

## ESRF: Aspects du fonctionnement au jour le jour de la machine

# PLAN DE L'EXPOSÉ



## Partie1

- INTRODUCTION
- Une BRÈVE histoire des accélérateurs jusqu'à l'ESRF
- L'ESRF AUJOURD'HUI
- LES ACCÉLERATEURS DE L'ESRF

## Partie2

- FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE
- FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE QUOTIDIENNE
- CONCLUSIONS et REMERCIEMENTS

# 1. INTRODUCTION ET CONTEXTE

- INTRODUCTION et CONTEXTE
- Une BRÈVE histoire des accélérateurs jusqu'à l'ESRF
- L'ESRF AUJOURD'HUI
- LES ACCÉLÉRATEURS DE L'ESRF
- FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE
- FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE QUOTIDIENNE
- CONCLUSIONS et REMERCIEMENTS

# 1. INTRODUCTION ET CONTEXTE

## → 2 grandes familles d'accélérateurs

**Accélérateurs  
linéaires**



**Accélérateurs  
circulaires**

## → 3 grandes familles d'application

**Sources de  
lumière**

**Physique  
des hautes  
énergies**

**Applications  
industrielles  
et médicales**

## → 1 cycle de vie (de 35 a 55 ans!!)

**Elaboration et lancement du projet**

**( 5 à 10 ans)**

**Construction du grand instrument**

**( 3 à 5 ans)**

**Mise à en service (commissioning)**

**( 1 à 2 ans)**

**Fonctionnement (opération)**

**(15 à 20 ans)**

**Mise jour majeur (upgrade)**

**(1 à 3 ans)**

**Fonctionnement (opération)**

**(10 à 15 ans)**

## 1. INTRODUCTION ET CONTEXTE

**Un instrument bien conçu, bien construit et opérationnel est souvent le fruit d'une même équipe.**

**Mais, les concepteurs, les constructeurs et les opérationnels sont souvent des équipes différentes.**

**De façon générale durant le cycle de vie du projet les intervenants vont évoluer et changer.**

## 1. INTRODUCTION ET CONTEXTE

**En général la machine est construite par des physiciens,  
des ingénieurs et des techniciens des accélérateurs.**

**Elle sera au service d'utilisateurs**

**de la communauté scientifique, industrielle ou médicale**

**En garantissant performances et l'innovation.**

## 1. INTRODUCTION ET CONTEXTE

L'opération d'un grand instrument c'est assurer  
à la fois:

Fiabilité

Qualité et performances

Maintenance

Développement(s)

# 1. INTRODUCTION ET CONTEXTE

*L'opération est définie par des contraintes extérieures*

L'Opération est définie par des contraintes :

Pour quelles sciences ?  
Quelles sont les contraintes sur le faisceau pour réaliser cette science ?

De quels outils dispose t-on ?



Quelle est la stratégie de fond qui aura de l'influence au quotidien ?

Quels sont nos engagements ?  
Combien d'heures de faisceau faut-il délivrer ?

# 1. INTRODUCTION ET CONTEXTE

*L'opération est définie par des contraintes extérieures*

- Quels sont les objectifs de l'ESRF ?
- Quelles sont spécifications du faisceau à garantir?
- Qui sont les utilisateurs, leurs exigences ?
- Quel est la stratégie de fonctionnement et de service?
- De quels moyens dispose t-on ?
- Comment l'ESRF a-t-il évolué et comment va-t-il encore évoluer?

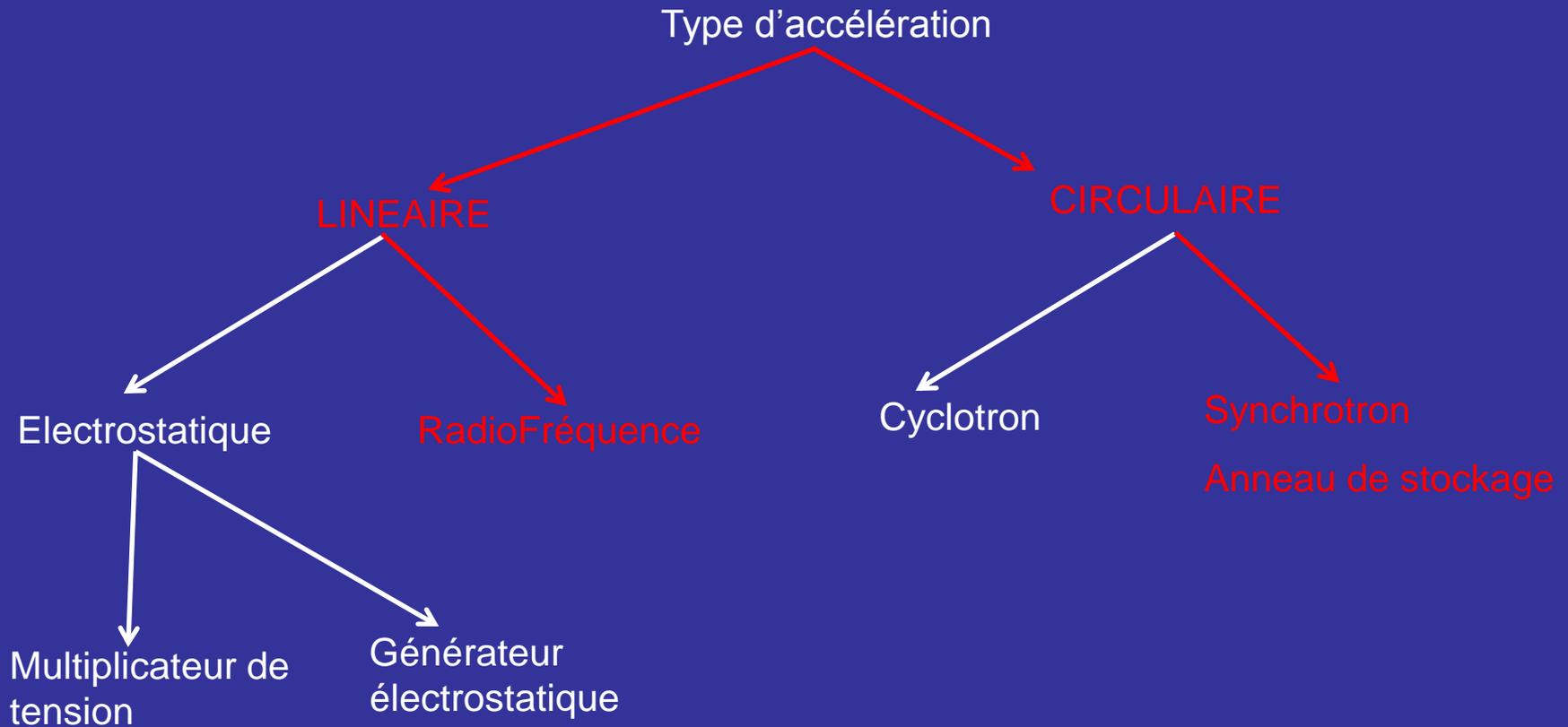
Une fois ces contraintes définies, l'Opération au quotidien à l'ESRF va 'couler de source' !

## 2. Une BRÈVE histoire des accélérateurs jusqu'à l'ESRF

- INTRODUCTION
- Une BRÈVE histoire des accélérateurs jusqu'à l'ESRF
- L'ESRF AUJOURD'HUI
- LES ACCÉLÉRATEURS DE L'ESRF
- FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE
- FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE QUOTIDIENNE
- CONCLUSIONS et REMERCIEMENTS

## 2. Une TRÈS BRÈVE histoire des accélérateurs jusqu'à l'ESRF

### *Les grandes familles d'accélérateurs*

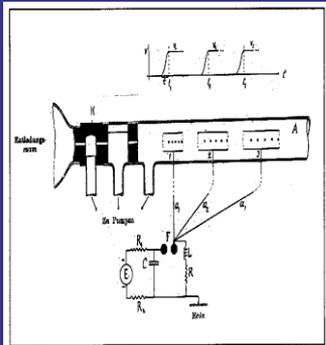


## 2. Une TRÈS BRÈVE histoire des accélérateurs jusqu'à l'ESRF

### Les accélérateurs linéaires à Radio Fréquence

#### L'accélérateur linéaire à radio-fréquence:

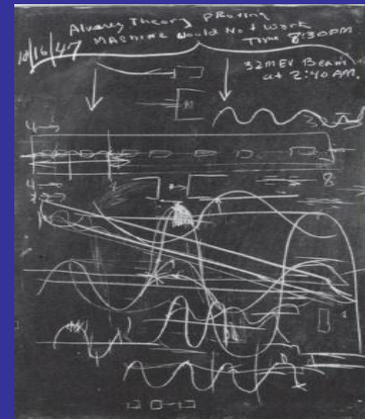
1924: Ising conçoit le premier 'Linac' sur papier



1928: Wideroe réalise le premier prototype



1947: Alvarez accélère le premier faisceau de proton dans un Linac



1947, Hansen met au point le premier accélérateur de l'Université de Stanford, le Mark I pour accélérer des **électrons** jusqu'à 6 MeV. Il construit ensuite un nouveau prototype, Mark II, avec lequel il atteint l'énergie de 49 MeV

1966 : 18 GeV électron atteint à SLAC (Stanford)



L'accélérateur linéaire de Stanford en quelques chiffres :

- Énergie record 53 GeV en 1987
- 3,2 km de long
- 960 sections accélératrices
- 245 klystrons d'une puissance comprise entre 6 et 64 MW chacun, installés dans le plus long bâtiment du monde
- Fréquence du champ électrique oscillant : 2856 MHz
- Lignes de faisceaux enterrées sous 8 mètres de terre.

## 2. Une TRÈS BRÈVE histoire des accélérateurs jusqu'à l'ESRF

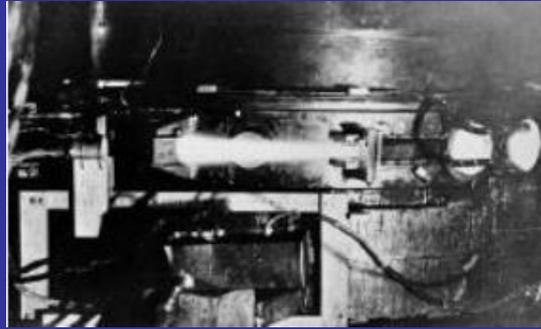
### *Les accélérateurs circulaires*

#### Les accélérateurs circulaires:

1930: le premier cyclotron



Mars 1936: 1er faisceau deuteron de 5.8 MeV



1940: 1er béatron



1952: le premier synchrotron (cosmotron)



1959: Inauguration du PS (CERN) :  
synchrotron à protons



1989: Inauguration du LEP (CERN) : collisionneur e-e<sup>+</sup>



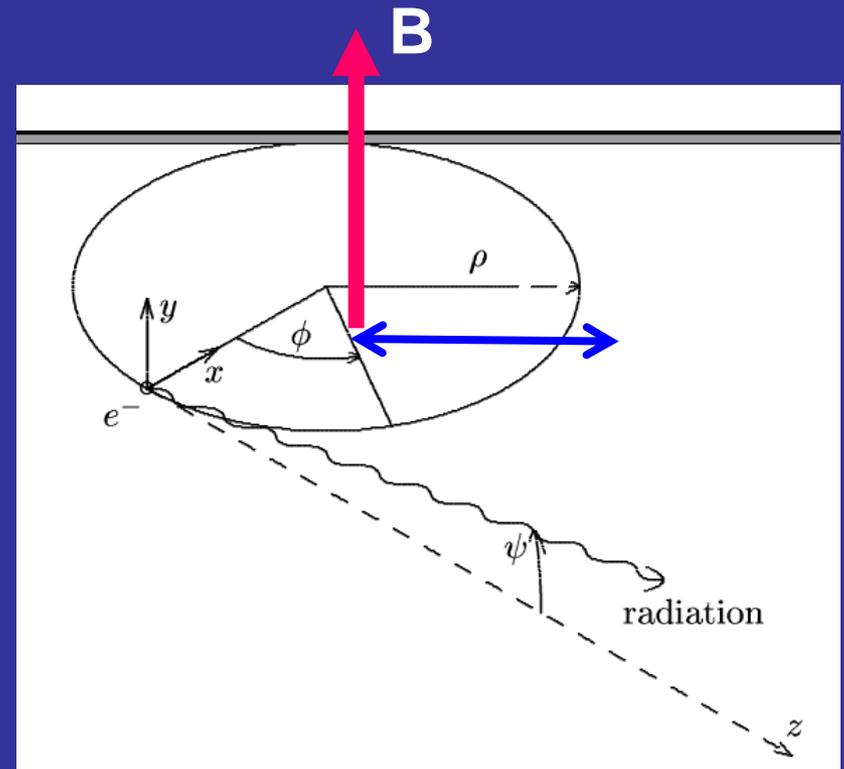
## 2. Une TRÈS BRÈVE histoire des accélérateurs jusqu'à l'ESRF

*Les accélérateurs circulaires (Slide Fabian Zomer)*

- Lorsqu'une particule chargée tourne dans un champ magnétique elle perd de l'énergie en rayonnant des photons (rayonnement de freinage ou bremsstrahlung)
- On peut montrer que la puissance perdue par une particule

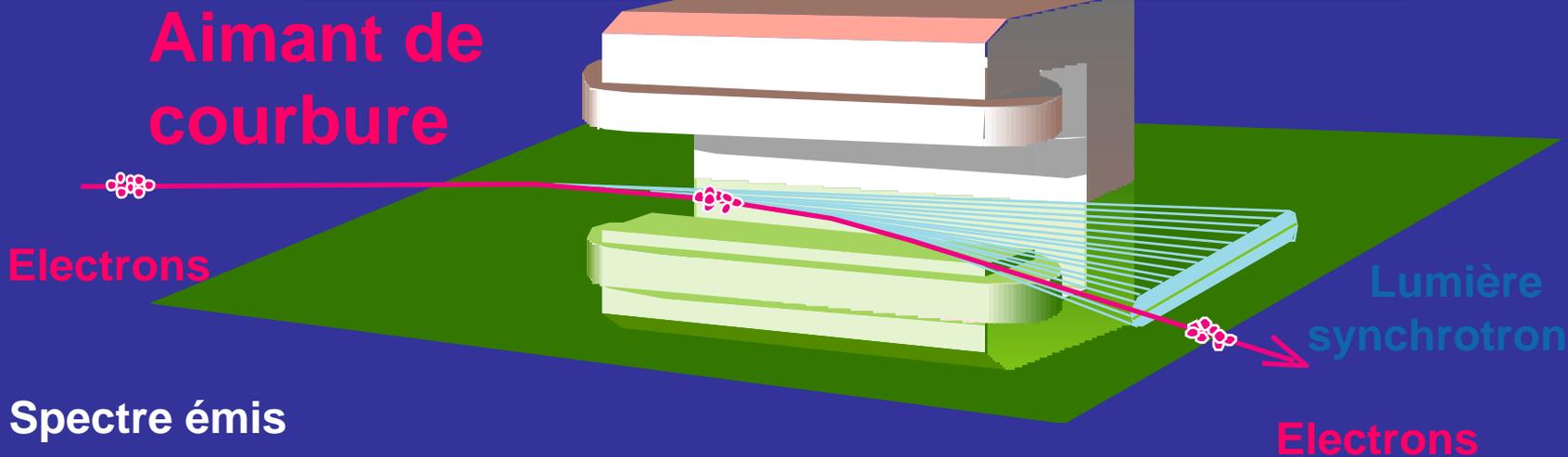
$$P \propto \left( \frac{E}{mc^2} \right)^4 \frac{1}{\rho^2}$$

Mais il y a une grosse différence entre électrons et protons : le rayonnement synchrotron !

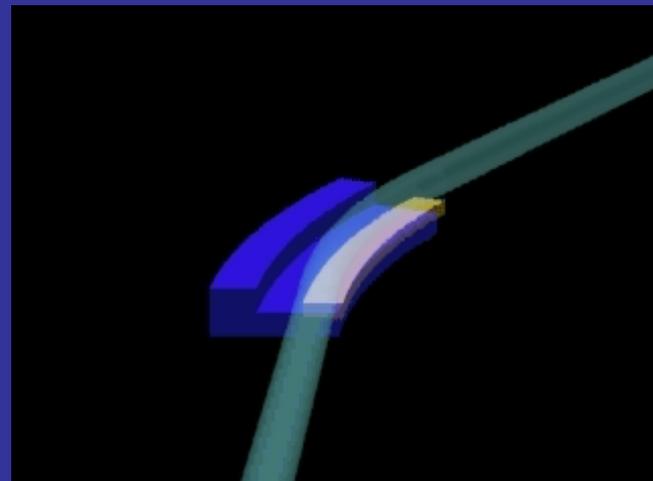
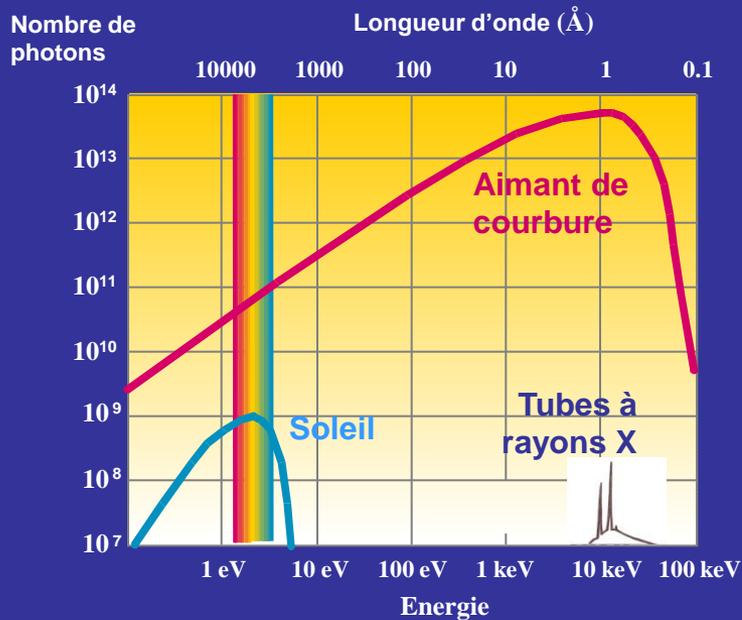


## 2. Une TRÈS BRÈVE histoire des accélérateurs jusqu'à l'ESRF

### Le rayonnement synchrotron



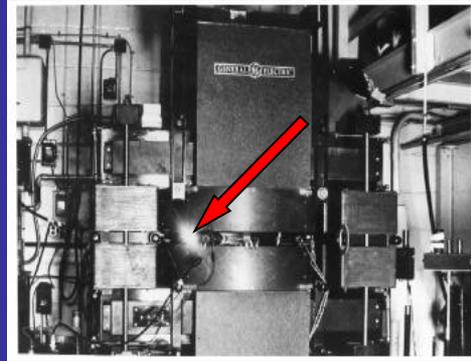
### Spectre émis



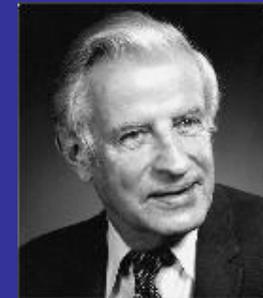
## 2. Une TRÈS BRÈVE histoire des accélérateurs jusqu'à l'ESRF

### *Les sources de rayonnements synchrotron*

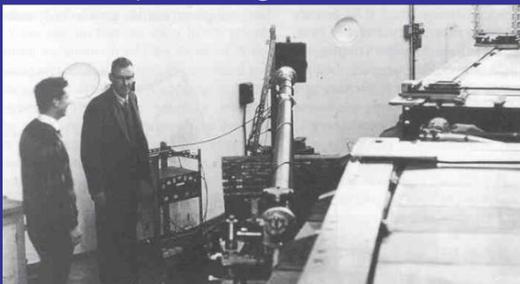
1947: Première observation du rayonnement synchrotron



1945: J Blewitt, sur son bétatron de 100 MeV aurait pu observer le rayonnement synchrotron si ... la chambre à vide n'avait pas été opaque !!



« Nina », la première ligne de lumière à Daresbury en 1966 (synchrotron de 6 GeV électron). 1ère génération



1981: SRS (UK) 1ère source (dédiée) de rayons X de 2ème génération



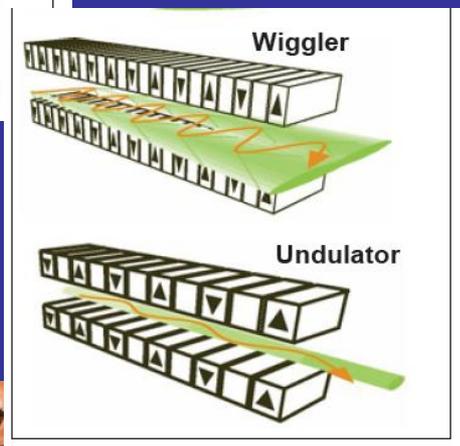
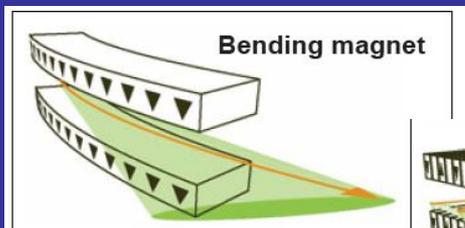
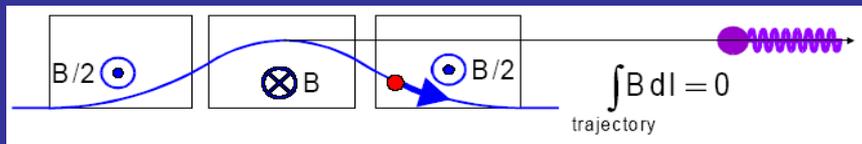
1994: Inauguration de l'ESRF, source de rayons X de 3ème génération



## 2. Une TRÈS BRÈVE histoire des accélérateurs jusqu'à l'ESRF

### Les éléments d'insertion

Insérer des aimants pour fournir un champ magnétique alternatif

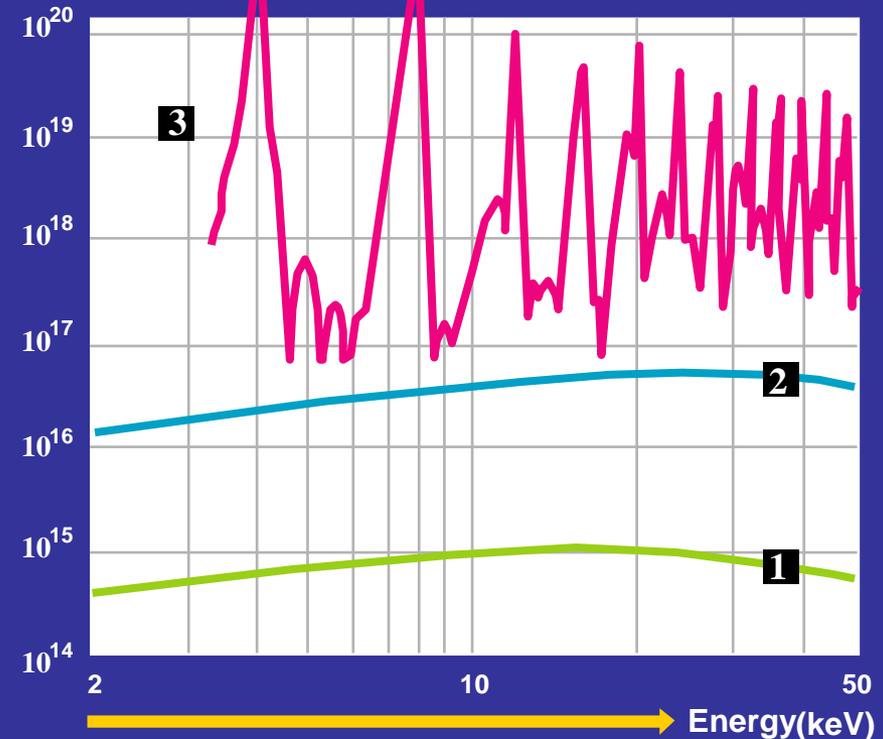


1 Aimant de courbure

2 Wiggler

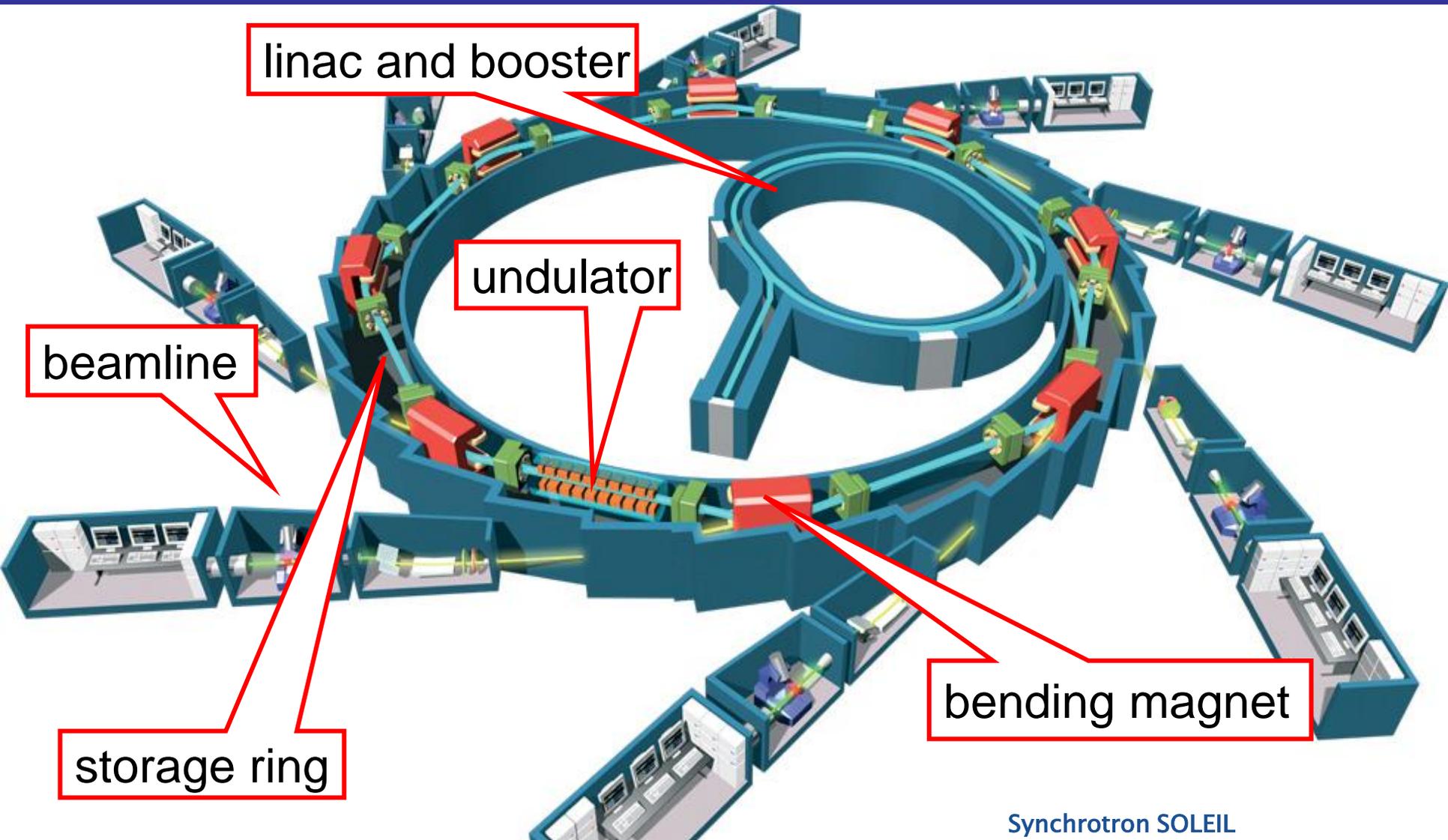
3 Onduleur

Brillance  
(photons/s/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/0.1%BW)



## 2. Une TRÈS BRÈVE histoire des accélérateurs jusqu'à l'ESRF

*Les sources de rayonnements synchrotron*



Synchrotron SOLEIL

## 2. Une TRÈS BRÈVE histoire des accélérateurs jusqu'à l'ESRF

### Les sources de rayonnements synchrotron

Le progrès des sources de rayons X peut se résumer dans un graphe de la brillance en fonction du temps

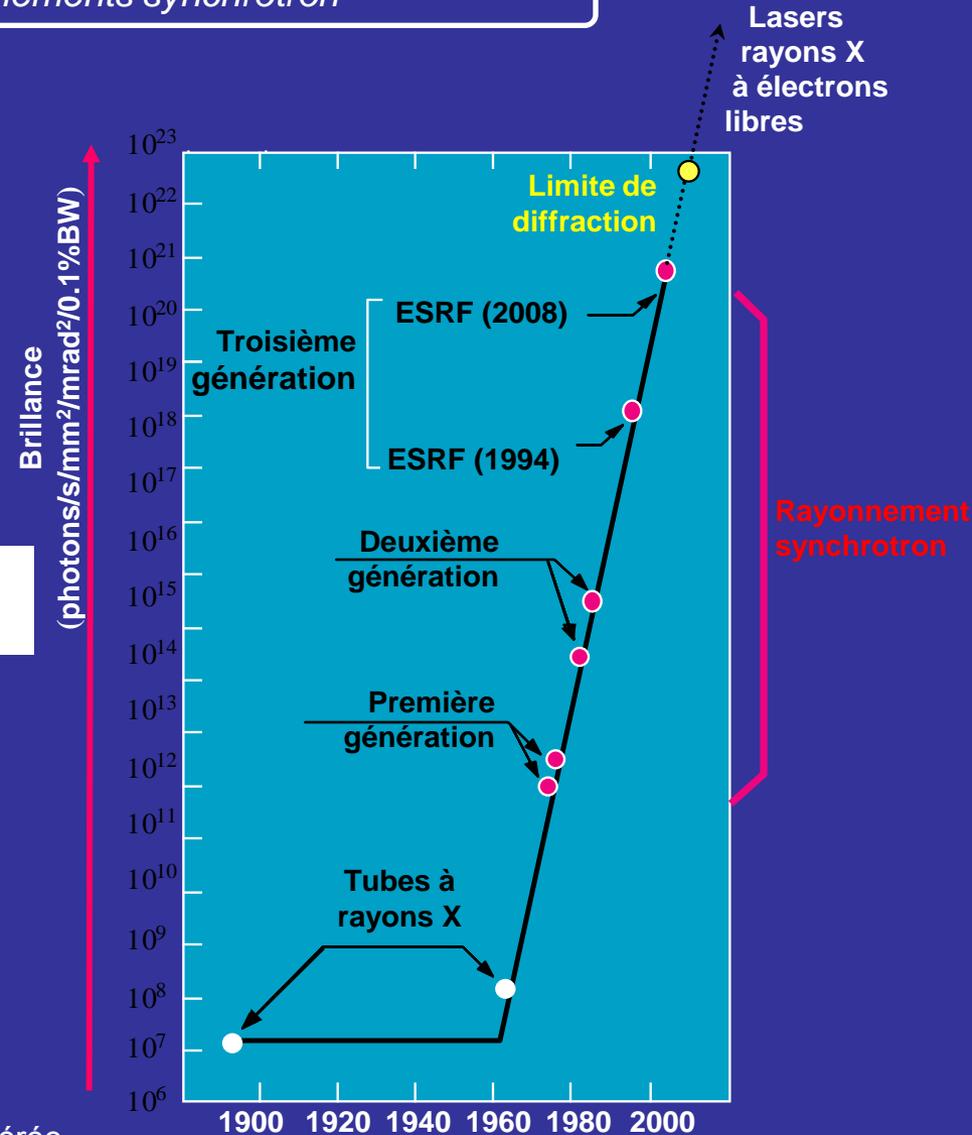
**Brilliance =**  
**photons /s / mm<sup>2</sup> /mrad<sup>2</sup> /0.1% bande passante**

Nombre de photons par seconde

Taille  
 horizontale \*verticale

Divergence  
 horizontale \*verticale

Dans une bande de 0.1 %  
 autour de l'énergie considérée.



## 2. Une TRÈS BRÈVE histoire des accélérateurs jusqu'à l'ESRF

### *Historique de l'ESRF*

- 1975 Construire un synchrotron capable de produire des rayons X durs hyper brillants.
- 1988 Signature entre les pays membres.
- 1992 Premier faisceau d'électrons dans l'anneau de stockage. Phase de mise au point.
- 1994 Ouverture aux utilisateurs. 15 lignes de lumière sont disponibles.
- 1998 Fin de la période de construction. 40 lignes de lumière sont opérationnelles.



- **2008** 20 ans après la signature. Début du programme d'extension.

## 2. Une TRÈS BRÈVE histoire des accélérateurs jusqu'à l'ESRF

### Historique de l'ESRF

1991

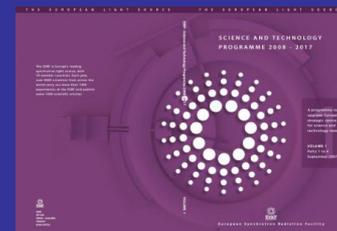
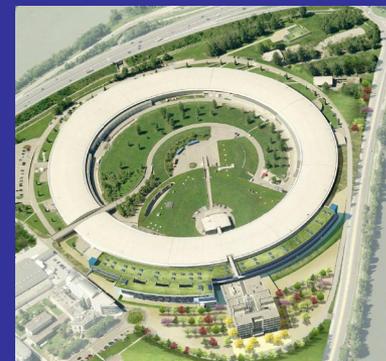


2010



1988

2017



2007

## 2. Une TRÈS BRÈVE histoire des accélérateurs jusqu'à l'ESRF

*Les sources de rayonnements synchrotron*

**Environ 50 sources de rayonnements  
synchrotron dans le monde**



## 2. Une TRÈS BRÈVE histoire des accélérateurs jusqu'à l'ESRF

### *Les sources de rayonnements synchrotron*

### Many Medium energy rings :2.7-3.5 GeV

SOLEIL, DIAMOND, CLS, ALBA, SSRF, TPS ,Australian Synchrotron, NSLS II ...



### High energy rings ( $\geq 6$ .GeV)

SPRING 8



ESRF Upgrade



APS Upgrade



Petra III



### X FELs (4<sup>th</sup> generation light sources)

- LCLS (Stanford)
- SACLA (SPRING8)
- Flash, European XFEL (Hamburg)
- Fermi@ elettra
- .....



LCLS

SACLA

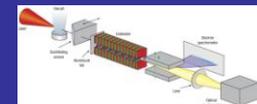


European XFEL

Fermi



### *Laser plasma acceleration: 5<sup>th</sup> generation light sources*



### 3. L'ESRF AUJOURD'HUI

- INTRODUCTION
- Une TRÈS BRÈVE histoire des accélérateurs jusqu'à l'ESRF
- L'ESRF AUJOURD'HUI
- LES ACCÉLERATEURS DE L'ESRF
- FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE
- FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE QUOTIDIENNE
- CONCLUSIONS et REMERCIEMENTS

### 3. L'ESRF AUJOURD'HUI

*La structure organisationnelle de l'ESRF*

**L'ESRF est en opération depuis dix sept ans**

*Inauguration: 30 Septembre 1994*

L'ESRF est une société civile  
de droit français,  
financée par 19 pays.

