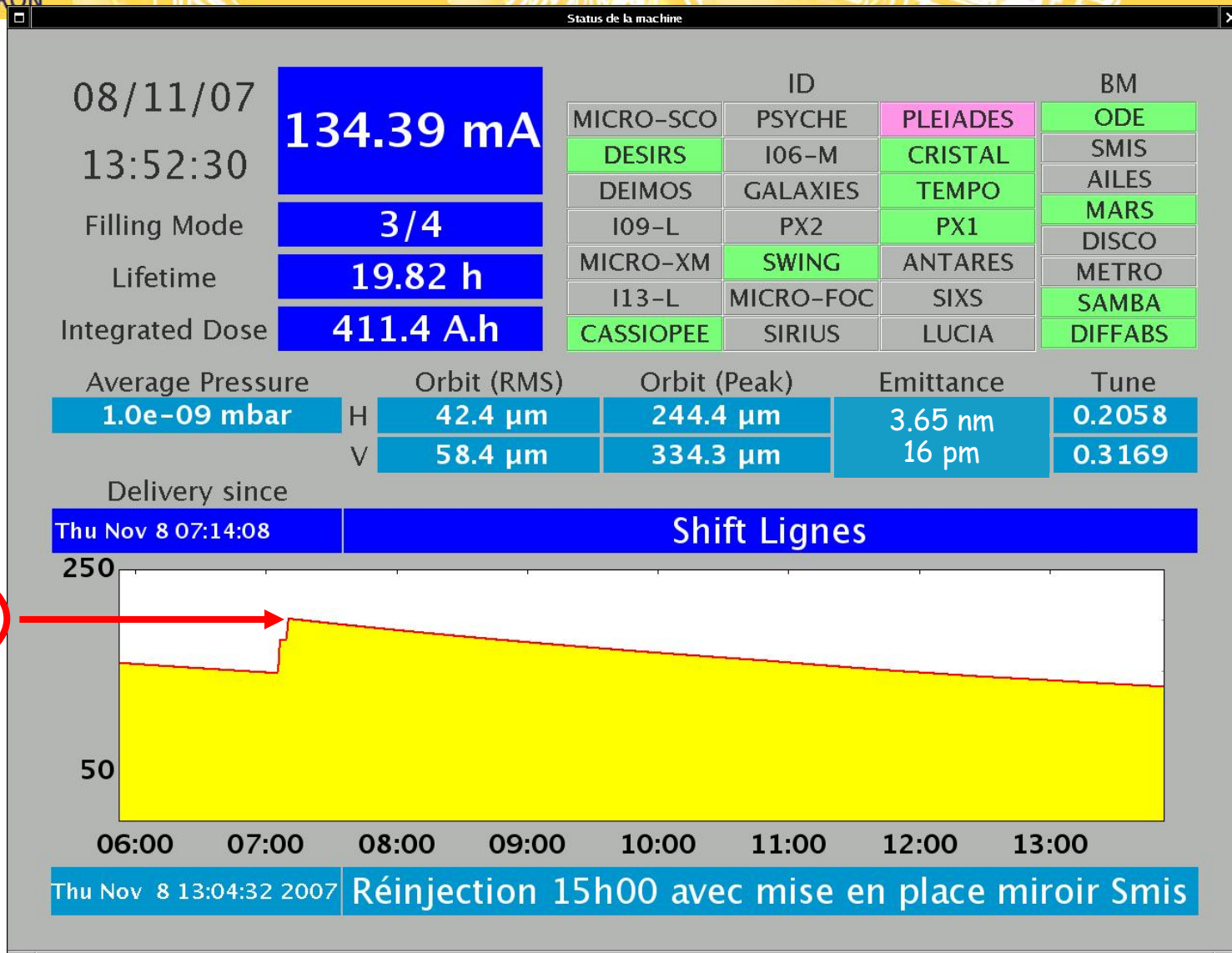
Anneau
de
stockage

Energie:	2.75 GeV
Circonférence:	354.097 m
Emittance H / V:	3.73 nm.rad / 12 pm.rad
Nombre cellules / super periods:	16 / 4
Sections droites :	12 m x 4 ; 7 m x 12 ; 3.8 m x 8
Betatron tunes, n_x/n_z :	18.19 / 10.29
Natural Chromat. ξ_x/ξ_z :	-52.42 / -22.76
Momentum compaction:	4.49×10^{-4}
Dispersion énergie :	$1.02 \cdot 10^{-3}$
Frequence révolution :	0.846 MHz





Maille et fonctions optiques sur $\frac{1}{4}$ d'anneau (1 super-période)



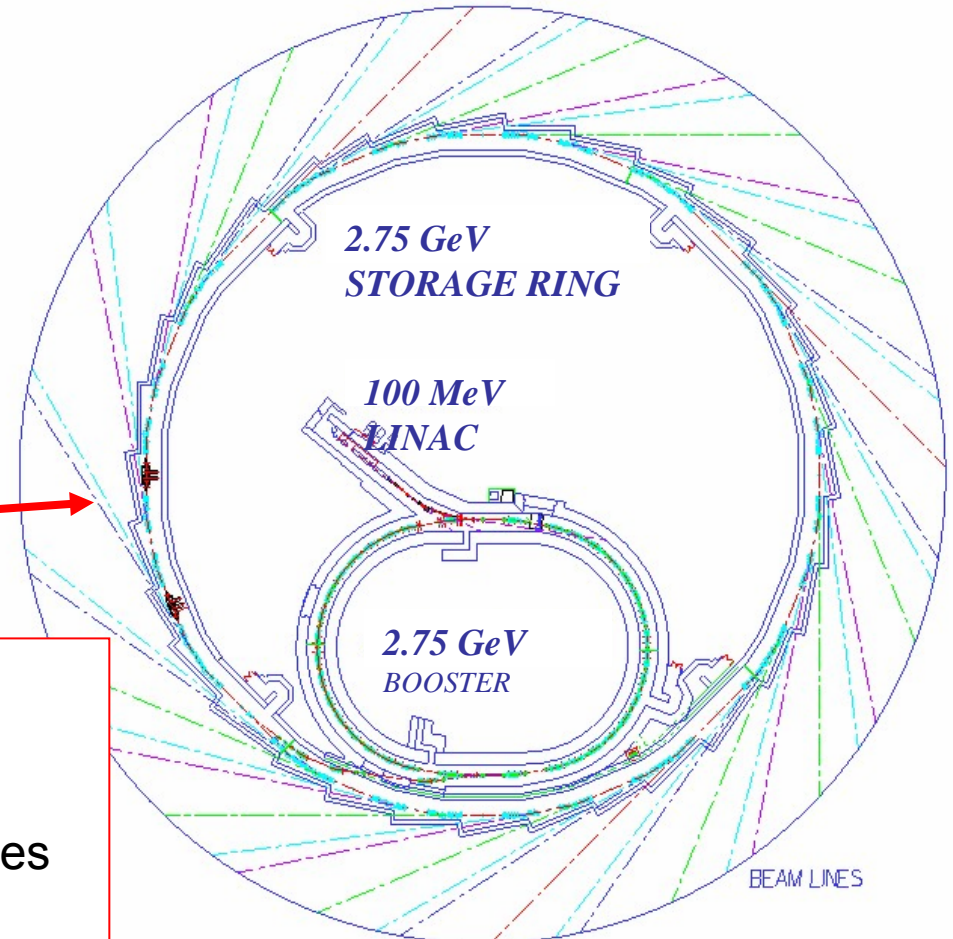
200 mA

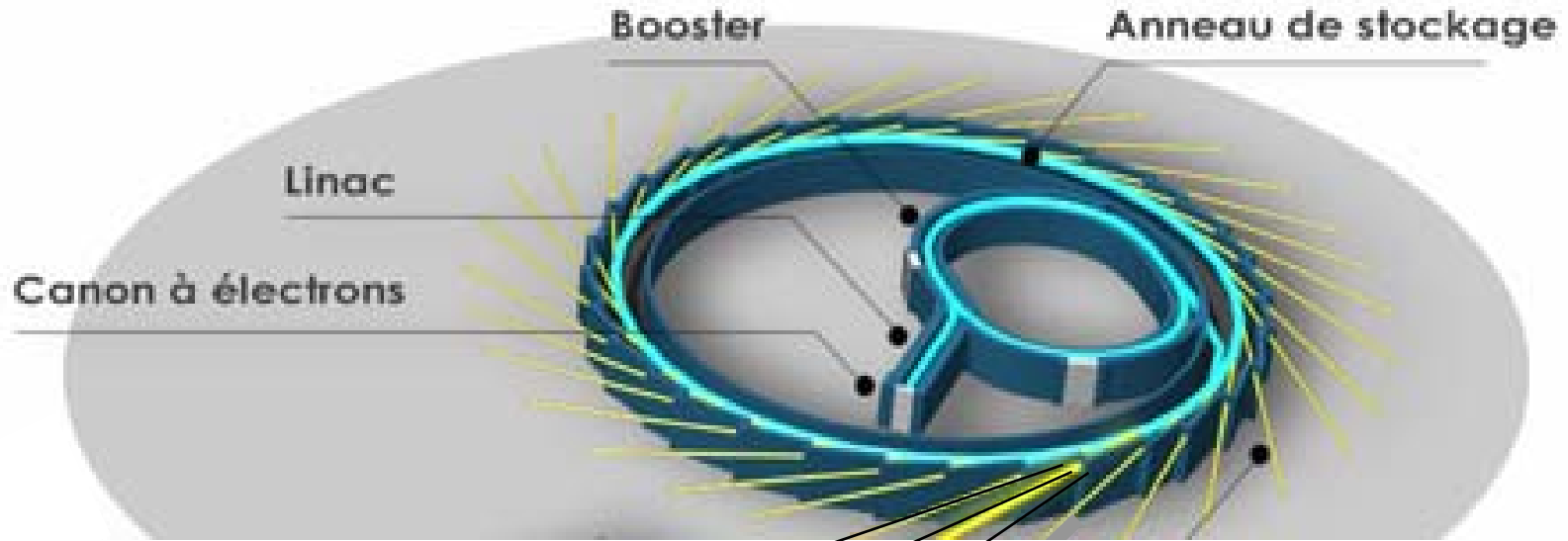
**Objectif
500 mA**

3 injections / jour

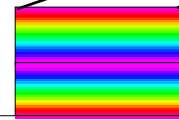
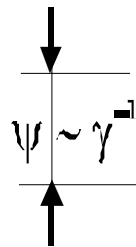
Lignes de lumière

- **2500 utilisateurs** prévus par an
- **11 lignes en opération** en octobre 2007 :
accueil des premiers utilisateurs externes
- **24 lignes** financées
- **43 lignes possibles**, 21 sur onduleurs

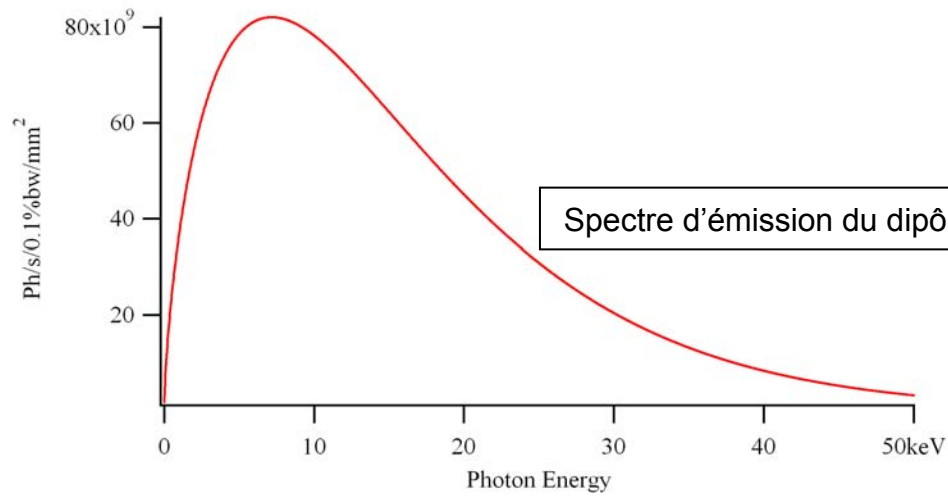
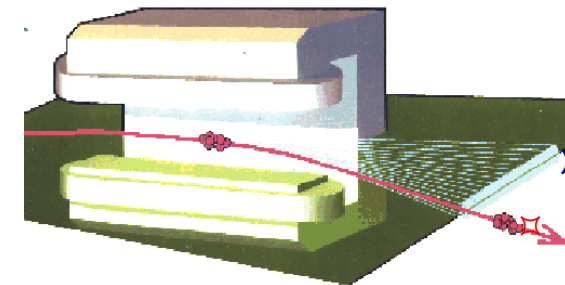




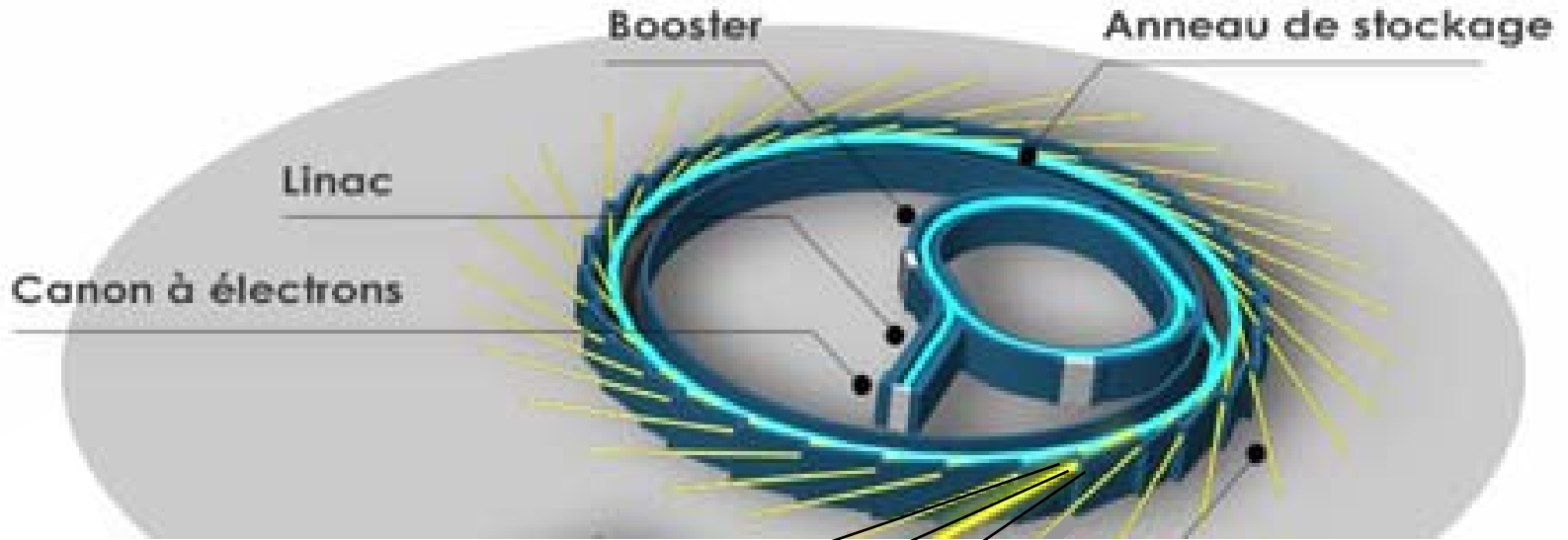
rayonnement
synchrotron



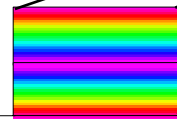
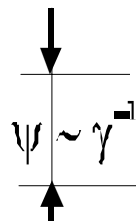
Source de rayonnement :
Aimant de courbure (DIPOLE)



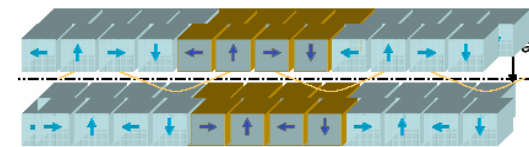
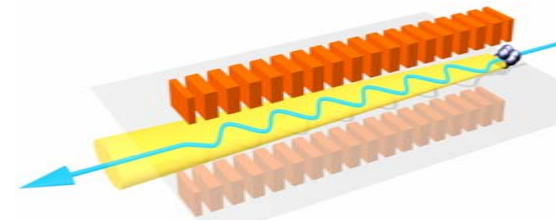
Spectre d'émission du dipôle (1.71 Tesla)