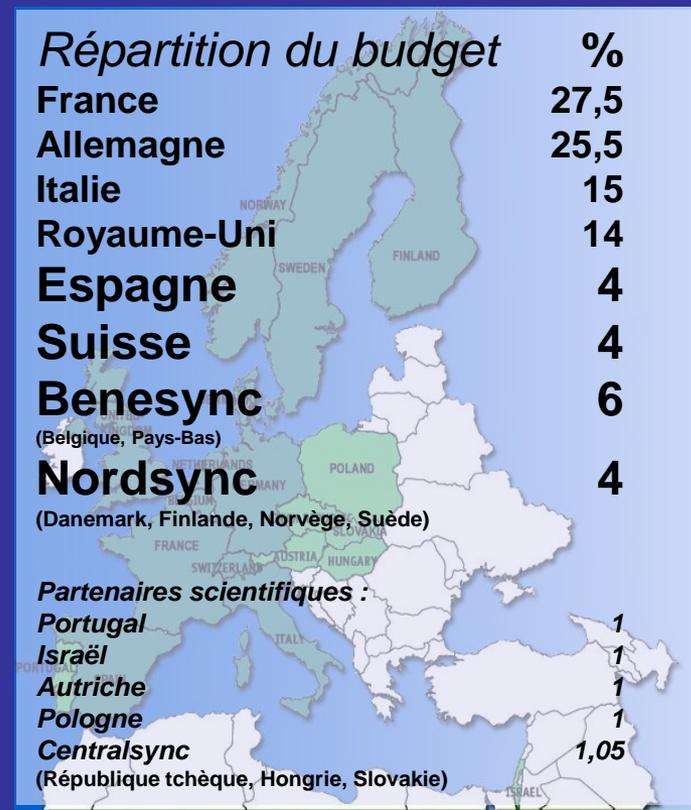
**Taux de disponibilité du faisceau 2011:**  
**98.91%**

**Temps moyen entre deux pannes 2011:**  
**108 heures**

En 2010:

2000 Propositions de recherche  
~ 6300 Utilisateurs, 1500 Sessions expérimentales  
~ 1800 Publications scientifiques *avec référé*

**Budget annuel : 90 M Euros.**

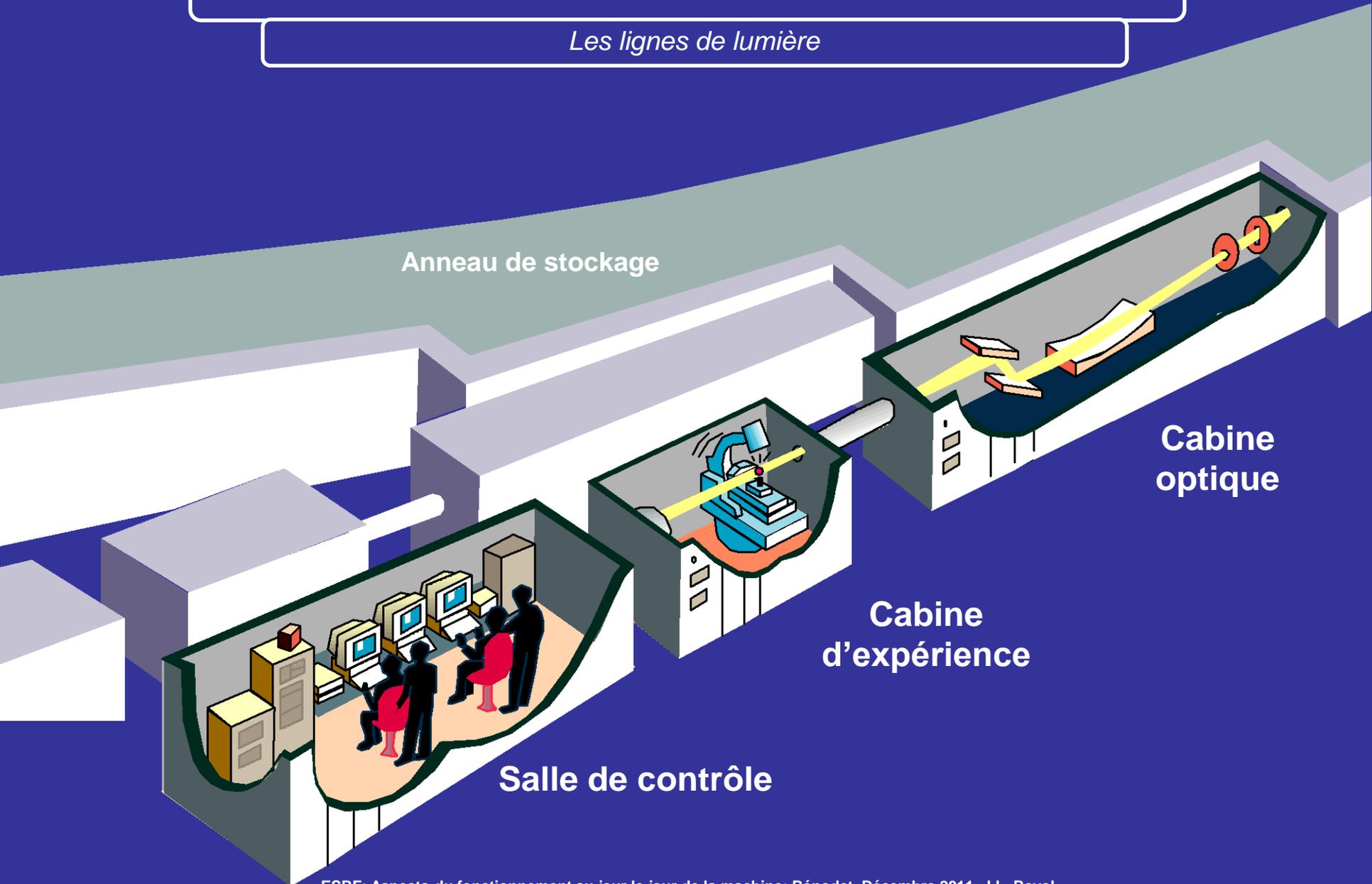


**600 Employés originaires de 30 pays**



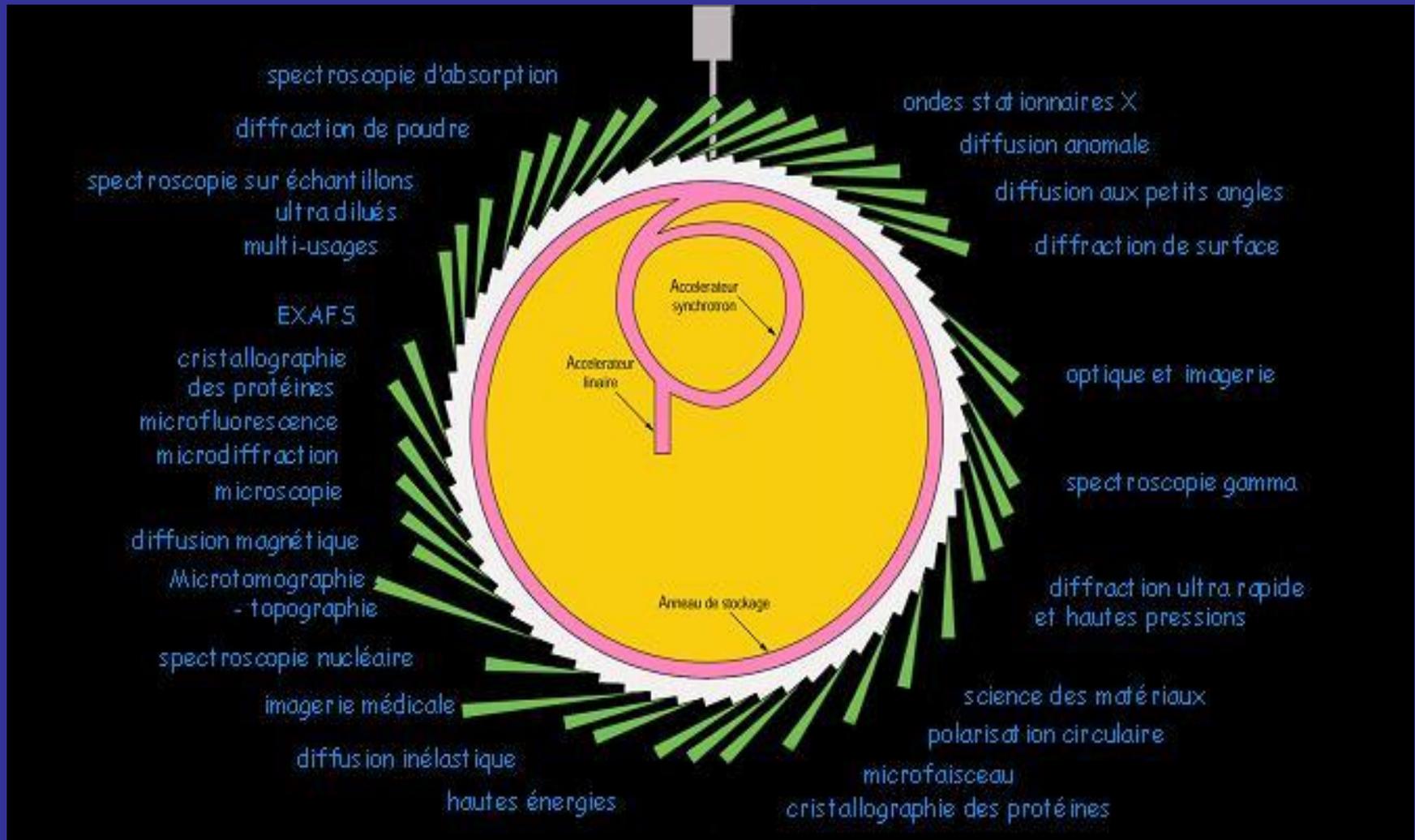
### 3. L'ESRF AUJOURD'HUI

*Les lignes de lumière*



### 3. L'ESRF AUJOURD'HUI

*Une vue globale de la Recherche à l'ESRF*



### 3. L'ESRF AUJOURD'HUI

*Quels types de science peut-on faire à l'ESRF ?*

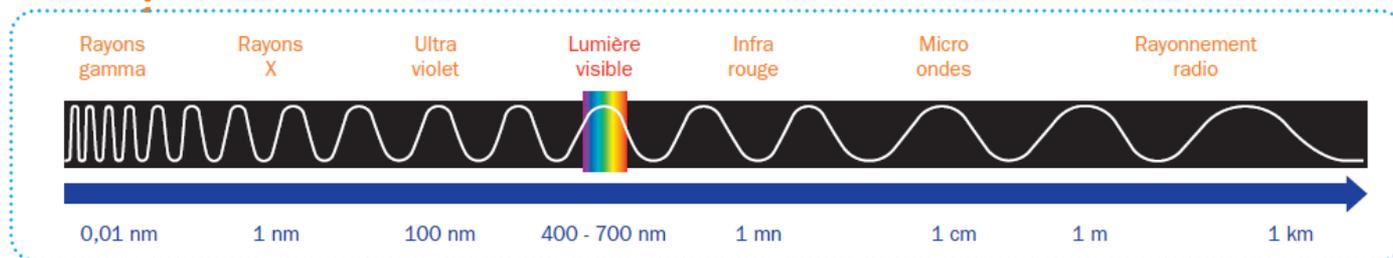
Introduction générale de l'activité à l'ESRF sous forme de film video





# La grande famille des ondes

La lumière fait partie de la grande famille des ondes électromagnétiques. Le soleil est la source la plus connue et la plus importante pour nous.



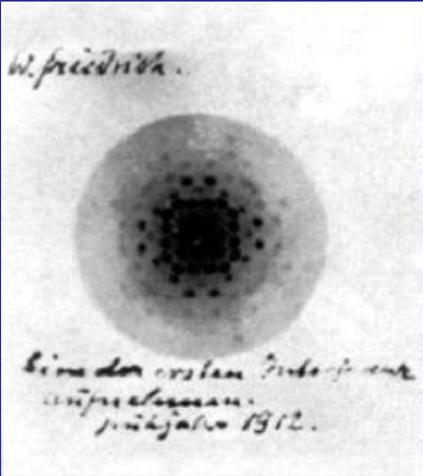
De droite à gauche en lisant la figure ci dessus, soit des plus longues ondes vers les plus courtes.

- Les ondes radio pour recevoir les émissions de la radio.
  - Les micro-ondes qui, par exemple, nous permettent de réchauffer des aliments par “ agitation ” des molécules d’eau qu’ils contiennent.
  - L’infrarouge émis en particulier par ce qui dégage de la chaleur (flamme, animaux ...)
  - La lumière visible, si bien illustrée par les couleurs de l’arc en ciel.
- L’ultra-violet, dont on constate des effets lors du bronzage de notre peau.
- Les rayons X, qui transportent beaucoup d’énergie. Ils sont capables de traverser la matière ; on les utilise par exemple pour la radiographie.
- Les rayons gamma que presque rien n’arrêtent.

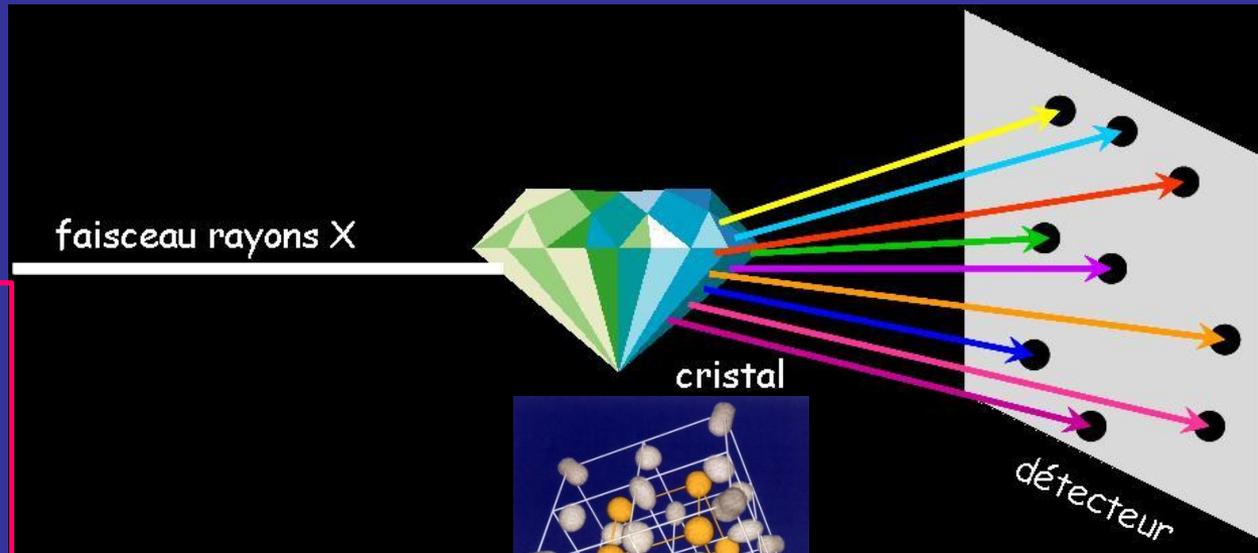
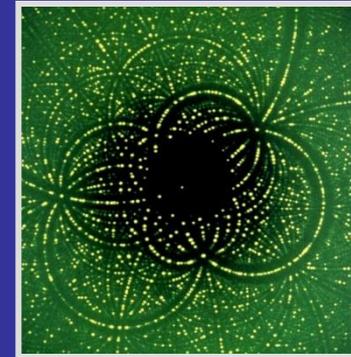
Dans le monde scientifique, l’ensemble de ces rayonnements est appelé “ ondes électromagnétiques ”, car elles sont toutes de même nature : de l’énergie qui se propage dans le vide, à 300 000 km par seconde. C’est la fameuse “ vitesse de la lumière ”.

### 3. L'ESRF AUJOURD'HUI

#### Diffraction Rayons X: le principe de base



Premier diagramme de rayons X obtenu par Max von Laue en 1912



Loi de Bragg :  $2 d \sin\theta = n\lambda$

$\lambda$  : longueur d'onde

$\theta$  : angle d'incidence

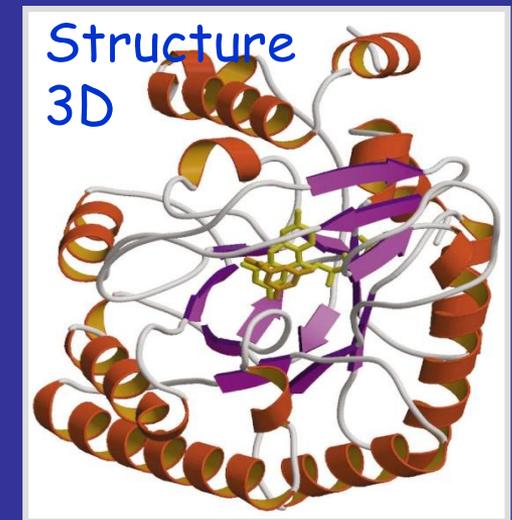
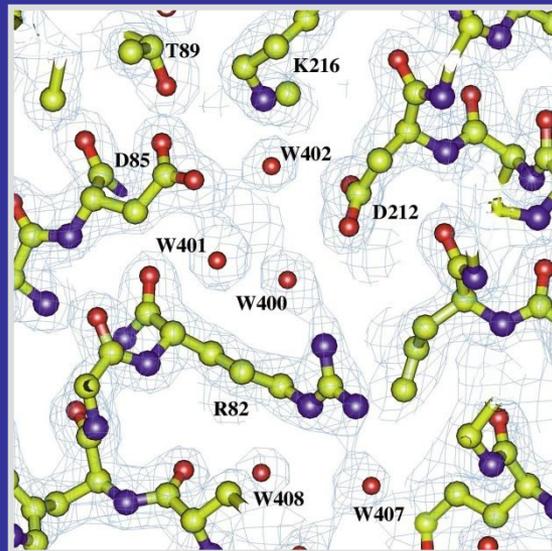
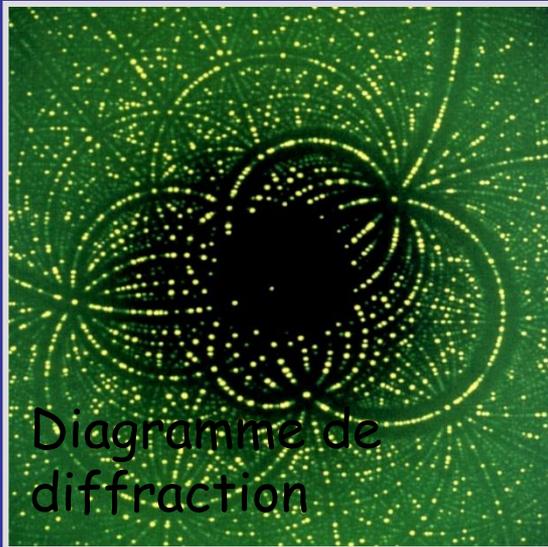
$d$  : distance entre 2 plans d'atomes

$n$  : entier

### 3. L'ESRF AUJOURD'HUI

*Quels types de science peut-on faire à l'ESRF ?*

#### Exemple 1 : la cristallographie des protéines



Faisceau:

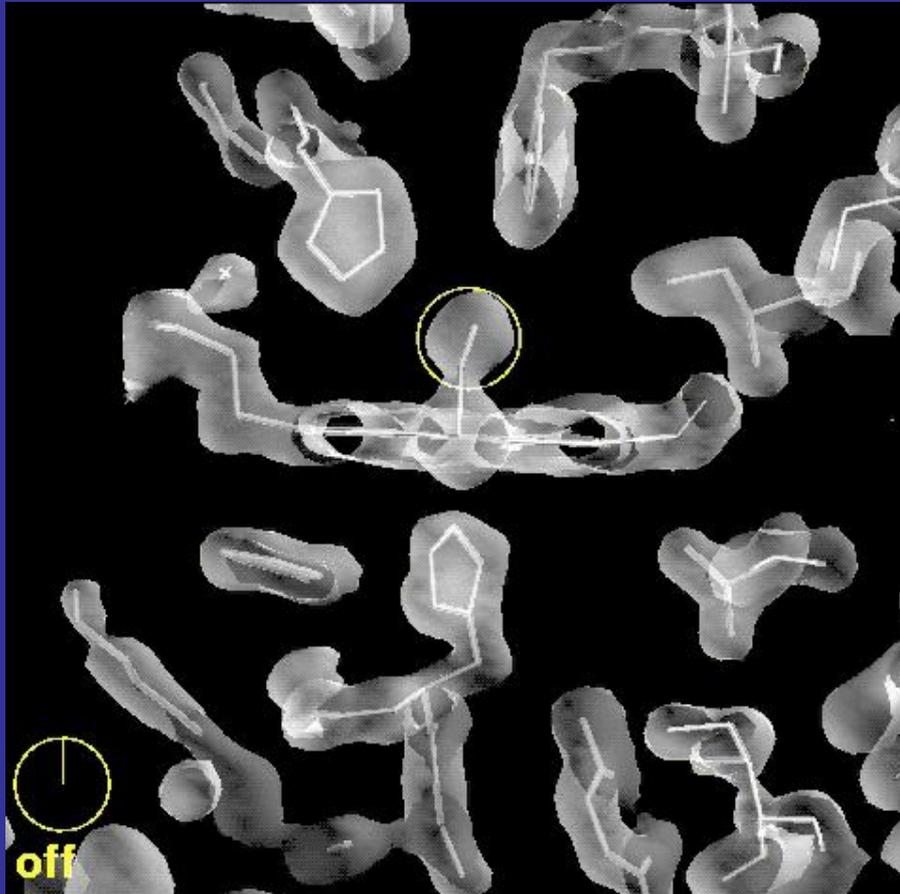
- FIABLE: beaucoup d'échantillons
- STABLE

### 3. L'ESRF AUJOURD'HUI

*Quels types de science peut-on faire à l'ESRF ?*

#### Exemple 2 : la Biologie

Filmer une protéine en action avec une précision inégalée



Faisceau:

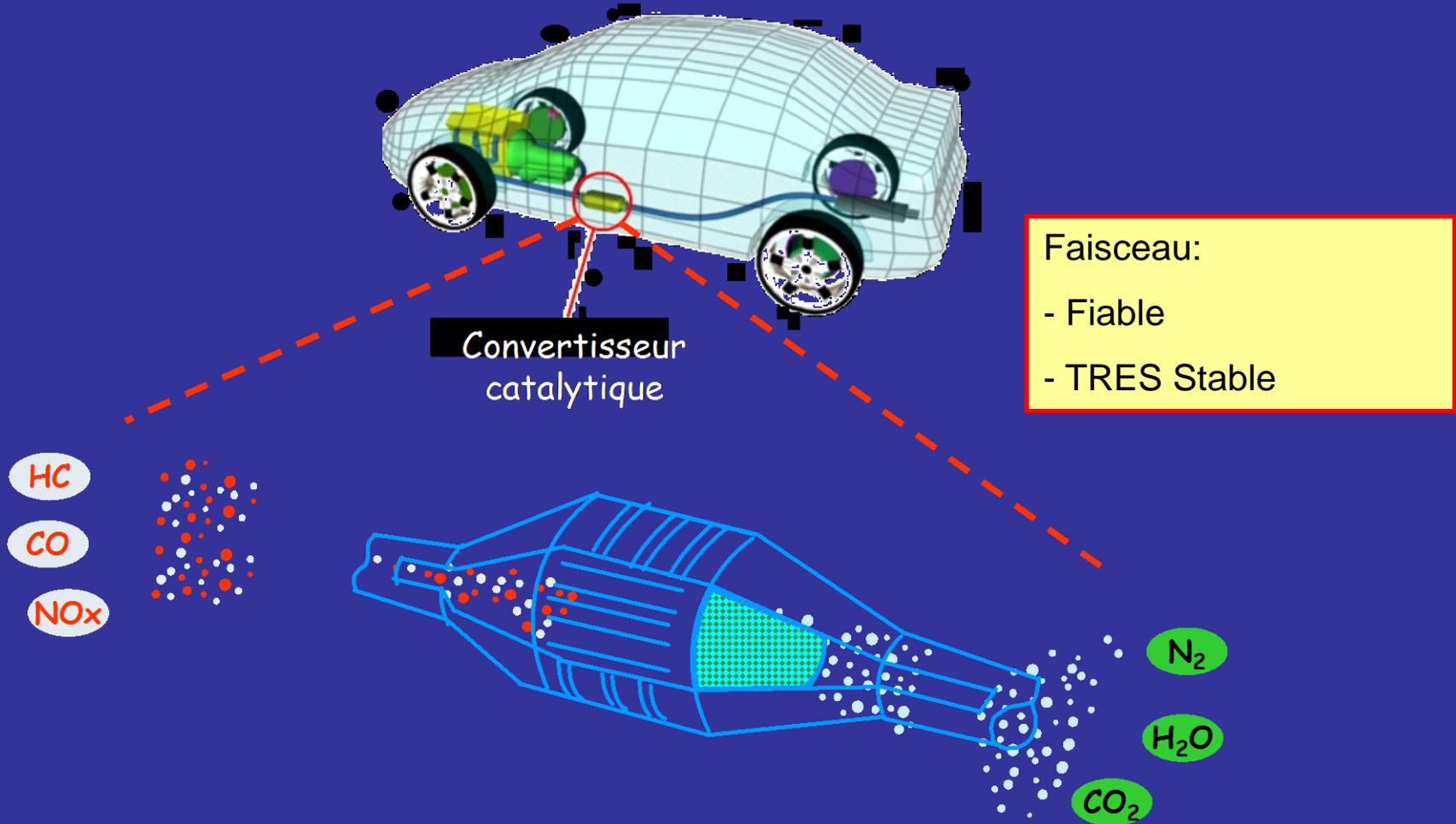
- Fiable
- Stable
- Structuré en temps

La myoglobine est une molécule qui stocke l'oxygène dans les muscles.

### 3. L'ESRF AUJOURD'HUI

*Quels types de science peut-on faire à l'ESRF ?*

#### Exemple 3 : la Chimie

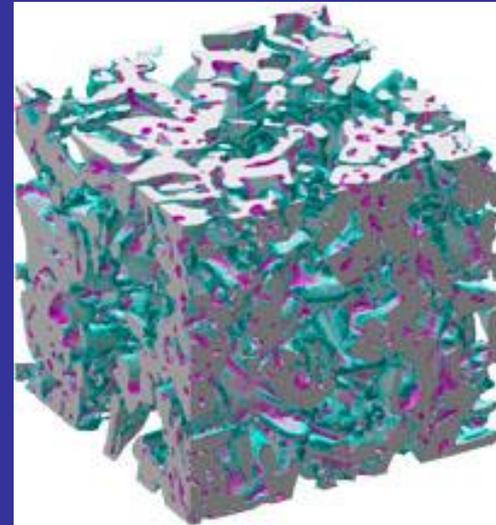
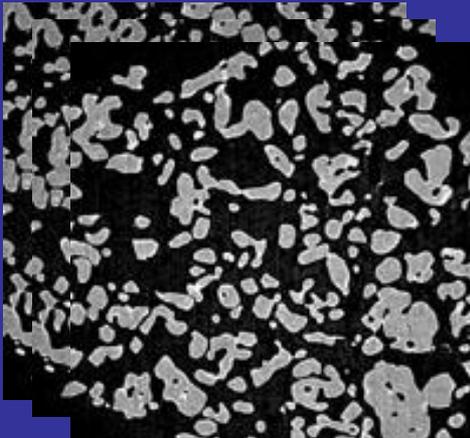


### 3. L'ESRF AUJOURD'HUI

*Quels types de science peut-on faire à l'ESRF ?*

#### Exemple 4 : l'environnement

L'analyse de la structure 3D d'échantillons de neige ...



... aide à la prévision du risque d'avalanche.



Faisceau:

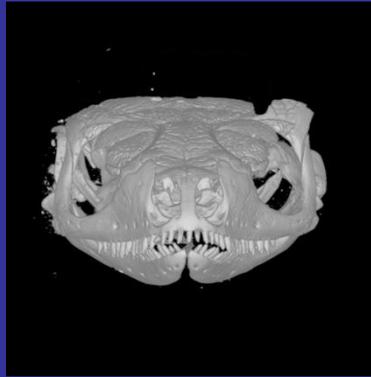
- Fiable
- Stable

### 3. L'ESRF AUJOURD'HUI

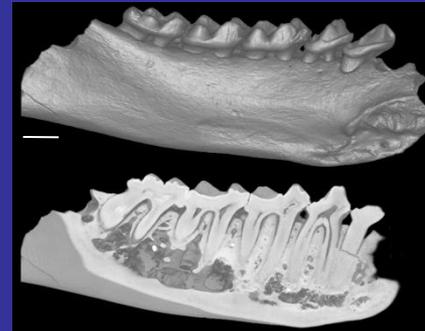
*Quels types de science peut-on faire à l'ESRF ?*

#### Exemple 5 : la paléontologie

Lézard fossilisé ...



Mâchoires d'ancêtres du singe



Toumaï, notre plus vieil ancêtre !



Faisceau:

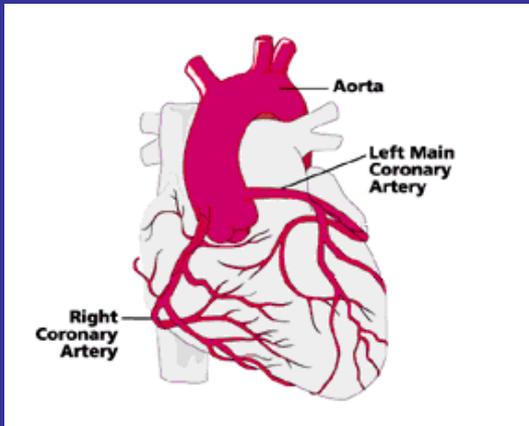
- TRES Fiable (scans)
- Intense

### 3. L'ESRF AUJOURD'HUI

*Quels types de science peut-on faire à l'ESRF ?*

#### Exemple 7 : la médecine

L'angiographie est une technique d'imagerie pour visualiser les coronaires.



L'angiographie pratiquée au synchrotron donne de meilleurs résultats que les techniques conventionnelles utilisées à l'hôpital.

#### Autres applications médicales

- Tomographie
- Mammographie
- Radiothérapie médicale

Faisceau:

- TRES Fiable

### 3. L'ESRF AUJOURD'HUI

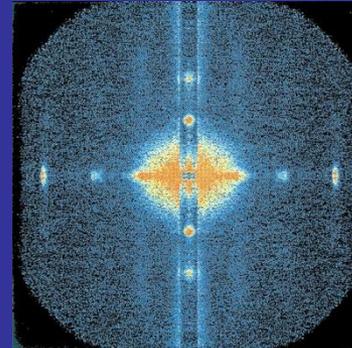
*Quels types de science peut-on faire à l'ESRF ?*

#### Exemple 6 : les matériaux

L'étude de la structure d'une toile d'araignée ...



... permet de comprendre ses étonnantes propriétés mécaniques



Faisceau:

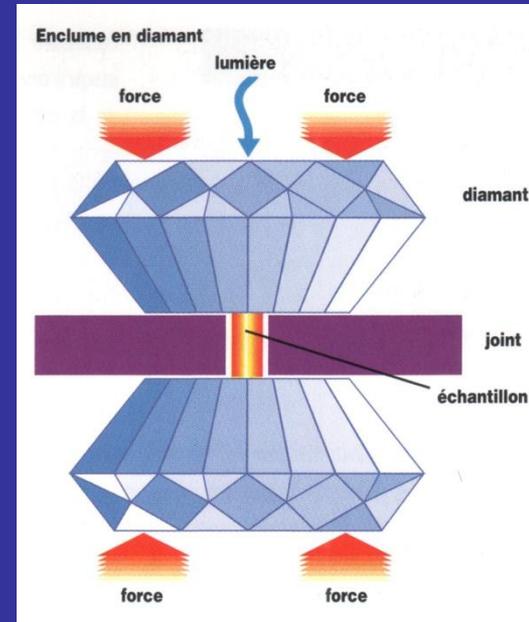
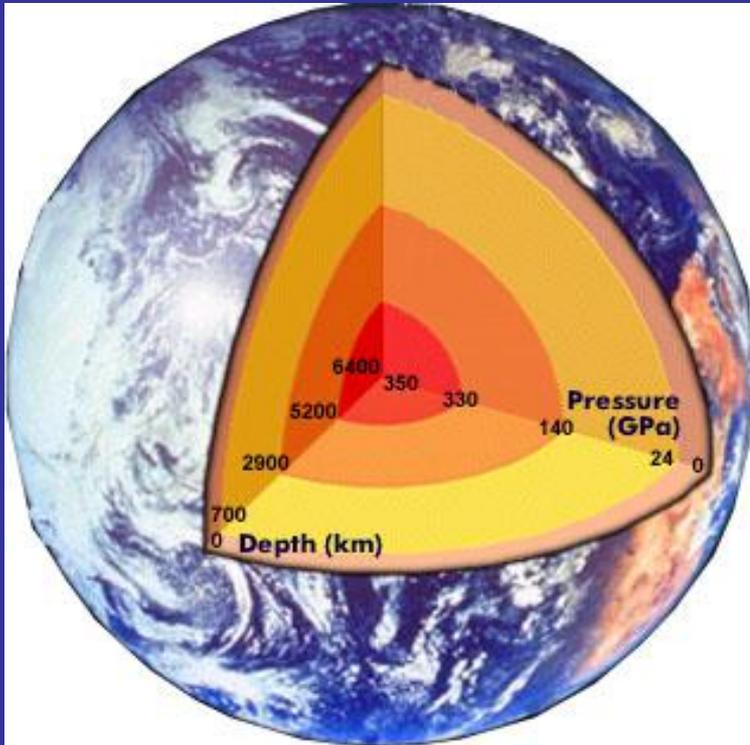
- Stable
- Petite dimension

### 3. L'ESRF AUJOURD'HUI

*Quels types de science peut-on faire à l'ESRF ?*

#### Exemple 8 : la géophysique

Pour connaître la structure de la matière au centre de la terre ...



... les scientifiques étudient des échantillons soumis à des conditions extrêmes de température et de pression.

Faisceau:

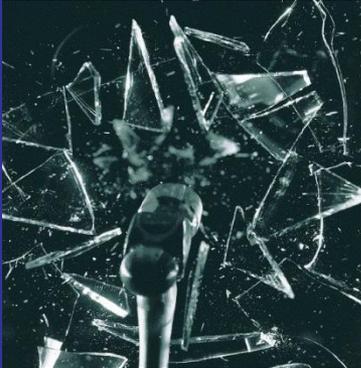
- Le plus intense possible
- Petite dimension

### 3. L'ESRF AUJOURD'HUI

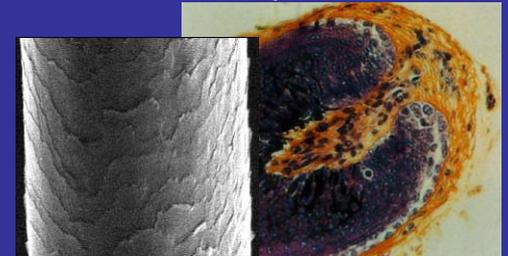
*Quels types de science peut-on faire à l'ESRF ?*

#### Exemple 8 : la recherche industrielle

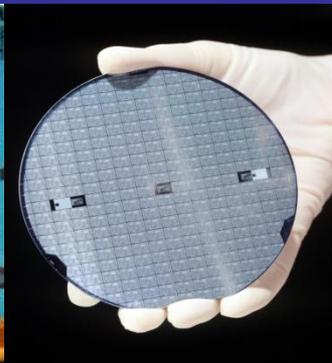
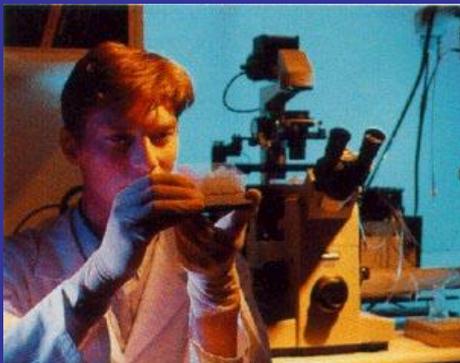
- **Bâtiment**



- **Cosmétiques**



- **Microélectronique**



- **Pharmacie**



Faisceau:  
- TRES Fiable

### 3. L'ESRF AUJOURD'HUI

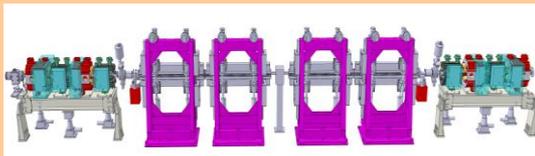
Besoins scientifiques pour le faisceau:

- Longueur d'onde accordable
- Flux
- Faible emittance
- Stabilité en position
- Structure temporelle
- Fiabilité et reproductibilité

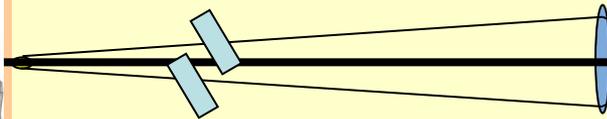
Une bonne expérience nécessite aussi un environnement expérimental performant:

- Optique X
- Préparation des échantillons
- Détecteurs sensibles et adaptés
- Exploitation informatique des données

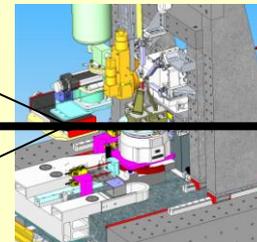
Accelerator and source



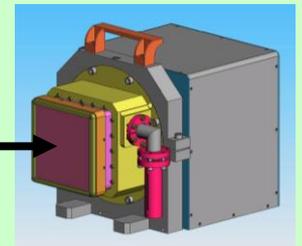
Beam conditioning



Sample management and environment



X-ray detectors

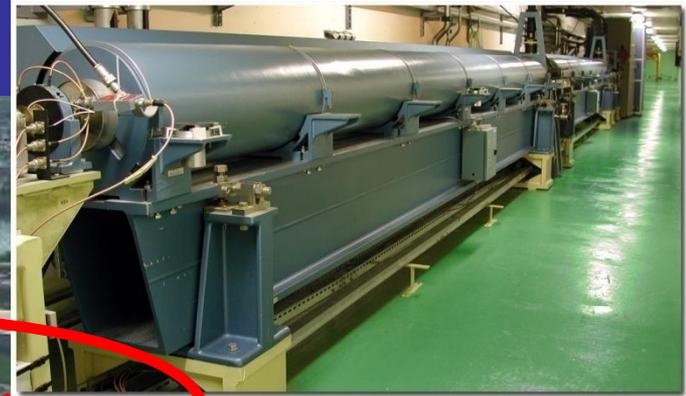


## 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

- INTRODUCTION
- Une TRÈS BRÈVE histoire des accélérateurs jusqu'à l'ESRF
- L'ESRF AUJOURD'HUI
- LES ACCÉLERATEURS DE L'ESRF
- FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE
- FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE QUOTIDIENNE
- CONCLUSIONS et REMERCIEMENTS

## 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

### Présentation générale

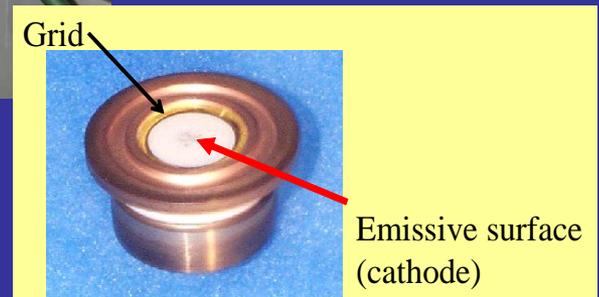


## 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

### L'accélérateur linéaire



Le Linac consiste en une **TRIODE** (cathode – anode – grille) alimentée par 100 KV. Les électrons produits ont donc une énergie de 100 keV. Les électrons sont ensuite accélérés par 2 sections accélératrices de 6 mètres chacune, chaque section accélérant le faisceau de 100 MeV, soit au total 200 MeV.



Mode d'opération	Impulsions longues	Impulsions courtes
Courant pic	25 mA	250 mA
Longueur de pulse	1 $\mu$ s	2 ns
Dispersion en énergie	+/- 1%	+/- 0.5%

## 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

### *La ligne de transfert Linac vers Booster: TL1*



- Longueur: 16 mètres
- Composants principaux: 2 aimants de déviation, 7 quadrupôles, 2 paires d'aimants correcteurs
- Diagnostics: écrans amovibles + rayonnement synchrotron



## 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

### *Le synchrotron (ou Booster): généralités*



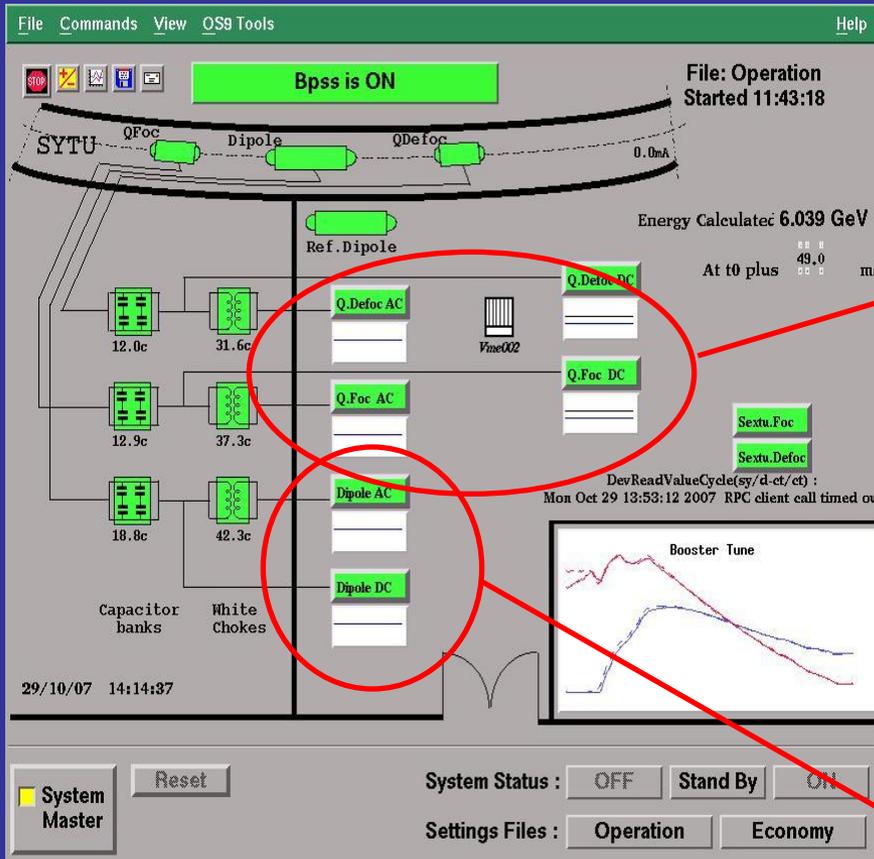
Objectif: Accélérer les électrons de 200 MeV à 6 GeV

Cycle: période de 100 msec (50 msec pour le cycle d'accélération)

Longueur: 300 mètres

# 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

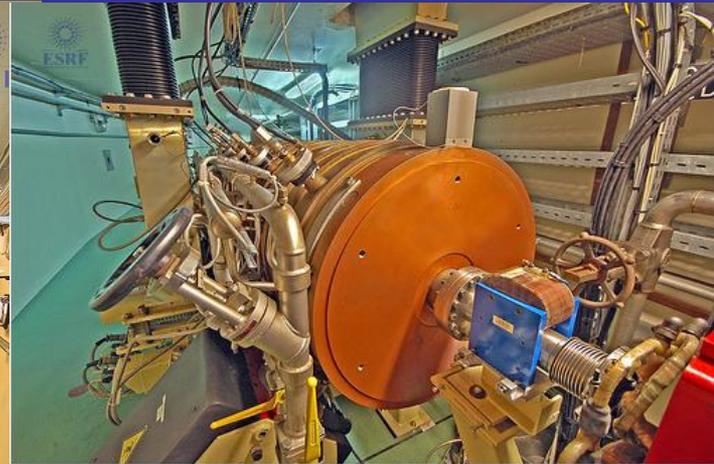
## Le synchrotron (ou Booster): Les aimants



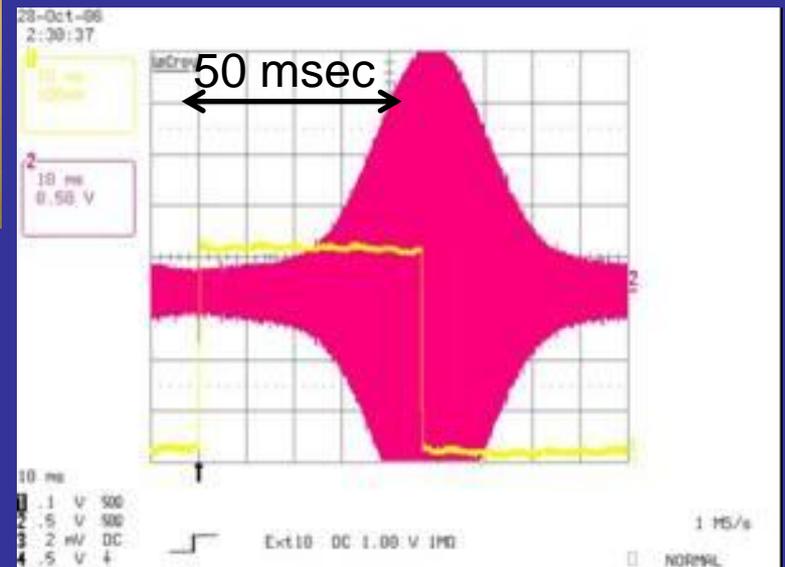
Quand le champ est minimum dans les dipoles, cela définit le « T0 »: le 'top-départ' du système de timing qui gère toute la chaîne d'injection/extraction

## 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

### *Le synchrotron (ou Booster): Le système Radio Fréquence*



- 2 cavités de 5 cellules (type LEP)
- Klystron: 1 MW – 352.2 MHz
- 2 fenêtres / cavité

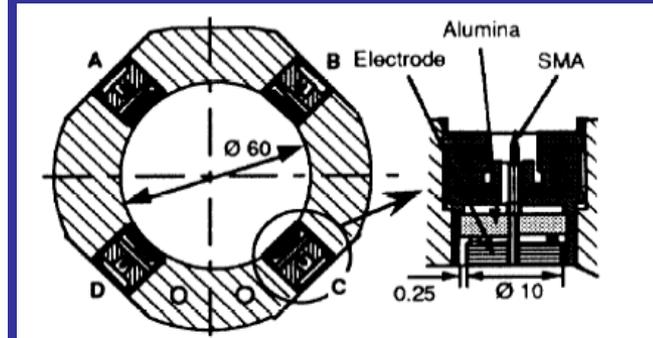
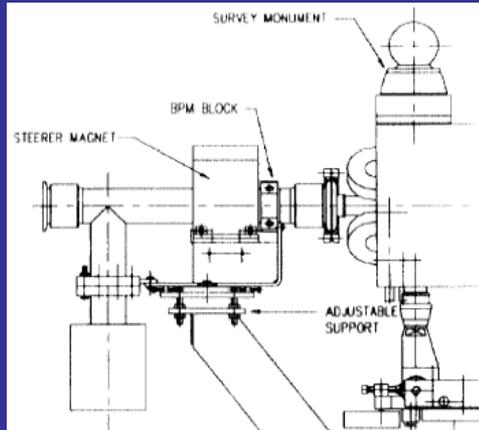
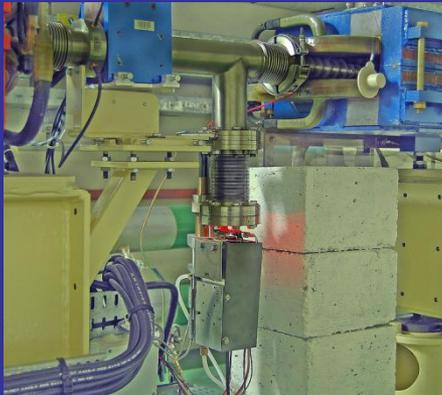


# 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

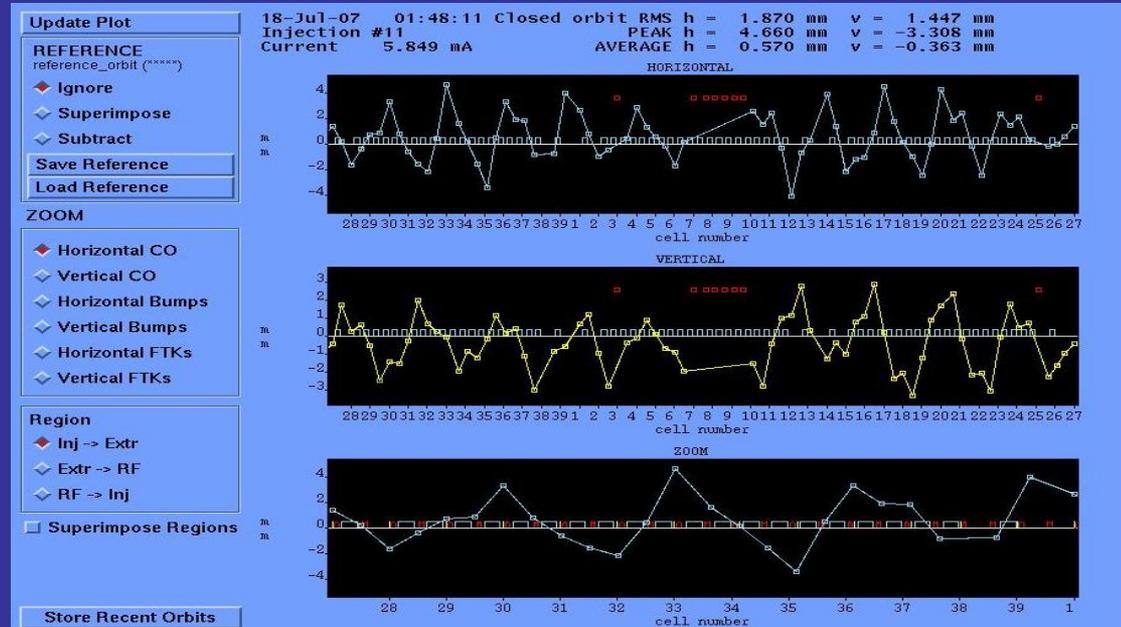
Le synchrotron (ou Booster): Les outils de diagnostic

La position du faisceau / l'orbite  
75 Blocs 'BPM'  
(Beam Position Monitor)

+ 8 Ecrans amovibles



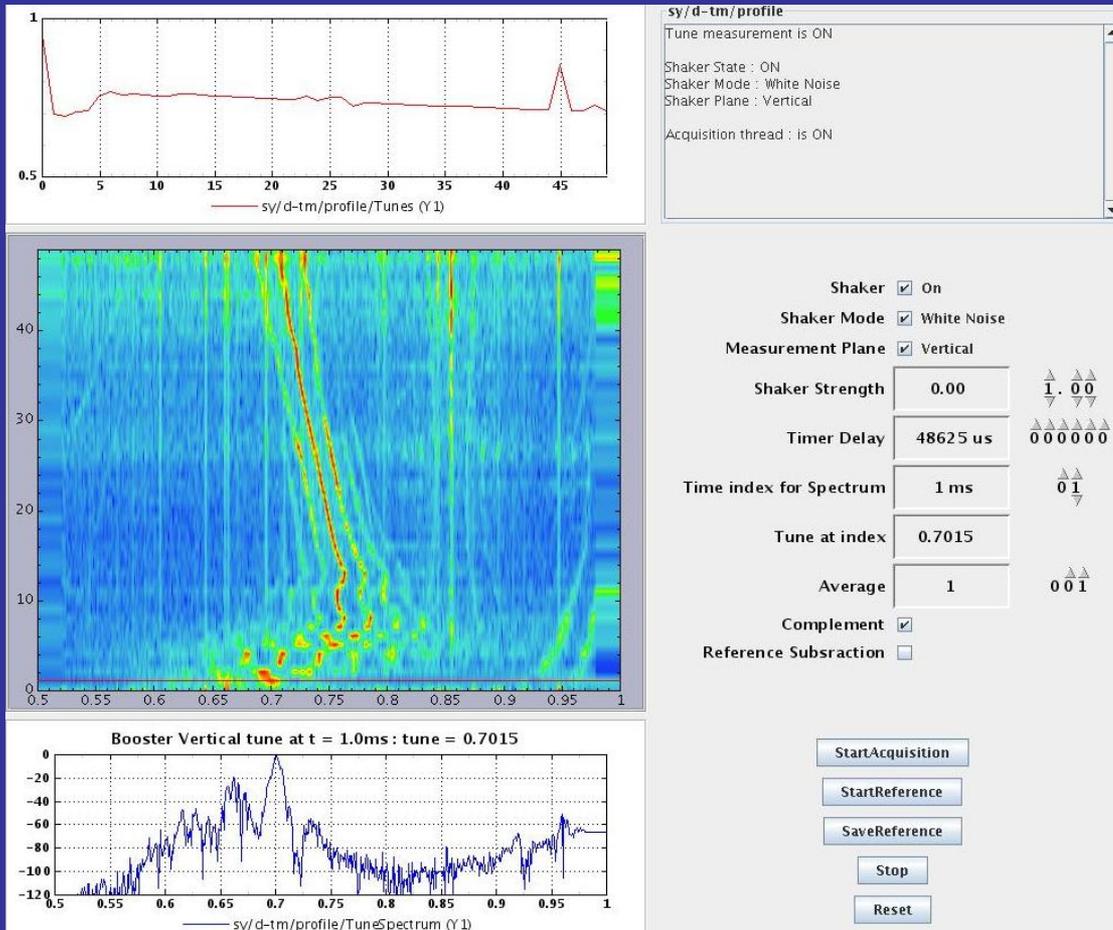
+ Synchrotron light monitors



# 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

## Le synchrotron (ou Booster): Les outils de diagnostic

Mesure des tunes tout le long du cycle d'accélération

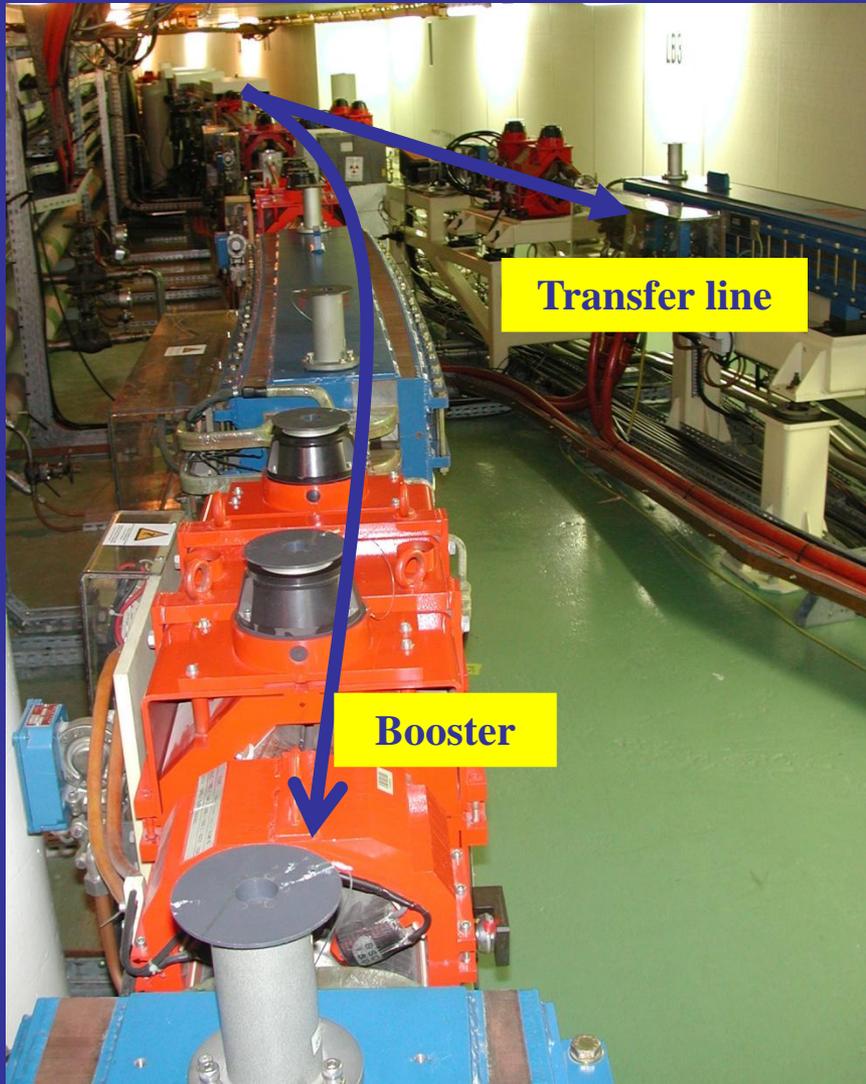


Pourquoi ??

- Eviter les couplages de faisceau
- Optimiser les points de fonctionnements à l'extraction
- Connaître les paramètres faisceau à l'entrée de la ligne de transfert qui suit le Booster

## 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

*La ligne de transfert Booster vers Anneau de stockage: TL2*



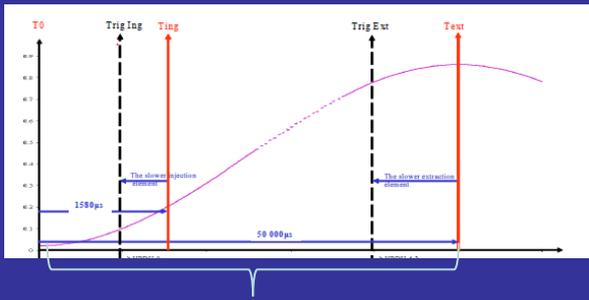
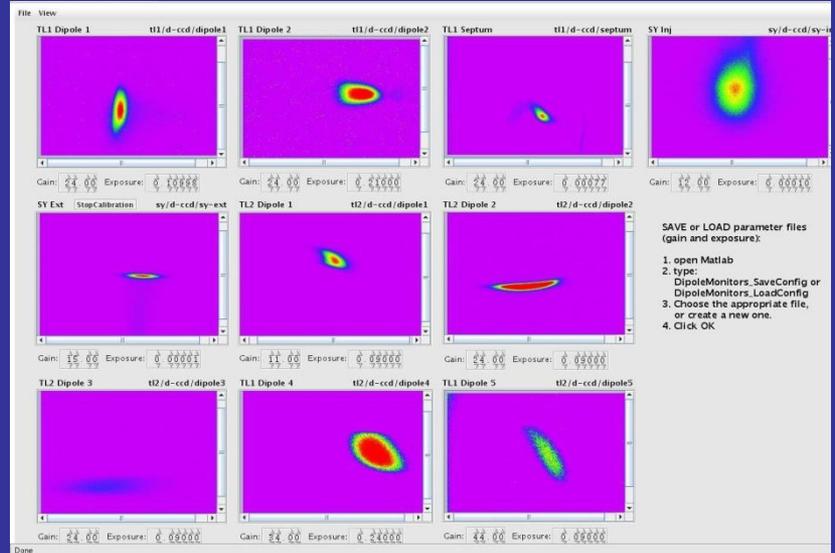
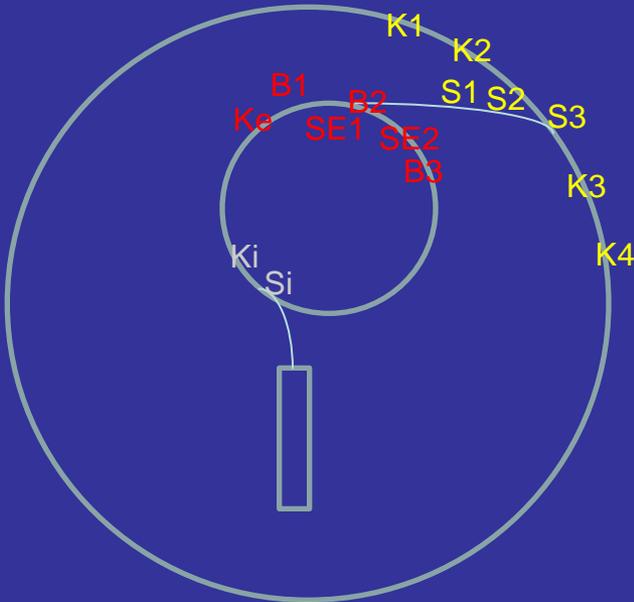
Objectif:

Transférer les électrons de 6 GeV du Synchrotron vers l'anneau de stockage:

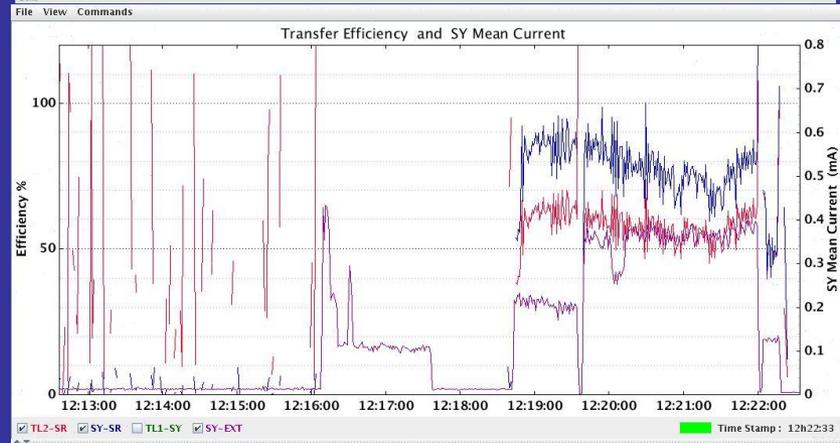
- 5 aimants de déviation (alimentés en série avec ceux du Booster)
- 14 quadripoles
- 9 écrans amovibles
- Beam Position Monitors
- Ecrans rayonnement synchrotron (1 écran / dipole)
- Longueur: 65 mètres

# 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

## Injection/extraction

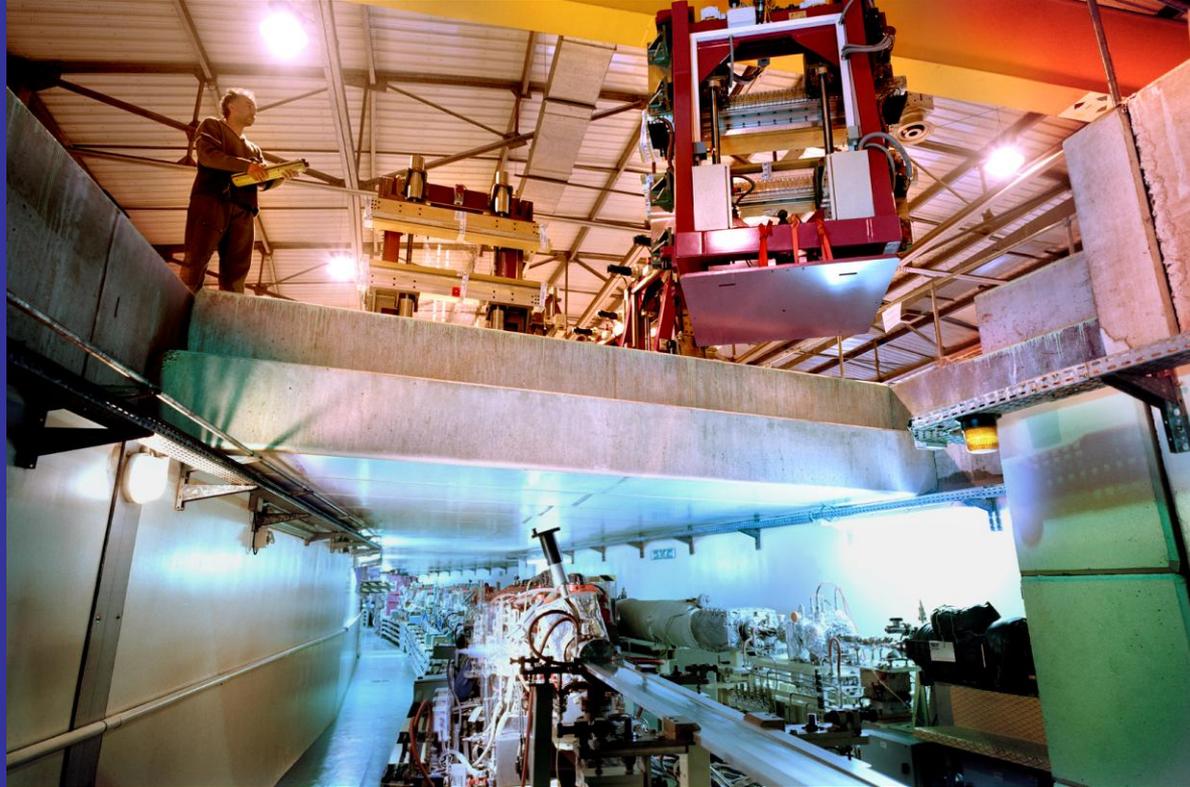


Un cycle d'injection = 50 ms



## 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

### *L'anneau de stockage: généralités*



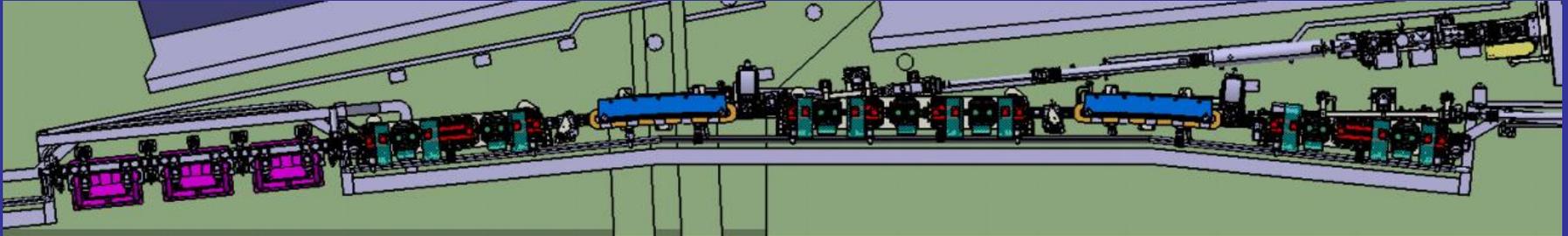
Stocker un faisceau d'électrons de 6 GeV

Source de rayons X (aimants de déviation, éléments d'insertion)

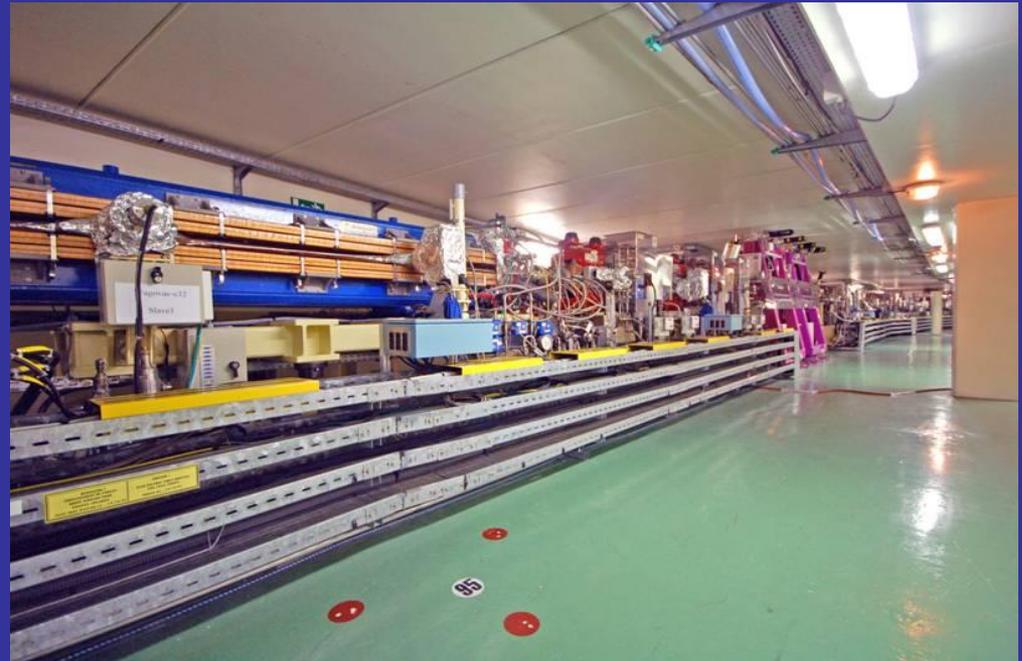
**SOUS CONTRAINTES !:** orbite, stabilité, intensité, taille faisceau, ...

## 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

### *L'anneau de stockage: généralités*



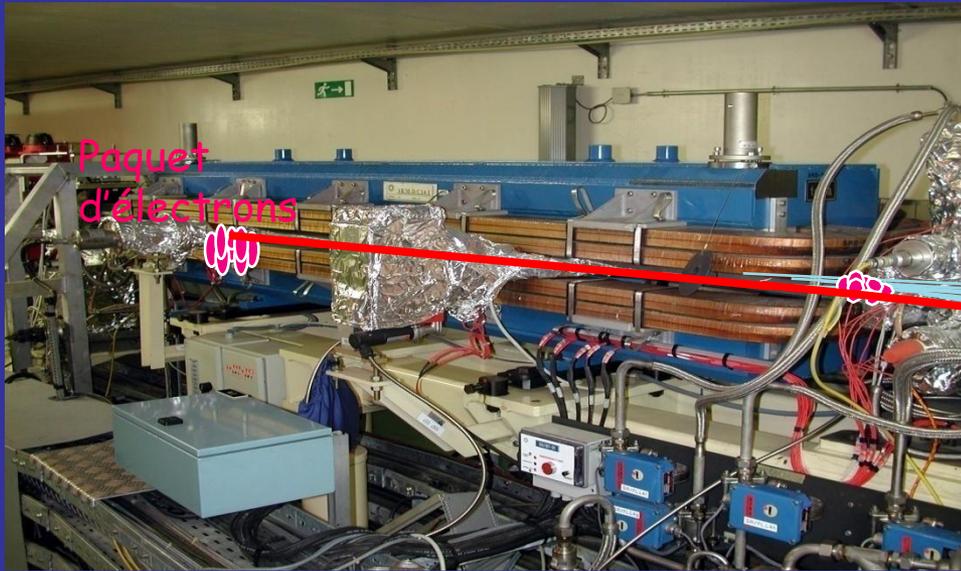
- Circonférence: 844 mètres
- 16 super-périodes de 2 cellules miroirs → 32 cellules
- Energie: 6 GeV
- Intensité nominale: 200 mA
- Intensité record: 300 mA
- Emittance: 4nm rad
- Couplage habituel: 0.1 %



## 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

*L'anneau de stockage: Les aimants*

64 aimants de déviation (dipôles)



Lumière  
synchrotron

Electrons

Nombre : 64 (2 par cellules)  
Angle de courbure :  $5.625^\circ$   
Champ magnétique : 0.8612 Tesla  
Nombre de famille : 1  
Courant Nominal : 714.993 A

$$E_{[\text{GeV}]} = 0.3 B_{[\text{T}]} \rho_{[\text{m}]}$$

$$B = 0.8 \text{ T} \quad \rho = 25 \text{ m}$$

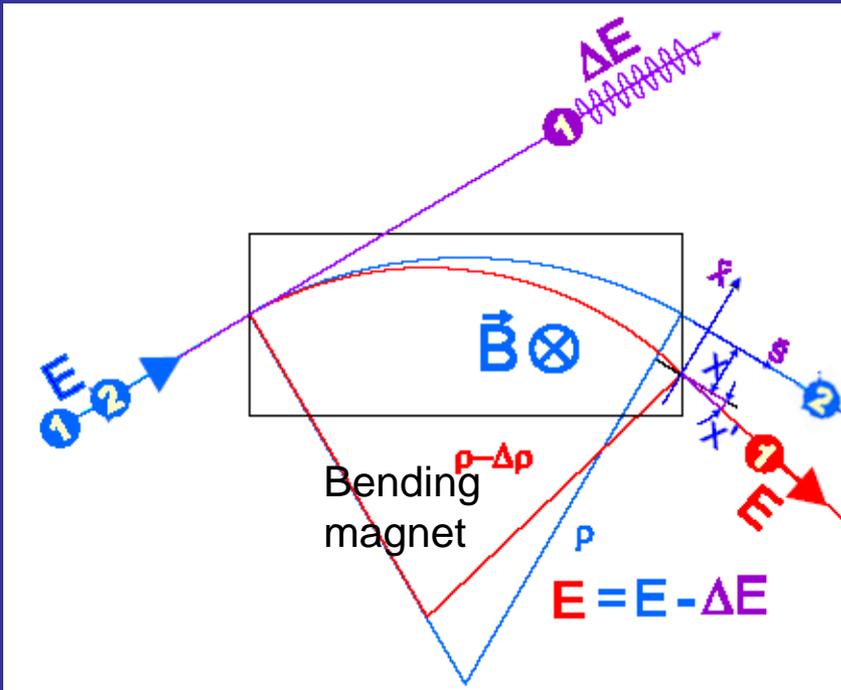
**Energy lost per turn of ring by one electron**

$$\Delta E_{[\text{keV}]} = 88.5 \frac{E_{[\text{GeV}]}}{\rho_{[\text{m}]}} = 4.6 \text{ MeV}$$

The power radiated around the length of the ring bending magnets by a current of 200 mA = 920 kW

## 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

### L'anneau de stockage: Les aimants



### Generation de l'emittance horizontale par radiation

Electron 2 émet  $\Delta E$  à la sortie du bending magnet.

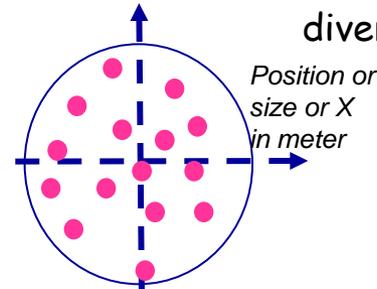
- même énergie à la sortie de l'aimant
- reste sur la trajectoire de référence

Electron 1 émet  $\Delta E$  à l'entrée du bending magnet.

- énergie plus basse en traversant l'aimant
- trajectoire plus grande

Une taille et une divergence sont créées (produit égal à l'emittance) ainsi que de la dispersion en énergie.

Angle or divergence or  $X'$  in radian



The beam emittance is the surface occupied by the beam in size and divergence.

$$\epsilon_{x[m \cdot \text{rad}]} = \frac{1}{\pi} \iint dx dx'$$

## 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

### *L'anneau de stockage: Les aimants*

256 quadrupôles répartis en 6 familles

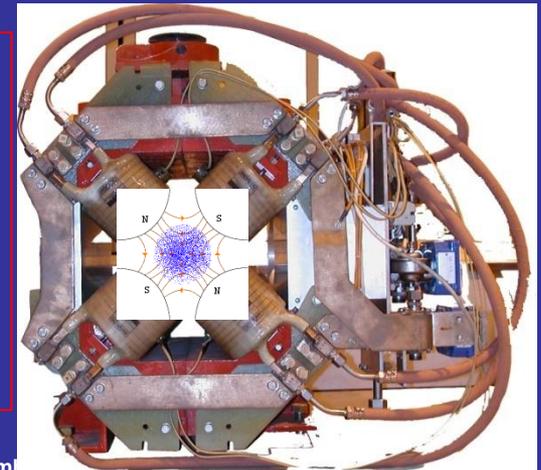


Nom	Nombre	Courant
QF2	32	216.730 A
QD3	32	-334.022 A
QD4	64	- 415.454 A
QF5	64	411.798 A
QD6	32	- 491.497 A
QF7	32	375.181 A

Les **quadrupôles** ont pour but de focaliser le faisceau d'électron afin de maintenir sa taille aussi petite que possible.