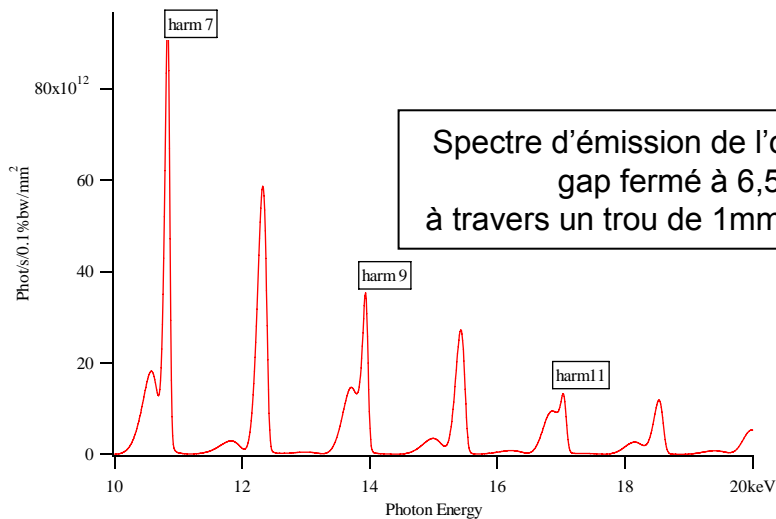
rayonnement
synchrotron



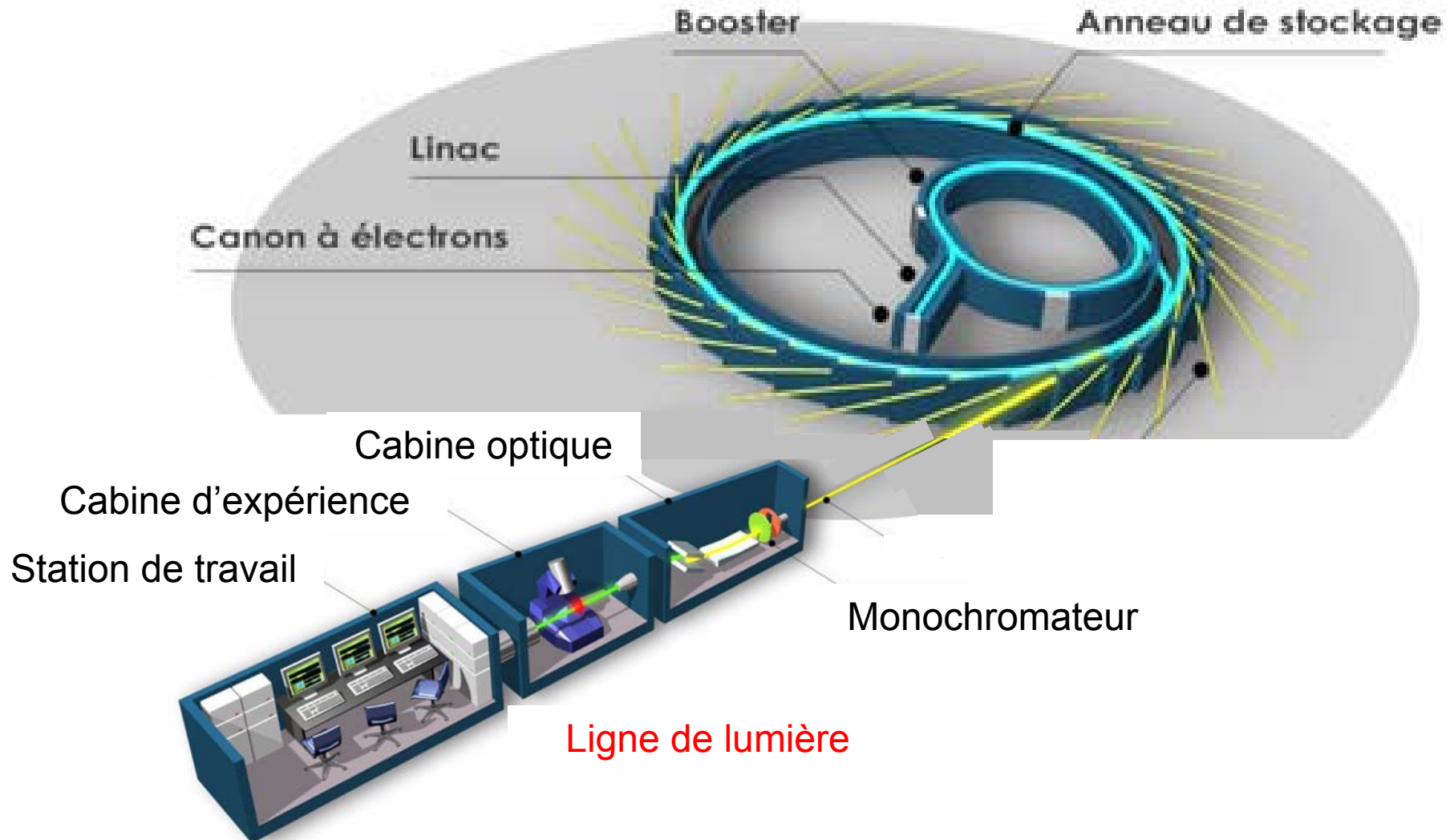
Source de rayonnement :
Onduleur à électro-aimants



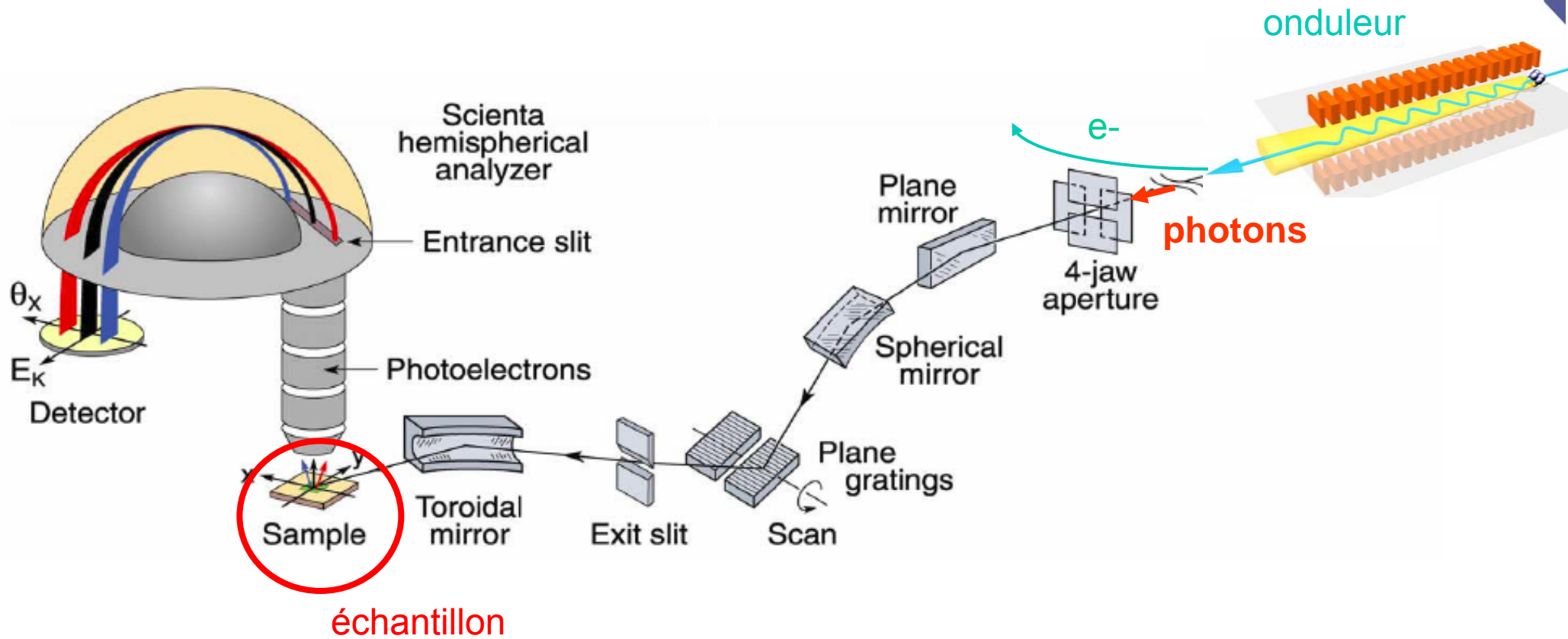
Onduleur à aimants permanents

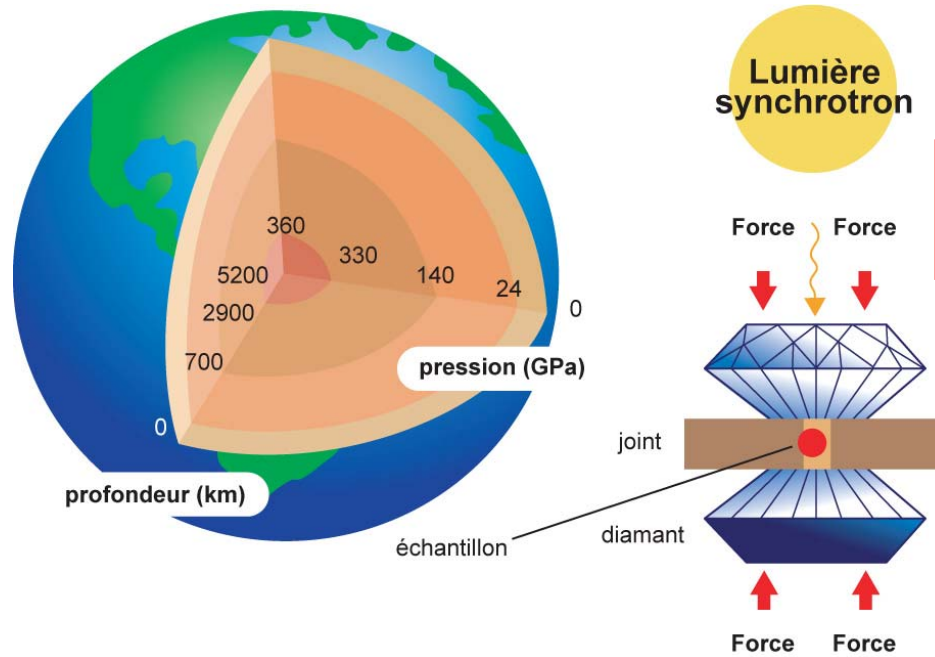


Spéctre d'émission de l'onduleur U22,
gap fermé à 6,5 mm
à travers un trou de 1mmx1mm à 20 m



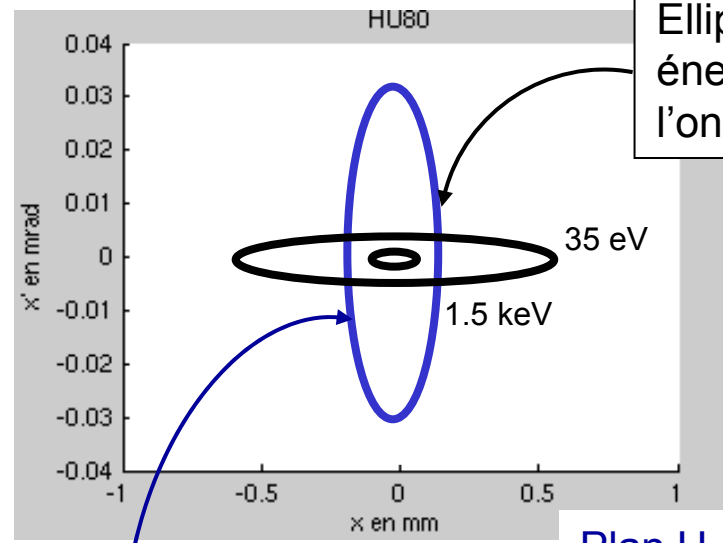
Ligne de lumière :
exemple d'optique





Action de paramètres extérieurs

Contrainte : Stabilité en position et en brillance du faisceau de photons



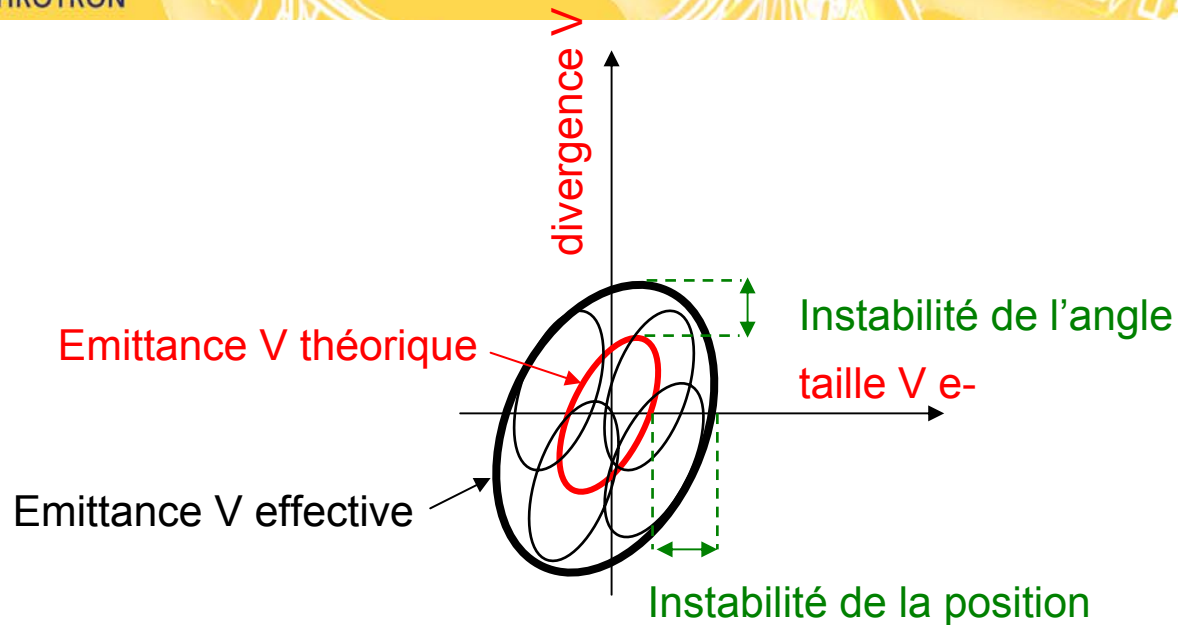
Ellipse d'émittance **du photon** pour les énergies 35 eV et 1.5 keV générées par l'onduleur

Plan H

Ellipse d'émittance des e- au point source
(distribution dans l'espace *taille x divergence*)

Exemple : point source dans l'onduleur
HU80, section droite moyenne de l'anneau

Conclusion : l'émittance du faisceau de photons est largement déterminée par l'émittance des électrons (essentiellement pour les photons de haute énergie)

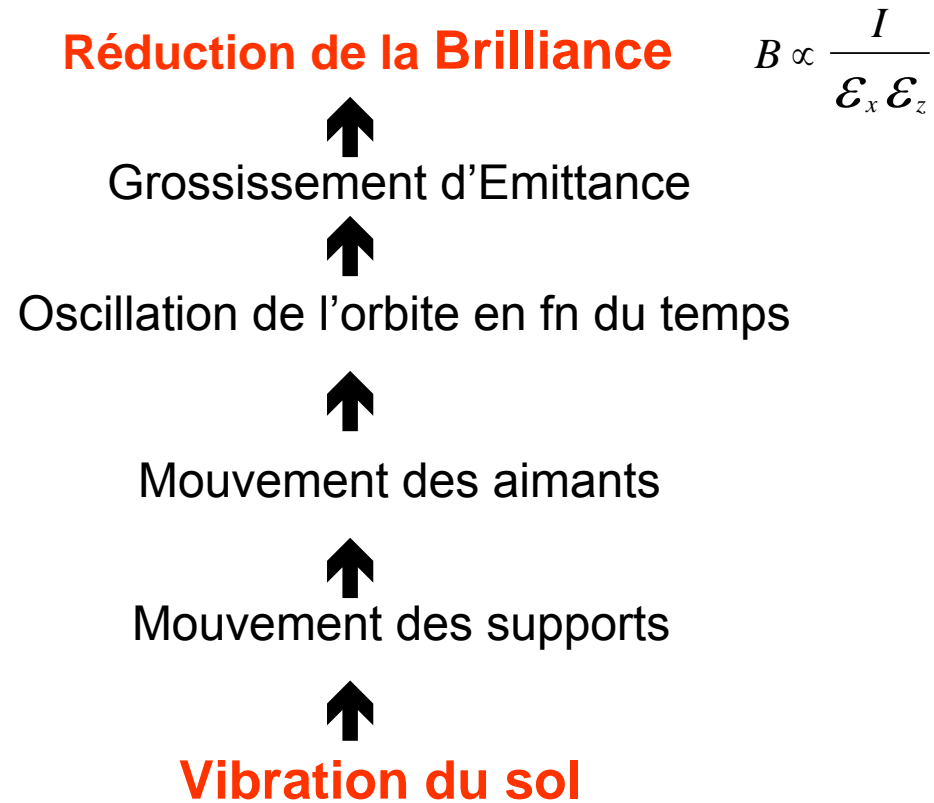


Conséquence :
les variations de position et angle des e- ne doivent pas excéder **10% des valeurs nominales de taille et divergence du faisceau e-**

Variations max	$\sigma_{\text{variation}}$ (μm)	$\sigma'_{\text{variation}}$ (μrad)
Horizontale	18	3
Verticale	0.8	0.5

Exemple de la SD moyenne

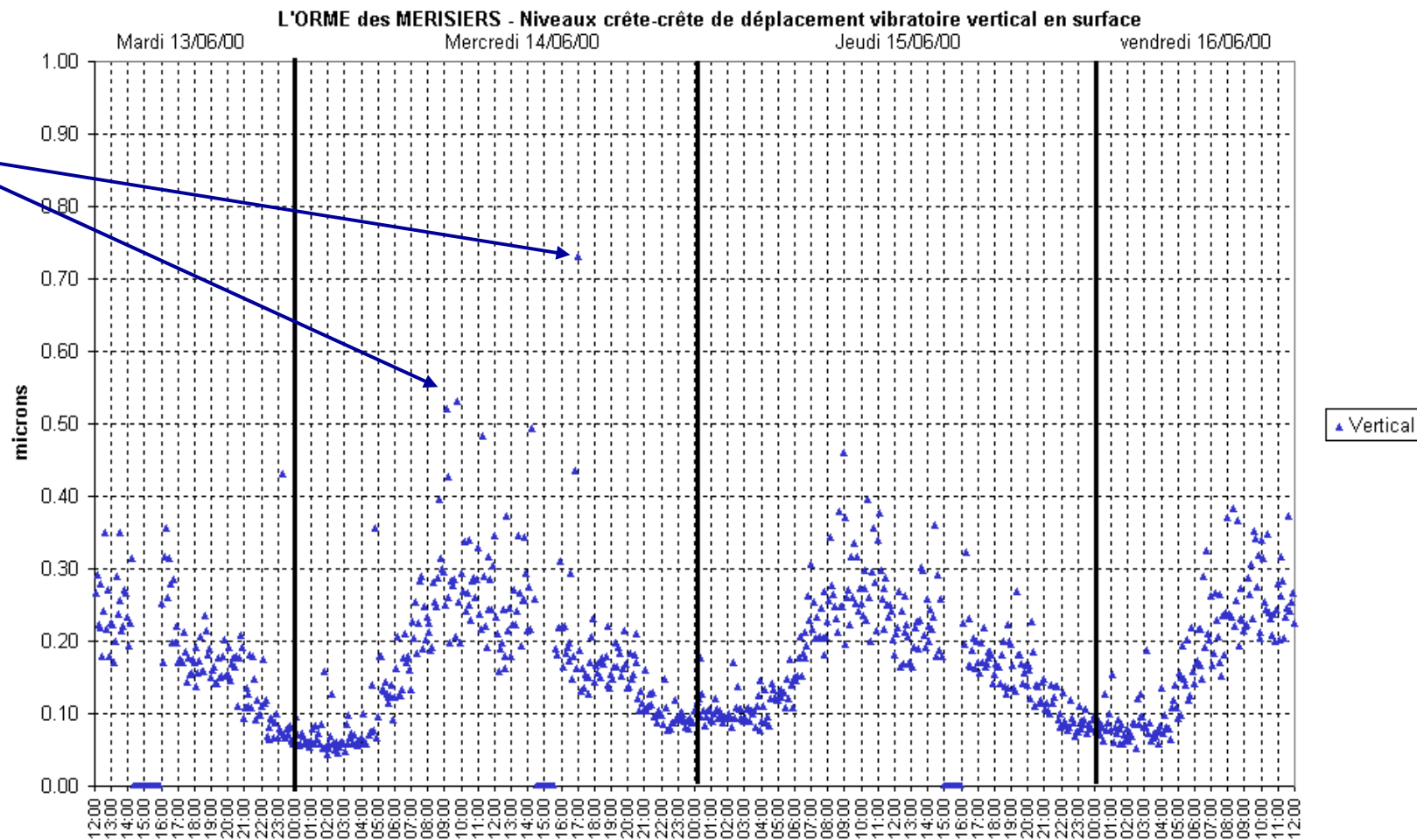
Problématique : vibration du sol



Solution :