Les valeurs de quadrupôles sont également importantes pour :

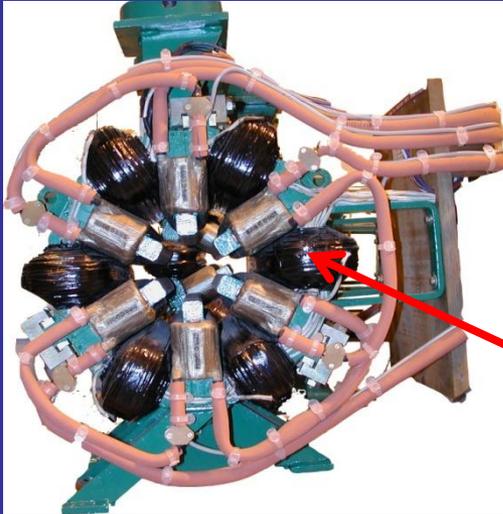
- les valeurs des tunes,
- la taille du faisceau,
- la vitesse d'injection,
- les résonances bêatroniques, etc



## 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

### L'anneau de stockage: Les aimants

224 sextupôles répartis en 7 familles



Nom	Nombre
S4	32
S6	32
S13	32
S20	32
S19	32
S22	32
S24	32

Les valeurs sont importantes pour:

- les chromaticités,
- les résonances bétatroniques
- l'ouverture dynamique,
- et donc sur le temps de vie du faisceau

6.01 GeV

5.99 GeV

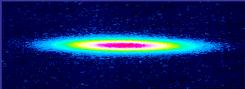
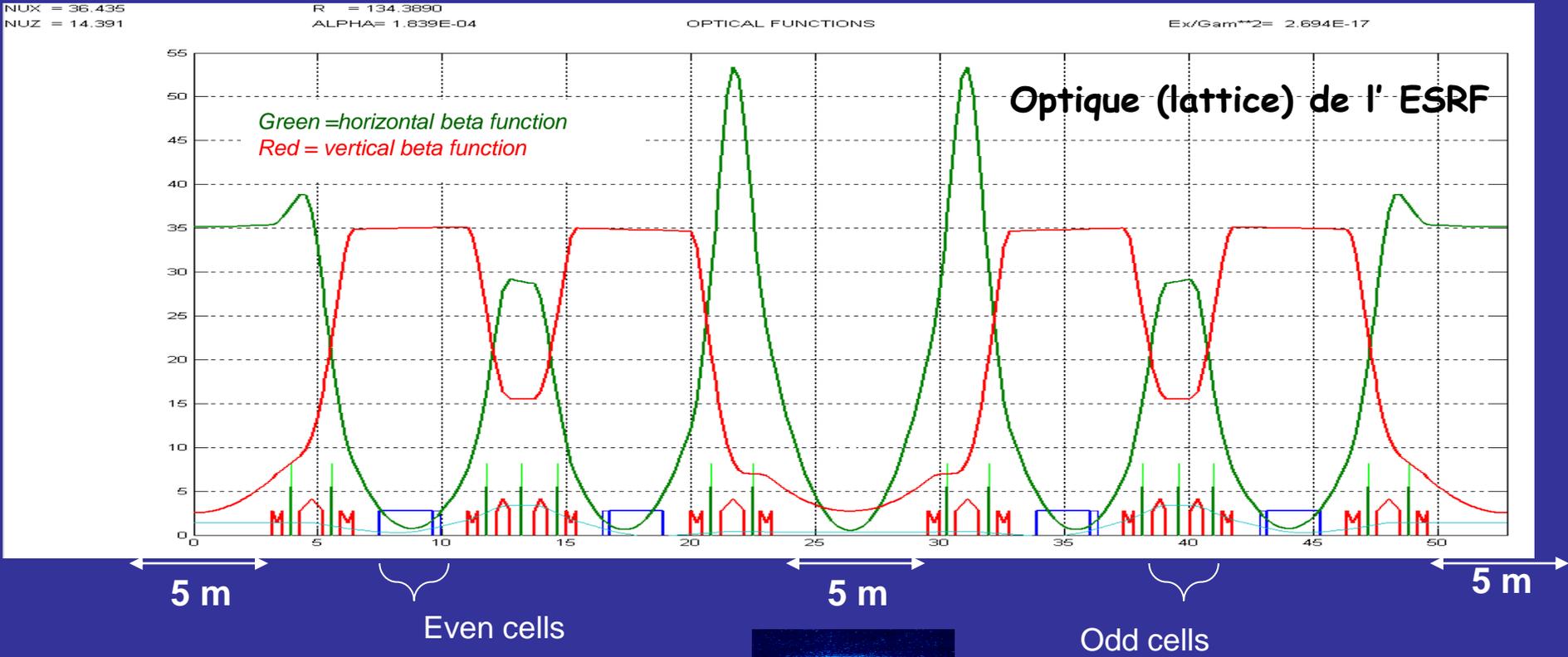
Un sextupôle agit comme:

- Un quadrupole focalisant pour les électrons de + haute énergie
- Un quadrupole defocalisant pour les électrons de + basse énergie

Et des aimants correcteurs  
(3 alimentations pour  
obtenir un champ V ou H)

# 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

## L'anneau de stockage: Les aimants



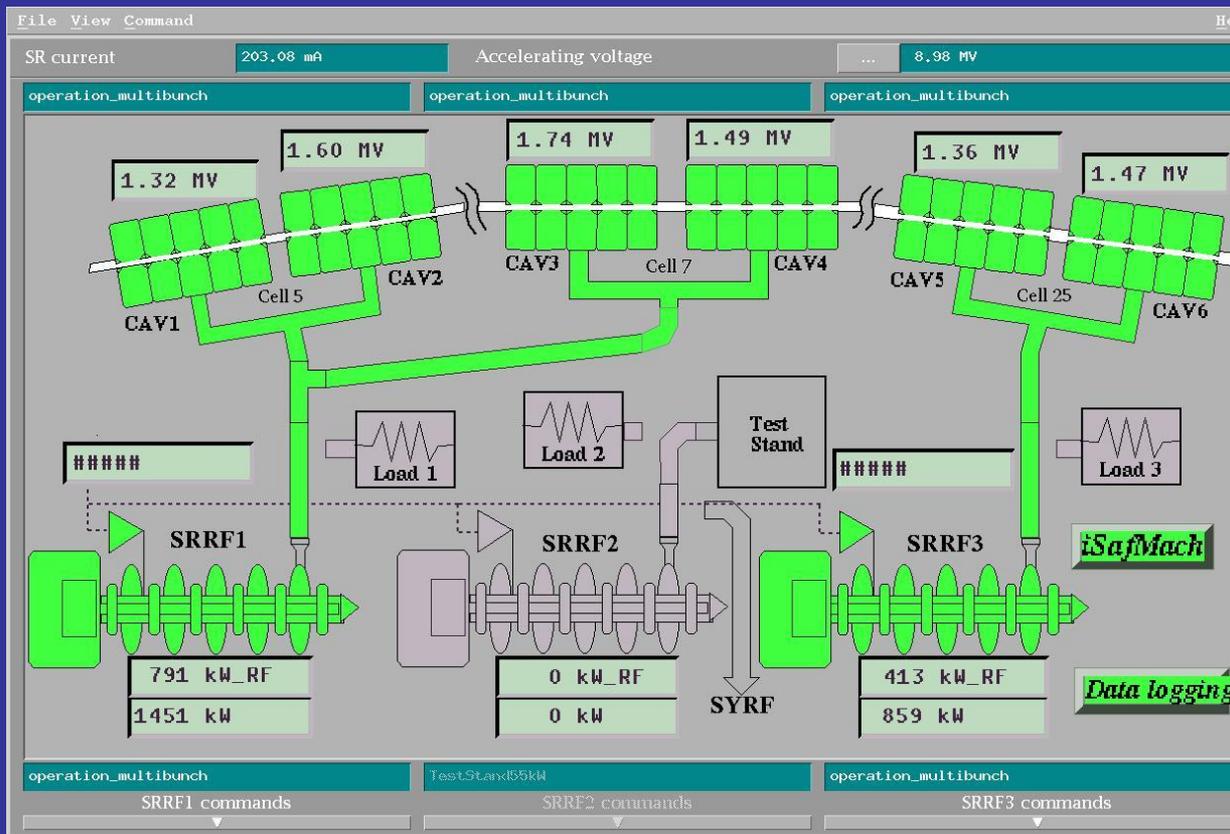
ESRF Horizontal emittance = 4 nm.rad  
ESRF vertical emittance = 5pm

L'emittance verticale est generee par un couplage avec l'emittance horizontale due aux erreurs magnetiques et aux defauts d'alignement

$\sigma_x = \sqrt{\epsilon_x \beta_x}$	$\sigma'_x = \sqrt{\epsilon_x / \beta_x}$
$\sigma_y = \sqrt{\epsilon_y \beta_y}$	$\sigma'_y = \sqrt{\epsilon_y / \beta_y}$
Taille	Divergence

## 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

### L'anneau de stockage: Le système Radio-Fréquence



Rôle: compenser l'énergie perdue tour par tour par les électrons, par suite de l'émission du rayonnement synchrotron, c-à-d, 4.8 MeV (avec les éléments d'insertion)

## 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

### L'anneau de stockage: Le système Radio-Fréquence



Pour une intensité faisceau de 200mA :

6 cavités actives (1 klystron alimente 4 cavités, le deuxième en alimente 2)

Tension accélératrice : 9 MV

Tension / cavité : 1.5 MV

Puissance totale klystrons : 1.3 MW (1MW pour faisceau+42 kW/cavité+20kW réfléchi)

- **macroscopique**: la fréquence RF impose le nombre maximum de bunches sur la circonférence.

$$h = \Delta \frac{F_{RF}}{F_{rev}} = 352 \text{ MHz} / 355 \text{ kHz} = 992$$

- **microscopique**: la fréquence RF impose le temps de révolution de la particule de référence. Pour un champ donné des aimants de déviation, elle définit la longueur de la trajectoire et donc, l'énergie de la particule de référence.

*A l'ESRF, un écart de 3.5 KHz ( $10^{-5}$ ) induit un déplacement horizontal du faisceau de 18 mm, visible sur les écrans (voir support écrit pour le détail de calcul)*

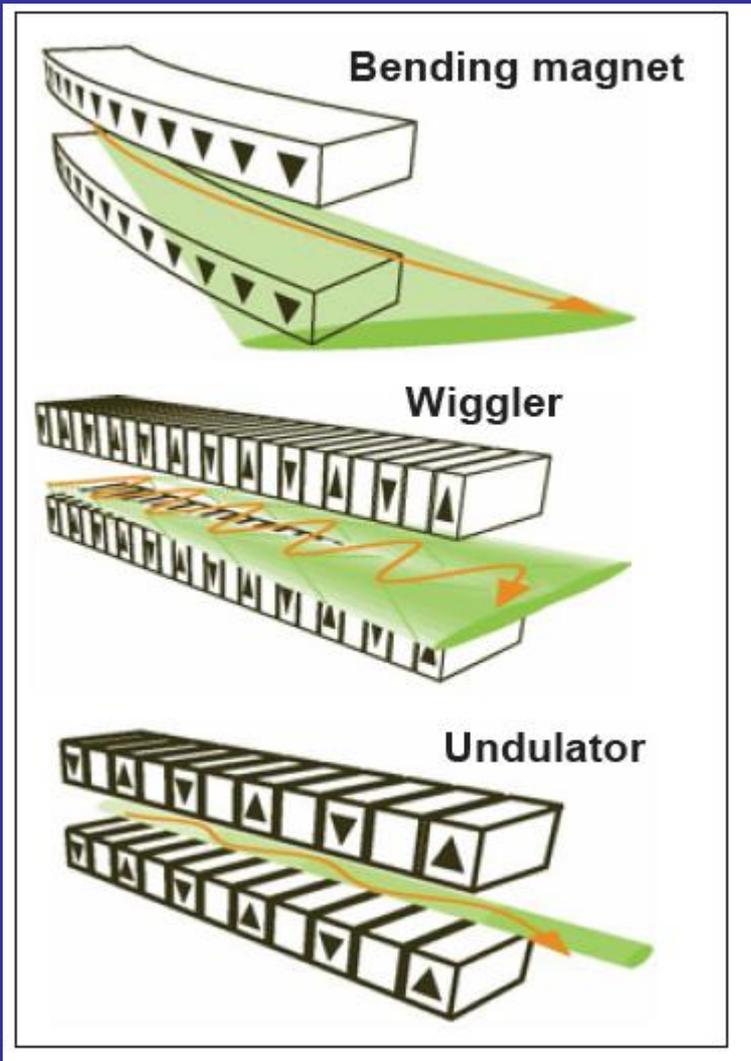
## 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

*L'anneau de stockage: Les éléments d'insertion*

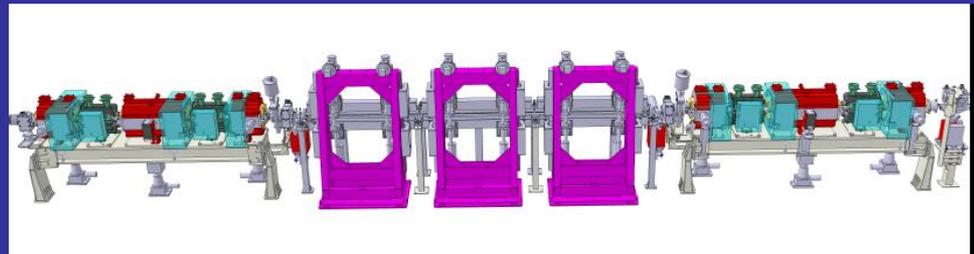


## 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

*L'anneau de stockage: Les éléments d'insertion*



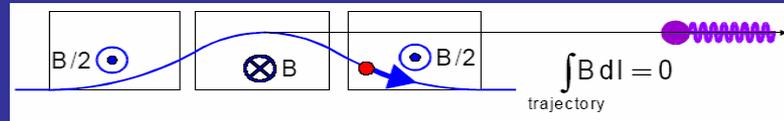
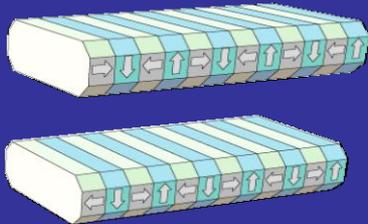
Rôle: produire des rayons X avec des propriétés spécifiques et différentes de ceux émis par les dipôles (bending magnets), par exemple, spectre en énergie variable, polarisation, brillance plus élevée.



## 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

### *L'anneau de stockage: Les éléments d'insertion*

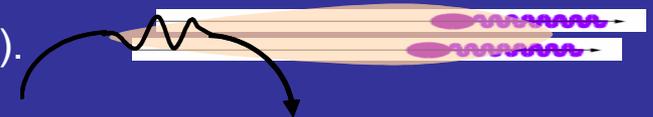
Généralement conçu « sur mesure » pour une ligne de lumière



Deux grandes familles:

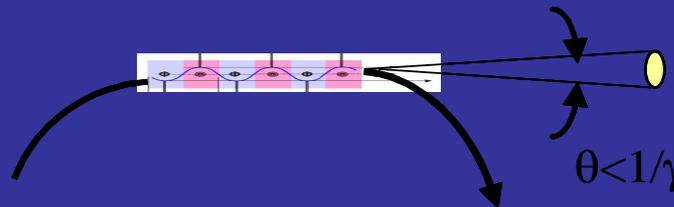
Wigglers : Petits nombres de périodes, champs magnétiques élevés.

Produisent des rayons X 'durs' ( $E > 10$  keV).



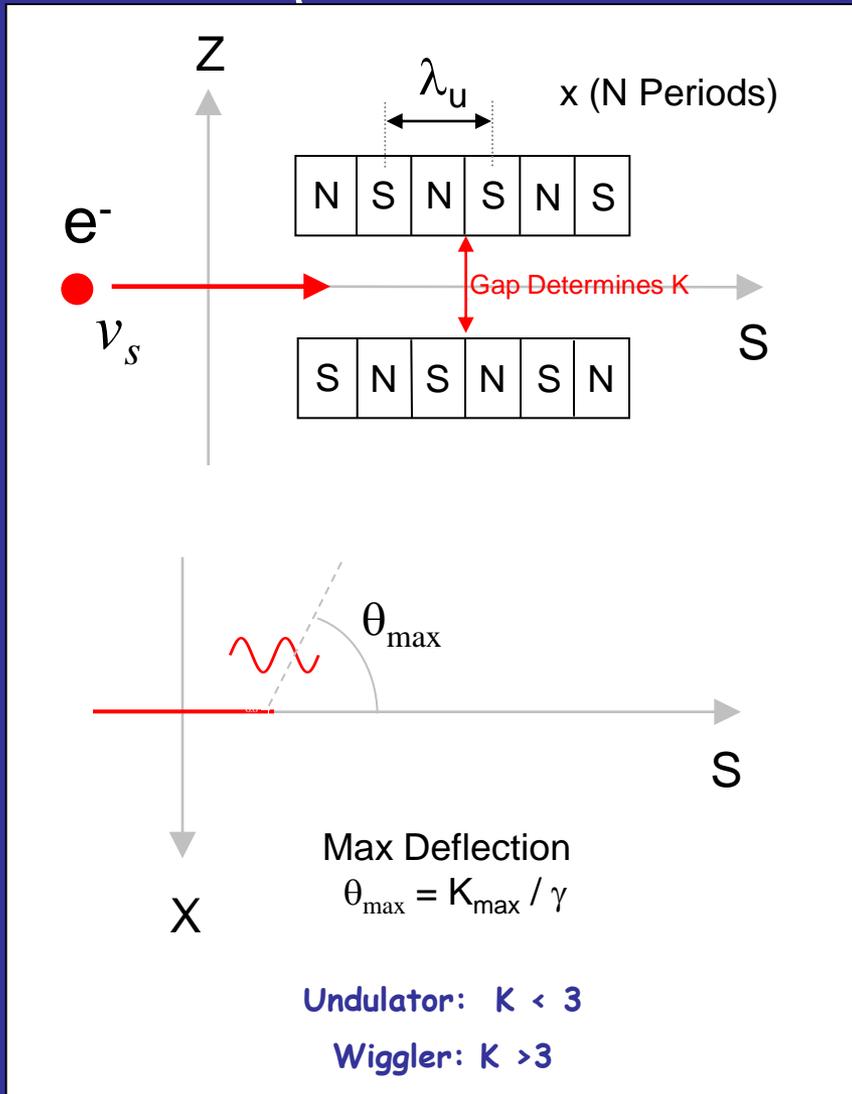
Onduleurs : Grand nombre de périodes.

Produisent un flux plus élevé par un principe d'interférence.



# 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

## L'anneau de stockage: Les éléments d'insertion



L'angle de déflexion est fonction du champ et de la périodicité des aimants

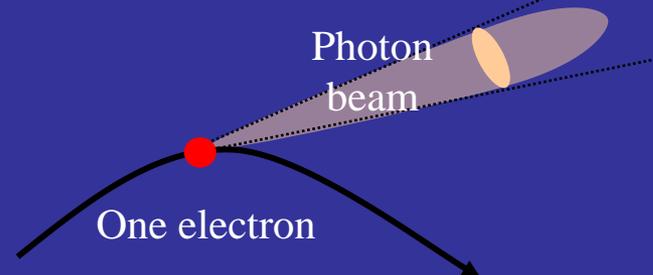
$$K = 0.0934 \lambda_u [\text{mm}] B_{\text{peak}} [\text{T}]$$

In case of undulator ,K ~ 1-2

*θ<sub>max</sub> has to be compared with 1/γ*

Narrow cone of natural emission angle 85μrad (0.005 degree) at 6 GeV

170μrad (0.01 degree) at 3 GeV



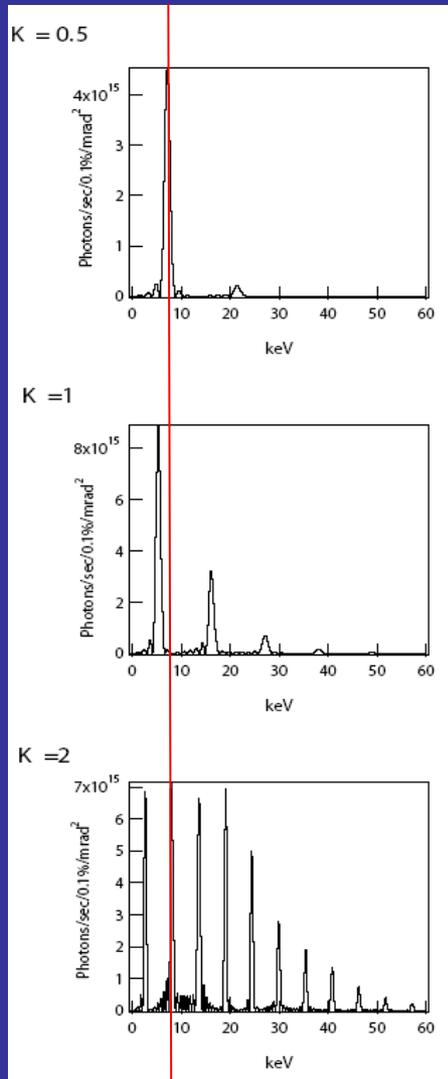
$$\Psi = \frac{1}{\gamma} = \frac{1}{E/E_0}$$

$$E_0 = 0.5 \text{ MeV}$$

$$E = 6 \text{ GeV}$$

## 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

### L'anneau de stockage: Les éléments d'insertion



L'angle de déflexion est fonction du champ et de la périodicité des aimants

$$K = 0.0934 \lambda_u [\text{mm}] B_{\text{peak}} [\text{T}]$$

In case of undulator,  $K \sim 1-2$

L'énergie du fondamental est donnée par:

$$\mathcal{E}_{[\text{keV}]} = 0.9.50 \frac{E^2_{[\text{GeV}]}}{\left(1 + \frac{K^2}{2}\right) \lambda_u [\text{cm}]}$$

*If  $K$  increases the energy fundamental peak of the undulator decreases.*

La puissance totale émise est:

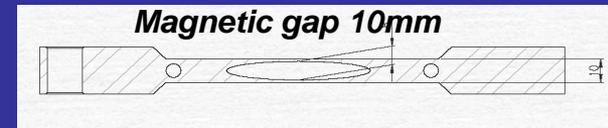
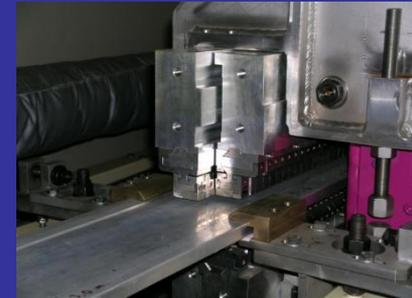
$$P_{[\text{kW}]} = 0.633 E_{\text{electron}} [\text{GeV}] B_{\text{peak}}^2 [\text{T}] * L_{[\text{m}]} * I_{[\text{A}]}$$

La conception d'un onduleur dépend fortement des besoins de la ligne.

## 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

*L'anneau de stockage: Les éléments d'insertion*

In-air Longueur = 1.64 m



In-vacuum

Longueur = 2.4 m



Power generated by one undulator (1.6 m) = 3kW

Available power = 250 kW

But less than 100 kW is used!!

2kW/mm<sup>2</sup> at 200 mA

8000 kW of Electrical power is needed to produce it!!

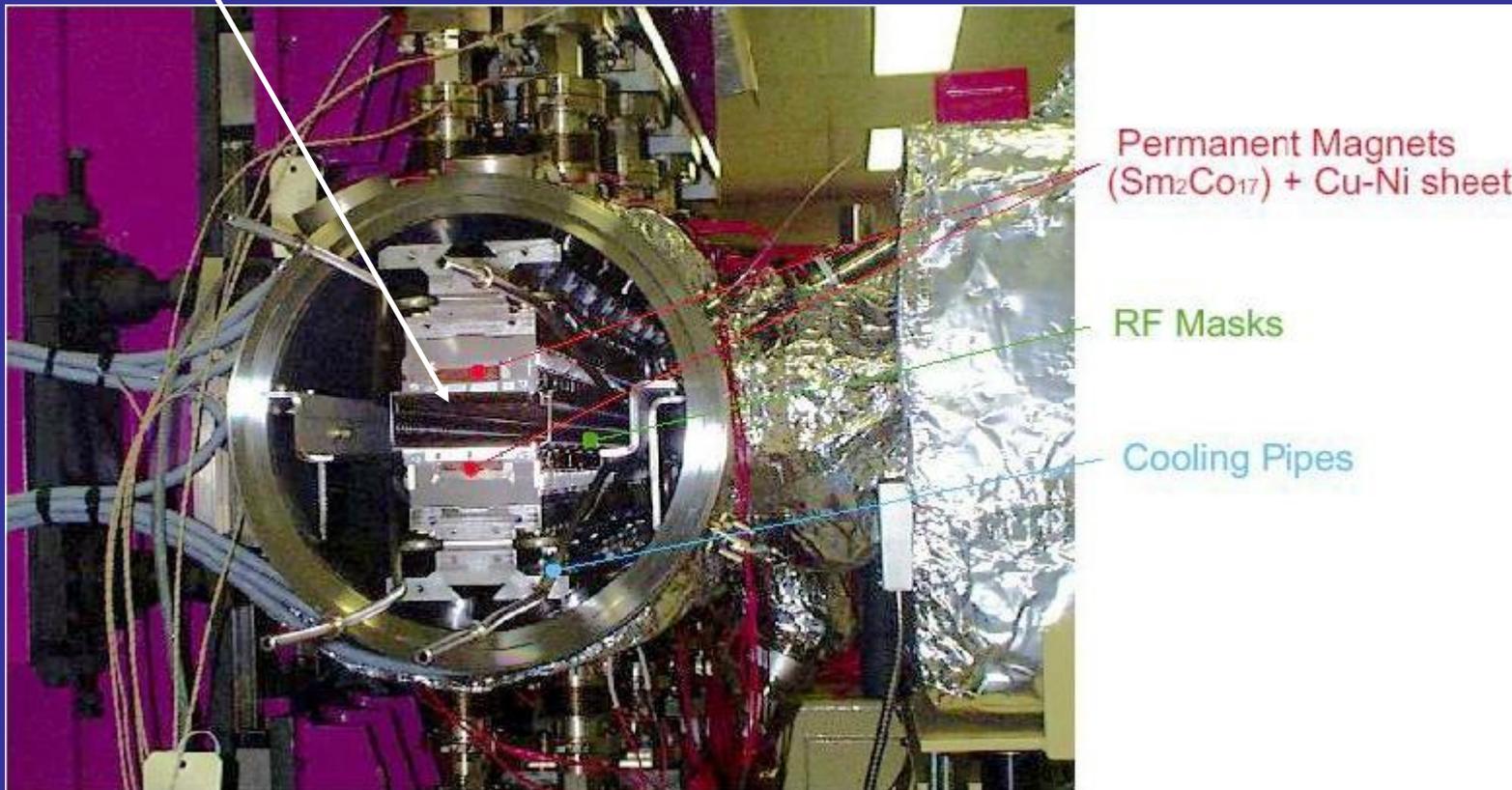
Efficiency: 2% !

*(2.4 m bride à bride, 2m assemblage magnétique)*

## 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

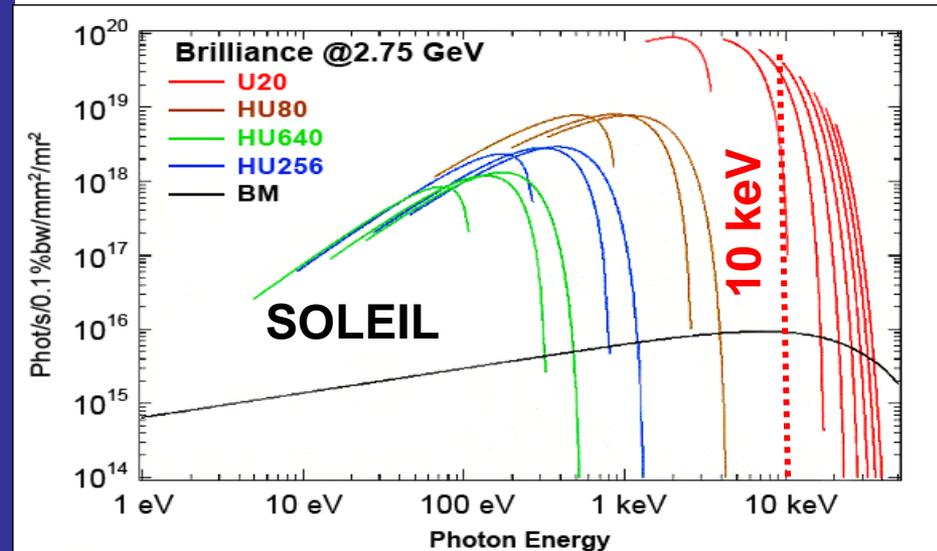
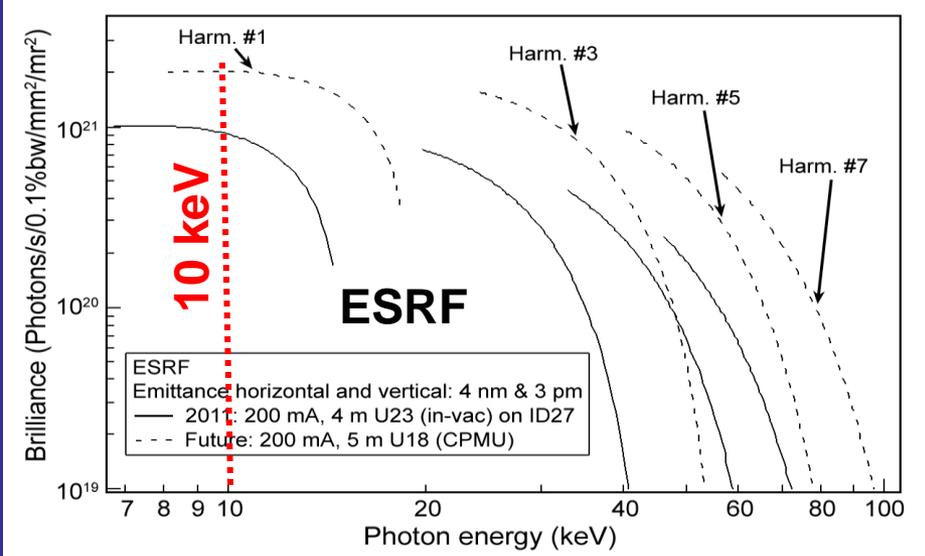
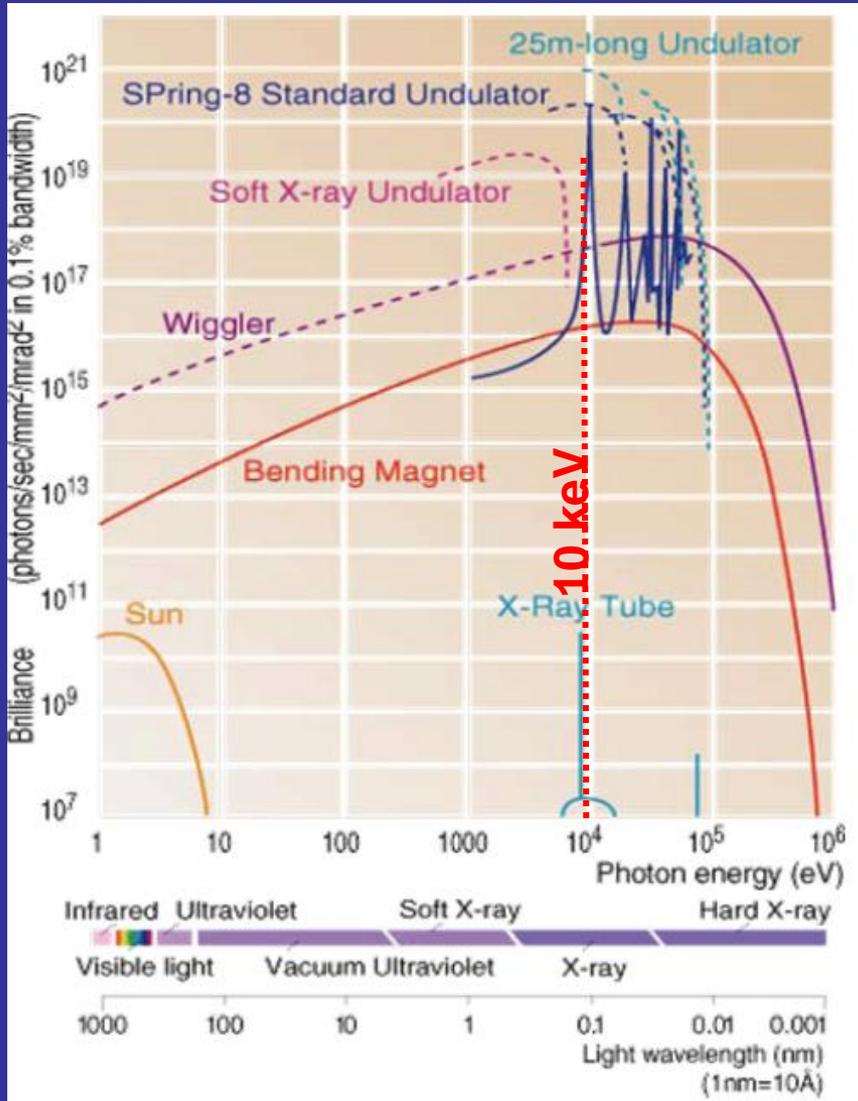
*L'anneau de stockage: Les éléments d'insertion*

Les machoires des onduleurs sous vide peuvent se fermer jusqu'à 5 mm



# 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

*L'anneau de stockage: Les éléments d'insertion*



## 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

### L'anneau de stockage: Les éléments d'insertion

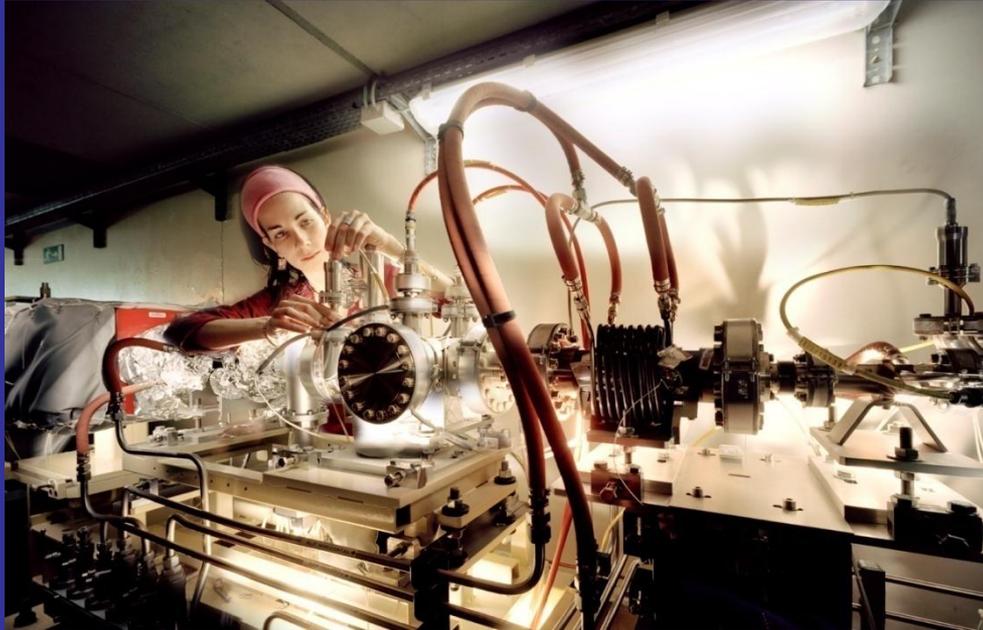
Photon Energy	keV	<b>12</b>	<i>Single electron photon beam emittance</i>		
Wavelength	nm	0.10			
Undulator length	m	1.6			
			<i>Emittance (nm)</i>	<i>Size( μm)</i>	<i>Divergence( μrad)</i>
			<b>0.016</b>	<b>6</b>	<b>3</b>

Electron energy	GeV	<b>6</b>	<i>Electron beam emittance</i>			
Coupling		0.2%				
			<i>Beta (m)</i>	<i>Emittance (nm)</i>	<i>Size( μm)</i>	<i>Divergence( μrad)</i>
"high beta section"	Horizontal	35.6	<b>4.0</b>	<b>377</b>	<b>11</b>	
	Vertical	2.5	<b>0.006</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	

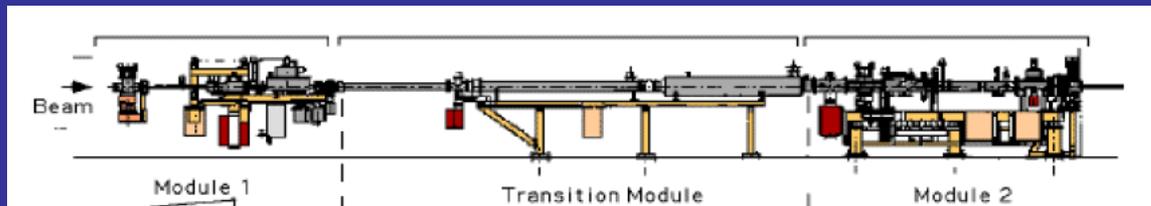
<i>User beam emittance</i>		<i>Emittance (nm)</i>	<i>Size( μm)</i>	<i>Divergence( μrad)</i>
	Horizontal	<b>4.1</b>	<b>377</b>	<b>11</b>
	Vertical	<b>0.023</b>	<b>7</b>	<b>3</b>