Mesure de vibration à la surface du sol, avant la construction (Juin 2000)

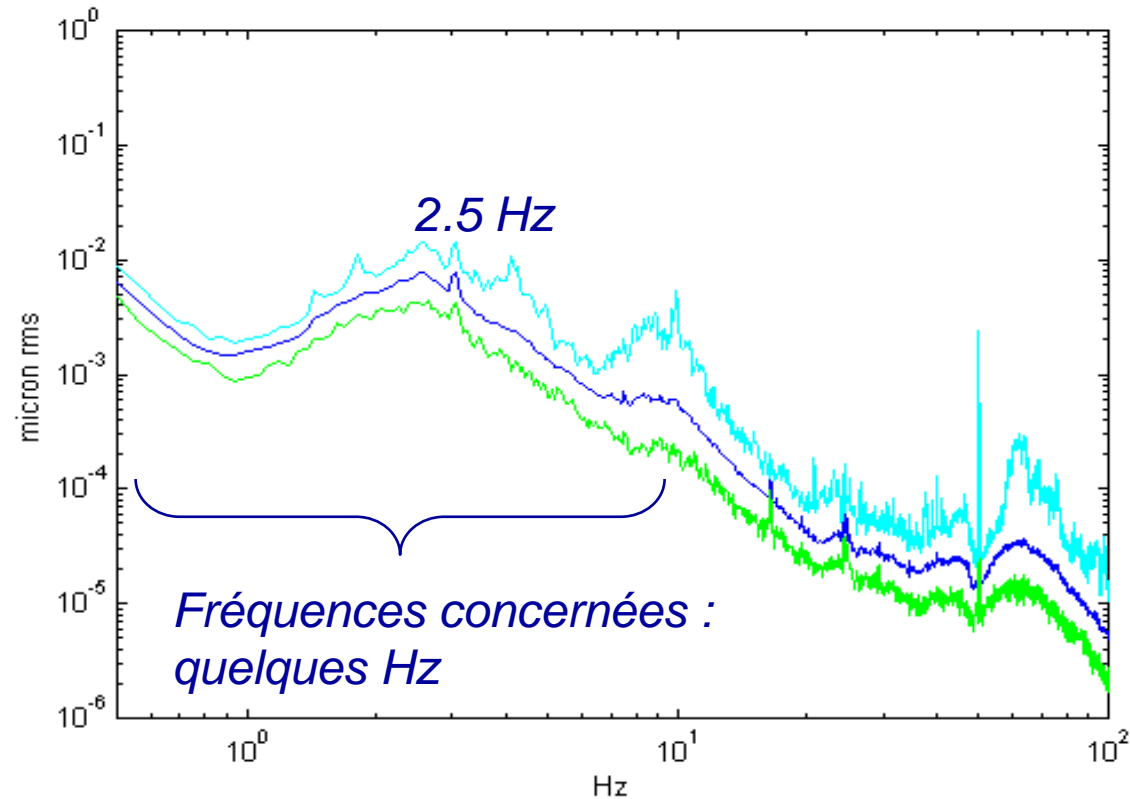
*accidents :
essieux de camion
en corrélation avec
des irregularités
des 2 routes
adjacentes*



Solution :

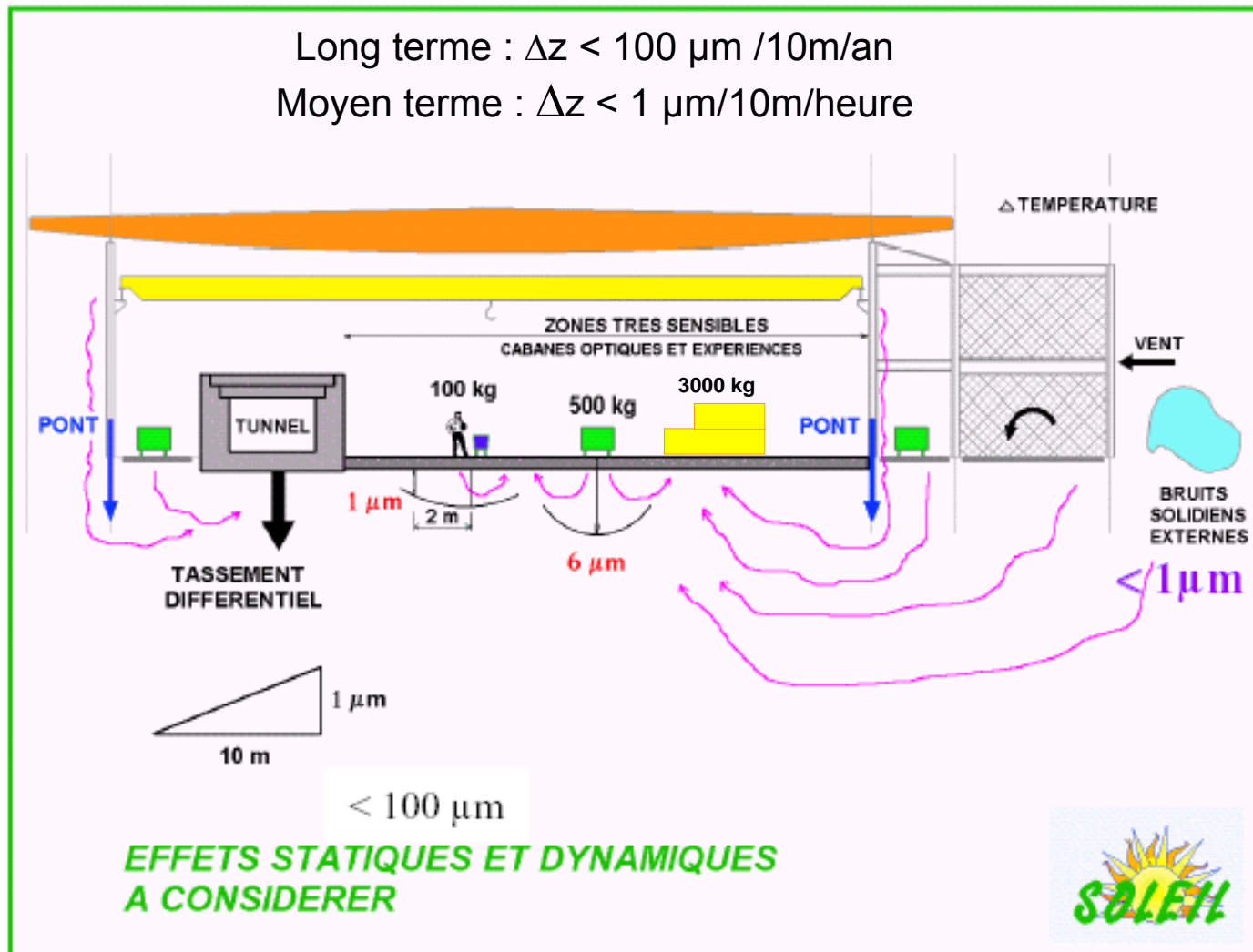
Mesure de vibration à la surface du sol, avant la construction (Juin 2000)

Spectres de déplacement vertical minimum, moyen et maximum relevés
le jeudi 15/06/2000 de 8h à midi



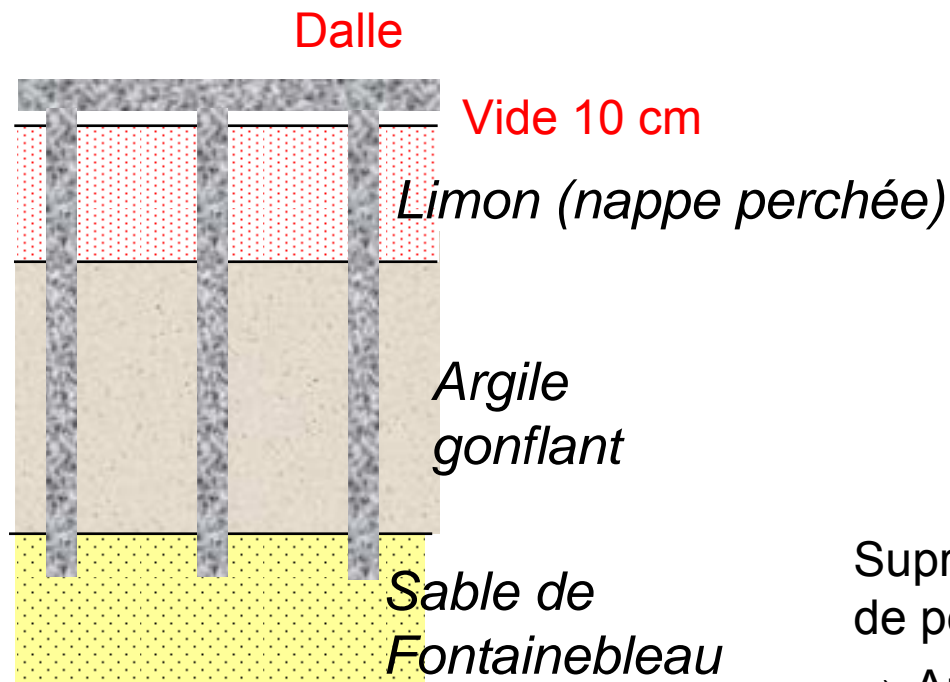
Solution :

Définition de critères pour les fondations du bâtiment synchrotron



Solution :

✓ **Dalle** (0.8m épaisseur moyenne) du tunnel anneau et du hall expérimental sur des **pieux** en béton (diamètre 0.8 et 0.6m, longueur 16 m)



Premier pieu



Suppression du chemisage des pieux / effet de peigne

→ Augmentation de l'inertie

→ Mode propre de la dalle < 2.5 Hz



Pieux :

128 sous le tunnel de l'anneau

420 sous le hall experimental (4*105)

64 sous le linac et le booster avec une dalle déconnectée

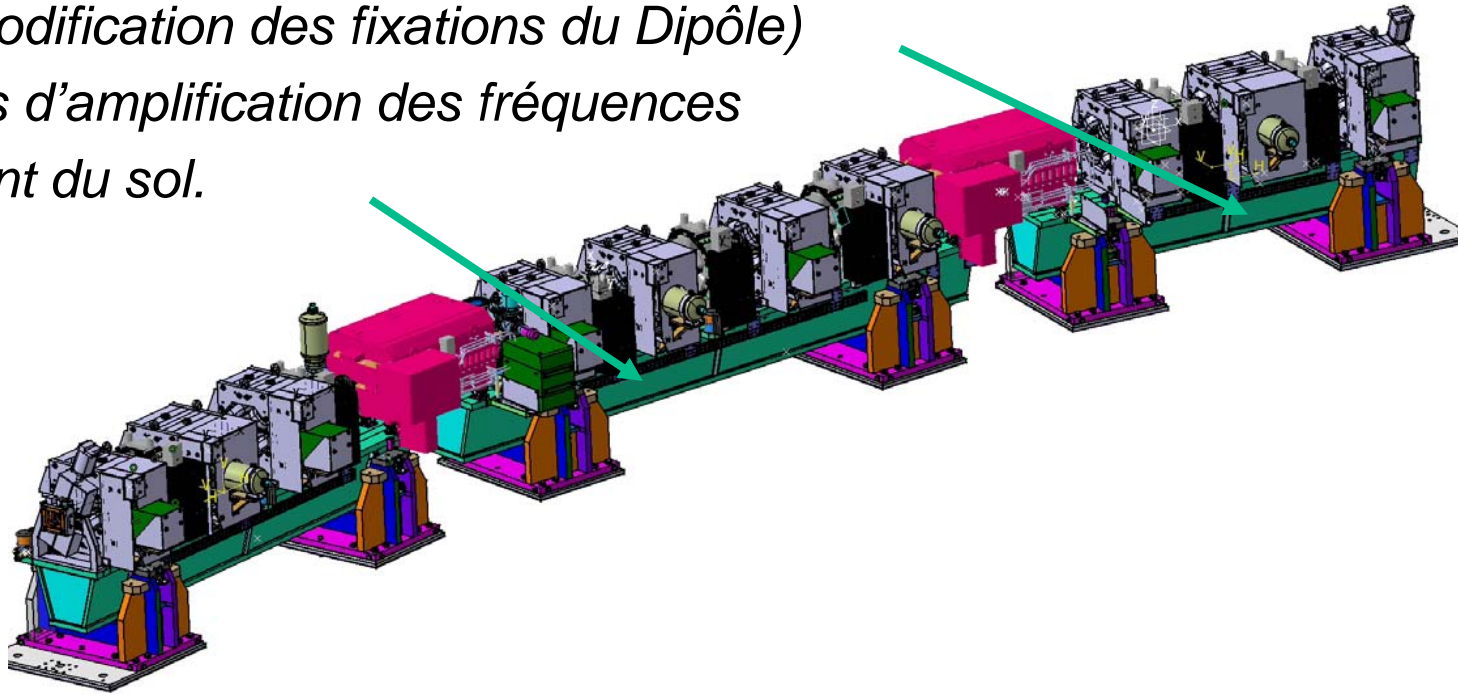
Solution :

✓ Les aimants de l'anneau sont groupés par **poutre** :

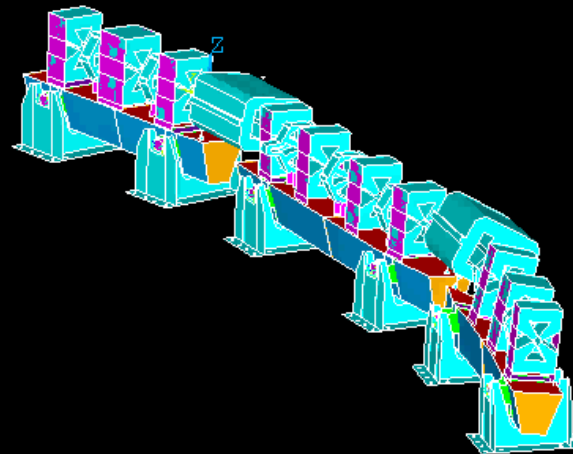
Du design des poutres résulte un premier mode de résonance > 47 Hz

(après modification des fixations du Dipôle)

*Donc pas d'amplification des fréquences
provenant du sol.*



Modélisation des modes propres de la poutre chargée par le code ANSYS



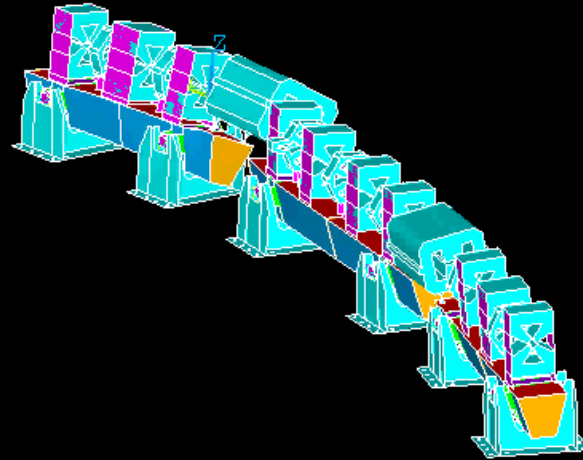
File: ens poutres

```
ANSYS 6.1
NOV 20 2002
09:52:54
DISPLACEMENT
STEP=1
SUB =1
FREQ=46.82
PowerGraphics
EFACET=1
AVRES=Mat
DMX =.020499
```

46.8Hz

```
*DSCA=31.687
XV =-.55356
YV =-.78062
ZV =.29019
*DIST=5.409
*XF =-1.48
*YF =-3.988
*ZF =.38929
A-ZS=68.039
Z-BUFFER
EDGE
```

1



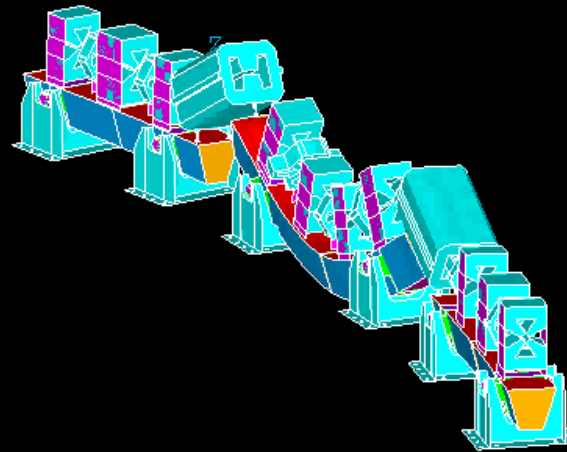
File: ens poutres

```
ANSYS 6.1
NOV 20 2002
09:54:25
DISPLACEMENT
STEP=1
SUB =2
FREQ=47
PowerGraphics
EFACET=1
AVRES=Mat
DMX =.021108
```

```
*DSCA=30.773
XV =-.55356
YV =-.78062
ZV =.29019
*DIST=5.409
*XF =-1.48
*YF =-3.988
*ZF =.38929
A-ZS=68.039
Z-BUFFER
EDGE
```

47Hz

1



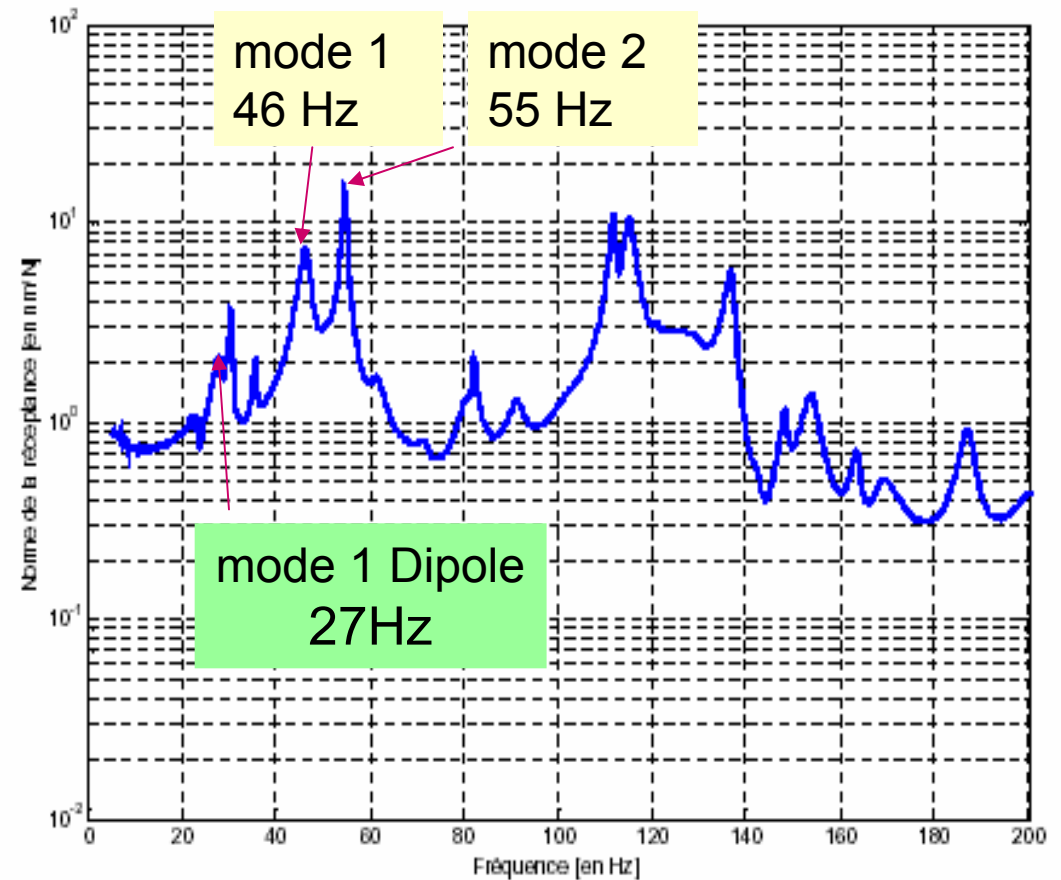
File: ens poutres

```
ANSYS 6.1  
NOV 20 2002  
09:55:13  
DISPLACEMENT  
STEP=1  
SUB =3  
FREQ=54.067  
PowerGraphics  
EFACET=1  
AVRES=Mat  
DMX =.01559
```

```
*DSCA=41.666  
XV =-.55356  
YV =-.78062  
ZV =.29019  
*DIST=5.409  
*XF =-1.48  
*YF =-3.988  
*ZF =.38929  
A-ZS=68.039  
Z-BUFFER  
EDGE
```

54Hz

Mesure sur prototype des modes propres de la poutre chargée :
parfaitement corrélée à la simulation



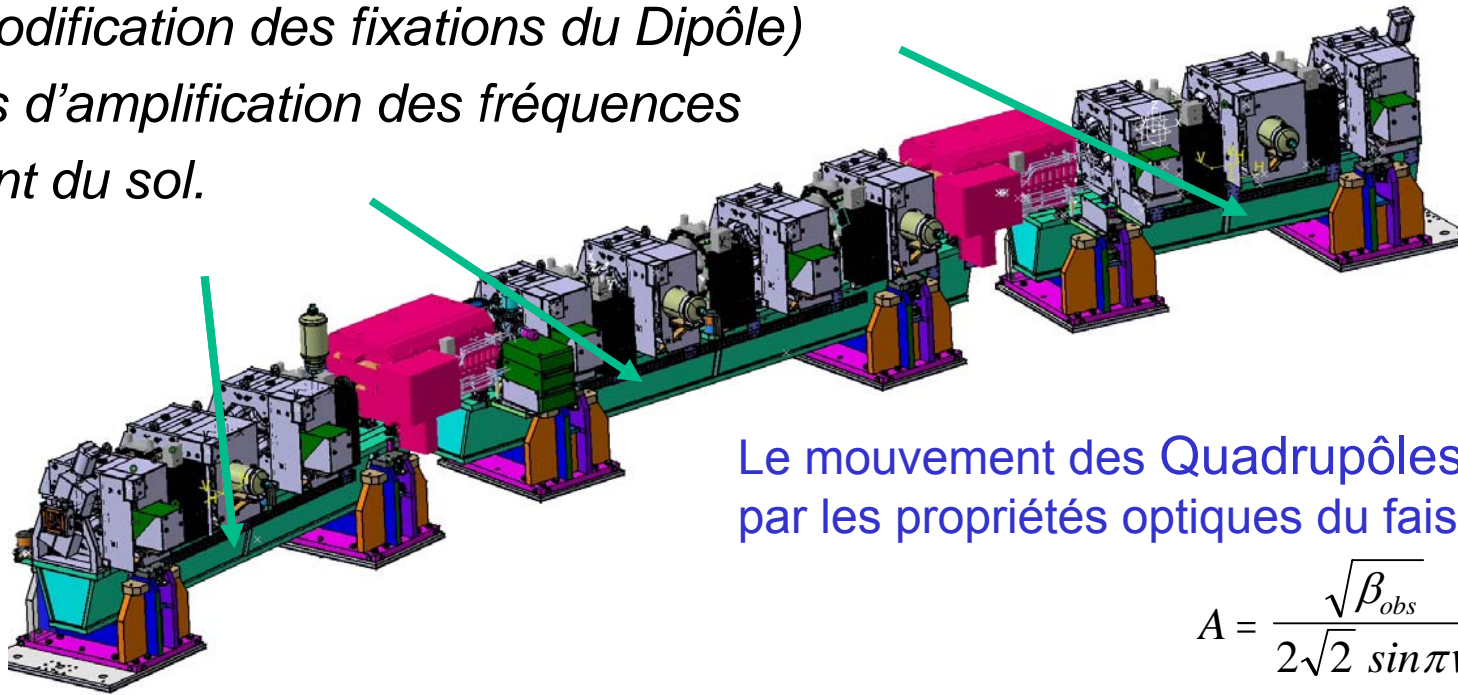
Solution :

✓ Les aimants de l'anneau sont groupés par **poutre** :

Du design des poutres résulte un premier mode de résonance > 47 Hz

(après modification des fixations du Dipôle)

Donc pas d'amplification des fréquences provenant du sol.



Le mouvement des Quadrupôles est amplifié par les propriétés optiques du faisceau

$$A = \frac{\sqrt{\beta_{obs}}}{2\sqrt{2} \sin \pi \nu} \sqrt{\sum_i \beta_i (Kl_i)^2}$$

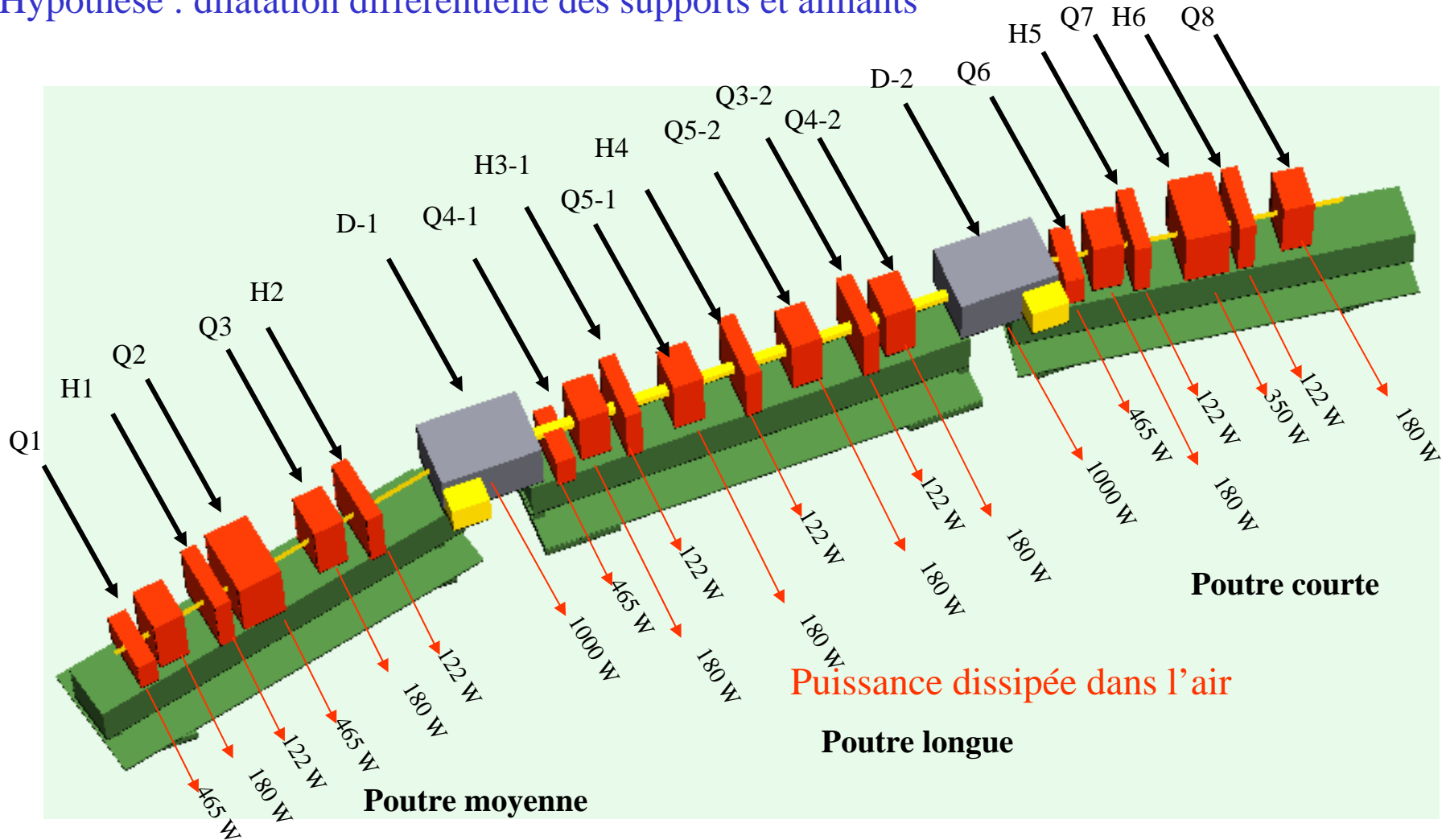
Cette amplification est réduite si les Quadrupôles focalisants et défocalisants bougent ensemble comme un corps rigide

Amplification	H	V
sans poutre	30	10
avec poutres	16	3
Gain	47%	70%

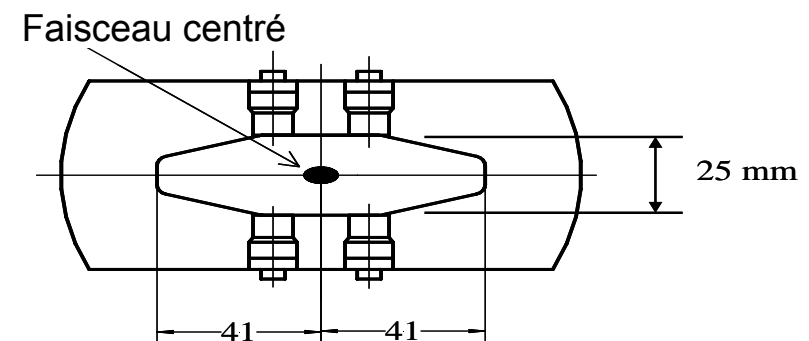
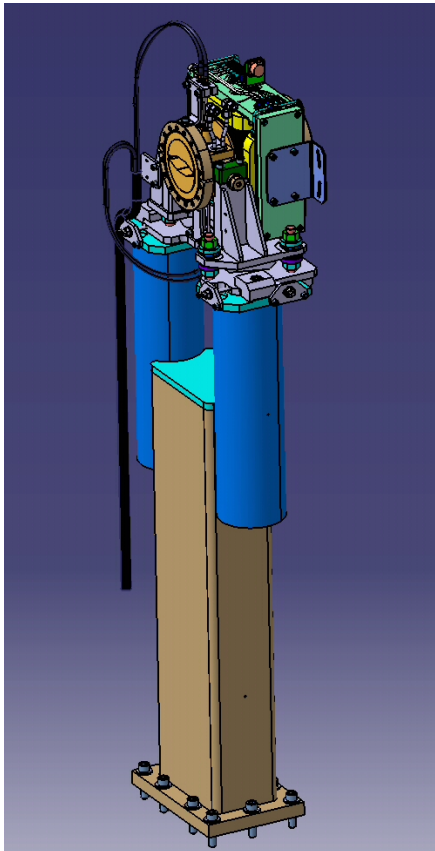
Problématique :

Puissance dissipée par les aimants et onduleurs

Hypothèse : dilatation différentielle des supports et aimants



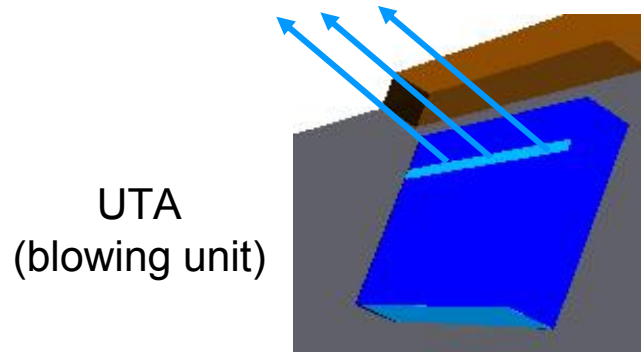
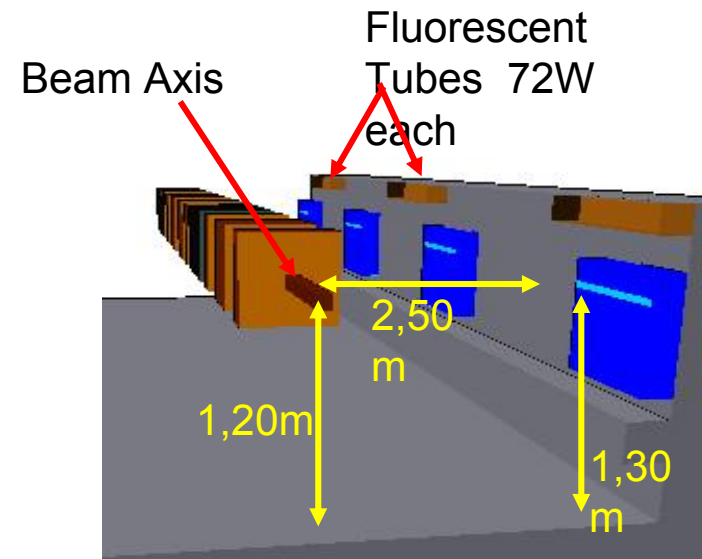
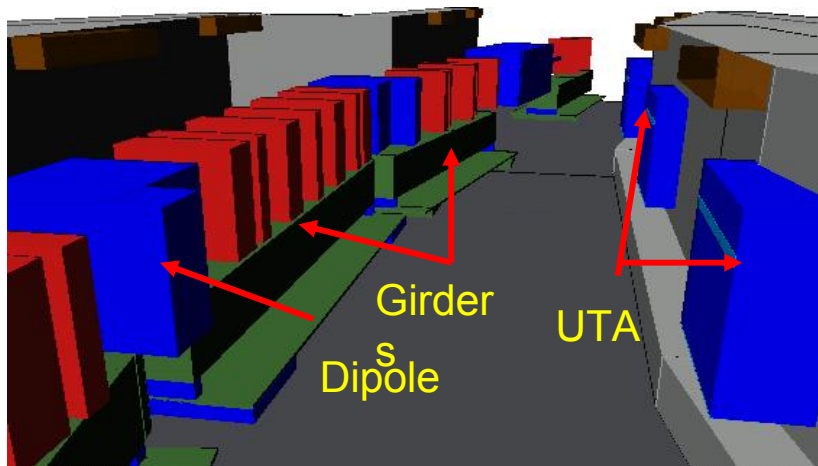
- La mesure des instabilités requiert des diagnostics de stabilité et de résolution en rapport avec les amplitudes attendues.
- Les **B**eam **P**osition **M**onitors mesurent l'orbite relativement au centre des quadropôles (après mesure préalable des offsets quad / BPM = « Beam Based Alignment »)



- Résolution < 100 nm
- Stabilité < 1 μm grâce à :
 - Support rigide (mode propre élevé)
 - Soufflet de part et d'autre pour désolidariser le moniteur de la chambre et de ses fluctuations de longueur
 - Câbles dans gaine indépendante et volumes climatisés (tunnel et hall)
 - Système de commutation des 4 électrodes sur les 4 voies du processeur LIBERA

Solution :