## 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

*L'anneau de stockage: Les départs de ligne*

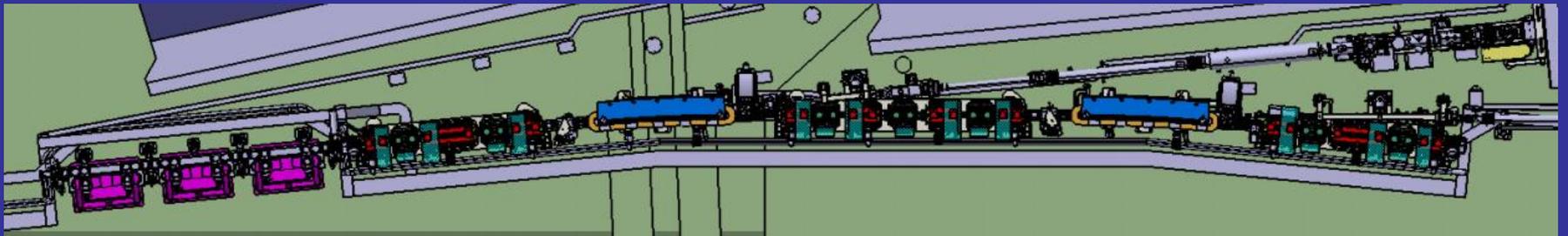
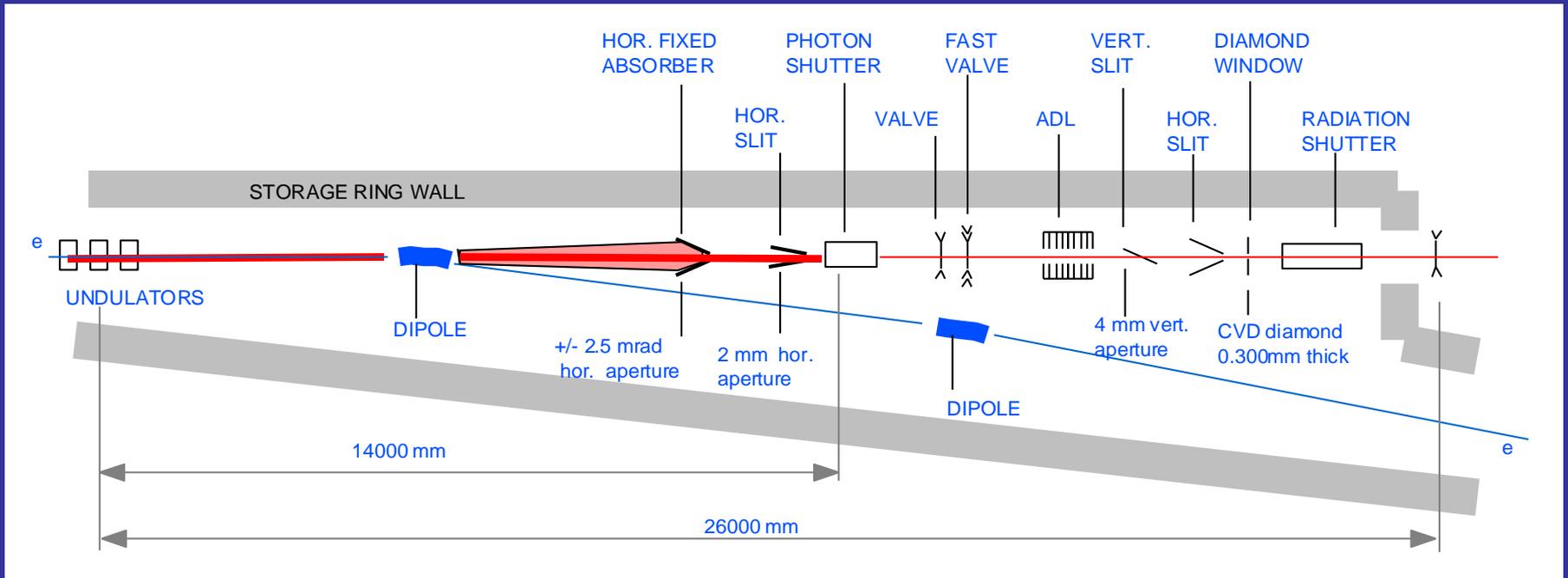


Rôle: acheminer les rayons X produits soit par les dipôles, soit par les éléments d'insertion, de l'anneau de stockage vers les lignes de lumière



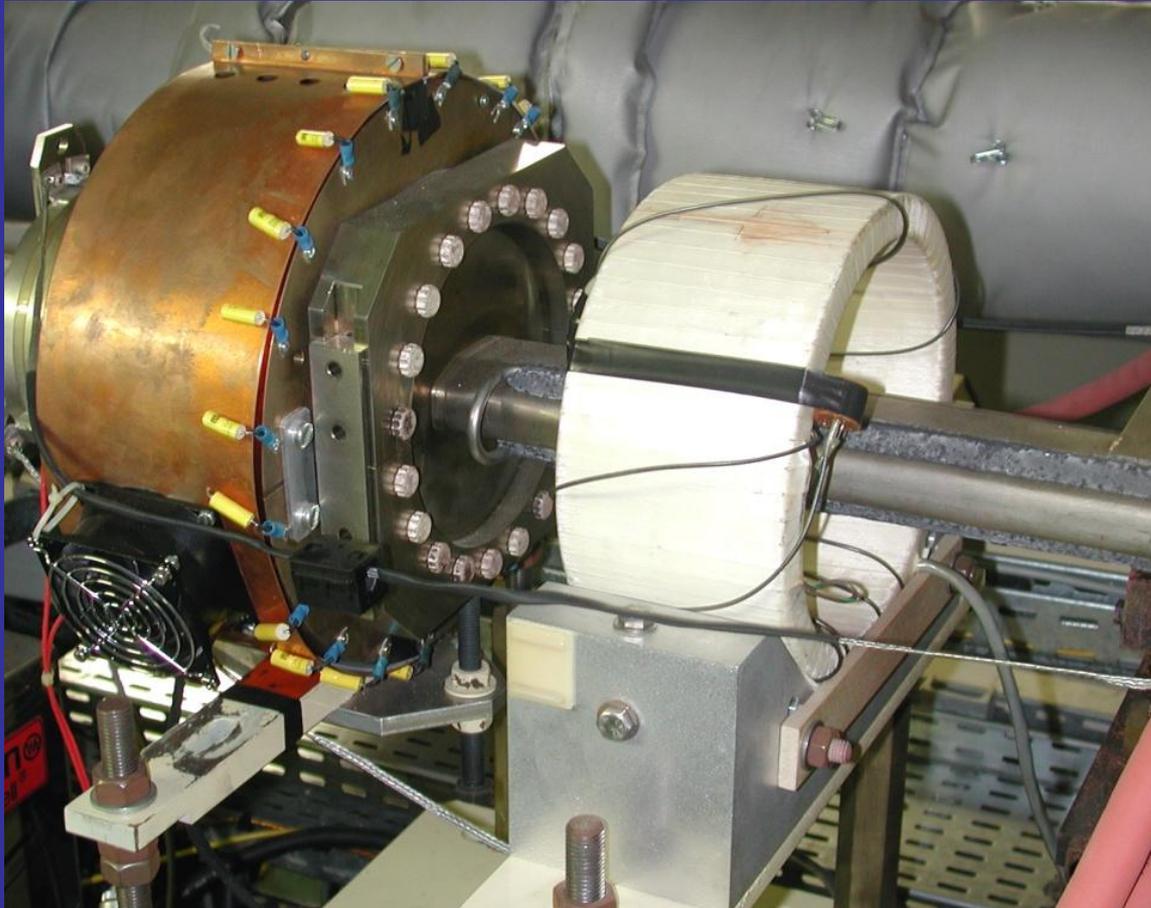
# 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

## L'anneau de stockage: Les départs de ligne



## 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

*L'anneau de stockage: Le diagnostic faisceau: le transformateur de courant*



Rôle: mesurer l'intensité du faisceau

## 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

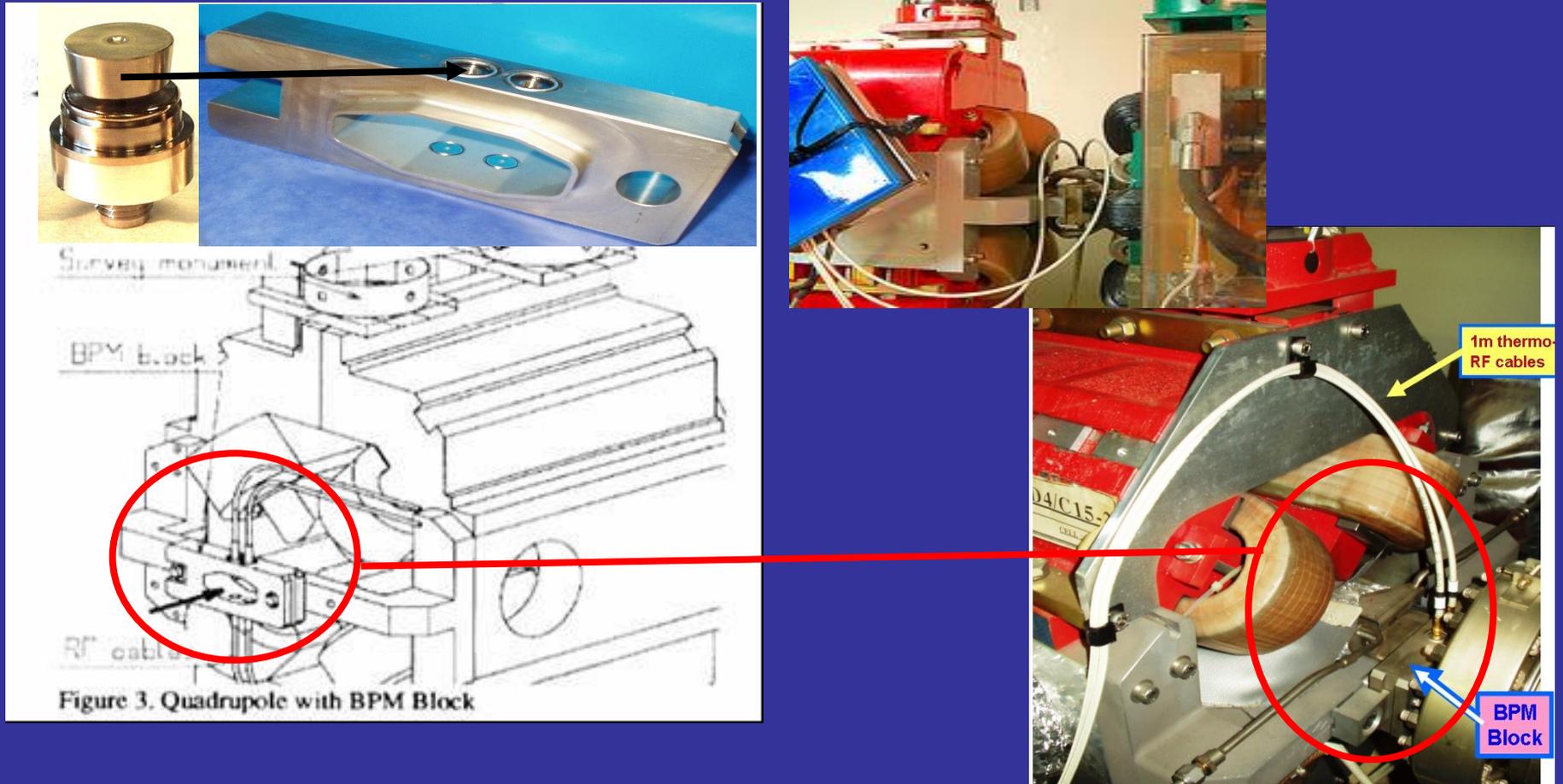
*L'anneau de stockage: Le diagnostic faisceau: le transformateur de courant*

2 grandes familles:

- les PCT (pour « Parametric Current Transformers »):
  - Conçus pour lire un courant jusque 300 mA avec une résolution de 2  $\mu$ A. Ils mesurent l'intensité TOTALE du faisceau circulant (temps d'intégration = 1 seconde).
- les FCT (pour « Fast Current Transformers ») :
  - Conçus pour mesurer l'intensité d'UN SEUL paquet d'électrons (ou plusieurs paquets si ceux-ci sont suffisamment rapprochés pour être contenu dans une fenêtre de quelques nanosecondes).

## 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

*L'anneau de stockage: Le diagnostic faisceau: Les BPMs*



Rôle: mesurer les positions centre de masse du faisceau d'électron dans les plans horizontal et vertical

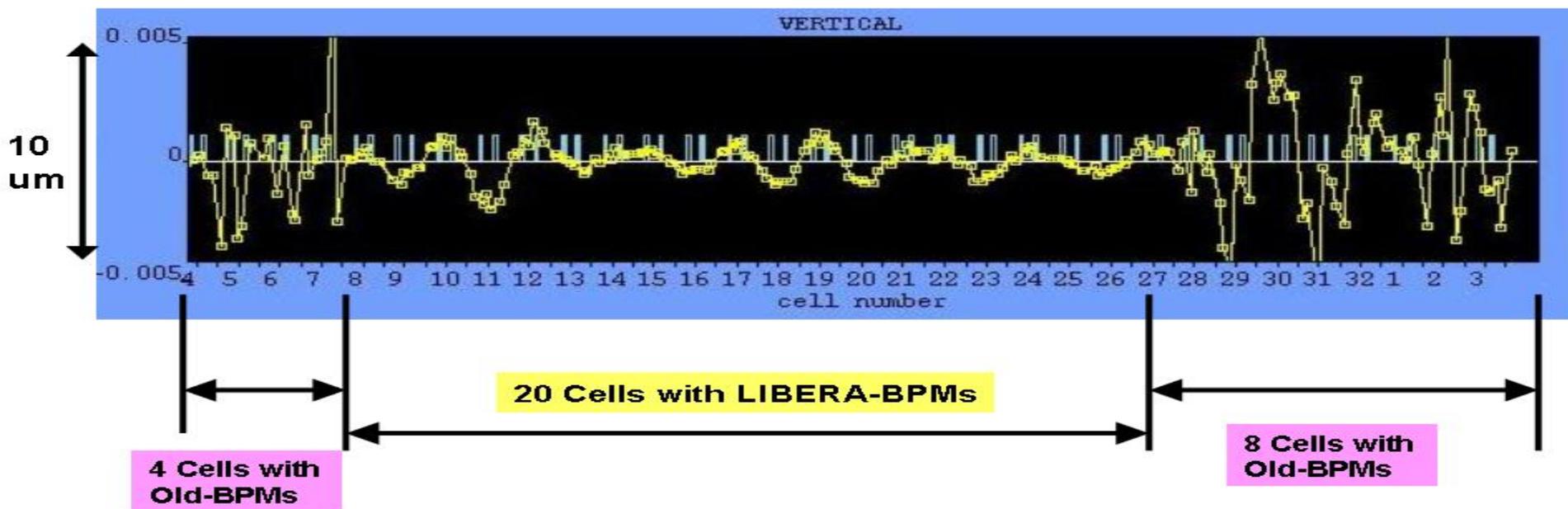
## 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

*L'anneau de stockage: Le diagnostic faisceau: Les BPMs*

224 BPMs, c-à-d, en moyenne un tous les 4 mètres.

Le principe: traitement des faibles signaux RF sur les 224 stations BPMs par des systèmes « Libera-Brillance »

La mesure: traite les 4 signaux RF en parallèle et de ce fait, permet de suivre le faisceau dès son entrée dans l'anneau de stockage.



## 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

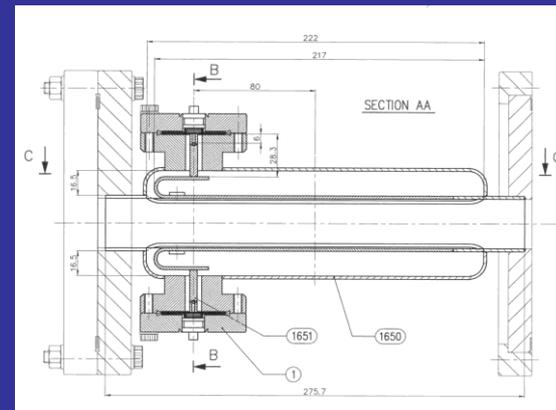
*L'anneau de stockage: Le diagnostic faisceau: le tune monitor*

Rôle: mesurer les les fréquences d'oscillations bétatroniques verticales et horizontales (les « tunes ») du faisceau circulant.

Le principe:

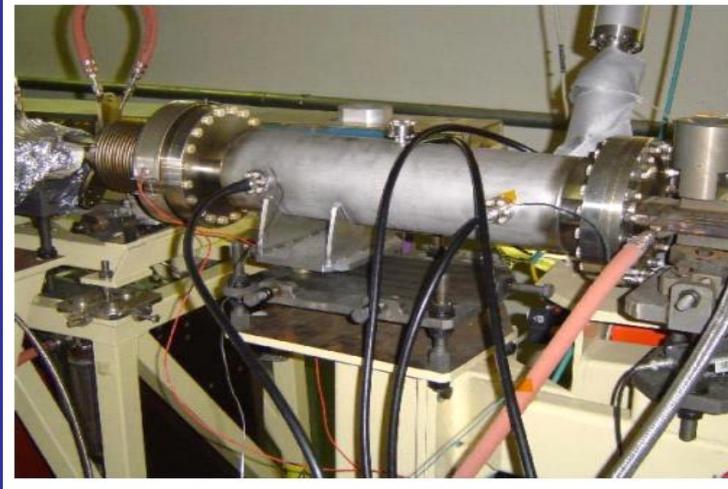
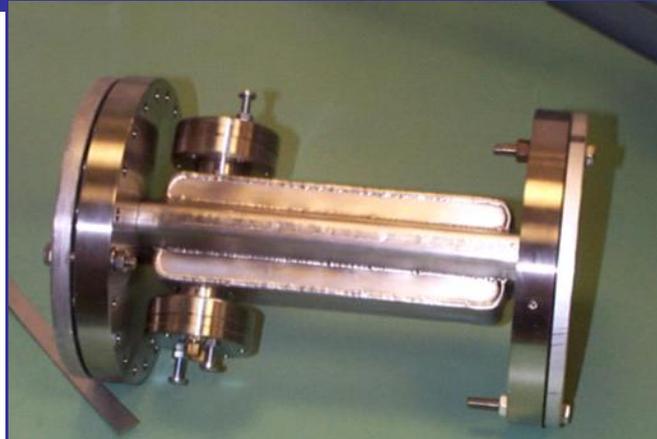
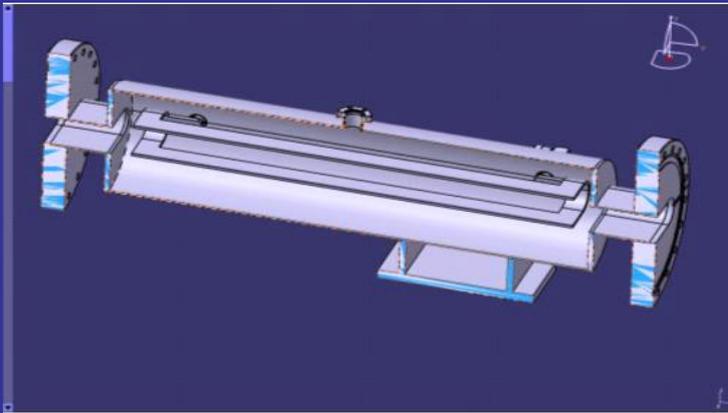
- Un excitateur excite le faisceau sur une bande de fréquence.
- Un pick-up récupère le signal qui sera traité par un analyseur de spectre.

*En pratique, tant l'excitation que le pick-up sont faits par 1 seule ligne à ruban (stripline) ou 2 lignes séparées, dans ce dernier cas, 1 ligne excite le faisceau tandis que l'autre capte le signal.*

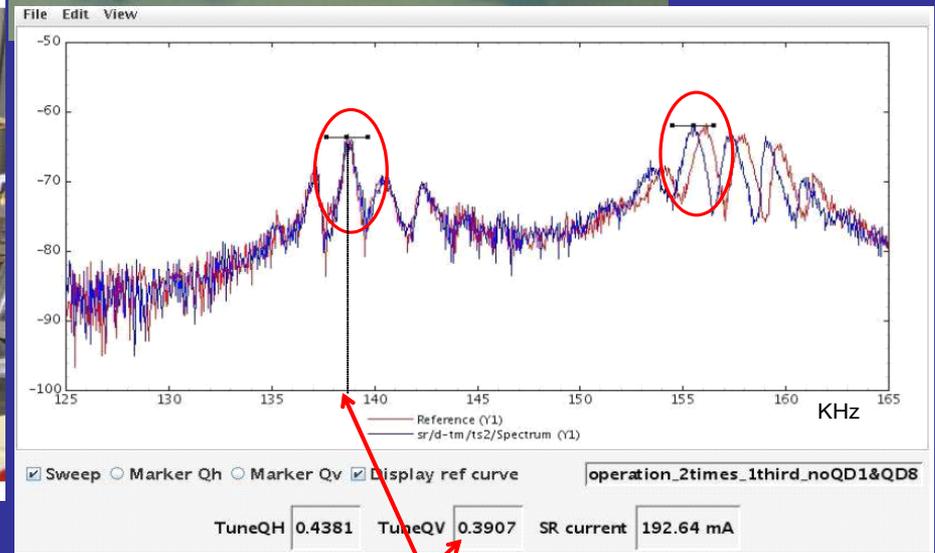


## 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

*L'anneau de stockage: Le diagnostic faisceau: le tune monitor*



*Cette stripline sert à la fois d'excitateur et de pick-up*

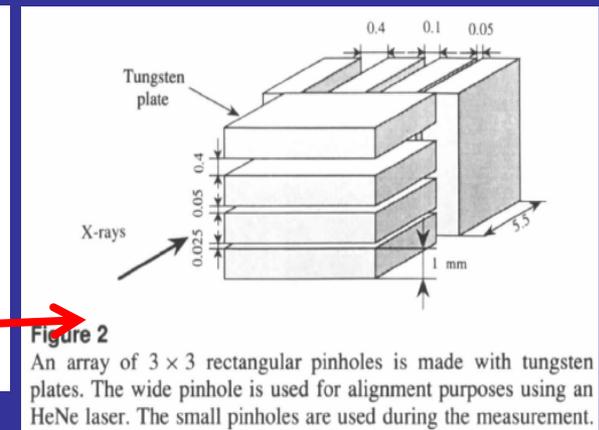
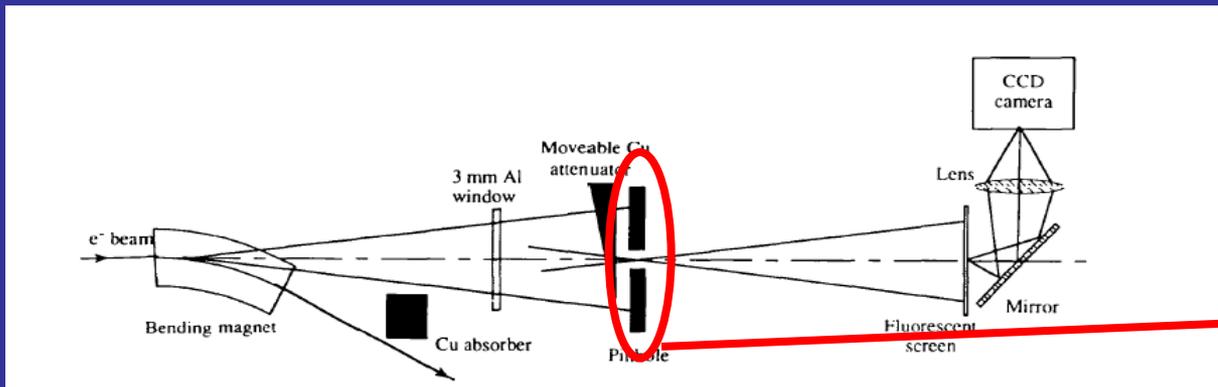


Nombre d'onde vertical

## 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

### *L'anneau de stockage: Le diagnostic faisceau: la pinhole caméra*

Rôle: permet de visualiser le profil transverse du faisceau d'électrons dans un aimant de déviation et d'en calculer son emittance



**Figure 2**

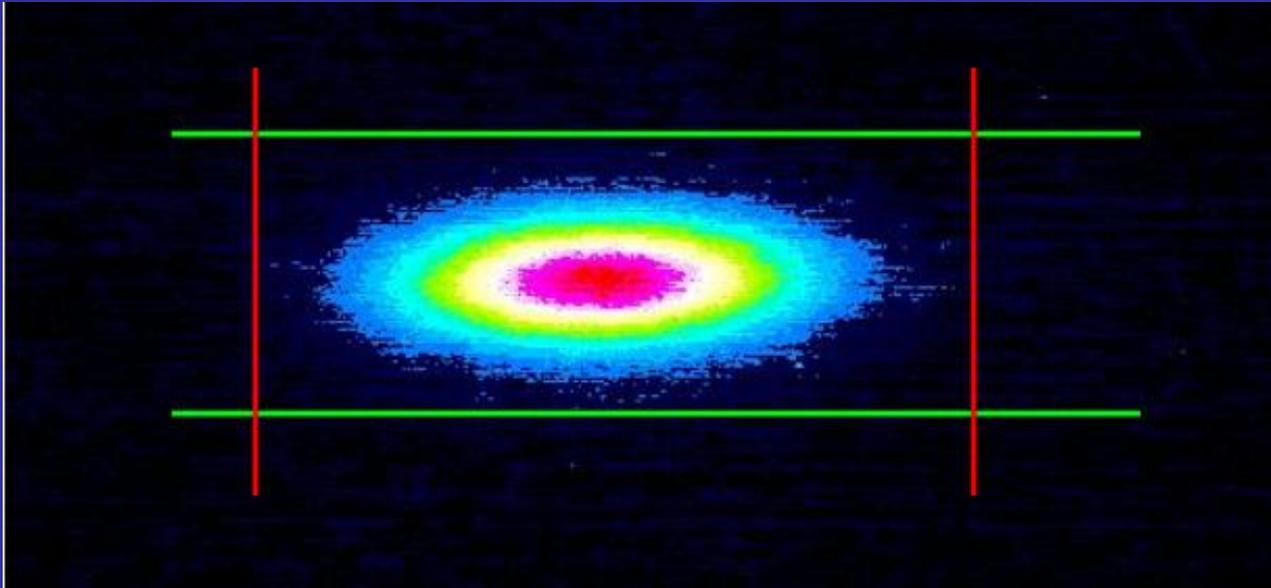
An array of  $3 \times 3$  rectangular pinholes is made with tungsten plates. The wide pinhole is used for alignment purposes using an HeNe laser. The small pinholes are used during the measurement.

### Principe:

- Une fenêtre aluminium sépare le haut vide de l'anneau de stockage du dispositif 'pinhole camera', qui lui, se trouve dans l'air.
- Un assemblage 'pinhole' se trouve à 4 mètres du point source et est constitué de barrettes de tungstène séparées par des cales d'épaisseur précises (de l'ordre de 25 et 100  $\mu\text{m}$ ), le tout monté sur une table motorisée avec possibilité de translation en X et Z ainsi qu'une rotation autour de X et Z.
- Une caméra CCD située à 16 mètres du point source recueille une image via un écran fluorescent.

## 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

*L'anneau de stockage: Le diagnostic faisceau: la pinhole caméra*



Cette image qui subit peu d'aberration est aussi une aide pour:

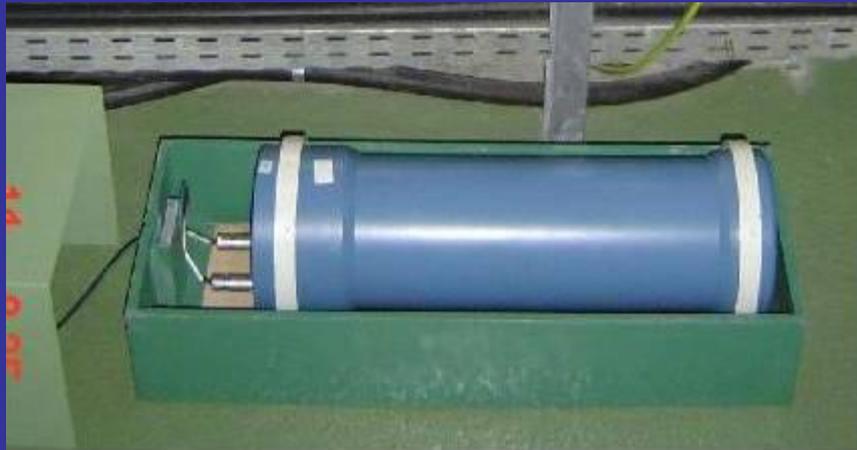
- stabilité de la position (problème d'oscillation avec un steerer ?)
- instabilités verticales / horizontales (manque de chromaticité)
- présences de modes d'ordres supérieurs dans les cavités RF

## 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

*L'anneau de stockage: Le diagnostic faisceau: les détecteurs de perte*

Les détecteurs de radiation « Unidos »:

chambres à ionisation localisées dans des coffrets blindés de 10 mm de plomb et placées à même le sol du côté extérieur de l'accélérateur, au début de chaque dipôle. Le détecteur est un gaz sous pression et ionisé par le passage de particules à hautes énergies (électrons / photons).



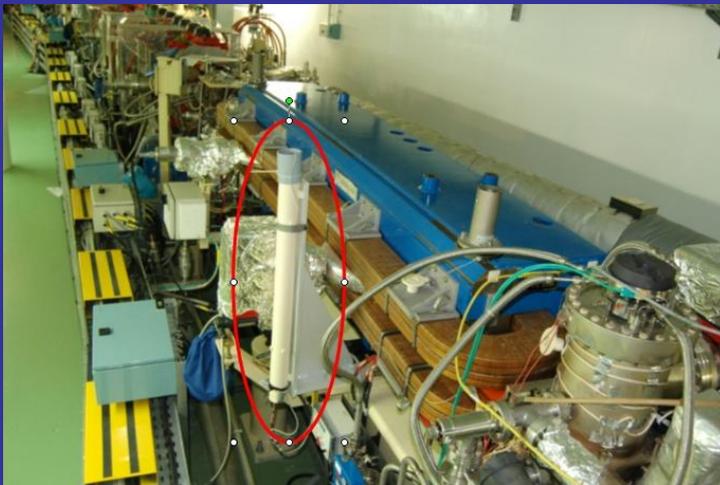
But du blindage: d'éliminer la composante 'rayonnement synchrotron'. Le gaz ionisé va créer un courant de fuite entre 2 plaques à haute tension. L'avantage de ces détecteurs est leur grande linéarité (pas d'effet d'avalanche). Par contre, il faudra détecter des courants de l'ordre du ... femtoA, processus coûteux et lent !

## 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

*L'anneau de stockage: Le diagnostic faisceau: les détecteurs de perte*

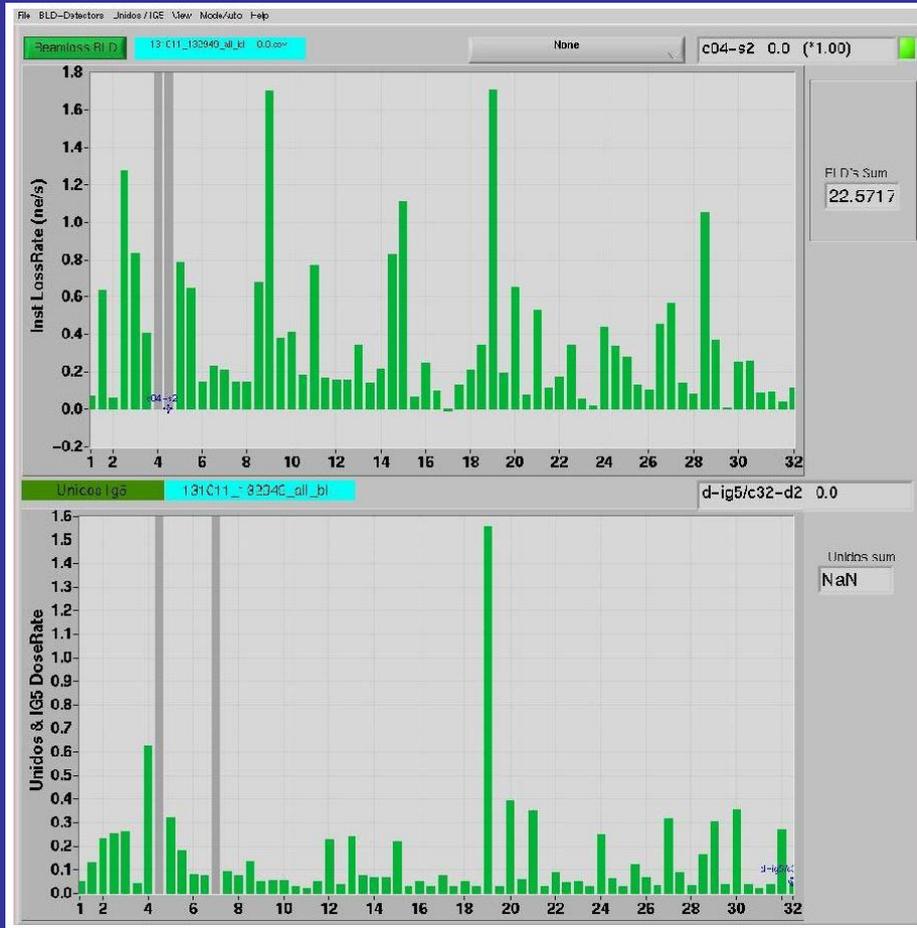
Les 'slow beam loss detectors

- Protégés par 1 cm de plomb afin d'éliminer la composante 'rayonnement synchrotron'.
- Situés sur le coté intérieur de l'accélérateur à hauteur de l'axe faisceau et au bout de chaque dipole.
- Constitués d'un cylindre de polymère photoémisif (25 mm de diamètre / 600 mm de long). La lumière émise est recueillie par un photomultiplicateur.
- Utiles pour localiser les pertes résultant d'un effet de 'raboitage' (scraping) du faisceau sur les chambres à vides et/ou dues à un vide localement médiocre.



## 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

*L'anneau de stockage: Le diagnostic faisceau: les détecteurs de perte*



Les diagnostics de perte sont des outils importants pour:

- Le réglage de la machine
- La détection des désalignements
- La détection précoce des fuites

## 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

### *L'anneau de stockage: Le système de vide*

Objectif: contrôler et maintenir le vide dans l'anneau de stockage à un niveau aussi bas que possible:

$10^{-10}$  mbar sans faisceau (pression statique)

$10^{-9}$  mbar avec faisceau (pression dynamique)



## 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

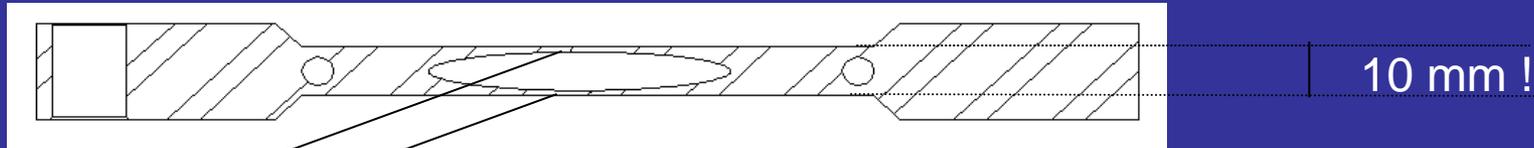
### *L'anneau de stockage: Le système de vide*

- Ce niveau de vide est assuré par les pompes ioniques
- Le contrôle de la pression est assuré par des jauges de type Penning.
- L'anneau de stockage est divisé en 32 zones de vide, chacune pouvant être isolée par des vannes contrôlables à distance.
- Grâce à des thermocouples, la température est contrôlée en des centaines de points sensibles (soufflets, crotch absorbers, etc).

## 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

*L'anneau de stockage: Le système de vide*

Longueur = 5 mètres et 6 mètres



8 mm !

10 mm !

- Aluminium extrudé
- L'intérieur de ces chambres est couvert d'une fine couche de NEG (Non Evaporable Getter) constitué d'un alliage de Titane, Zirconium, Vanadium. La particularité de cet alliage est de piéger chimiquement certaines molécules (surtout le CO et CO<sub>2</sub>) et en simplifiant, on peut donc dire que ces matériaux se comportent comme une pompe à vide.

## 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

*L'Opération des accélérateurs au jour le jour consiste à contrôler, et faire fonctionner ces 3 accélérateurs selon des contraintes imposées pour remplir les objectifs de l'ESRF.*

## 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

*L'information en salle de contrôle*

Monitoring courant,  
emittances, durée de vie

Monitoring des  
pertes

Profil transverse

Synoptique principal

Filling pattern



- Pilotage et contrôle des sous équipements des accélérateurs
- Réinjections
- Contrôles des paramètres faisceau
- Analyses de pannes ou des fautes

## 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

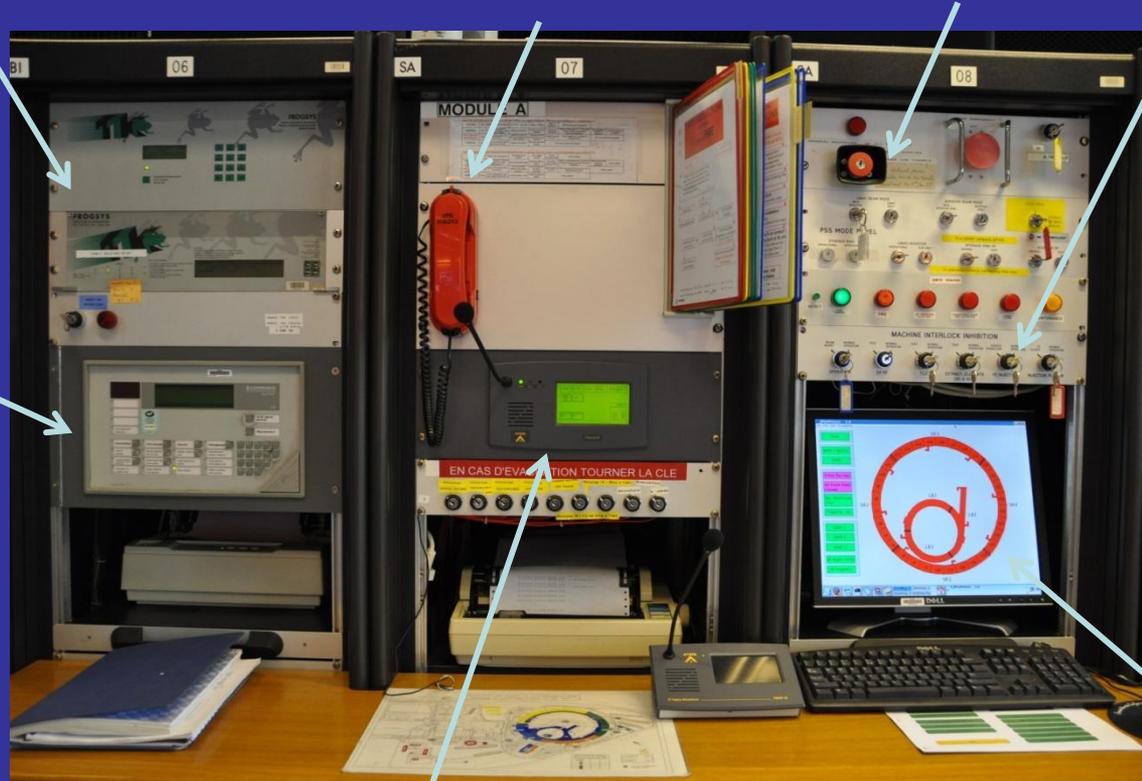
*L'information en salle de contrôle*

Alarmes fuite  
d'eau

Téléphone  
rouge

Arrêt d'urgence général et clés  
de configuration opération

Alarmes  
incendie



La sécurité  
humaine et matériel est un  
élément essentiel de la  
conduite des accélérateurs

Diffusion d'ordres  
(évacuations,..)