Unité de Traitement d'Air

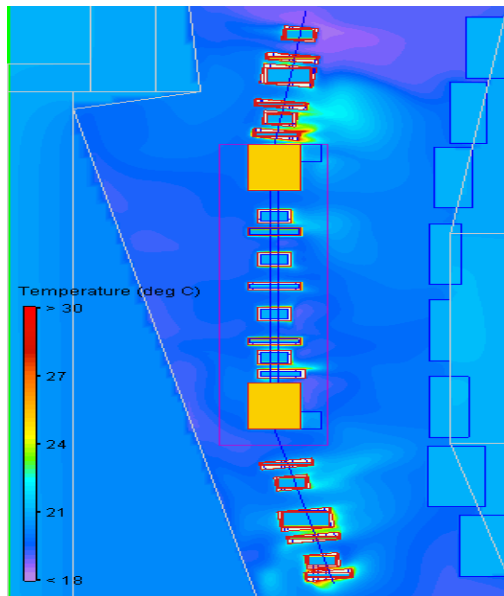


température air UTA = T assurant la T_{ure}
du tunnel à 21°C
angle ouverture H = 5°
angle vertical V = +10°

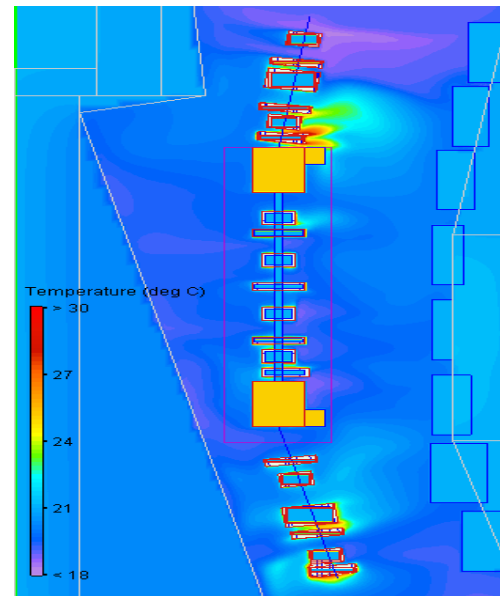
Simulation par le code *Flomerics*

Variation longitudinale statique de la t^{ure} : $21^{\circ}\text{C} \pm 0.3^{\circ}\text{C}$

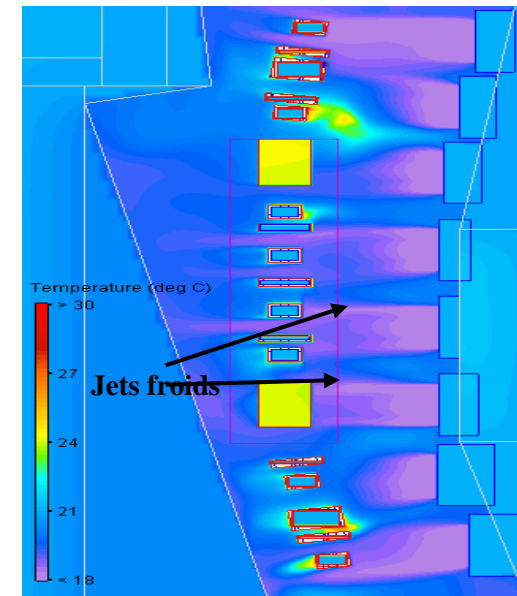
Variation locale dans le temps : $21^{\circ}\text{C} \pm 0.1^{\circ}\text{C}$



(altimétrie) 1 m



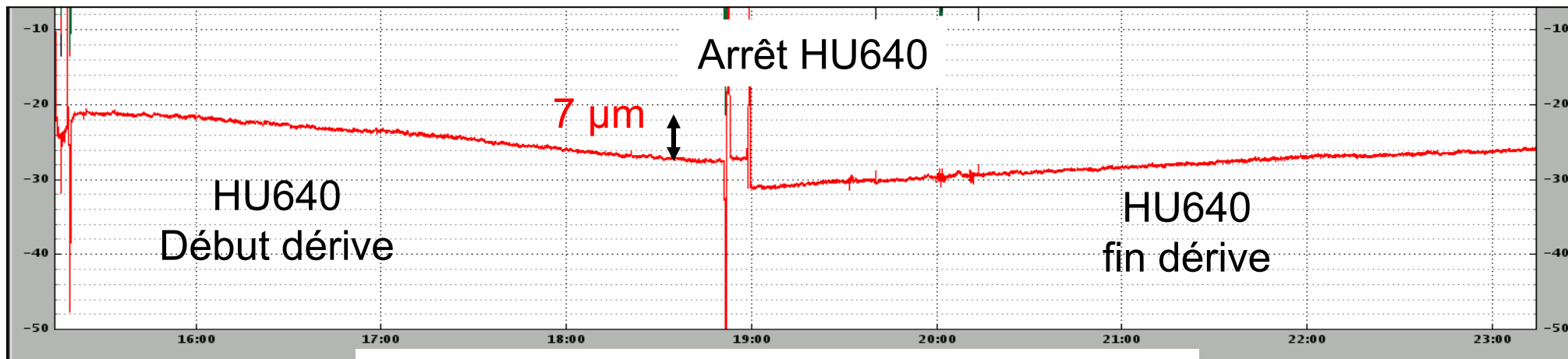
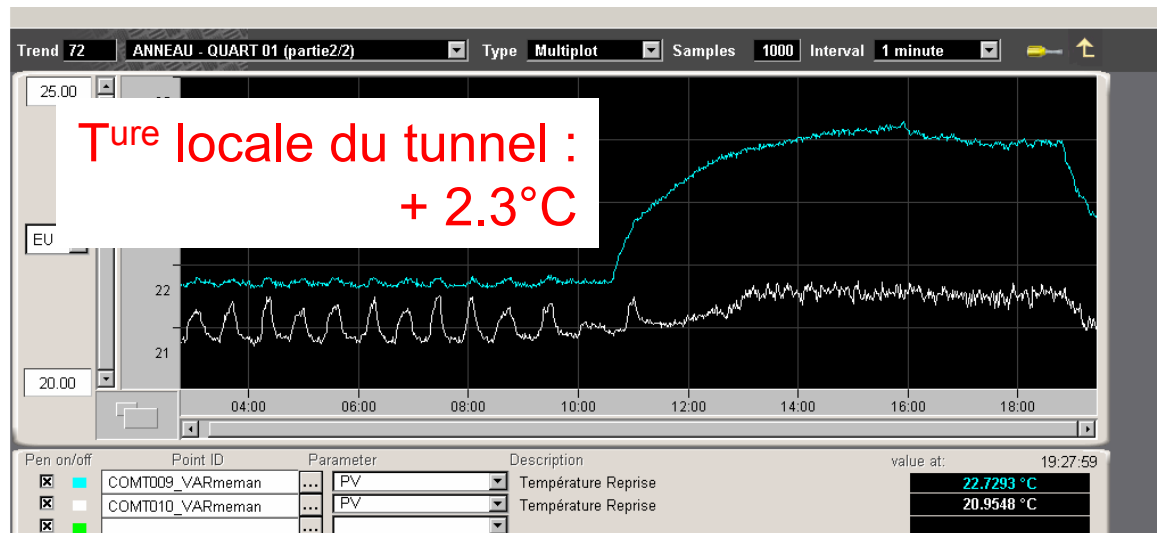
1.20 m (axe faisceau)



1,48 m (axe UTA)

Exemple d'effet persistant :

Dérive locale lente au démarrage de l'onduleur HU640 (Puissance 180 kW max)



Orbite verticale sur 8h dans la section droite

Un des challenges des sources de 3ème génération est de fonctionner en mode « **top up** » (injection continue, par exemple toutes les 2 mns).

→ courant électrons quasi constant (à 10^{-2} ou 10^{-3} près, en fonction du besoin exprimé par les utilisateurs et de la durée de vie)

→ charge thermique sur les optiques des lignes quasi constante

→ **stabilité du faisceau de photons**

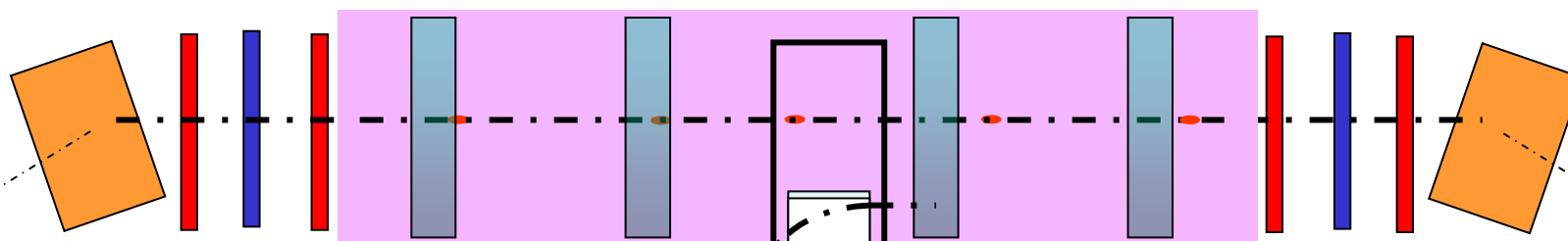
et durée de vie maintenue artificiellement « infinie »

Conséquence : l'injection dans l'anneau du faisceau issu du Booster ne doit pas perturber la prise de données expérimentales

→ **Préserver les conditions de stabilité transverses du faisceau d'électrons pendant l'injection**

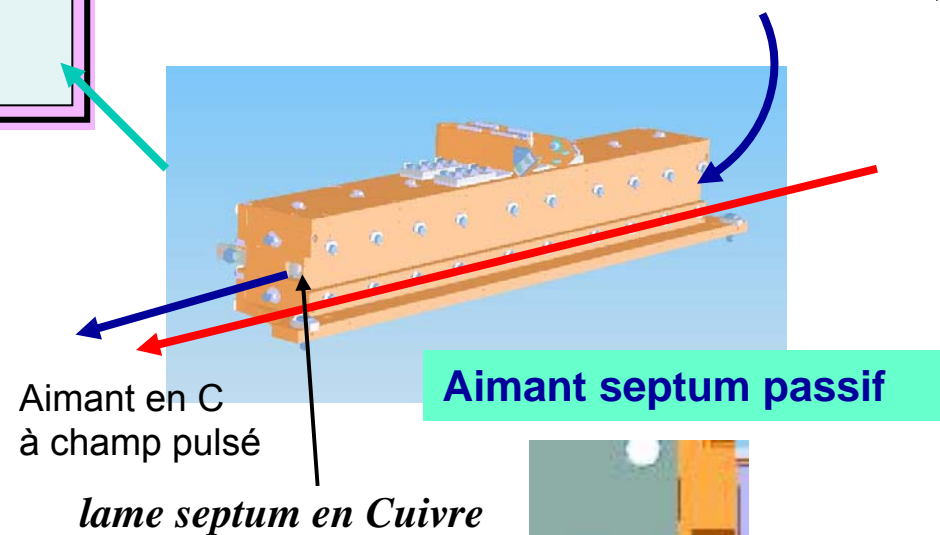
Section d'injection dans l'anneau

Chambre à vide anneau



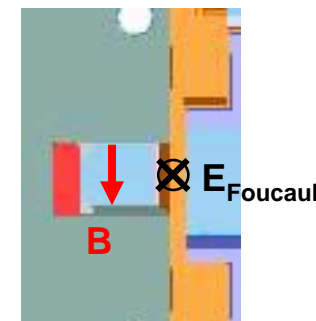
Problématique :
2 derniers aimants de déviation (**110 mrad et 25 mrad**) proches de la chambre à vide de l'anneau → **leur champ de fuite agit comme un kick dipolaire sur le faisceau stocké**

Fin ligne de transfert



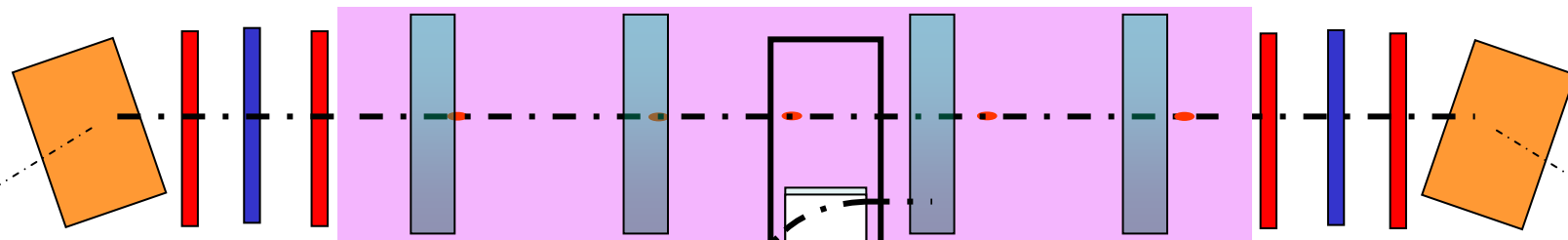
CONTRAINTE : $\int B_{leakage} dl < 12 \mu Tm$

Solution standard : utiliser les courants de Foucault pour minimiser les champs de fuite : « **EDDY CURRENT SEPTUM** ».



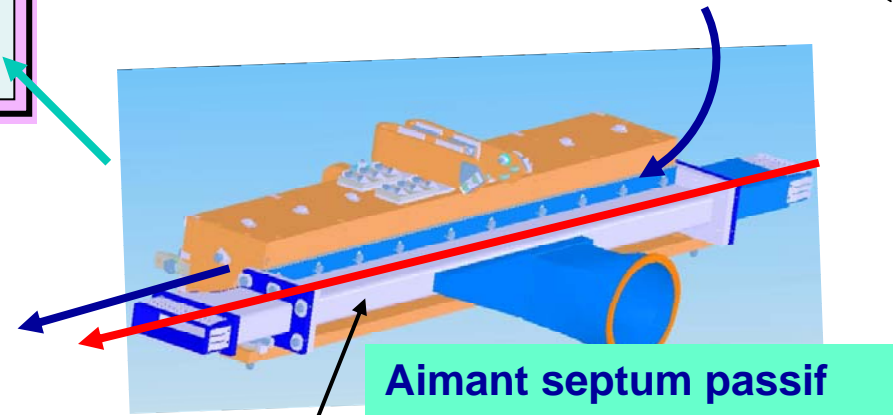
Section d'injection dans l'anneau

Chambre à vide anneau



Problématique :
2 derniers aimants de déviation (**110 mrad et 25 mrad**) proches de la chambre à vide de l'anneau → **leur champ de fuite agit comme un kick dipolaire sur le faisceau stocké**

Fin ligne de transfert



Aimant septum passif

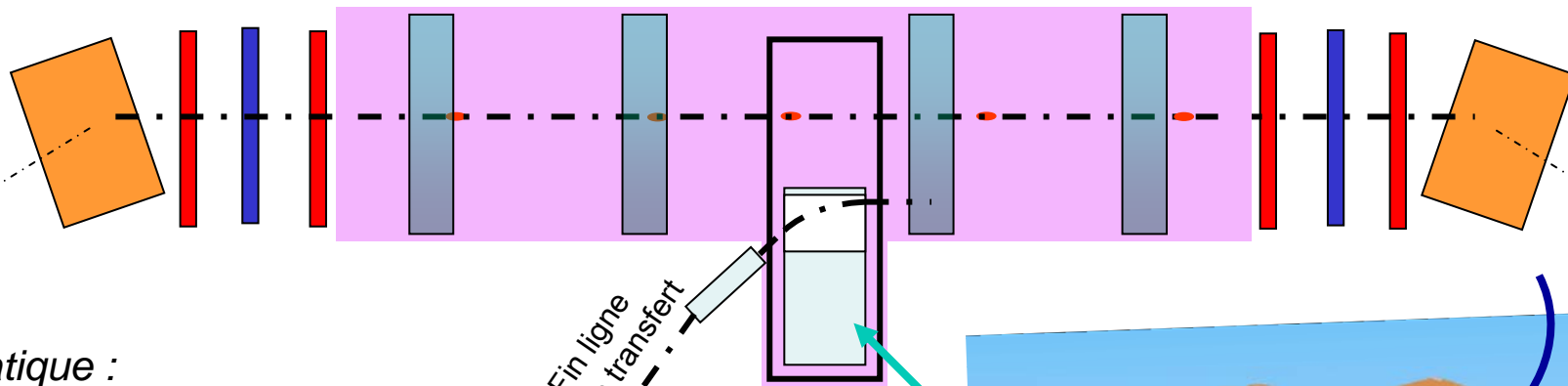
Chambre « leurre » du faisceau stocké
(préserve l'impédance de la chambre à vide)

CONTRAINTES : $\int B_{leakage} dl < 12 \mu Tm$

Solution standard : utiliser les courants de Foucault pour minimiser les champs de fuite : « EDDY CURRENT SEPTUM ».

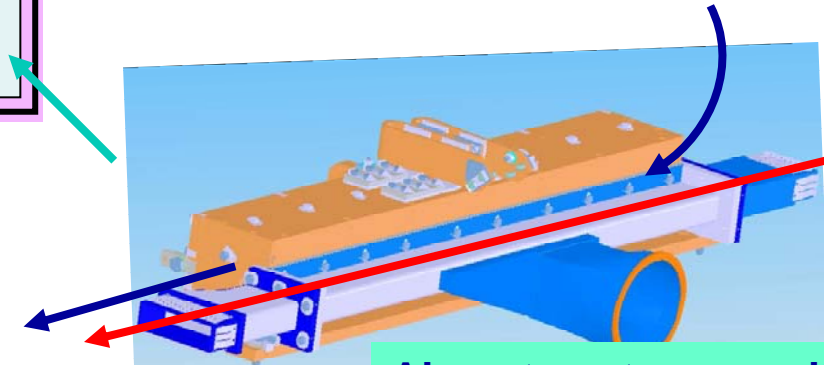
Section d'injection dans l'anneau

Chambre à vide anneau

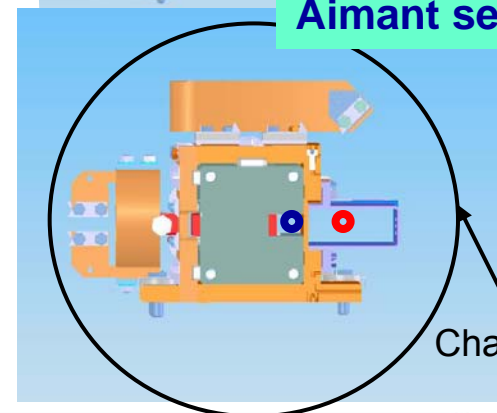


Problématique :
2 derniers aimants de déviation (**110 mrad et 25 mrad**) proches de la chambre à vide de l'anneau → **leur champ de fuite agit comme un kick dipolaire sur le faisceau stocké**

Fin ligne de transfert



Aimant septum passif

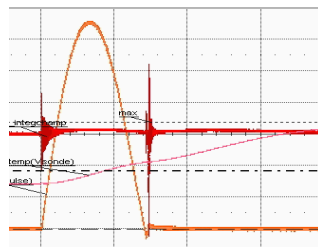
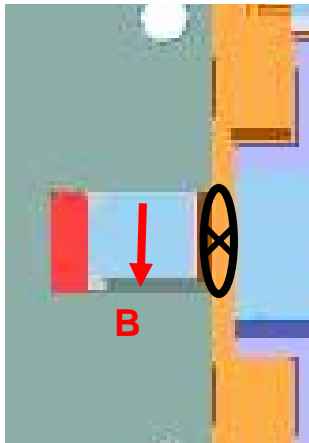


Chambre à vide anneau

CONTRAINTE : $\int B_{leakage} dl < 12 \mu Tm$

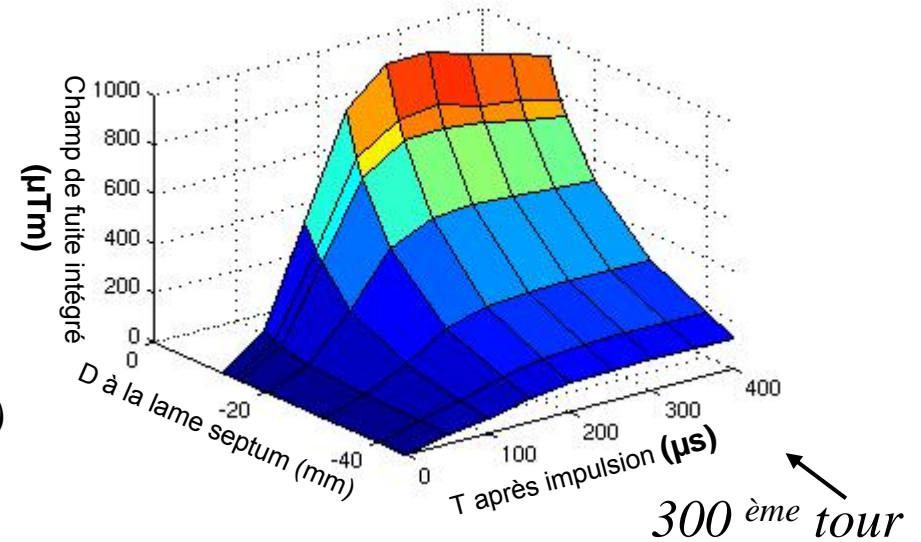
Solution standard : utiliser les courants de Foucault pour minimiser les champs de fuite : « EDDY CURRENT SEPTUM ».

1ère phase
Impulsion septum passif en demi-sinus (standard)

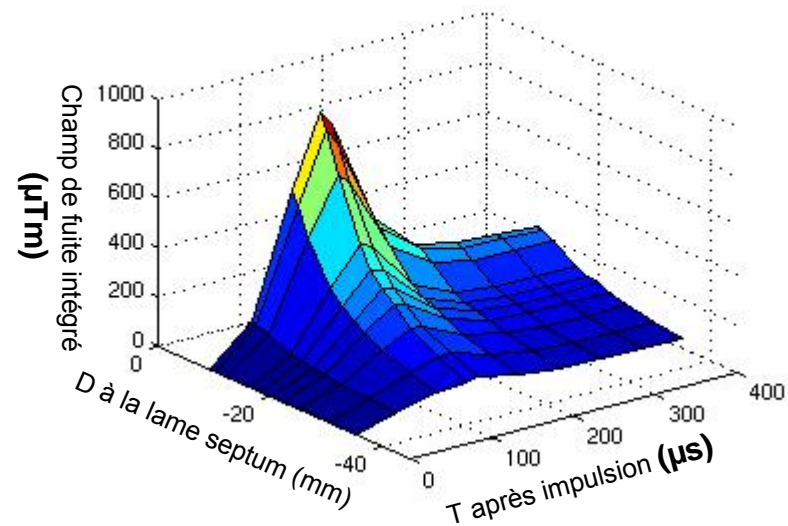
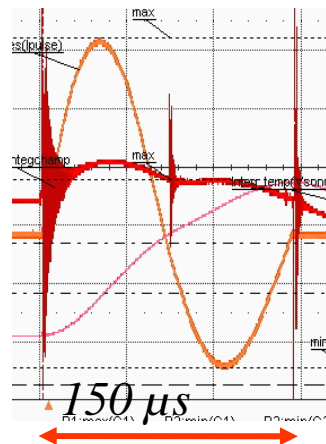
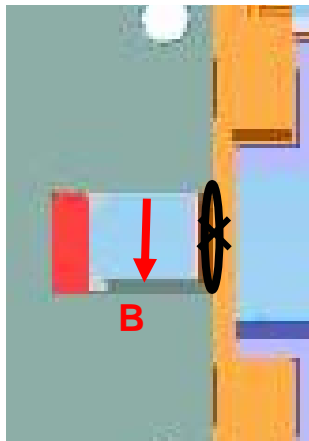


60 μ s (51 tours d'anneau)

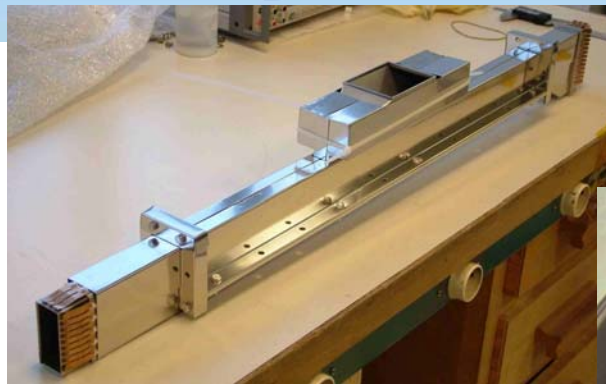
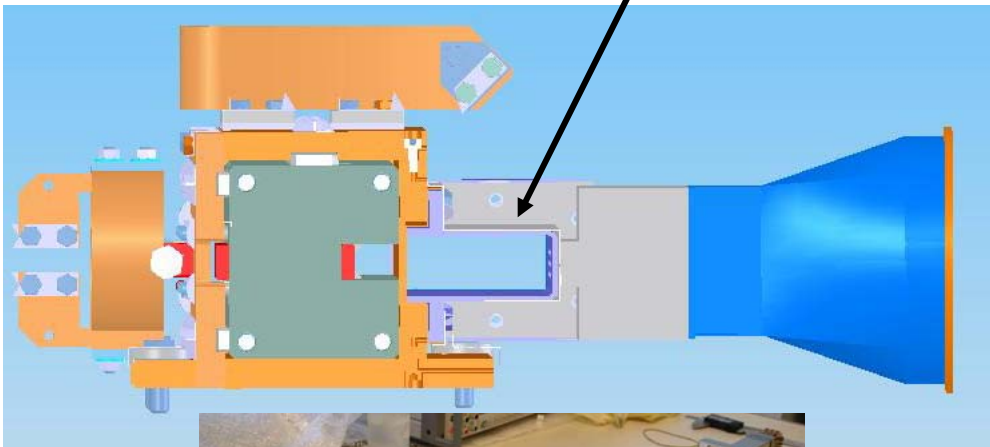
Mesure du champ de fuite du septum passif
bobine longue (970 cm/ 6 tours fil de Litz).



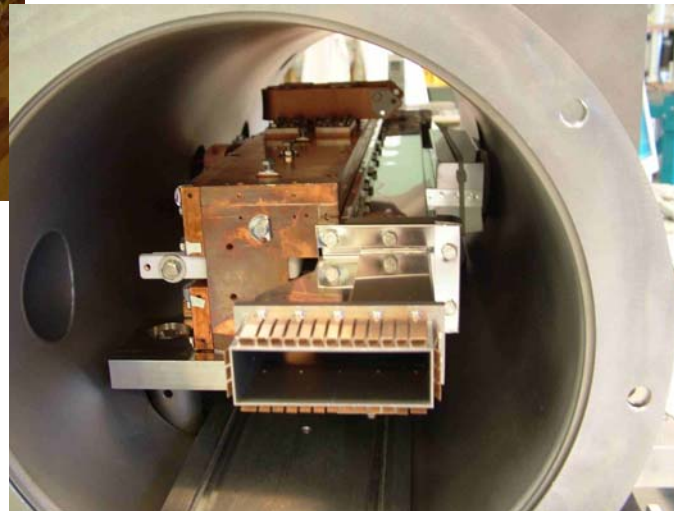
2ème phase
Impulsion septum passif en sinus complet



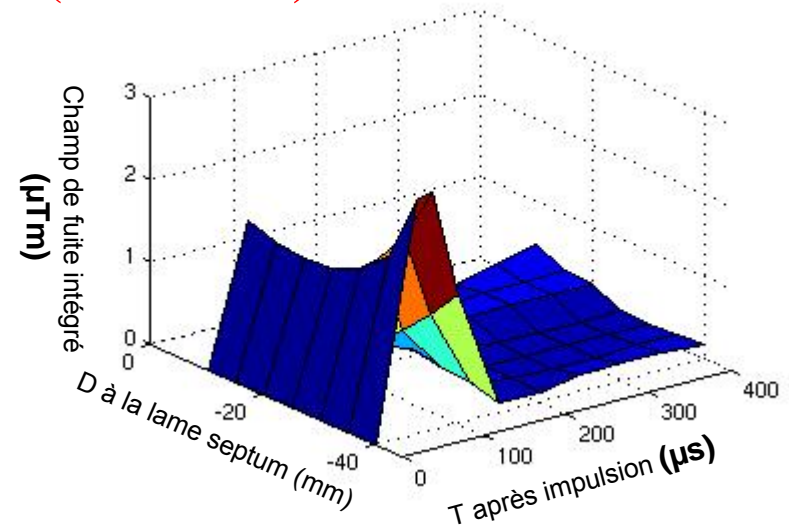
3ème phase
Blindage autour de la chambre leurre de l'anneau

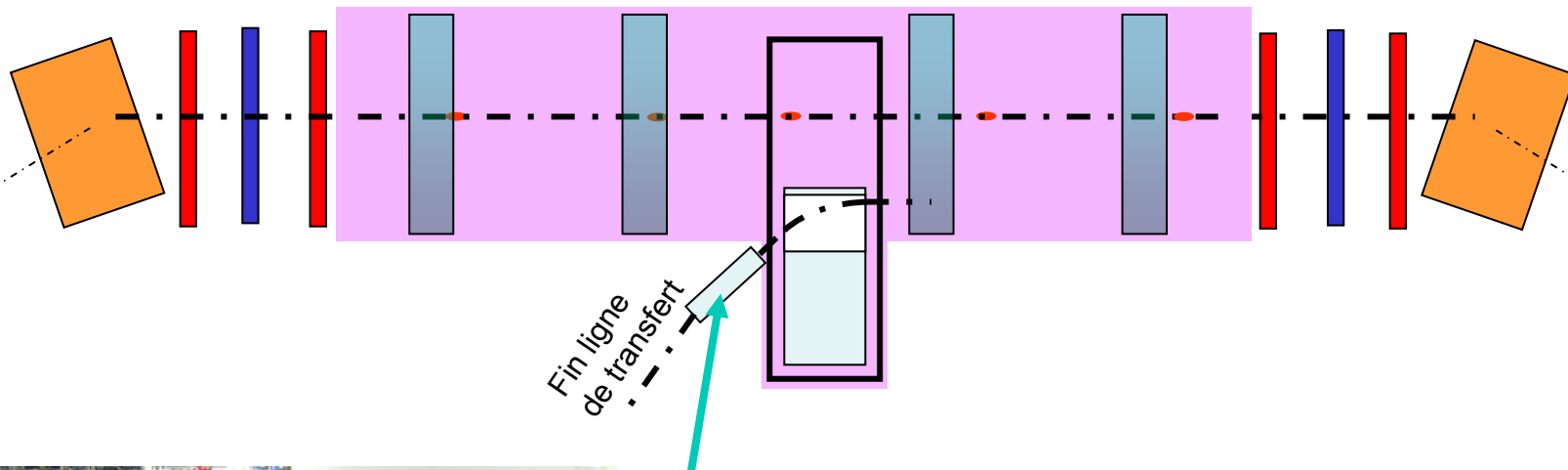


0.5 mm SuperImphy ('Mumétal' de très haute perméabilité magnétique) avec traitement thermique après formage (1100 °C)

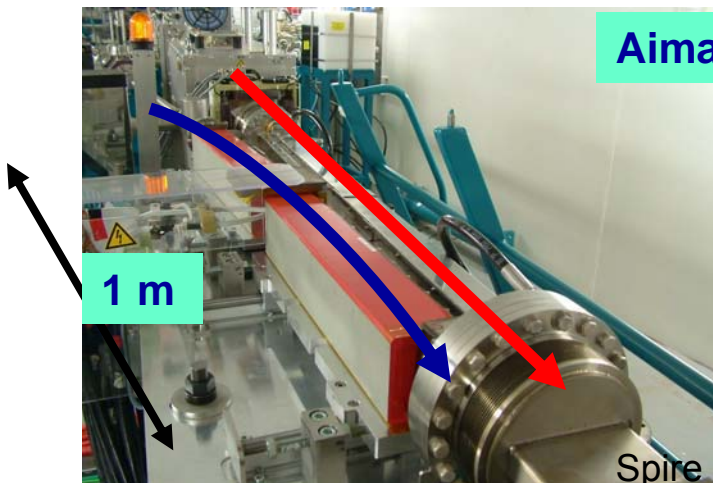


$\int B_{leakage} dl < 4 \mu T.m$
soit 10^{-5} du champ intégral principal
(255 mT.m)





Aimant septum actif



Spire 2trs de courant
à champ pulsé
(3.5 ms demi-sinus)

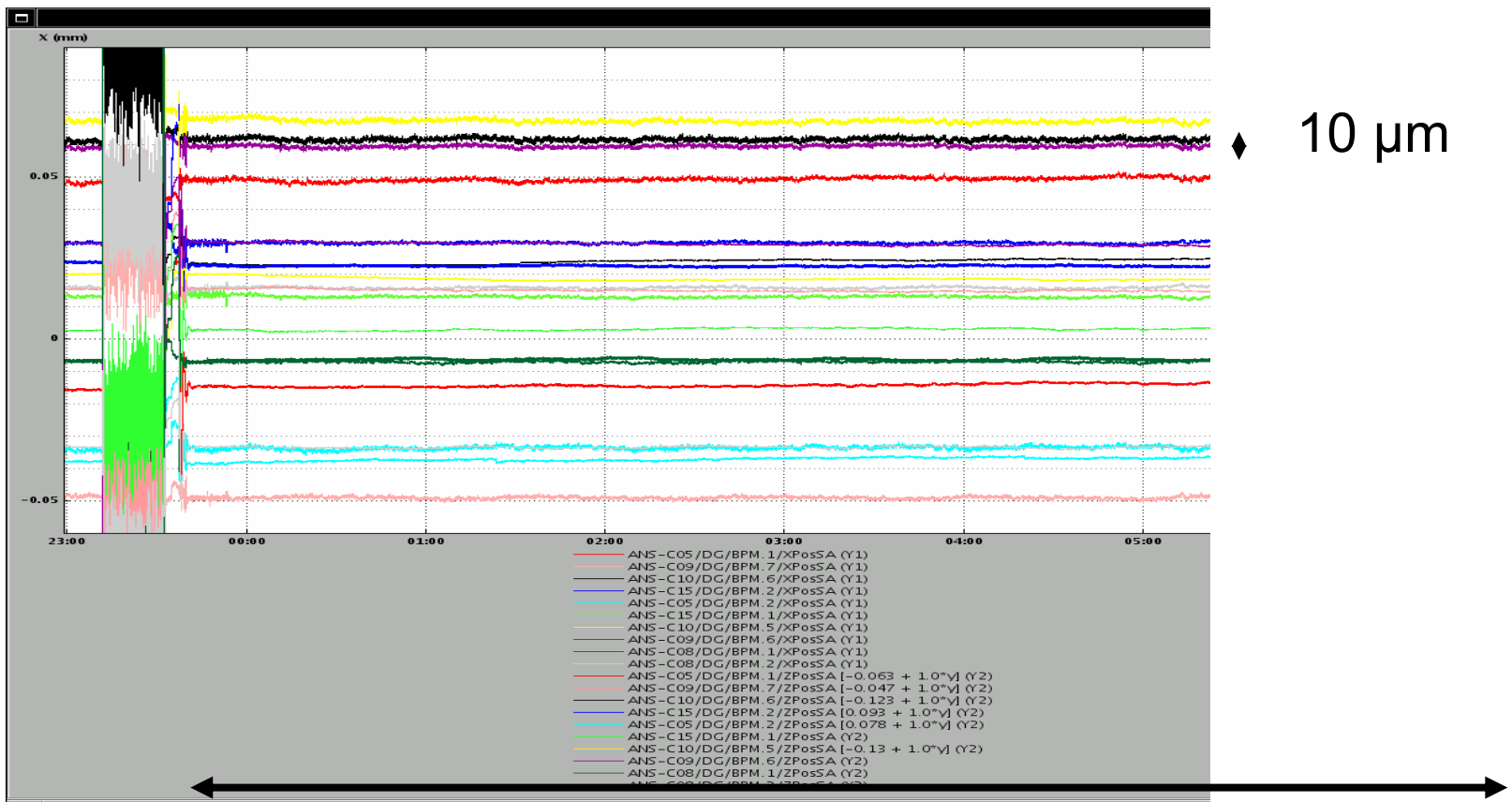
Solution :

blindage de 1.5 mm en Mumétal autour de la chambre Anneau.