Système de sécurité  
personnels pour les  
accès tunnels

## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

- INTRODUCTION
- Une TRÈS BRÈVE histoire des accélérateurs jusqu'à l'ESRF
- L'ESRF AUJOURD'HUI
- LES ACCÉLÉRATEURS DE L'ESRF
- FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE
- FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE QUOTIDIENNE
- CONCLUSIONS et REMERCIEMENTS

## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

### *Objectif du chapitre*

#### OBJECTIF:

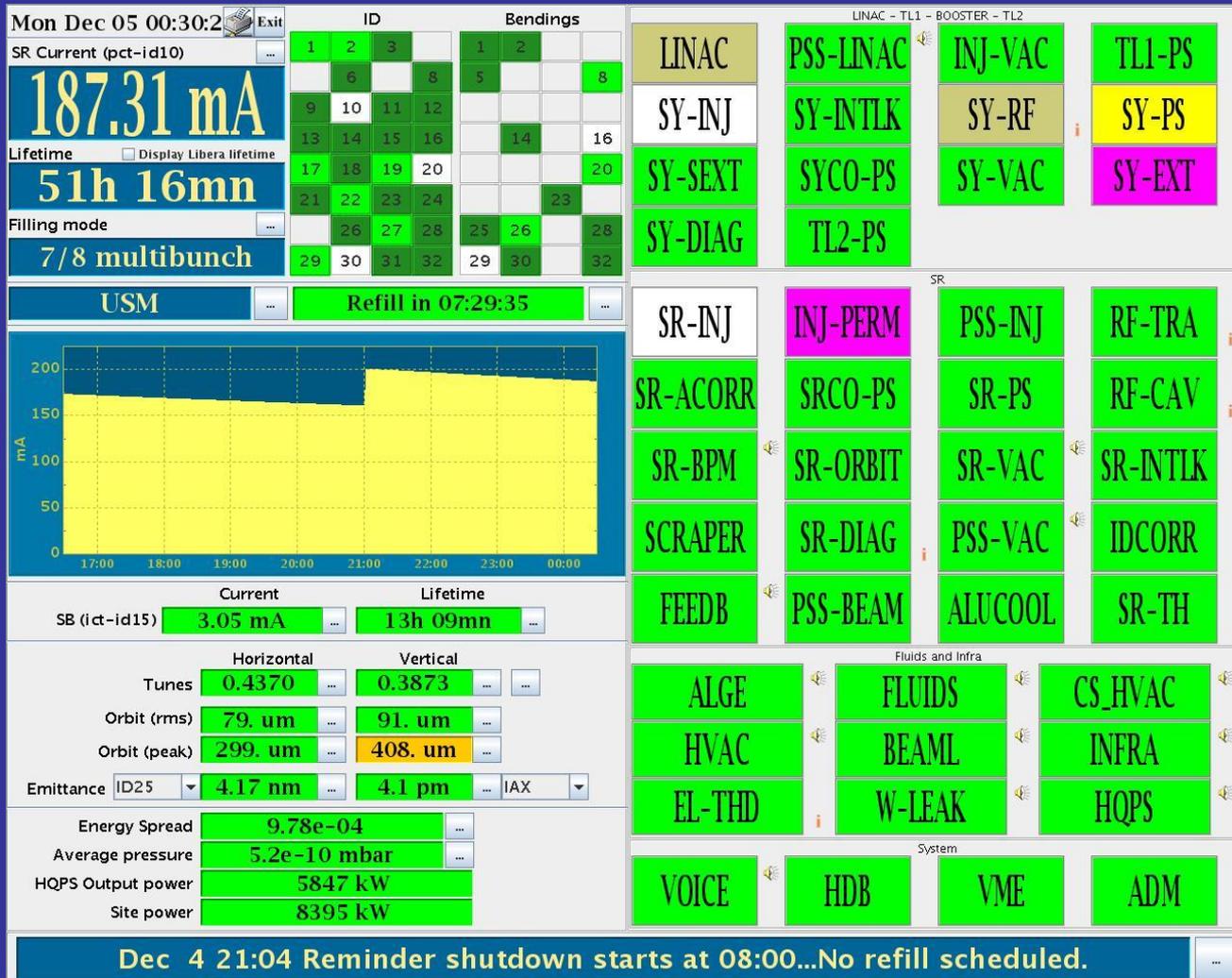
Démontrer que l'opération au « QUOTIDIEN » commence par une approche globale de plus long terme.

Ces tâches de fond contribueront à satisfaire la contrainte N°1 demandée par les utilisateurs:

**LES ACCELERATEURS DOIVENT ETRE FIABLES !**

# 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

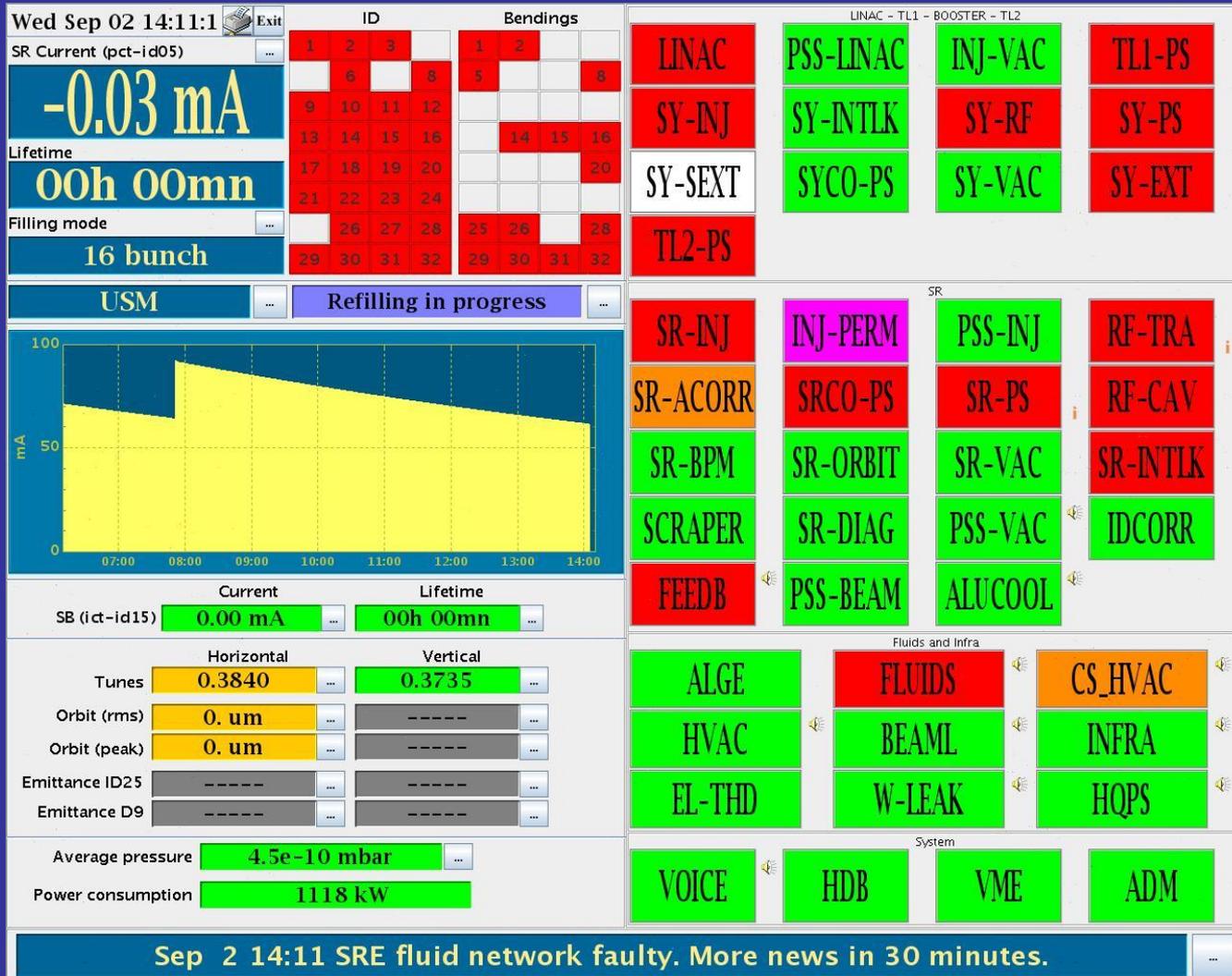
*L'information en salle de contrôle*



Quand tout va bien!!

# 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

*L'information en salle de contrôle*



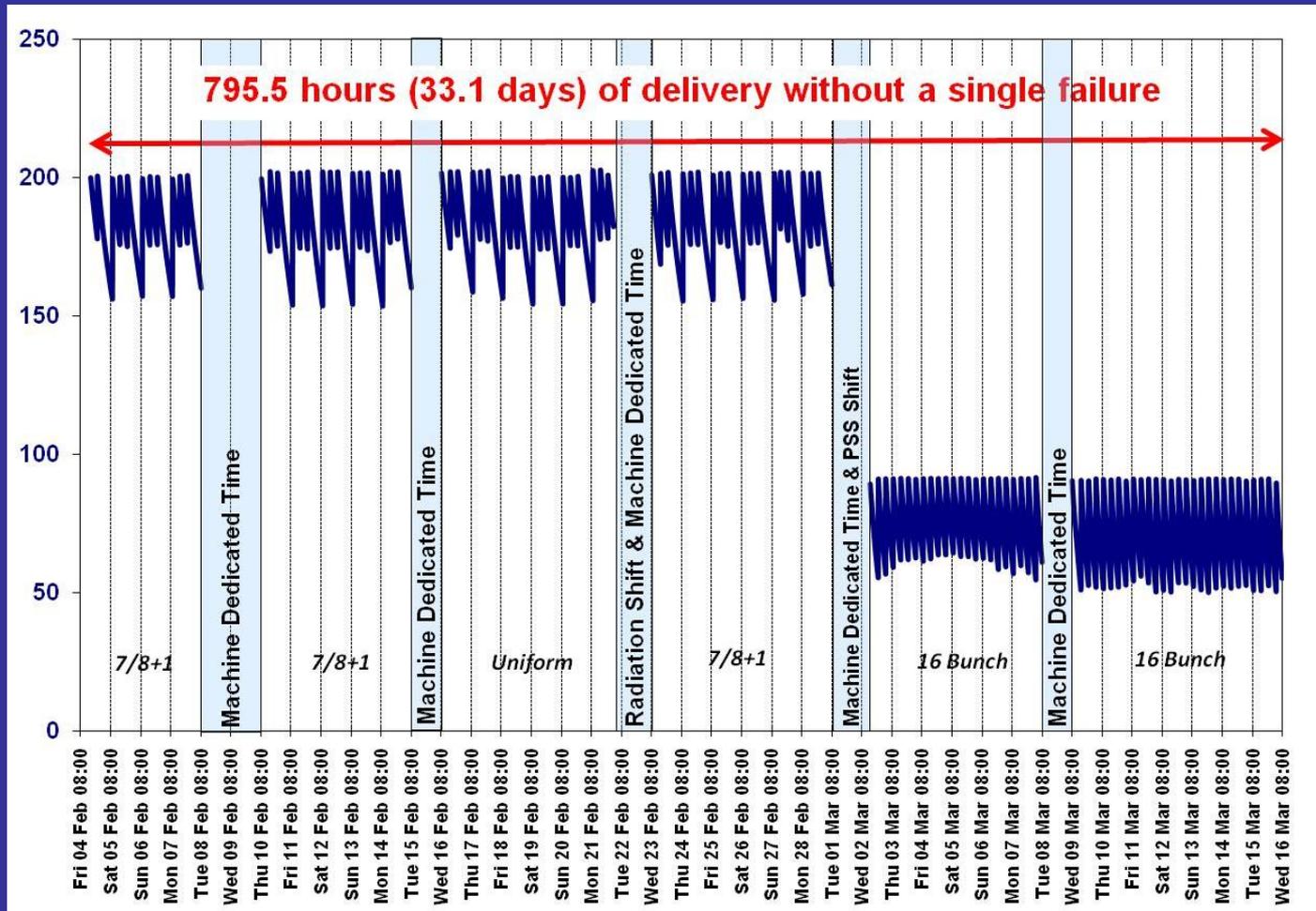
En cas de  
faute !!

# 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

Différentes configuration de pannes

Six semaines de rêve en 2011

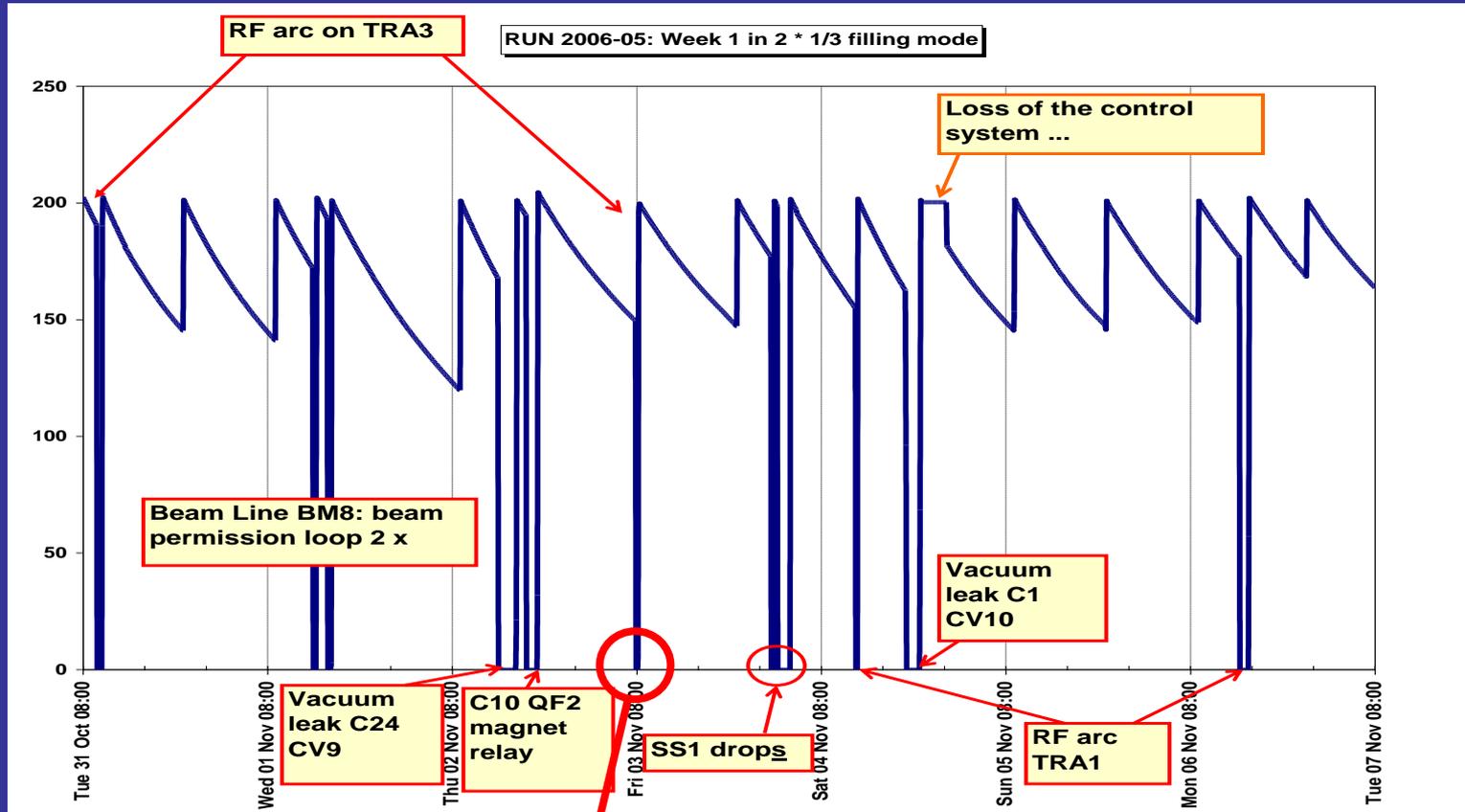
Et un Record de disponibilité sans panne



## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

*Différentes configuration de pannes*

La semaine d'horreur: 11 pannes en 7 jours. Temps moyen d'une panne: 60 minutes

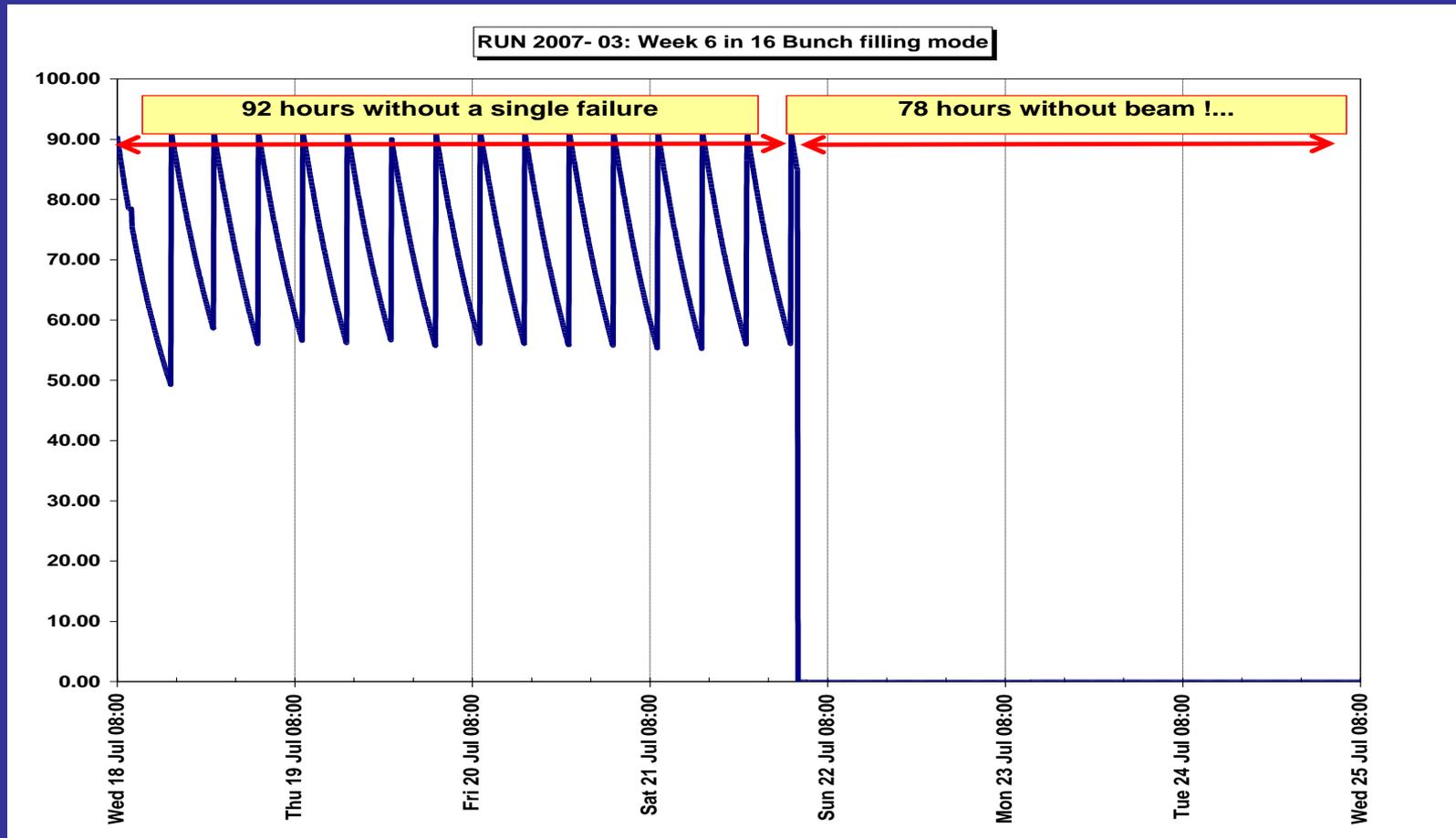


Pour beaucoup d'utilisateurs: 15 minutes perdue sur l'accélérateur = 1 heure perdue sur la ligne de lumière (instabilité monochromateur suite à choc thermique)

## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

*Différentes configuration de pannes*

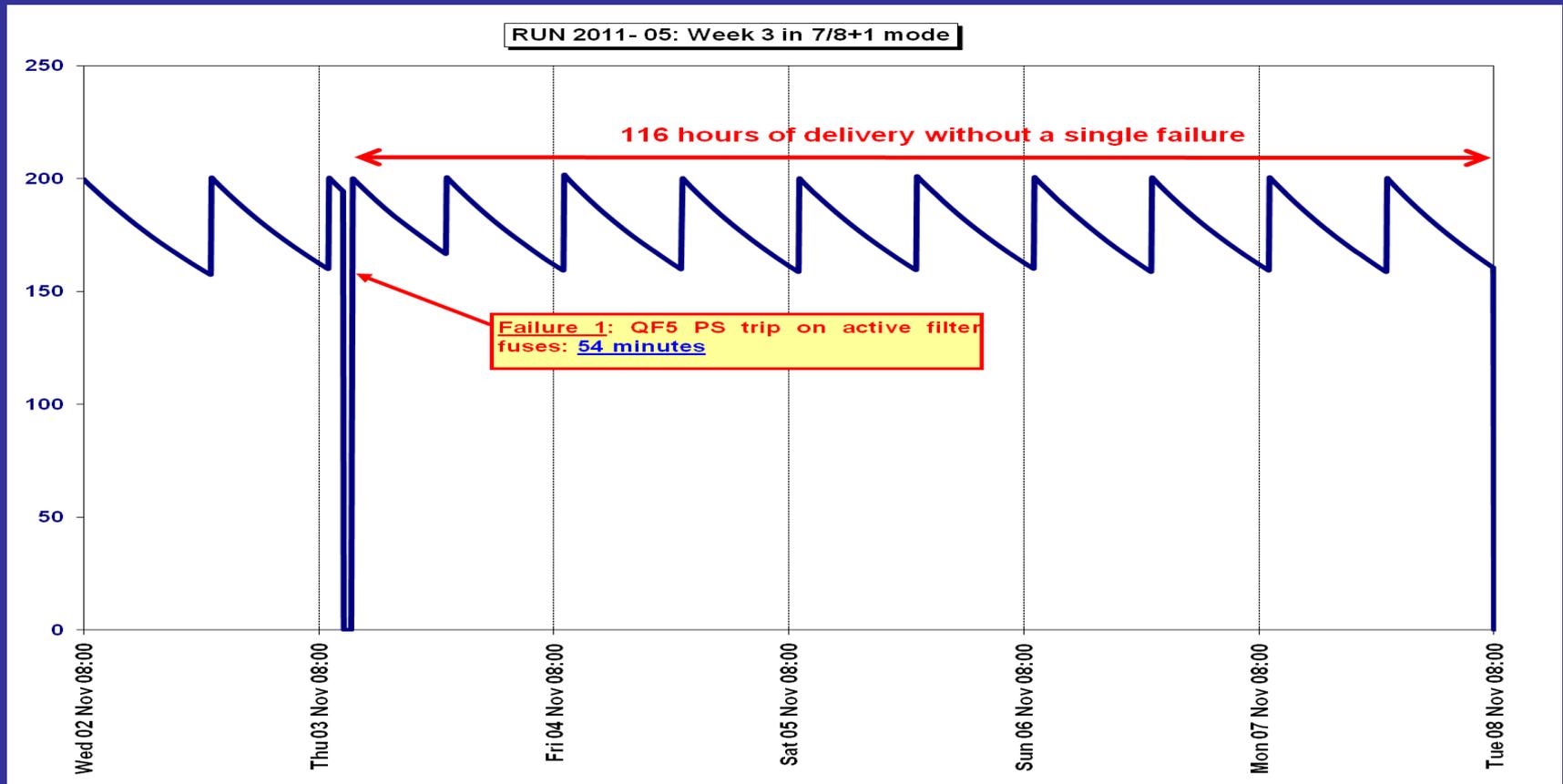
Autres temps difficiles: 1 seule panne en 7 jours ... mais d'une durée de 78 heures !...



## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

*Différentes configuration de pannes*

Et enfin, une semaine « typique » représentative de la fiabilité de l'ESRF aujourd'hui :  
1 pannes sur 144 heures. Durée moyenne d'une panne = 1 heure



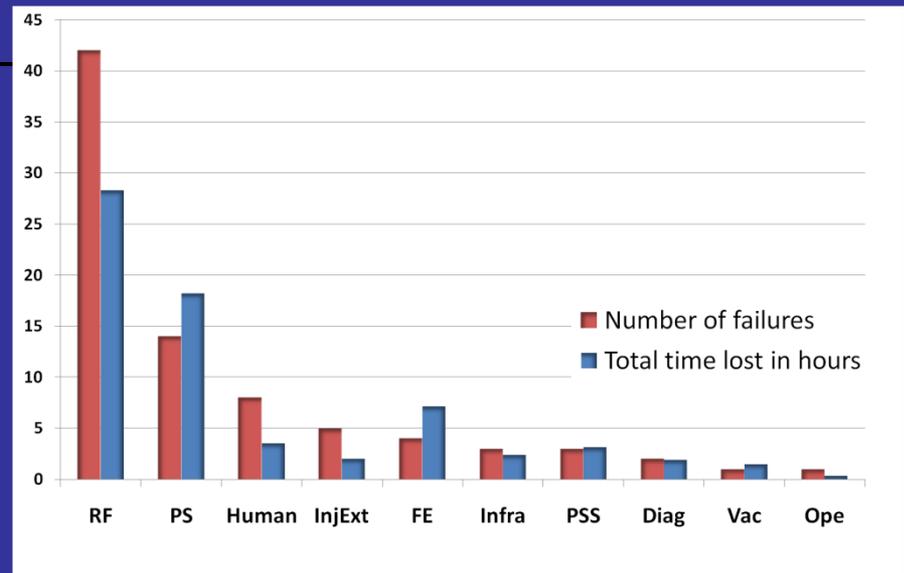
## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

*Différentes configuration de pannes*

<i>Machine statistics</i>	<b>2009</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>
Availability (%)	99.04	98.78	98.91
Mean time between failures (hrs)	75.8	67.50	107.8
Mean duration of a failure (hrs)	0.73	0.82	1.21

**En 2010:**  
**5538 hours** effective delivery  
 including 48.5 hours for 599 refills  
**68.2 hours** lost due to 83 failures

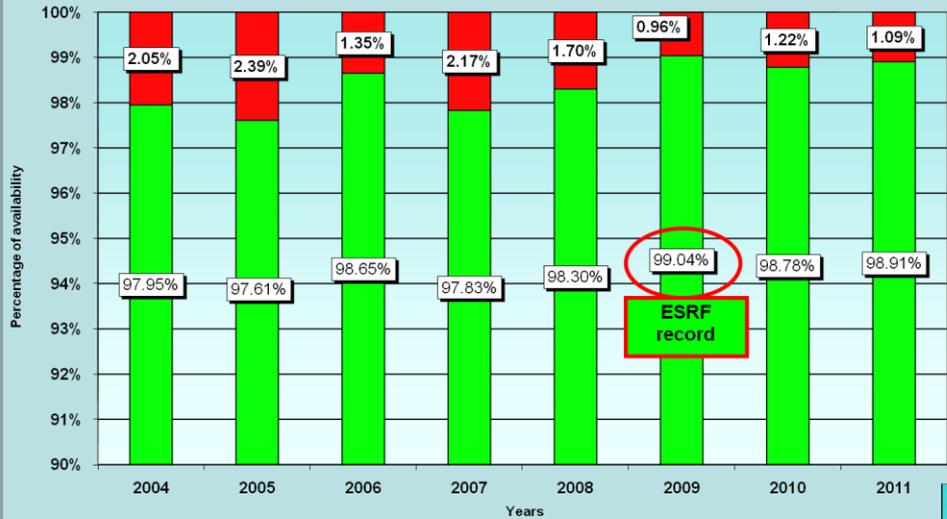
Distribution des pannes en 2010



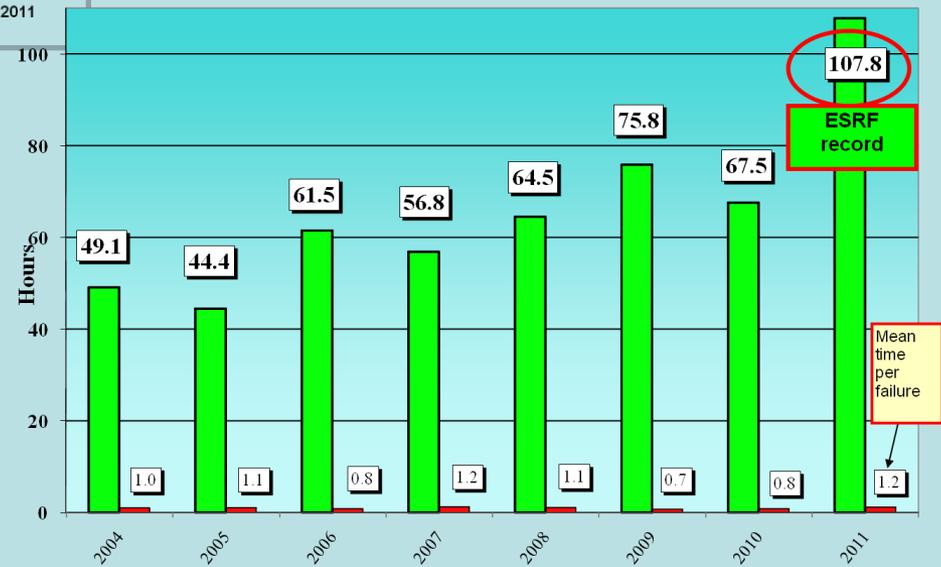
# 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

*Différentes configuration de pannes*

ACCELERATOR'S AVAILABILITY FROM 2004 TO 2011



Mean Time Between Failures over the years



## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

### *Définitions et introduction*

Il faut donc tout mettre en œuvre pour:

#### 1. Eviter la panne !

#### 2. Diminuer le temps moyen d'une panne lorsque celle-ci survient.

*Quoi de plus frustrant pour un chercheur qui a réservé son expérience plus de 6 mois à l'avance, qui vient de voyager 24 heures, d'arriver au Laboratoire et de constater que le faisceau est indisponible pour plusieurs heures, voire plusieurs jours et enfin d'apprendre que son expérience est annulée ?...*

#### 3. Avoir une durée moyenne maximale entre 2 pannes .

*Ces pannes perturberont l'ensemble des expériences. Le temps moyen entre 2 pannes est appelé **MTBF** – **Mean Time Between Failures**.*

*Une perte de faisceau, c'est aussi la perte de charge thermique sur les optiques des stations expérimentales, qui nécessite de 1 à 2 heures pour se stabiliser. Il est préférable d'avoir une panne plus longue et de corriger le problème plutôt que des pannes répétitives.*

## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

### *Définitions et introduction*

La réalisation de ces 3 objectifs n'est pas aussi utopique qu'il n'y paraît.

Les méthodes seront différentes selon l'objectif à réaliser !

QUIZZ ...

Combien coûte 1 heure de faisceau (et donc une heure de panne) à l'ESRF ?...

14 000 euros / heure de faisceau  
/ heure de panne

## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

### *Eviter la panne*

Eviter une panne =

- Une bonne conception
- Une bonne réalisation
- L'ANTICIPER pendant le fonctionnement
  - = METTRE en œuvre des méthodes non destructives de diagnostic
- PLANIFIER Remplacement / Réparation

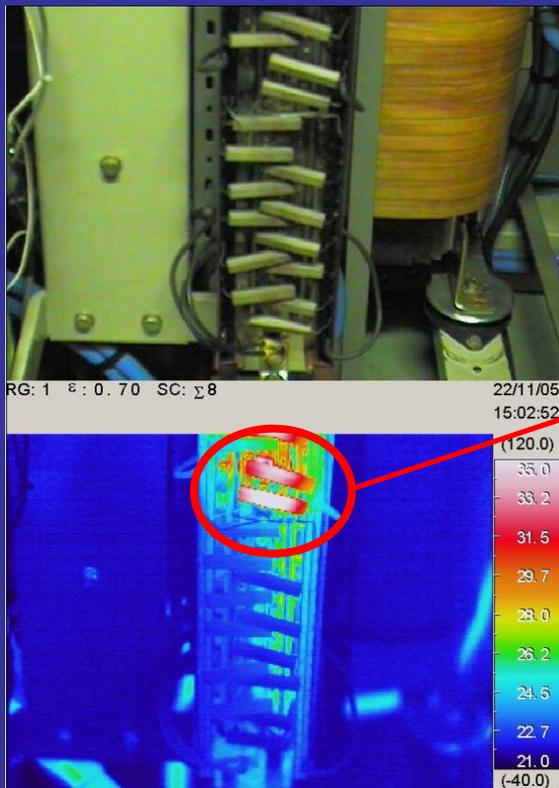
Dans cette partie, on donnera des exemples de techniques utilisées à l'ESRF

## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

*Eviter la panne: thermographie infra-rouge*

### Exemple 1: La thermographie infra-rouge

Objectif: Photographier un équipement en fonctionnement à l'aide d'une caméra infra-rouge (même à travers une paroi). On peut détecter un échauffement anormal d'une pièce avant sa panne définitive.



2 résistances aux contacts douteux parmi un banc de résistances similaires.

Exemple type d'une panne potentielle, repérée à temps.

Elle fera l'objet d'une réparation dès que les accélérateurs seront arrêtés pour une maintenance planifiée.

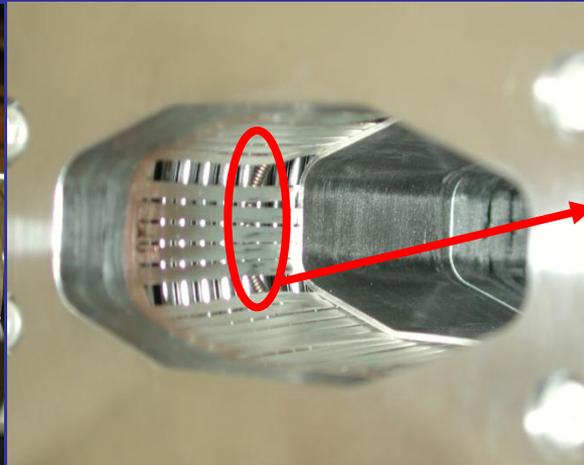
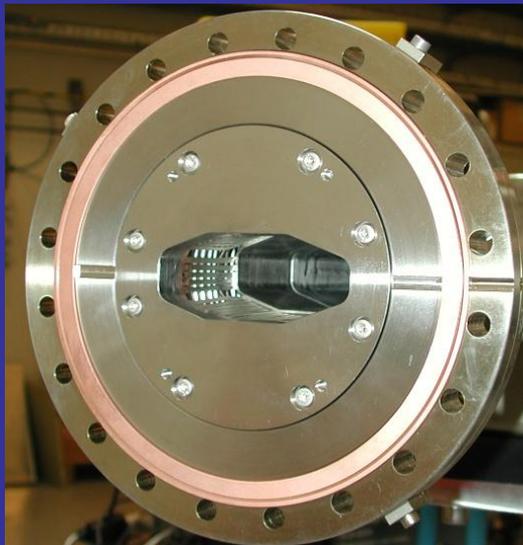
## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

*Eviter la panne: les radio gammagraphies*

### Exemple 2: Les radios gammagraphies

300 soufflets assurent une transition flexible d'une chambre à vide vers la suivante.  
Soufflet = mini-cavité résonnante perturbant le faisceau

→ nécessité de placer des transitions appelées « RF liner » pour assurer une continuité de la circulation du courant image du faisceau chargé.



Un ressort maintient les doigts compressés sur la surface de transition: c'est ESSENTIEL !