→ $\int B_{leakage} dl = 120 \mu Tm$ crête
pour un champ principal de $2 \times 575 mTm$

à suivre..

Stabilité des orbites H et V aux points source, **sans insertion**



Shift 8 heures sans réinjection ($I = 200 \text{ mA} \downarrow 130 \text{ mA}$)

Fonctionnement standard
avec Feedback d'orbite lent

Champs magnétiques parasites : Variation des champs dans les onduleurs

HU640 (1 seul !)

Longueur : **10 m**

Période 640 mm

Champ $B_{x\max} = 0.09 \text{ T}$

Champ $B_{z\max} = 0.11 \text{ T}$

Polarisation Linéaire et circ.

Energie photons :

5 – 40 eV



Champs magnétiques parasites : Variation des champs dans les onduleurs

HU80 (3)

Période 80 mm

Champ $B_{x\max} = 0.76 \text{ T}$

Champ $B_{z\max} = 0.85 \text{ T}$

Polarisation Linéaire et circ.

Energie photons :

80 – 1500 eV



U20 (3)

Période 20 mm

Champ $B_{z\max} = 0.97 \text{ T}$

Polarisation Linéaire et circ.

Energie photons :

3000 – 18000 eV

Gap mini = 5.5 mm



HU256 (3)

Période 256 mm

Champ $B_{x\max} = 0.275 \text{ T}$

Champ $B_{z\max} = 0.4 \text{ T}$

Polarisation Linéaire et circ.

Energie photons :

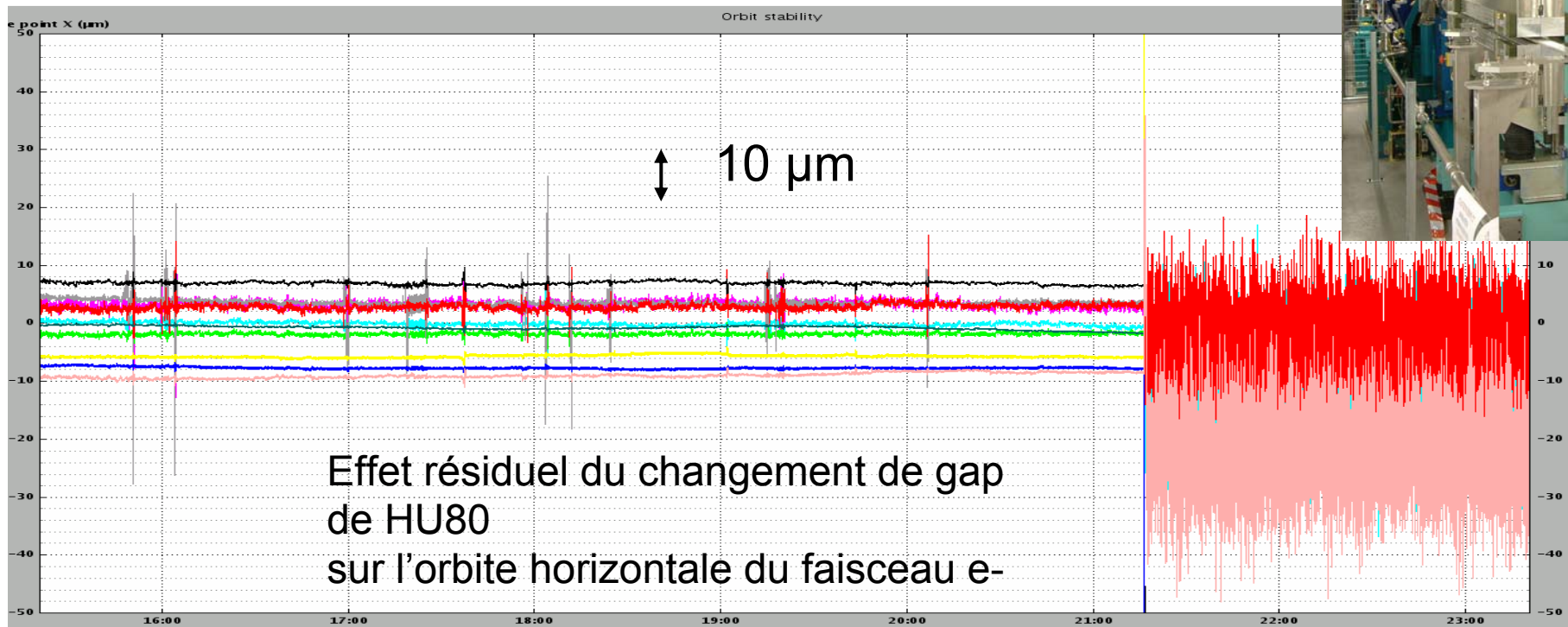
10 – 1000 eV



Problématique :

L'intégrale de champ sur l'axe générée par les onduleurs n'est pas strictement nulle. Des correcteurs associés corrigent cet effet par anticipation → établissement de « **table de feeforward** » pendant des shift dédiés (qqes 100 h).

Lors des changements de champ, les transitions de correction restent délicates (vitesse relatives des alimentations,..)

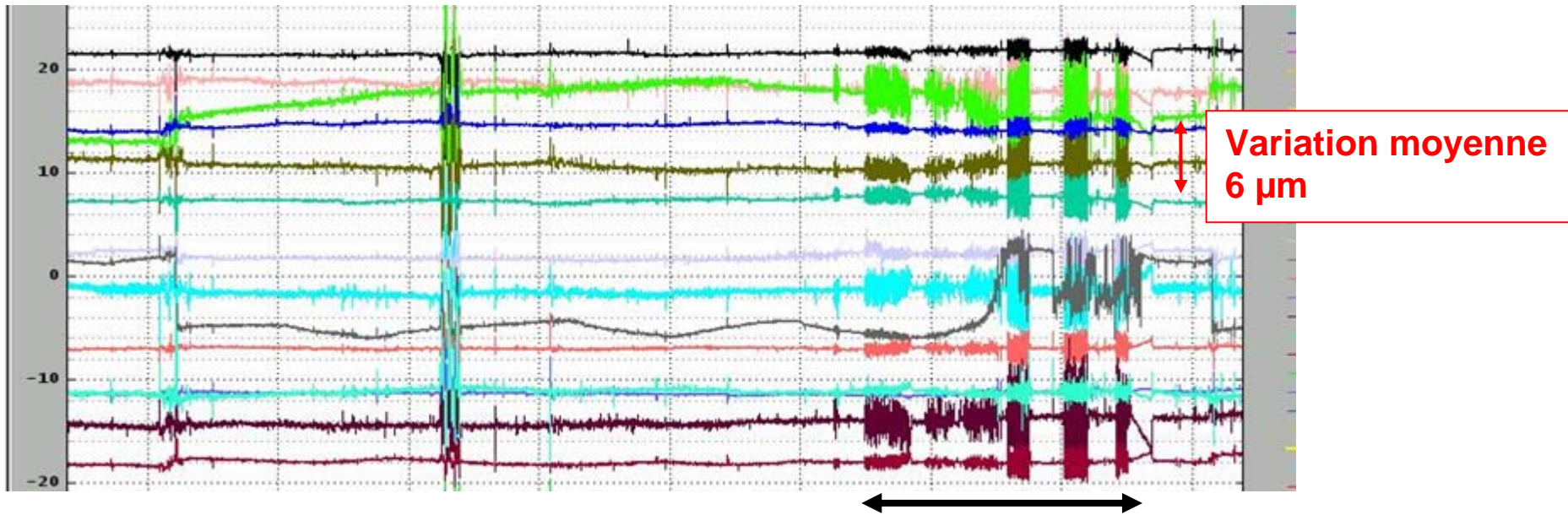


Problématique :

Durant le commissioning d'une ligne de lumière, usage d'un aimant dipolaire à fort champ (**2 T**, futur 7 T) pour tester les mesures de dichroïsme circulaire.

Source à l'extérieur du tunnel de l'anneau (hall expérimental)

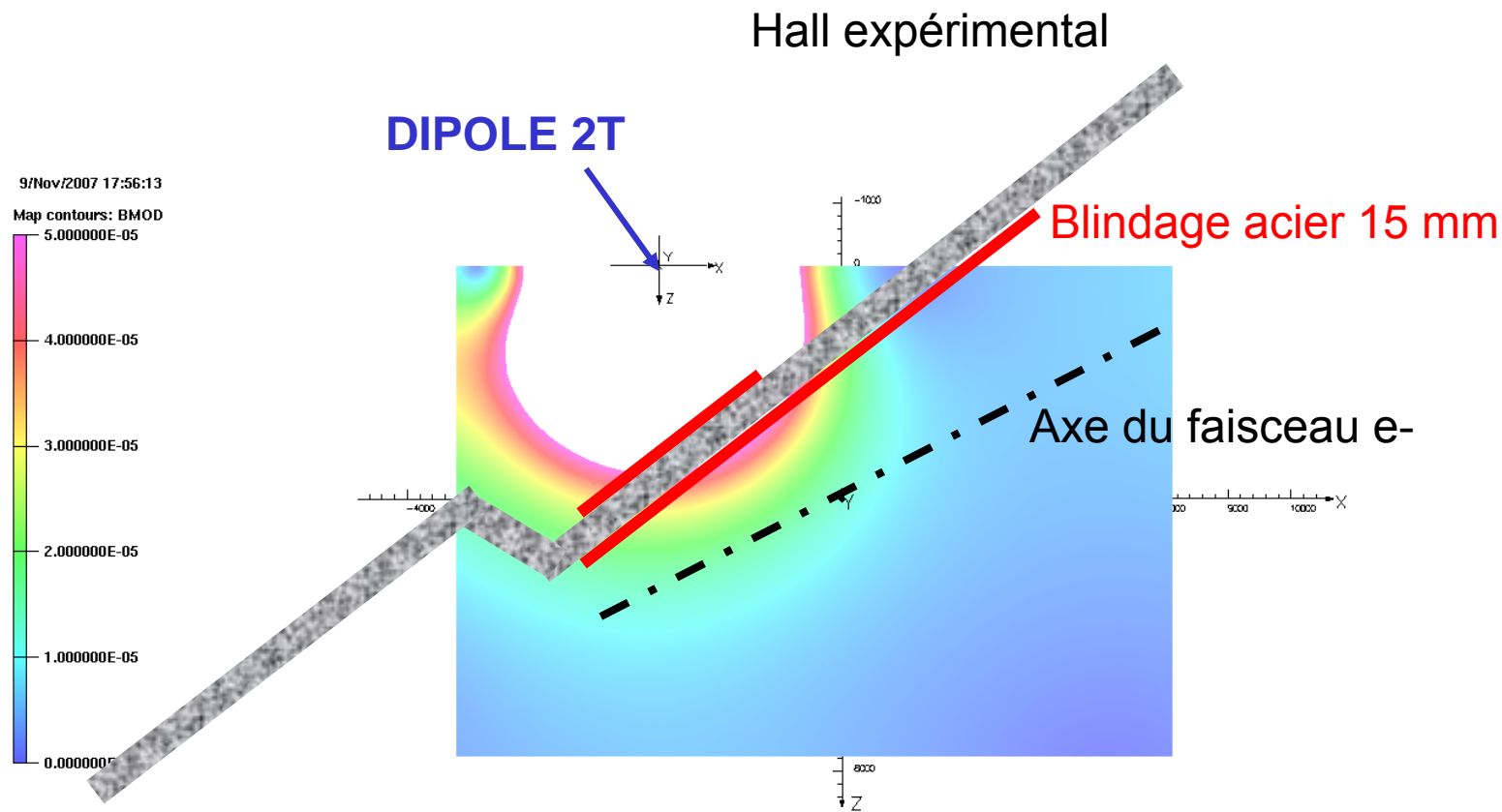
Effet sur les orbites H et V aux points sources des autres utilisateurs.. :



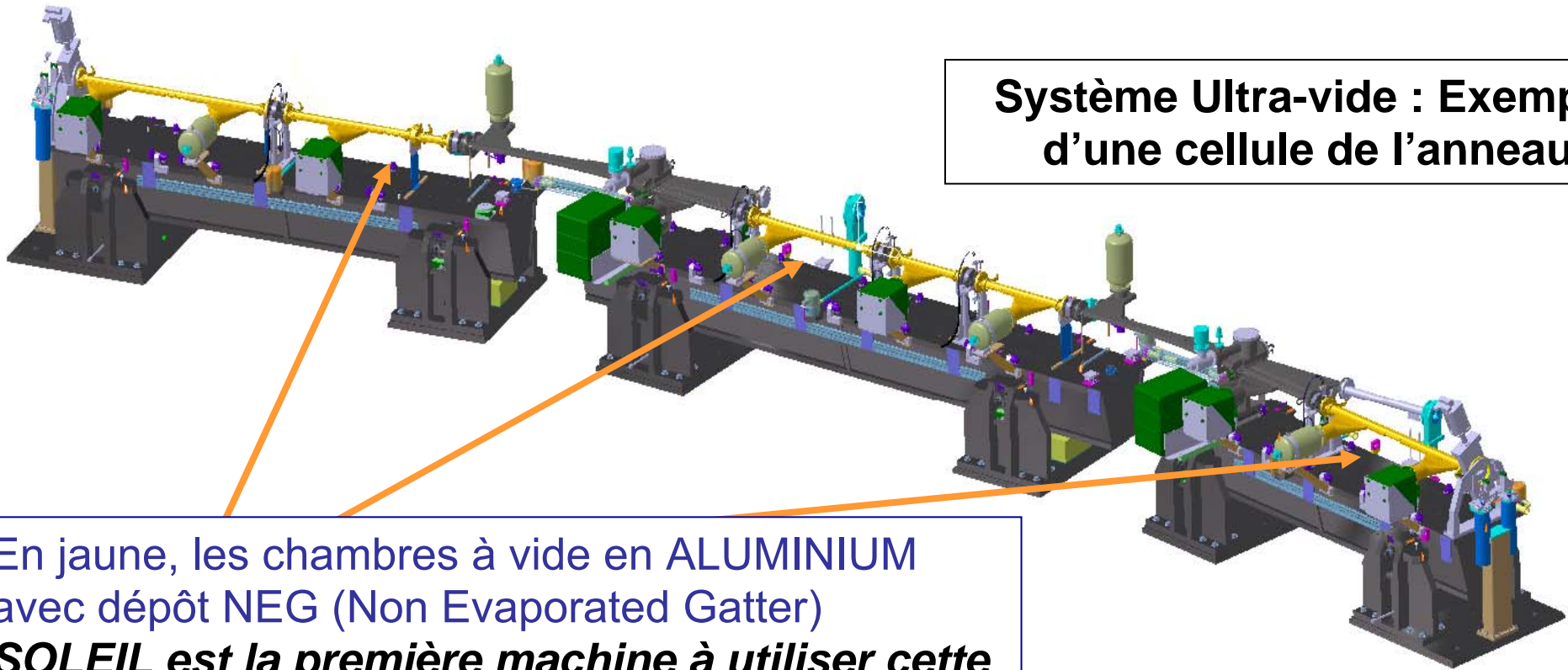
2 h de variation rapide $\pm 2\text{T}$
dans le dipôle de la ligne

CONTRAINTE : $\int B_{leakage} dl < 10 \mu Tm$ intégrée sur toute la zone d'incidence

Solution : blindage, simulation complexe de l'environnement par le code *Opera3d/TOSCA (Vector Fields)*. A suivre...



- Le courant image circule dans les parois de la chambre à vide.
- Le courant image génère des champs électromagnétiques qui peuvent affecter la stabilité du faisceau d'électrons.
 - Étude de l'incidence du dépôt NEG qui se trouve sur à l'intérieur des chambres de l'anneau (à l'exception des dipôles) avec le code *GdFidl*



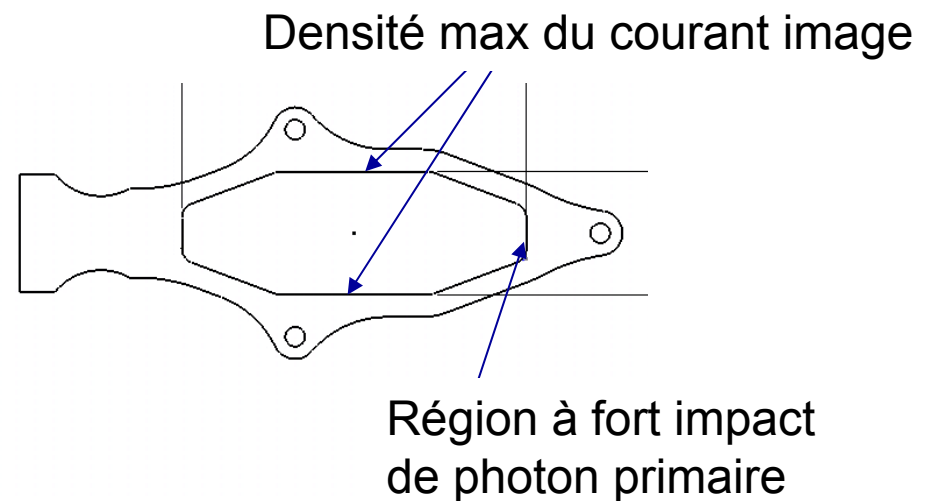
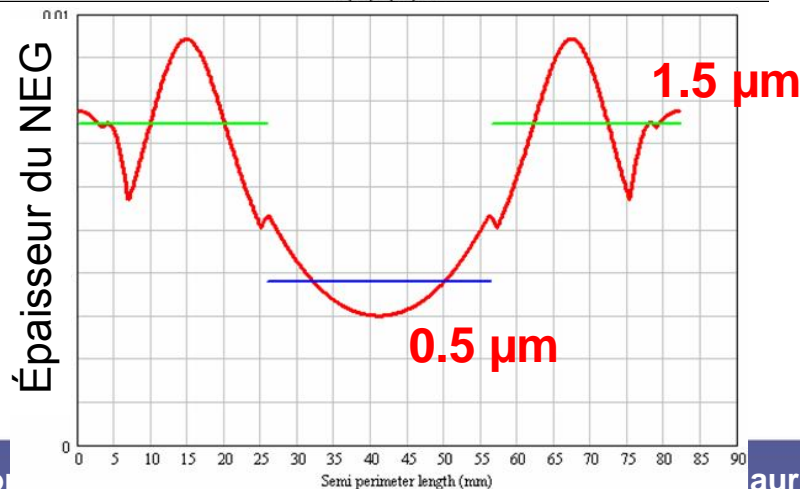
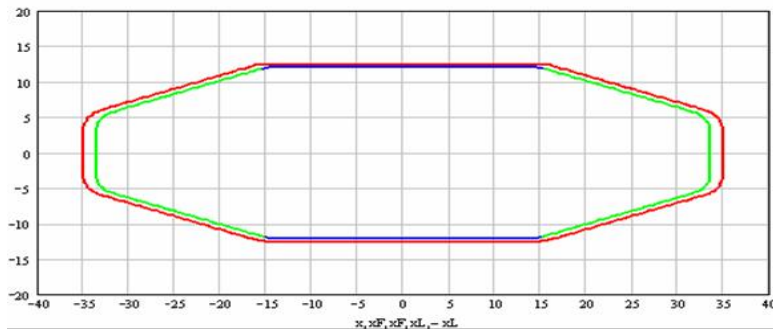
**Systeme Ultra-vide : Exemple
d'une cellule de l'anneau**

En jaune, les chambres à vide en ALUMINIUM
avec dépôt NEG (Non Evaporated Gatter)
**SOLEIL est la première machine à utiliser cette
technique sur 56% de l'anneau**

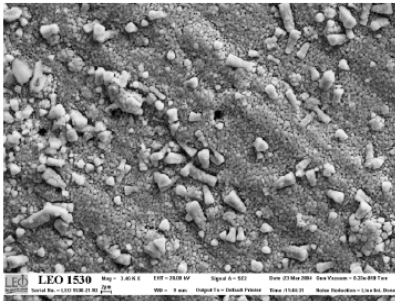
*Le NEG est un alliage ternaire (TITANE / ZYRCONIUM / VANADIUM)
déposé par pulvérisation sur la chambre Aluminium. Il constitue
une surface métallique favorisant les liaisons de valence avec
les molécules résiduelles.*

- Les paramètres critiques du NEG sur l'impédance de la chambre sont :
L'épaisseur du dépôt à proximité du faisceau / **sa rugosité** (idem)
- Cependant l'épaisseur doit rester suffisamment grande pour préserver l'efficacité à long terme contre la désorption stimulée par les photons.

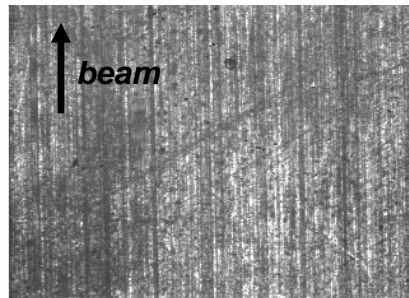
Solution : une distribution non uniforme de l'épaisseur du dépôt.



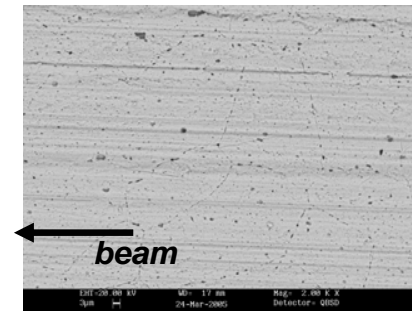
- Grâce à la faible épaisseur, la rugosité suit de la rugosité initiale du substrat : $R_a = 0.3 \mu\text{m RMS}$
- Elle suit la direction de l'extrusion de la chambre Alu $\rightarrow //$ au faisceau donc favorable



Measured at the ESRF
(bumps $\sim 90\mu\text{m}$)
Courtesy T. Perron



SOLEIL extruded Al chamber
(rms $\sim 0.3 \mu\text{m}$)
Courtesy SOLEIL's Metrology Lab.



NEG coated SOLEIL extruded
Al chamber
Courtesy SAES Getters

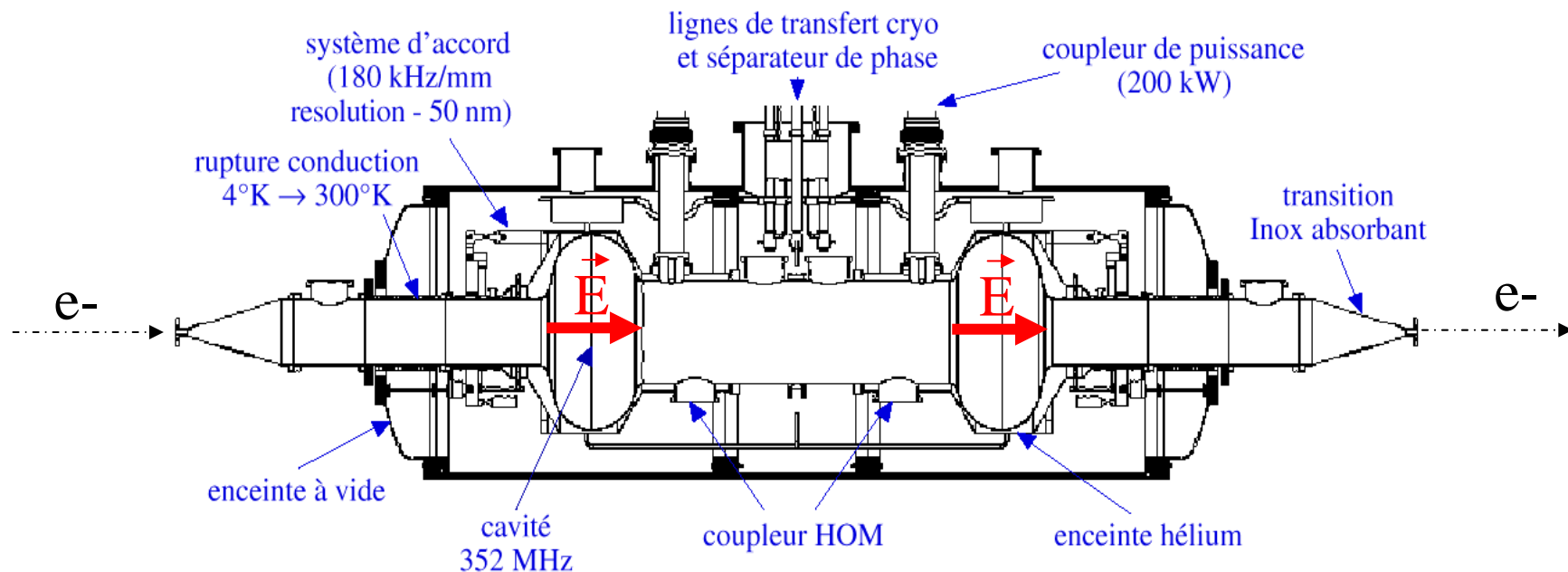
R. Nagaoka et al. Beam instability observations and analysis at SOLEIL 22nd PAC conference, Albuquerque, June 2007

Les cavités HF restituent au faisceau l'énergie perdue par rayonnement, par l'intermédiaire d'un champ électrique parallèle à la direction des électrons

Ces cavités génèrent des mode d'ordre supérieurs (HOM) susceptibles d'affecter la stabilité du faisceau d'e-.

Les cavités SUPRA de SOLEIL sont une solution à ce problème.

→ Design du **cryomodule avec 2 cavités SC** permettant l'opération à 500 mA sans mode d'ordre supérieur (Collab CEA/CERN/SOLEIL/ESRF)



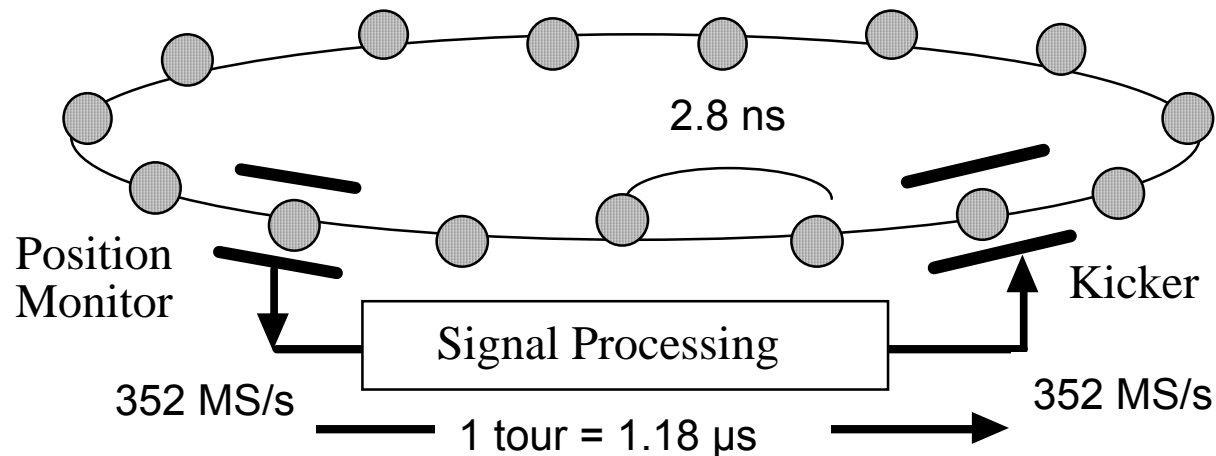
Correction de l'orbite H et V :

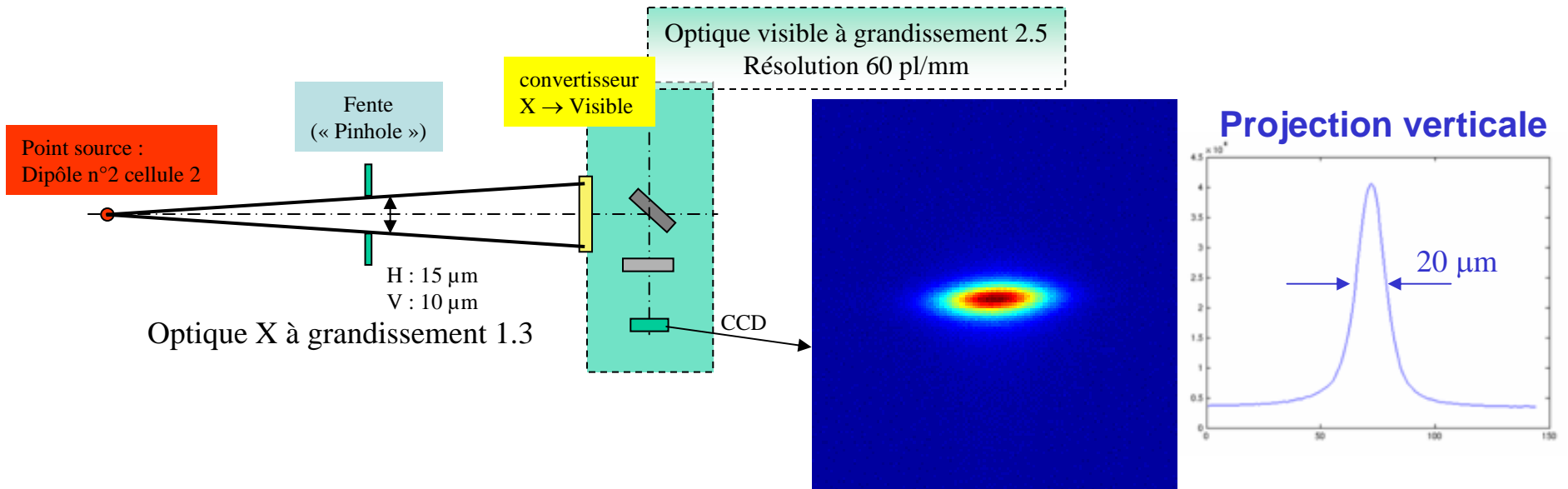
- Lente : fréquence d'échantillonnage = 10 S/s
fréquence d'application = 0,1 Hz
BP : 0 - 0,1 Hz
 - moyennage des orbites sur 5s (50 samples)
 - application de la correction dipolaire H et V (5s de temps de montée des 2x56 alimentations).
- Rapide : fréquence d'échantillonnage et d'application = 10 kHz
BP : 1 ~100 Hz
 - data sur réseau indépendant
 - algorithme hébergé dans les FPGA des LIBERA
 - 48 correcteurs (bobines rapides sans fer)
- Interaction entre les 2 feedbacks d'orbite :
2 phases :
 - phase de test : *zone fréquentielle morte / pas de communication entre les 2 corrections*
 - Puis : *recouvrement fréquentiel / communication de l'orbite de référence*

Correction des instabilités transverses H et V : *paquet par paquet*

- Les data analogiques du BPM sont traitées par un processeur type SPRING8.

Fréquence d'échantillonnage = $88 \text{ MS/s} \times 4 = 352 \text{ MS/s}$



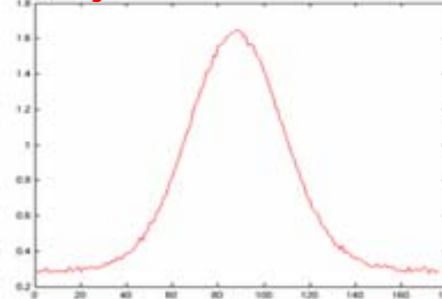


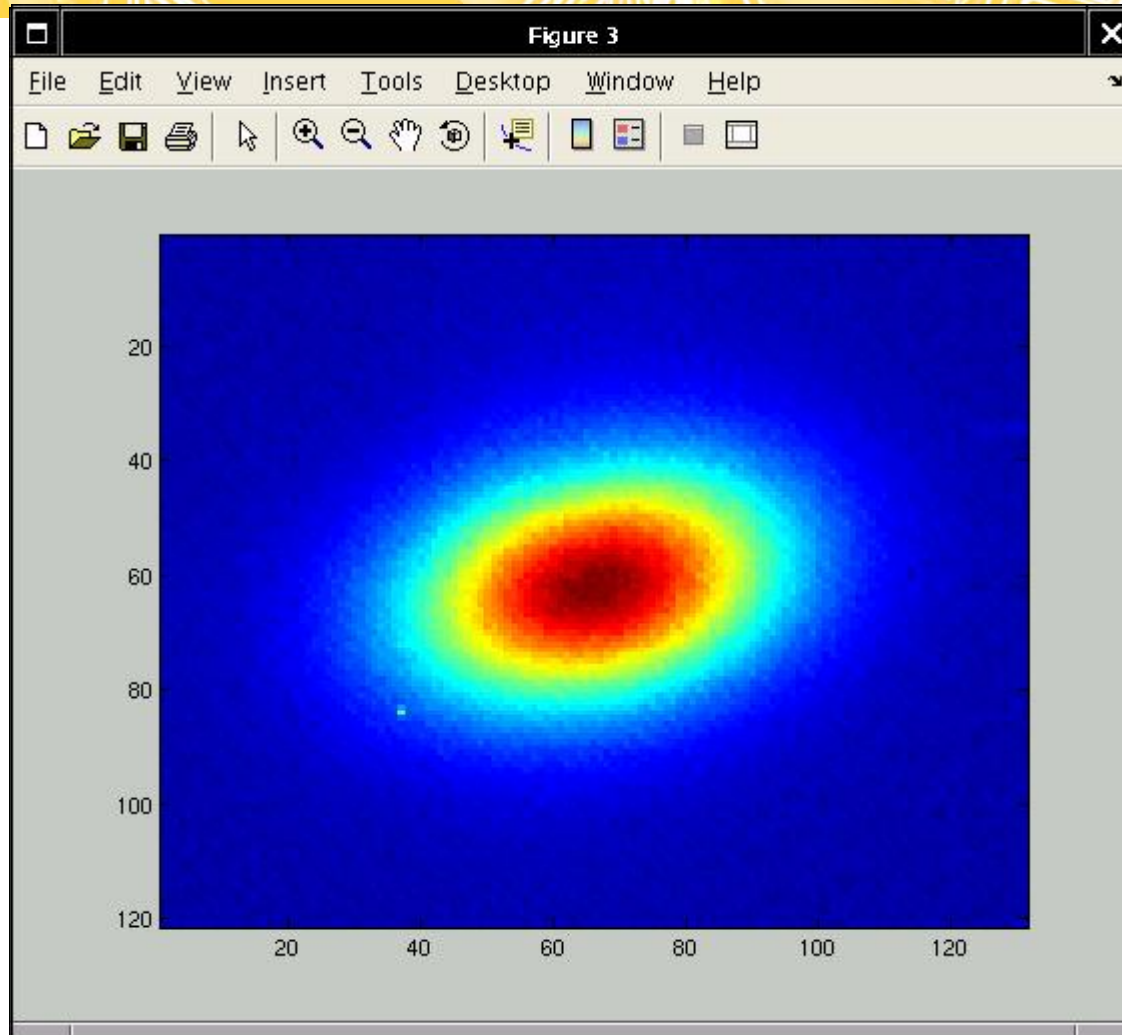
Des diagnostics utilisent le rayonnement synchrotron (Pinhole, XBPM, MRSV).

Outre la mesure d'émittance, la pinhole permet d'évaluer l'efficacité des corrections précédemment citées.

Résolution de mesure des fluctuations en position et en taille : **0.2 μm**

Projection horizontale





Effet sur la pinhole d'un
quadrupôle tourné

Un grand merci à ceux qui ont contribué à ce séminaire :

Infra-structure (Ph. Eymard, S. Mzah)

Physique machine (A. Nadji, P. Brunelle, L. Nadolski, R. Nagaoka),

Vide (Ch. Herbeaux),

Alimentations (P. Lebasque),

Magnétisme (F. Marteau, O. Marcouiller),

Diagnostics (JC. Denard, N. Hubert)