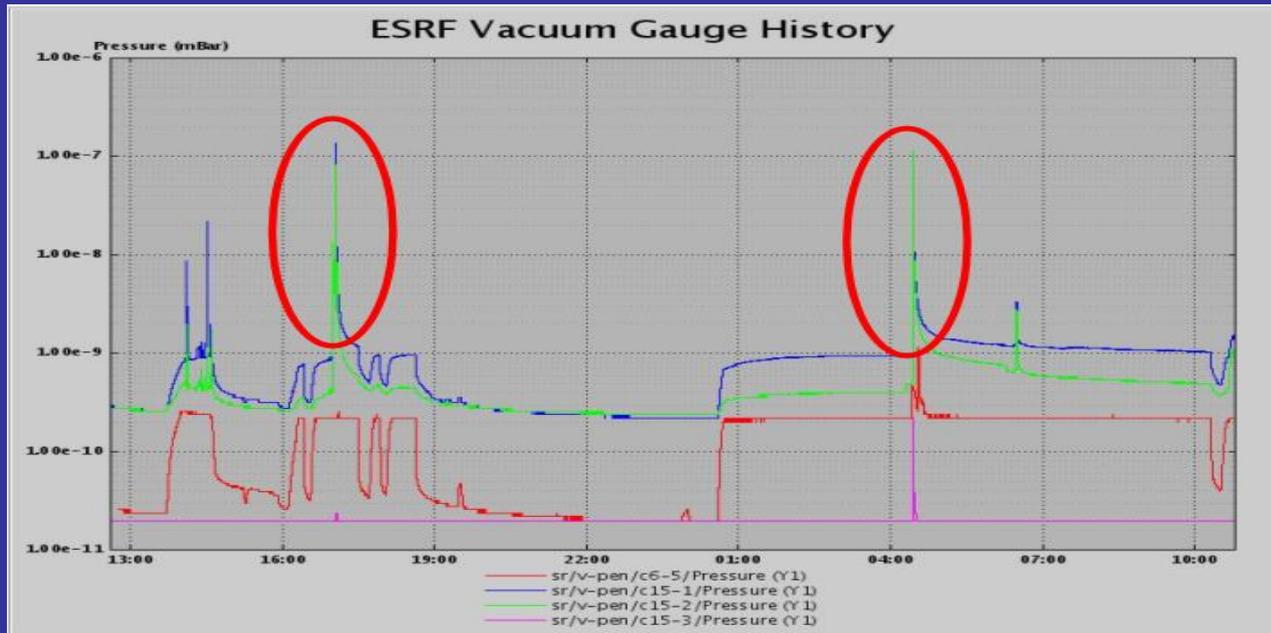
## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

*Eviter la panne: les radio gammagraphies*

Dans certains modes (structurés en temps – dépendant du courant par bunch et du nombre de bunch), ces RF liners se fragilisent suite à des échauffements →

Le ressort peut se détendre, des doigts peuvent plier.

Cela se traduit par des remontées de pression

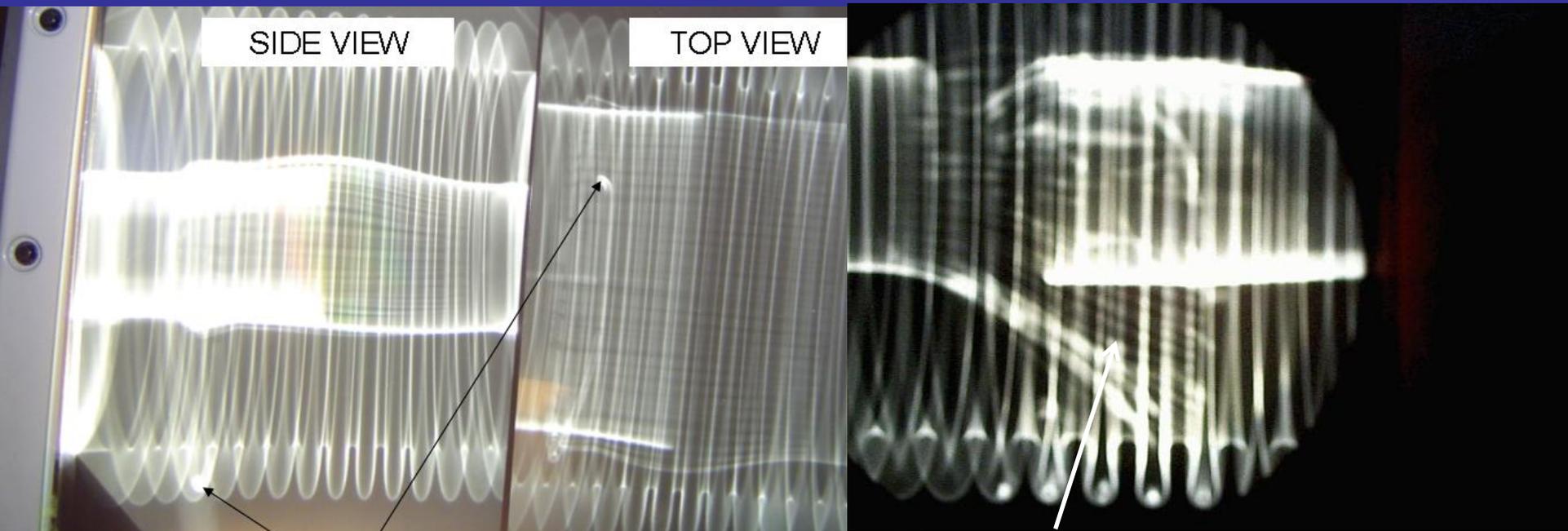


Une gammagraphie est **NECESSAIRE** avant la « casse » totale !

## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

*Eviter la panne: les radio gammagraphies*

Gammagraphie = source d'iridium + film photo. Quelques minutes de tir. Après 2 heures, on obtient une photo de L'INTERIEUR de la chambre à vide / du soufflet.



Ressort détendu, voire cassé

Doigts pliés suite à échauffement après cassure d'un ressort ...

## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

*Eviter la panne: les radio gammagraphies*

Avant l'usage des gammagraphies à l'ESRF, un problème nous était indiqué lorsqu'il était ... trop tard (faisceau bloqué, remontées de pression ..)



Ces pannes sont aujourd'hui évitées par:

- alarmes instantanées dès qu'une remontée de pression (même minime) apparaît à un endroit de l'anneau de stockage
- décision d'un expert vidiste d'effectuer une gammagraphie pour (in)valider la remontée de pression

## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

*Eviter la panne: Faire des études post-accidents*

### Exemple 3: Effectuer des études post-accidents

Un « nouveau » type d'accident arrive...

→ Analyser l'origine

→ Evaluer la probabilité que ce soit un cas isolé ou le début d'une longue série !...

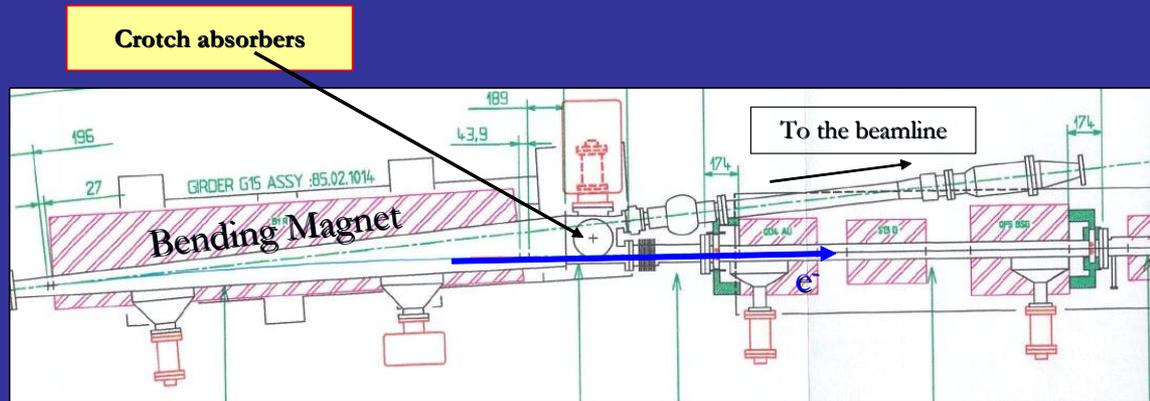
Deux exemples notoires à l'ESRF:

- les crotch absorbers
- la corrosion dans les chambres à vide

## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

*Eviter la panne: Faire des études post-accidents*

### Exemple 3.1: Effectuer des études post-accidents: Les crotch absorbers



Rôle: capter les rayons X émis par un aimant de déviation mais qui ne seront pas pris vers le départ de ligne.

Incident: Mars 2005, une fuite d'eau se déclenche dans l'un d'entre eux.

→ mise à l'air sur plus de 50 mètres et ... de l'eau dans une chambre à vide.

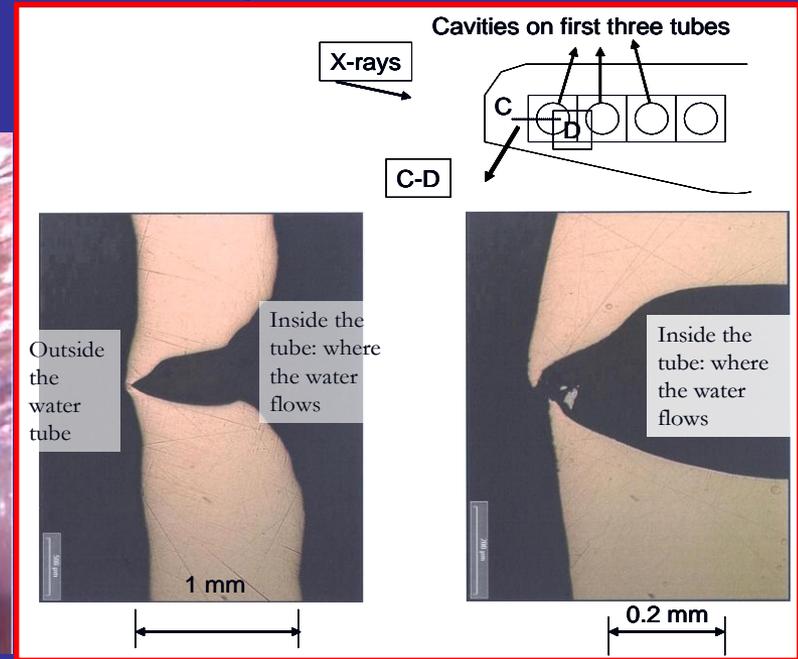
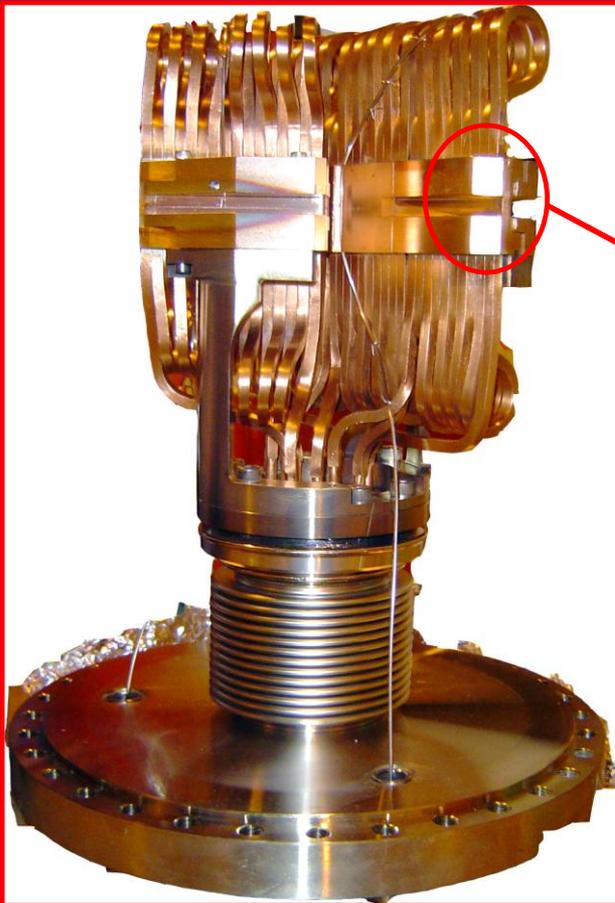
→ Cinq jours seront perdus.

## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

*Eviter la panne: Faire des études post-accidents*

### Exemple 3.1: Effectuer des études post-accidents: Les crotch absorbers

La partie incriminée fut découpée finement afin de mieux analyser la fuite



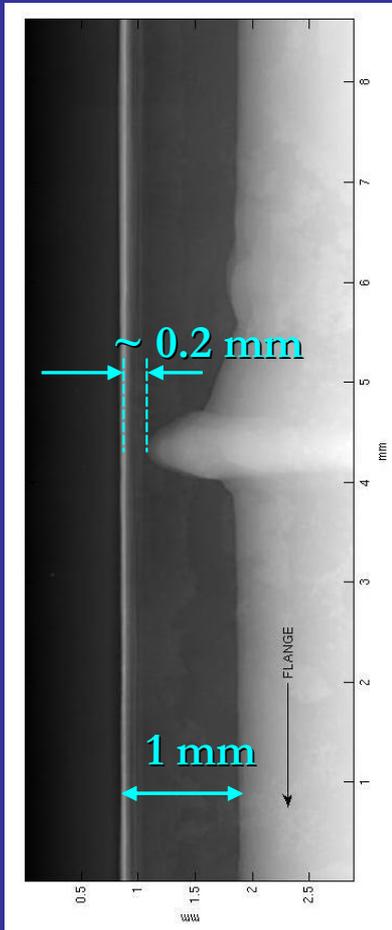
Défaut de construction (= accident isolé) OU  
Début d'une longue série ??

Une autre crotch est démonté et gammagraphié

## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

*Eviter la panne: Faire des études post-accidents*

### Exemple 3.1: Effectuer des études post-accidents: Les crotch absorbers



1ère conclusion: tous les crotch présentent le même risque: un crotch pris au hasard ne présente plus qu'une épaisseur de 200 microns avec la fuite ! → le risque est SYSTEMATIQUE !

La cause: un cocktail détonant:

eau désionisée + cuivre + radiations

Action court terme: désaligner volontairement tous les crotches de 2 mm dans le plan vertical afin que les rayons X heurtent une zone encore épaisse de 1 mm n'ayant jamais vu de faisceau.

Action long terme: redessiner les crotches et tous les remplacer !!

Cette action a duré 1 an ½.

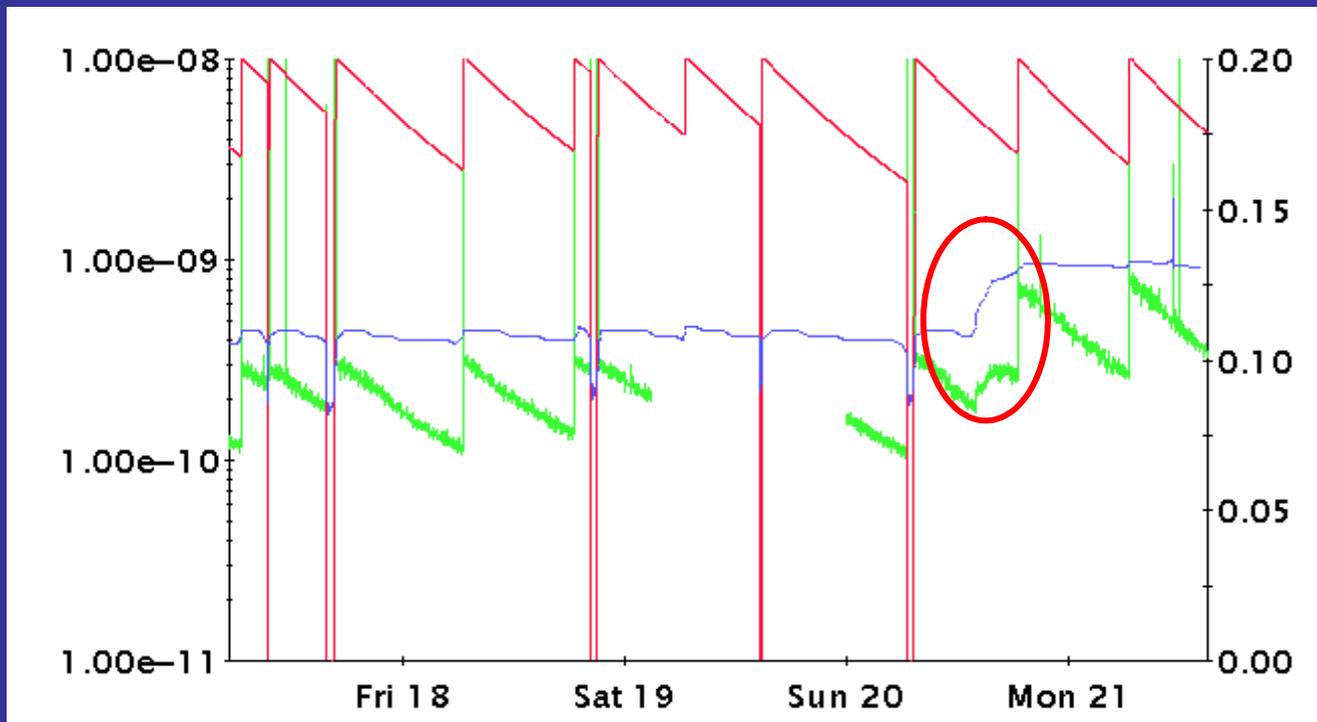
## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

*Eviter la panne: Faire des études post-accidents*

### Exemple 3.2: études post-accidents: La corrosion dans les chambres à vide

Différence avec l'exemple précédent: problème connu, identifié, mais on ne peut pas envisager le remplacement systématique ...

Les premiers signes: des remontées de pression



## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

*Eviter la panne: Faire des études post-accidents*

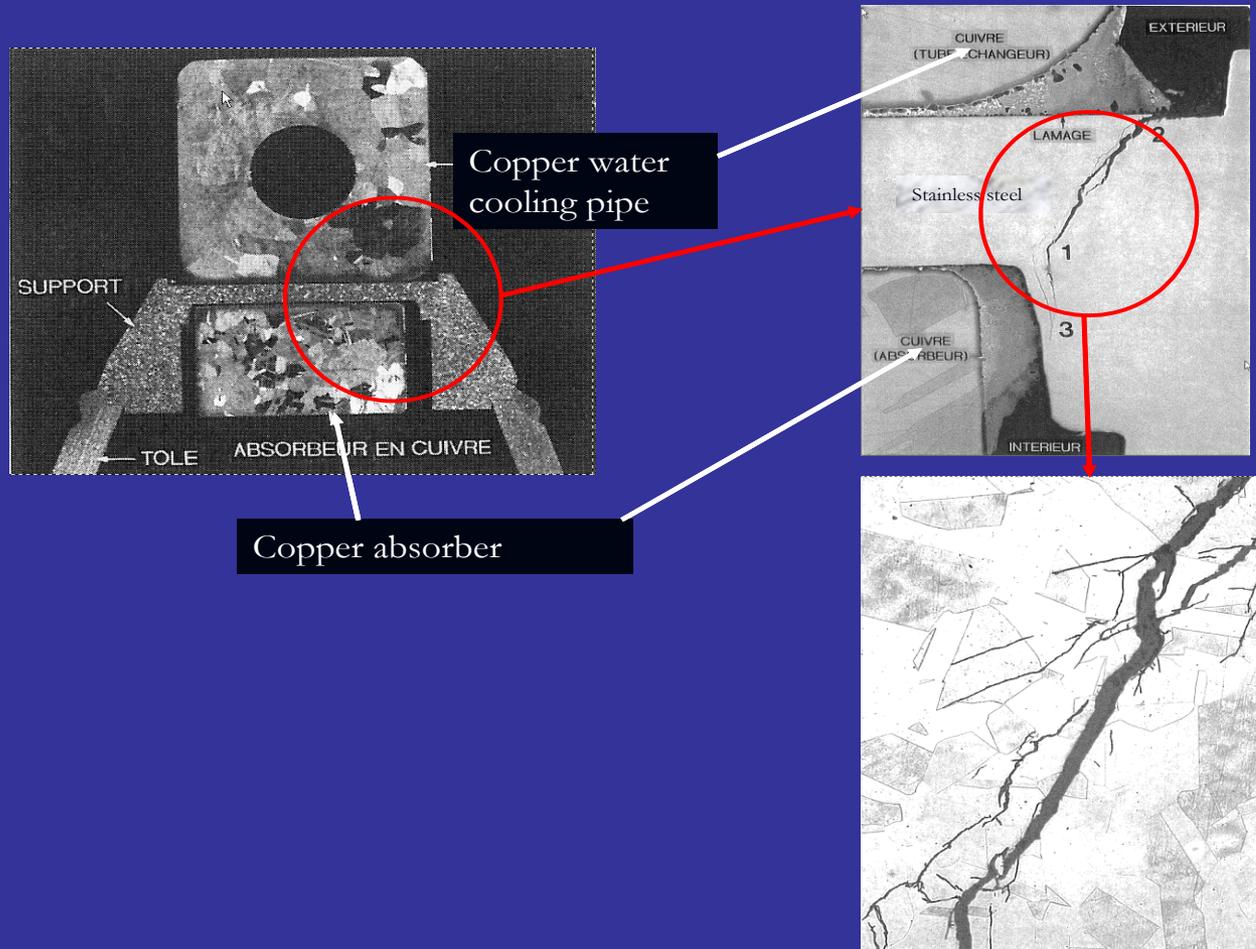
### Exemple 3.2: études post-accidents: La corrosion dans les chambres à vide

Rapport d'expertise : *«la fuite résulte d'un mécanisme de corrosion sous contrainte, imputable à la présence de chlore. Cette contamination provient de l'utilisation, lors de l'opération de brasage des tubes en acier inoxydable sur la chambre, d'un flux décapant contenant du chlore, flux qui se sera infiltré au fond du lamage, lieu de confinement et qui n'aura pu être éliminé, malgré les opérations de nettoyage de la pièce*

## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

*Eviter la panne: Faire des études post-accidents*

### Exemple 3.2: études post-accidents: La corrosion dans les chambres à vide



Copper absorber

## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

*Eviter la panne: Faire des études post-accidents*

### Exemple 3.2: études post-accidents: La corrosion dans les chambres à vide

Action QUOTIDIENNE: surveiller toute remontée de pression anormale, même insignifiante

Action très court terme: boucher la fuite à l'aide d'un spray

Action moyen terme: remplacer la chambre à vide

Cette suite d'actions a porté ses fruits en 2005:

6 fuites ont été détectées précocement. Toutes ont fait l'objet d'une réparation transparente pour les utilisateurs car effectuées lors des interventions hebdomadaires planifiées

## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

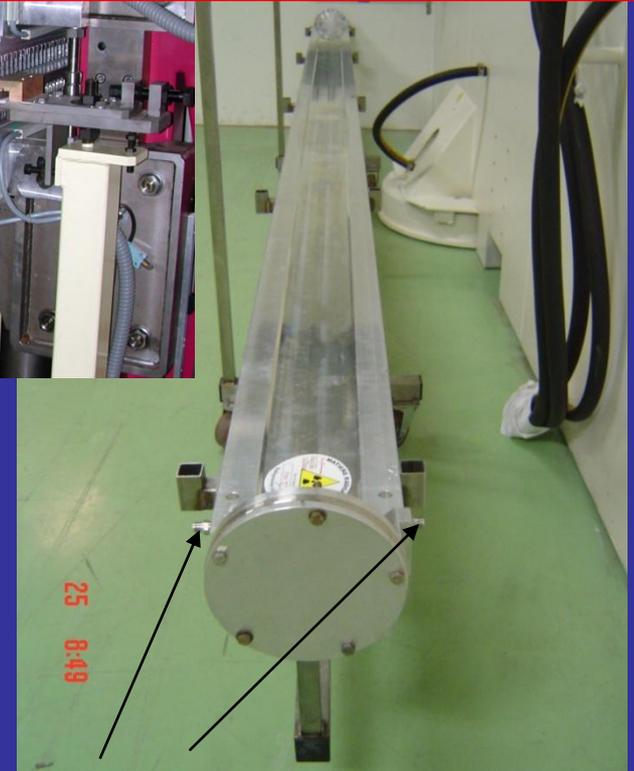
*Eviter la panne: Faire des études post-accidents*

### Exemple 3.2: études post-accidents: La corrosion dans les chambres à vide

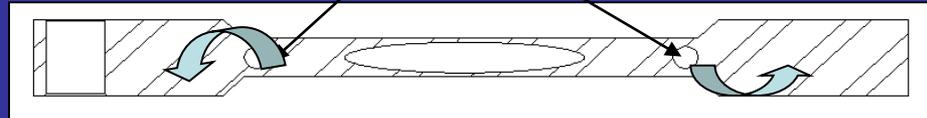
Chambre à vide de 5 mètres pour éléments d'insertion.



Problèmes de corrosion du circuit de refroidissement présentant des risques de bouchage et de fuites.



SRA cooling channels: 6 mm diameter



## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

*Eviter la panne: Faire des études post-accidents*

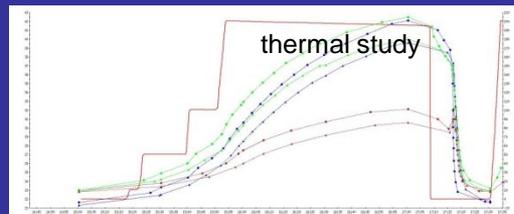
### Exemple 3.2: études post-accidents: La corrosion dans les chambres à vide

#### Problèmes observés:

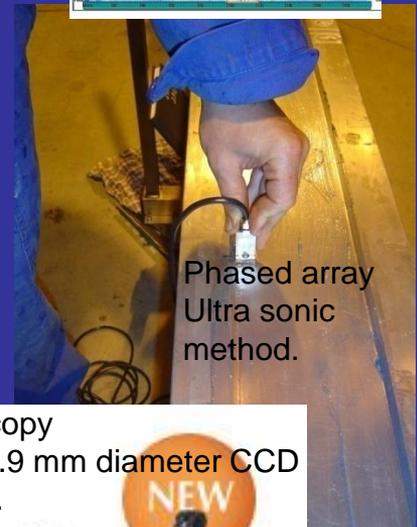
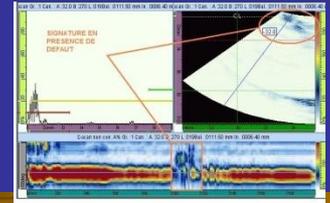
- Diminution du débit d'eau (de 200l/h à 100 l/h) dans la plupart des cellules.
- Corrosion observée sur plusieurs chambres ( Aluminum oxide après analyse )
- Des interlocks de protection machine si le débit est inférieur à 80l/h
- Problème le plus dramatique une fuite d'eau dans le tunnel.

#### Action entreprise pour résoudre le problème:

- Flushing des chambres
- Diminution du seuil d'interlock
- Caractérisation de la corrosion en utilisant une méthode non destructive
- Réduction or ou arrêt du refroidissement des chambres défectueuses
- Etude et production d'un nouveau profil
- Modification des caractéristiques chimique du circuit de refroidissement



Non destructive method of investigation:



Videoscopy with a 3.9 mm diameter CCD camera.



## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

*Eviter la panne: Analyse mécanique en ligne*

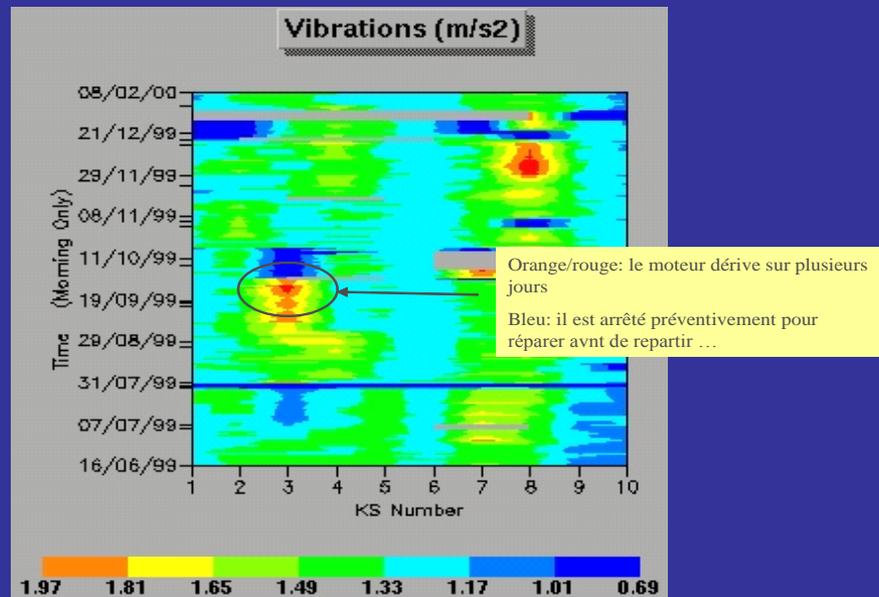
### Exemple 4: Analyse mécanique en ligne

Jusqu'à septembre 2007, l'ESRF était doté de 10 moteurs Diesel de 1 MW chacun.

Rôle: pallier les coupures d'électricité dues à des défauts sur le réseau du fournisseur d'électricité.

En cas d'arrêt brutal de 1 ou plusieurs de ces moteurs: danger pour l'équipement qu'ils protègent ! Ils passeraient de « pleine puissance » à « arrêté » instantanément.

→ Des capteurs de vibrations ont été installés pour détecter précocement toute anomalie liée à un / plusieurs composants du moteur



## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

*Eviter la panne: Eviter les fausses pannes*

### Exemple 5: Eviter les fausses pannes

Fausse panne = panne induite par le capteur / interlock et pas par l'équipement surveillé.

Conséquence = la même que pour une vraie panne: tout s'arrete !!

Un exemple typique à l'ESRF: les capteurs de température des sextupoles.

Phénomène:

Les aimants sextupolaires s'arrêtent suite à un déclenchement de l'interlock de température de la bobine. Or la bobine ne semble pas chaude ...



Diagnostic: Le caoutchouc protecteur du capteur se liquéfie sous les radiations.

→ Sa structure moléculaire passe d'isolant à conducteur !

→ Un courant de fuite s'installe faisant croire à un déclenchement du capteur !

## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

*Eviter la panne: Eviter les fausses pannes*

La bonne question !: Ces interlocks sont-ils VRAIMENT utiles ?

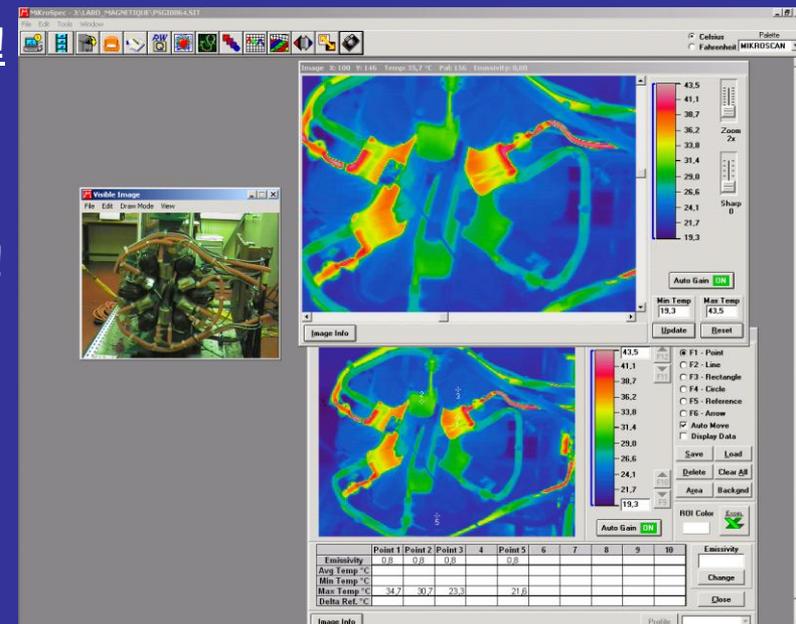
Tests: Un sextupole est placé sur un bac de mesure pour y subir une série de tests.

Ils est alimenté mais ses bobines, non refroidies à l'eau!

Résultat: Même non refroidie, une bobine ne présente pas d'élévation de température inquiétante !

Un capteur passif de lecture suffit, l'interlock est inutile !

Action: déconnexion de 1344 de ces interlocks – autant de causes de pannes en moins !



## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

*Eviter la panne: Se servir de ses yeux !...*

### Exemple 6: Se servir de ses yeux

1 exemple ...

Hiver 2001 – 2002: démarrage des accélérateurs sans problèmes. Tout tourne bien pendant 3 jours.

Jour 4: on simule un 'delivery' aux utilisateurs et on ferme les mâchoires des éléments d'insertion au minimum.

Le faisceau ne passe plus. Des pertes élevées sont indiquées par les détecteurs en cellule 15.

Une inspection visuelle a lieu dans cette zone ...

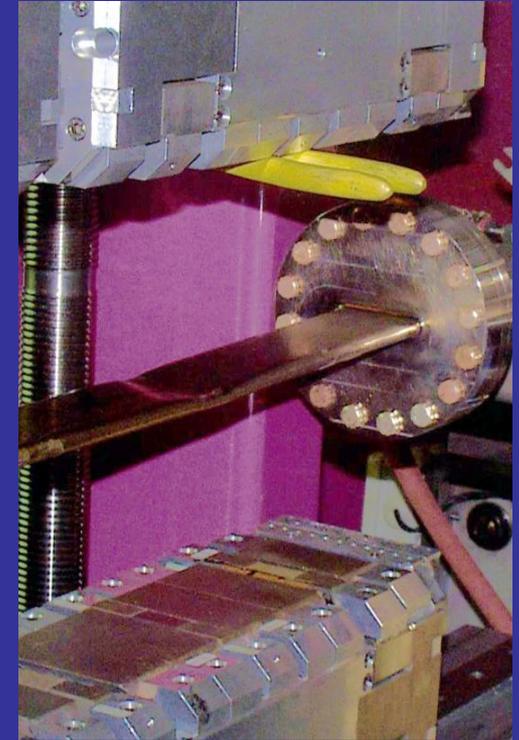
## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

*Eviter la panne: Se servir de ses yeux !...*



Une personne avait oublié une pince dans cette zone. Attirée par le champ magnétique, la pince s'est collée à une mâchoire, écrasant la chambre à vide lors de la fermeture de l'élément d'insertion ...

24 heures de perdues « grâce » au fait que la chambre alu s'est pliée sans créer de fuite de vide. Une chambre inox aurait éclaté provoquant une remise à l'air très brutale sur plusieurs dizaines de mètres !...



Depuis lors, une inspection visuelle (3 personnes) approfondie a lieu en fin de période de maintenance.

## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

*Eviter la panne: Planifier des périodes d'arrêt – réparer / maintenir*

Toutes les méthodes décrites ci-dessus permettent de détecter une panne de manière précoce afin d'anticiper sa réparation.

Encore faut-il avoir prévu ... des créneaux d'intervention planifié hors des périodes de service aux utilisateurs !

Basé sur l'expérience, nous planifions:

- 1-2 heures d'intervention tous les 15 jours pendant la journée réservée aux études accélérateurs. En cas de nécessité, cette fréquence peut être ramenée à 1-2 heures tous les 7 jours (actuellement, 1 journée par semaine est dédiée aux études sur les accélérateurs).
- 5 périodes plus longues sur l'année pour effectuer des interventions plus conséquentes (changements de chambre à vide, remplacement d'un élément d'insertion, etc.) : 1 mois en hiver, 1 mois en été et 3 \* 10 jours répartis sur le reste de l'année.



## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

*Eviter la panne: et ... échanger avec les autres instituts*

### Objectifs:

Echanger les expériences avec les autres instituts, sur le matériel déjà utilisé ailleurs.

### Comment ?

- Conférences / workshop: notamment les « Workshop on Accelerator Operation »
  - 2007: Trieste – Italie
  - 2010: Corée du sud (Pohang Light Source)  
ou les « Accelerator Reliability Workshop »
  - 2002: Grenoble
  - 2009: Vancouver – Canada
  - 2011: Cape Town – Afrique du Sud
  - 2013: Melbourne - Australie
- Liste e-mail / forum regroupant le « milieu de l'opération des accélérateurs »
  - <http://lists.reliadb.org/mailman/listinfo/accelerator-announc>

## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

### 5.3 Avoir une durée moyenne maximale entre deux pannes

Les pannes fréquentes vont perturber tous les types d'utilisateurs.

Ce type de pannes se distingue de la catégorie précédente en ceci qu'il faut en avoir eu plusieurs avant de se rendre compte que l'on est en face d'un problème récurrent et non isolé...

Quelques exemples concrets utilisés à l'ESRF pour augmenter le MTBF (Mean Time Between Failures) sont décrits.

## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

### 5.3.1 Avoir une durée moyenne maximale entre deux pannes: **Redondance active**

#### Un exemple de redondance active : HQPS – High Quality Power Supply

##### Le problème de départ:

Grenoble = région montagneuse – orageuse. Un orage peut générer une chute de tension sur le réseau 225 – 400 KV, accompagné d'une variation de fréquence autour du 50 Hz nominal

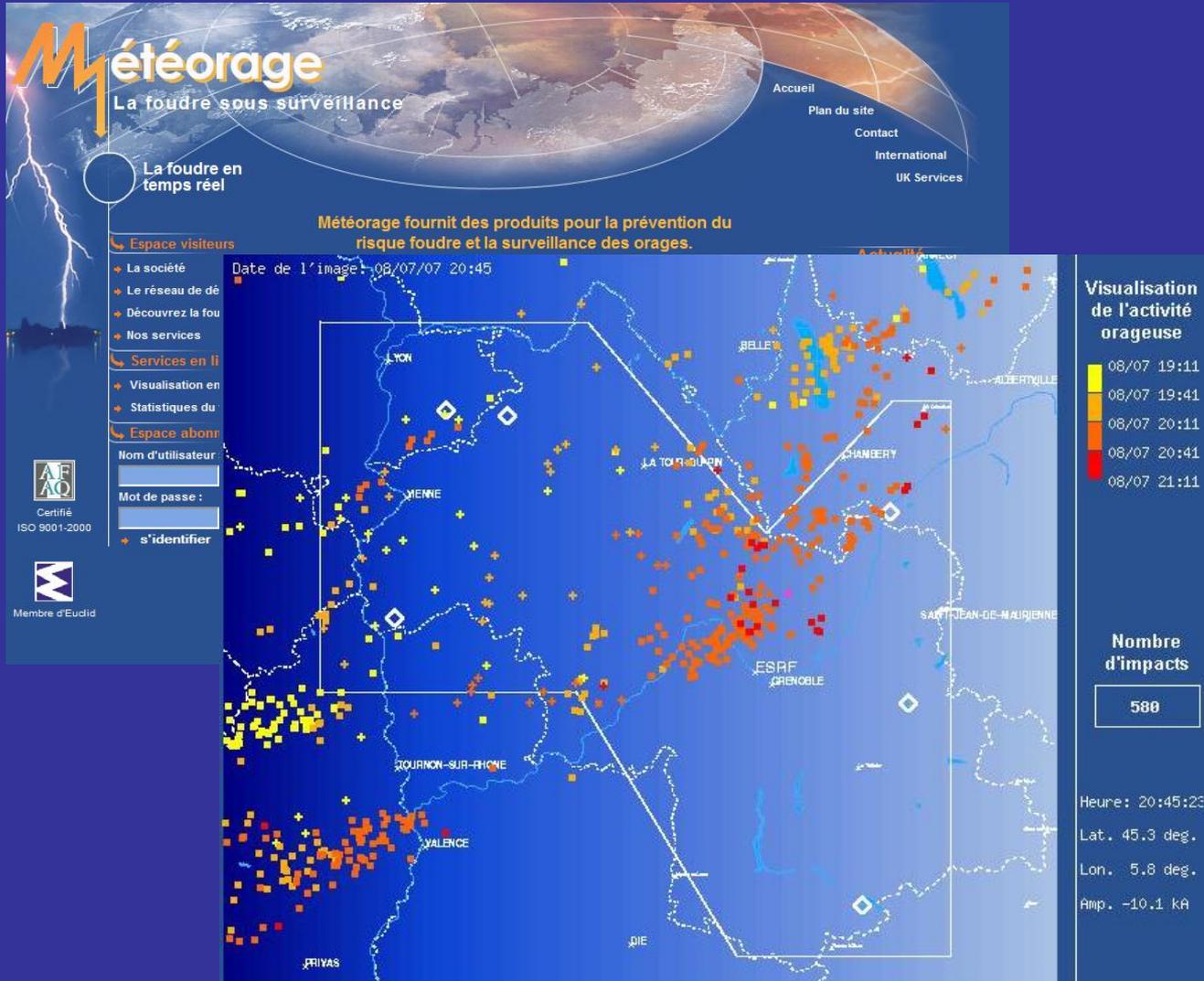
##### Quelques chiffres:

- Une chute de tension MOYENNE dure 200 msec avec  $\Delta U/U = - 20 \%$
- Suite à une erreur de manipulation de EDF, il est déjà arrivé de rester plusieurs minutes sans électricité (travaux de nouveau Tram, etc ...)
- Entre 08/1992 et 07/1993, il y a eu 279 (!) perturbations de réseau. Toutes comprises entre 0.1 et 2 secondes et 6 d'entres-elles avec  $\Delta U/U = - 80 \%$ .

TOUTES les perturbations (parmi les 279) qui ont eu lieu pendant la période de livraison utilisateur ont arrêté les accélérateurs (parfois plusieurs par jour) !

# 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

L'information en salle de contrôle



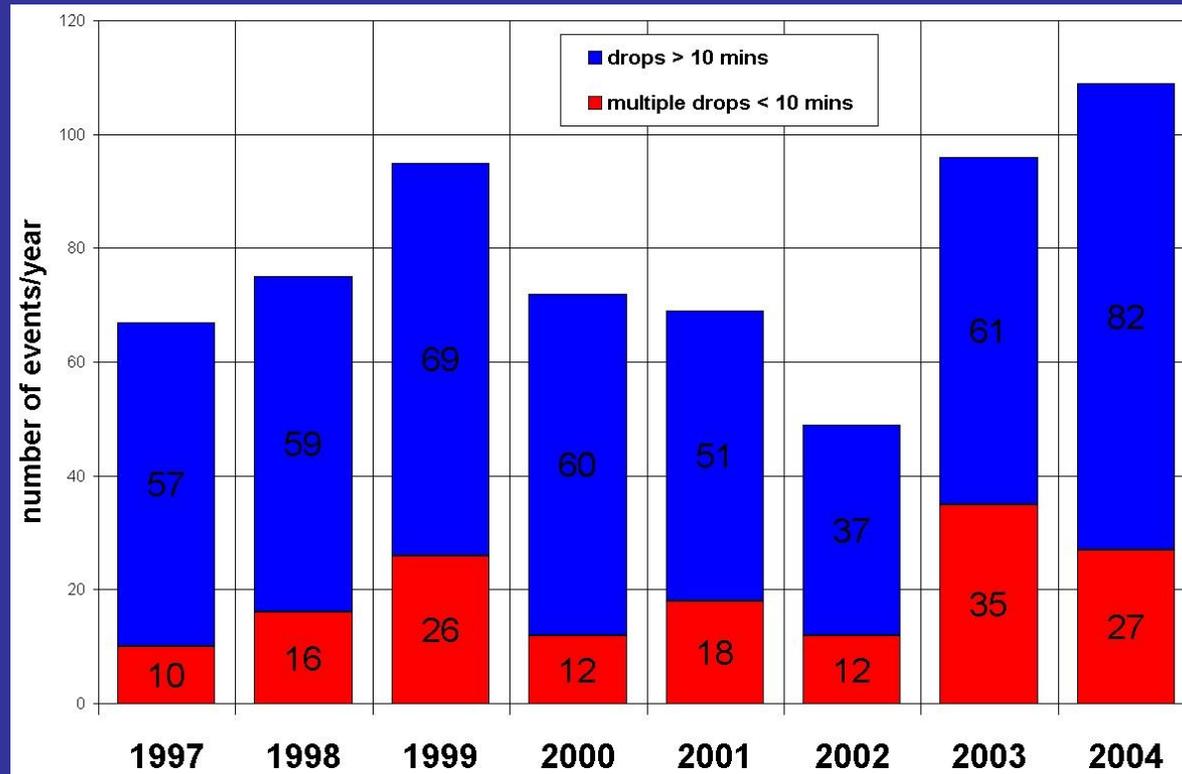
Surveillance de l'activité orageuse



Dimanche  
08/07/2007  
500 impacts  
en 2 heures

## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

### 5.3.1 Avoir une durée moyenne maximale entre deux pannes: **Redondance active**



En moyenne 80 perturbations du réseau 20kV par an

## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

### 5.3.1 Avoir une durée moyenne maximale entre deux pannes: **Redondance active**

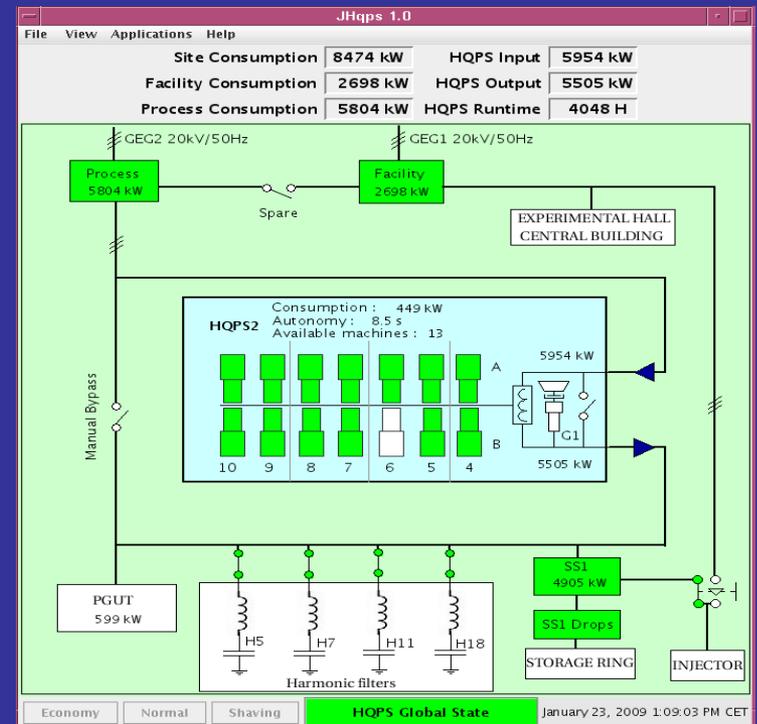
Une solution:

Installer un système dit « High Quality Power Supply » - HQPS, afin de pallier ces chutes de tension.

- Le système: 14 accumulateurs / générateurs placés en parallèle sur le réseau principal.
- 9.3 MW disponible

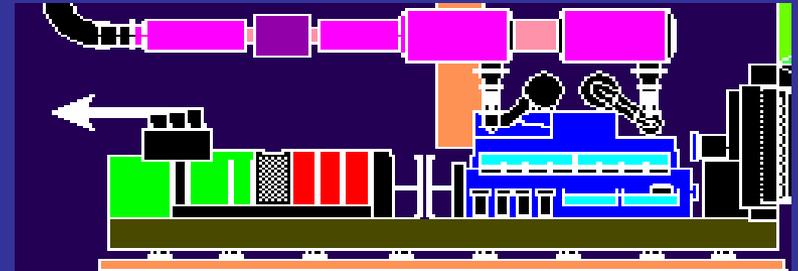
En cas de détection de chute de tension, un disjoncteur en entrée s'ouvre et les accumulateurs délivrent leur énergie aux alternateurs jusqu'au moment où le réseau principal est redevenu correct, ce qui fermera le disjoncteur pour revenir dans des conditions de travail normales.

Ce système compense 80 chutes de tension / an et évite autant de coupure de faisceau !...



## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

### 5.3.1 Avoir une durée moyenne maximale entre deux pannes: **Redondance active**



### Conclusion:

- Autant de pannes répétitives évitées
- Un MTBF considérablement augmenté grâce à ce système
- Diminution du stress des équipements du au variation du reseau
- Un moteur diesel de 1MW est démarré en cas de coupures longues (> 3 sec) pour maintenir le système de vide et le système de contrôle

## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

### 5.3.2 Avoir une durée moyenne maximale entre deux pannes: *la conception*

#### Exemple 1: les détecteurs d'arc radio-fréquence dans les cavités

Des détecteurs d'arc protègent les guides d'onde RF. Quand un arc est détecté, la source de puissance (klystron) est arrêté.

1999: **50 arrêts** suite ... à une fausse détection

→ l'interlock EST utile ... mais pas optimisé !

2000: amélioration des détecteurs (bruit électronique mieux filtré, bascule flip-flop supprimée, niveau de détection remonté, etc)

Depuis 2000: en moyenne 10 détections d'arc par an, généralement VRAIES.

Soit, en moyenne, 40 arrêts évités chaque années ...

## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

### 5.3.2 Avoir une durée moyenne maximale entre deux pannes: **la conception**

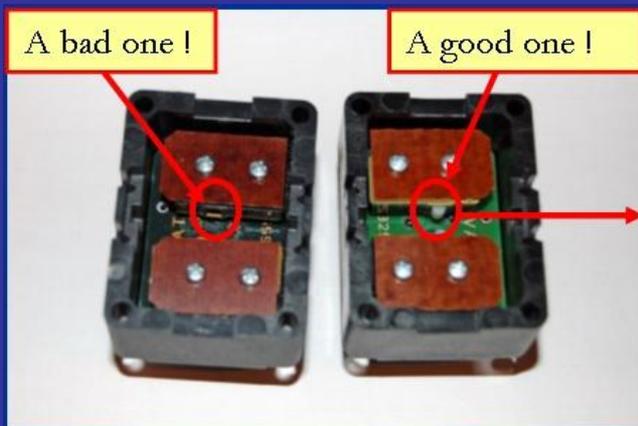
#### Exemple 2: les capteurs « fin de course »

2005: plusieurs arrêts faisceau.

Déclenchement d'un capteur 'fin de course' de vannes de vide manuelles... signifiant la « fermeture » de celles-ci. Ce fait est évidemment impossible: personne ne se trouve dans les accélérateurs pendant le fonctionnement !

Cet interlock est cependant utile pendant les périodes de maintenance ...

Constat: le contact déclencheur était complètement détruit sous l'effet des radiations



Solution: des capots de plomb recouvrent maintenant ces capteurs et de plus, ils ont été remplacés par des contact en céramique (moins sensibles aux radiations)

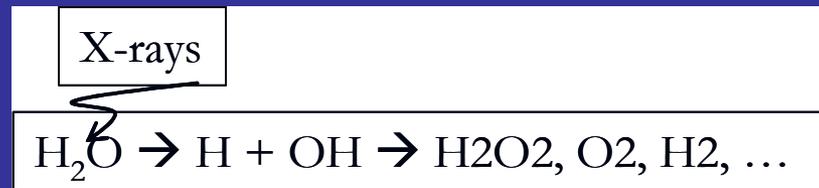
## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

### 5.3.3 Avoir une durée moyenne maximale entre deux pannes: la maintenance préventive

#### Exemple 1: la présence d'oxyde de cuivre dans les circuits d'eau

##### Le phénomène:

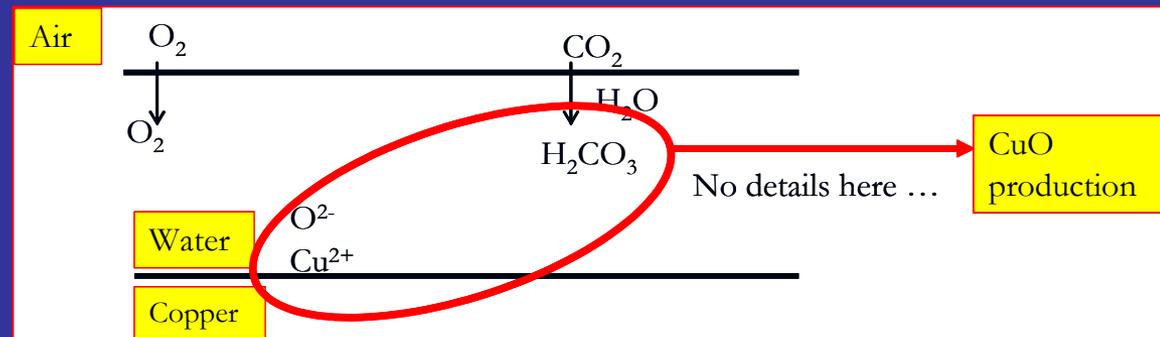
##### 1. La radiolyse



H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> et H<sub>2</sub> sont des contributeurs importants à la production d'oxyde de cuivre

##### 2. La formation d'oxyde de cuivre

Lors d'une intervention sur les circuits d'eau, du CO<sub>2</sub> est inévitablement introduit dans le circuit d'eau



## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

### 5.3.3 Avoir une durée moyenne maximale entre deux pannes: *la maintenance préventive*

Les phénomènes qui auront de l'importance sur le TAUX de production sont :

facteur 1.6 : les radiations

facteur 3 : la température de l'eau

facteur 15 : la vitesse de l'eau

facteur 200 (!) : le taux de concentration de CO<sub>2</sub> dans l'eau et la quantité d'oxygène dissous dans l'eau.

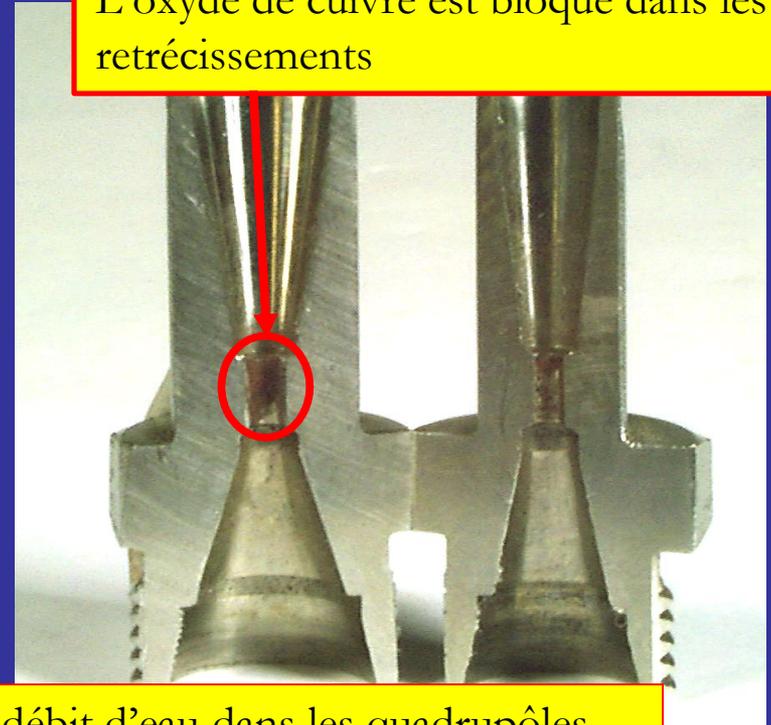
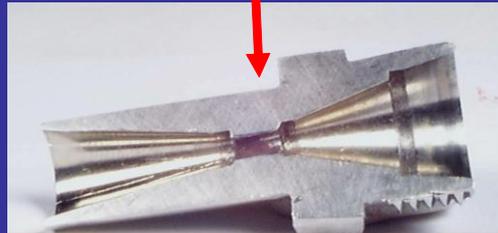
#### Les conséquences:

Des dépôts d'oxyde de cuivre se forment dans tous les rétrécissements du circuit, là précisément où la vitesse de l'eau est élevée et où un effet de cavitation est souvent présent.

L'oxyde de cuivre va continuer à se déposer jusqu'au moment où l'eau ne parvient quasiment plus à passer, déclenchant alors l'interlock du débitmètre de l'équipement correspondant.

## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

### 5.3.3 Avoir une durée moyenne maximale entre deux pannes: la maintenance préventive



L'oxyde de cuivre est bloqué dans les retrécissements

Les raccords calibrés sont utilisés pour limiter le débit d'eau dans les quadrupôles

## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

### 5.3.3 Avoir une durée moyenne maximale entre deux pannes: *la maintenance préventive*

#### Comment minimiser cet effet ?

- Placer des résines spéciales dans le circuit d'eau pour piéger l'oxyde de cuivre.
- Mesurer en continu le taux d'oxygène dissous dans l'eau (de l'ordre de 50 ppb) afin d'anticiper tout problème.
- Prendre régulièrement des échantillons d'eau pour mesurer la quantité d'oxyde de cuivre (également pour anticiper toute anomalie)
- Maintenir le réservoir d'eau sous pression avec de l'azote et non pas de l'air.
- Maintenir le pH aux environs de 5.5
- Les débitmètres sont tous systématiquement vérifiés lors des périodes de maintenance. Dès que l'un d'entre eux mesure un débit légèrement inférieur au débit nominal, les raccords sont vérifiés et nettoyés.
- Des tests systématiques de baisse de pression d'eau ont lieu afin de noter quels débitmètres déclenchent en premier lieu. Ceux-là sont aussi vérifiés en priorité.

## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

### 5.3.3 Avoir une durée moyenne maximale entre deux pannes: *la maintenance préventive*

#### Résultats:

Ces pannes autrefois très fréquentes sont aujourd'hui marginales.

De plus, on retire aujourd'hui 20 mgr de cuivre / m<sup>2</sup> / jour contre ... 600 avant que ces mesures ne soit prises.

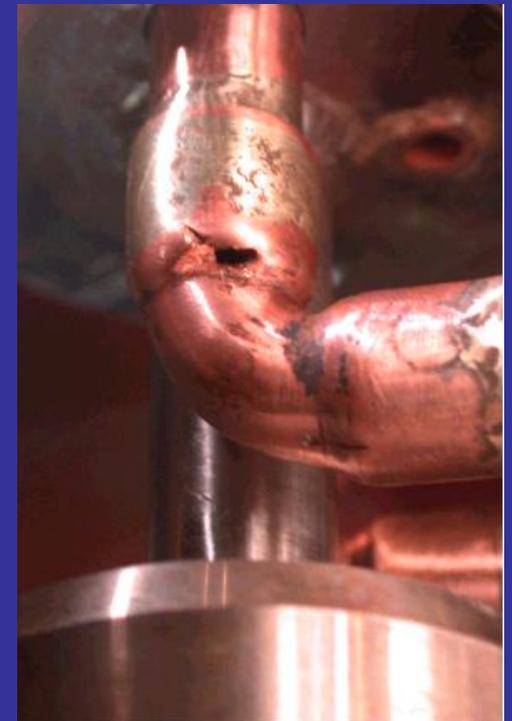
## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

### 5.3.3 Avoir une durée moyenne maximale entre deux pannes: *la maintenance préventive*

#### Exemple 2: les phénomènes de corrosion eau-cuivre

Il arrive assez fréquemment que des fuites d'eau se déclenchent à des endroits où ont lieu le phénomène de cavitation (coudes, rétrécissements).

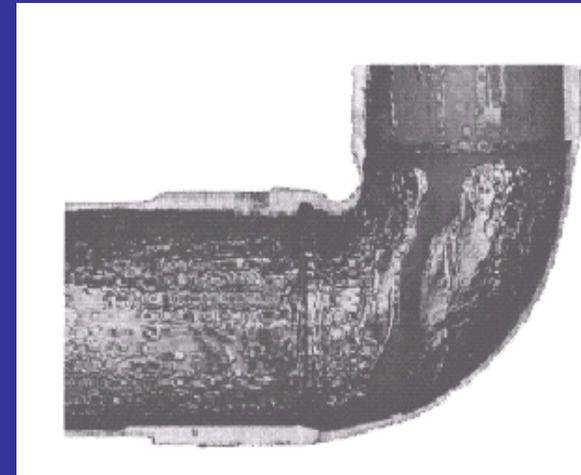
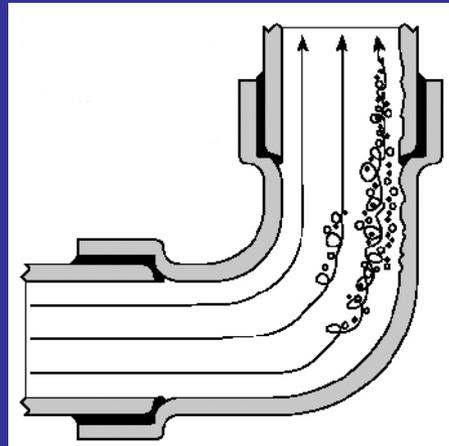
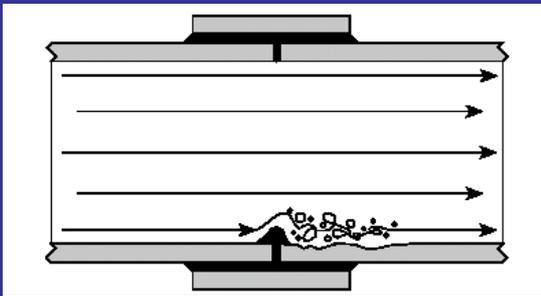
En 2005, il y a eu 13 arrêts et 17 heures de perdues à cause de ce type de panne.



## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

### 5.3.3 Avoir une durée moyenne maximale entre deux pannes: *la maintenance préventive*

Dans ces endroits: la vitesse de l'eau est élevée ou bien change de direction. Des bulles vont se créer et percuter avec suffisamment de force les parois de cuivre qu'au fil des années, un trou va se créer: 'pitting effect'.

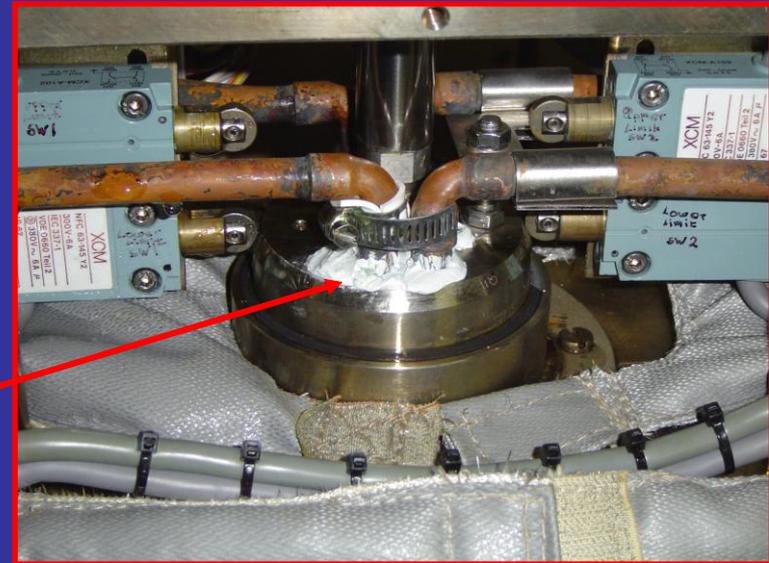
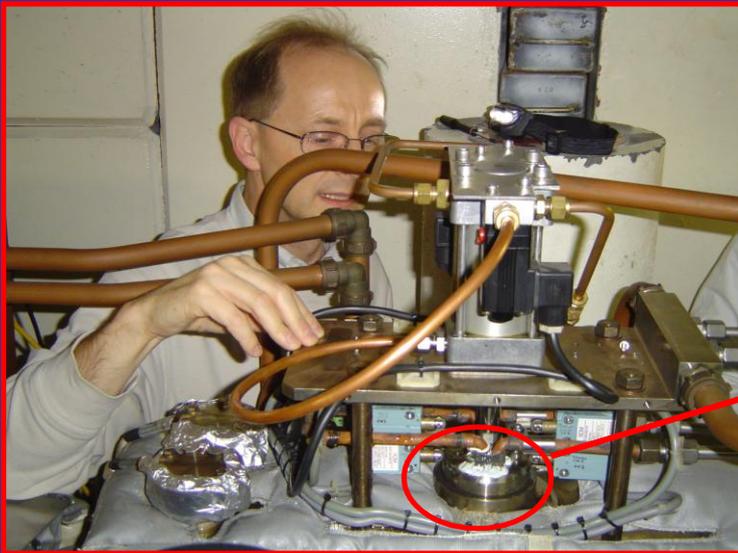


## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

### 5.3.3 Avoir une durée moyenne maximale entre deux pannes: *la maintenance préventive*

#### Solution court terme:

réparer vite, du mieux qu'on peut en fonction de l'importance du trou



#### Solution long terme:

Remplacement systématique des modules.

Programme long et coûteux actuellement en cours

## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

### 5.3.3 Avoir une durée moyenne maximale entre deux pannes: la maintenance préventive

#### Exemple 3: Anticiper le vieillissement

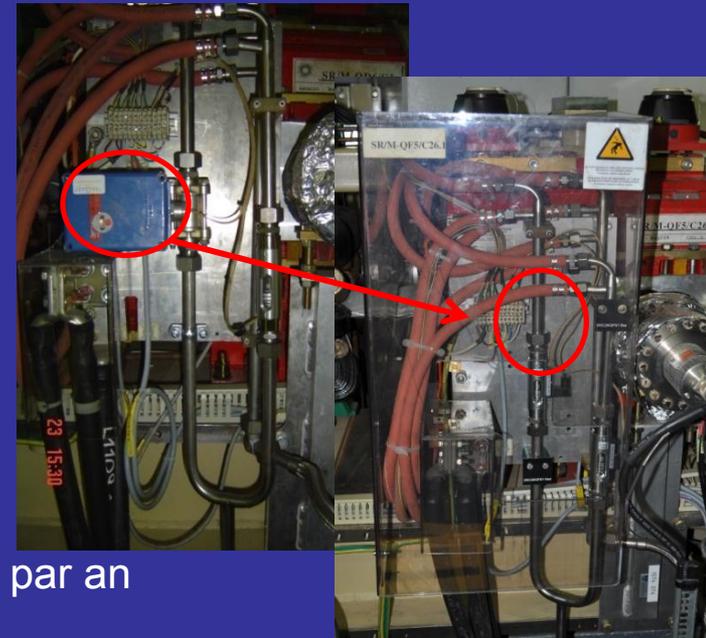
**Problème :** - 1200 « ELETTA » débitmètres en opération  
- maintenance importante due au vieillissement  
- pas de lecture du débit

**Risque:** - arrêt de la machine

**Action:** - étude de marché  
- test in situ ( radiation, EMC, accuracy,...)  
- 14 sur 32 cellules modifiées

**Gain :** - Pas de maintenance : 50 Keuros d'économies par an  
- Suivi de l'évolution du débit  
- anticipation des blocages  
- débitmètres trois fois moins chers

**Résultats: Meilleur suivi du refroidissement des composants de la machine**  
**Amélioration de la fiabilité**



## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

*Eviter la panne: Faire de la maintenance preventive*

### Exemple 4: Suivre l'évolution des sources de problèmes

Corrosion et abrasion des circuits de refroidissement des bobines des sextupôles



224 sextupôles!

Risques:  
micro fuites

Action: Mise en place d'une  
feuille de papier buvard au  
droit des interconnexions

Lors de chaque arrêt technique:  
Observation de l'évolution des taches et  
Intervention en cas de signe de fuite



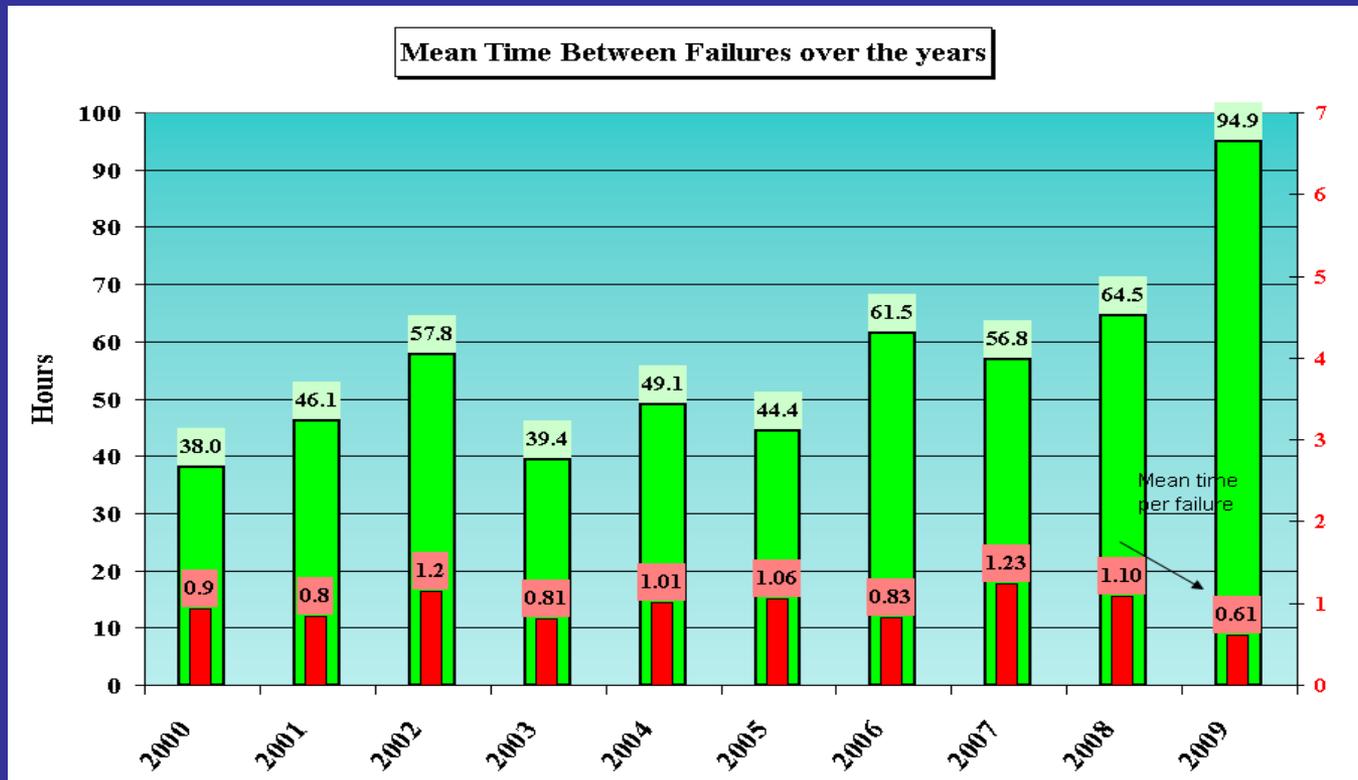
## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

### 5.3.3 Avoir une durée moyenne maximale entre deux pannes: *résultats*

Les résultats sont sans ambiguïté:

1994: 1 panne de 72 minutes toutes les 13 heures

2009 en cours: 1 panne de 40 minutes toutes les 95 heures !



## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

### 5.4 Diminuer le temps moyen d'une panne: introduction

La panne est là !

Il faut minimiser le temps de la panne !

2 types de méthodes:

- technique

- redondance passive: un équipement est prêt à prendre la relève

- organisationnelle

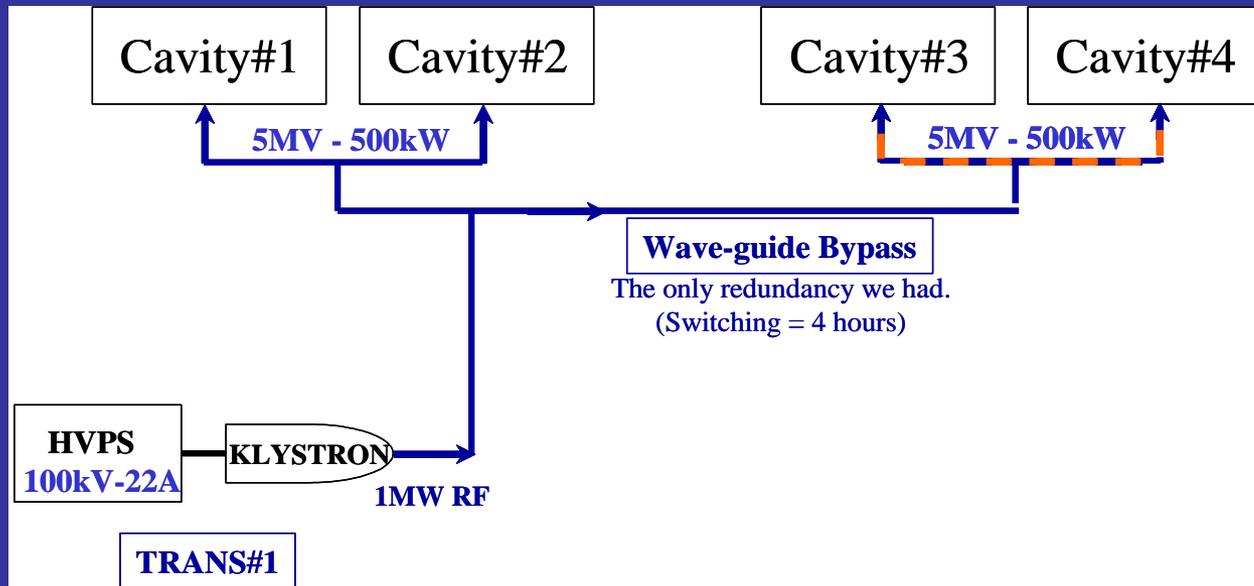
- procédures, pièces de réserve, formation, etc

## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

### 5.4.1 Diminuer le temps moyen d'une panne: redondance passive

#### Exemple 1: Redondance de klystrons radio-fréquence

- Avant 1995: 1 seul klystron – pleine puissance- alimente 4 cavités



Si panne klystron: 6 heures de remplacement en supposant que 2 – 3 personnes compétentes ont pu se déplacer (nuit, WE , ...)

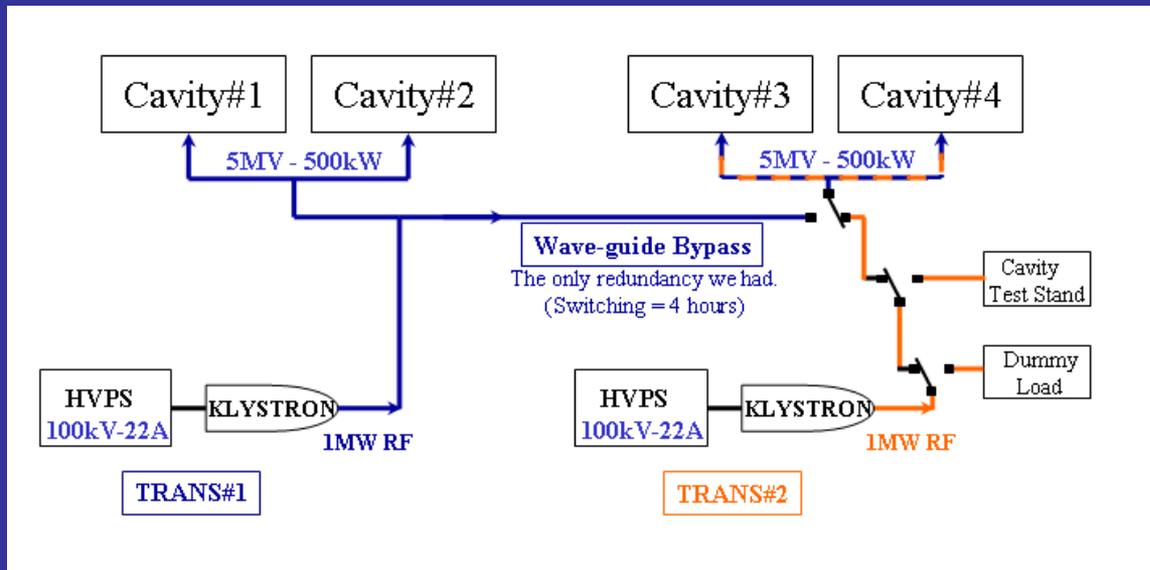
## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

### 5.4.1 Diminuer le temps moyen d'une panne: redondance passive

- 1995: 2 klystrons alimentent les 4 cavités (1 klystron = 2 cavités)

Avantage: Chaque klystron travaille à mi-puissance

Grand succès car le nombre de pannes chute drastiquement après cette amélioration

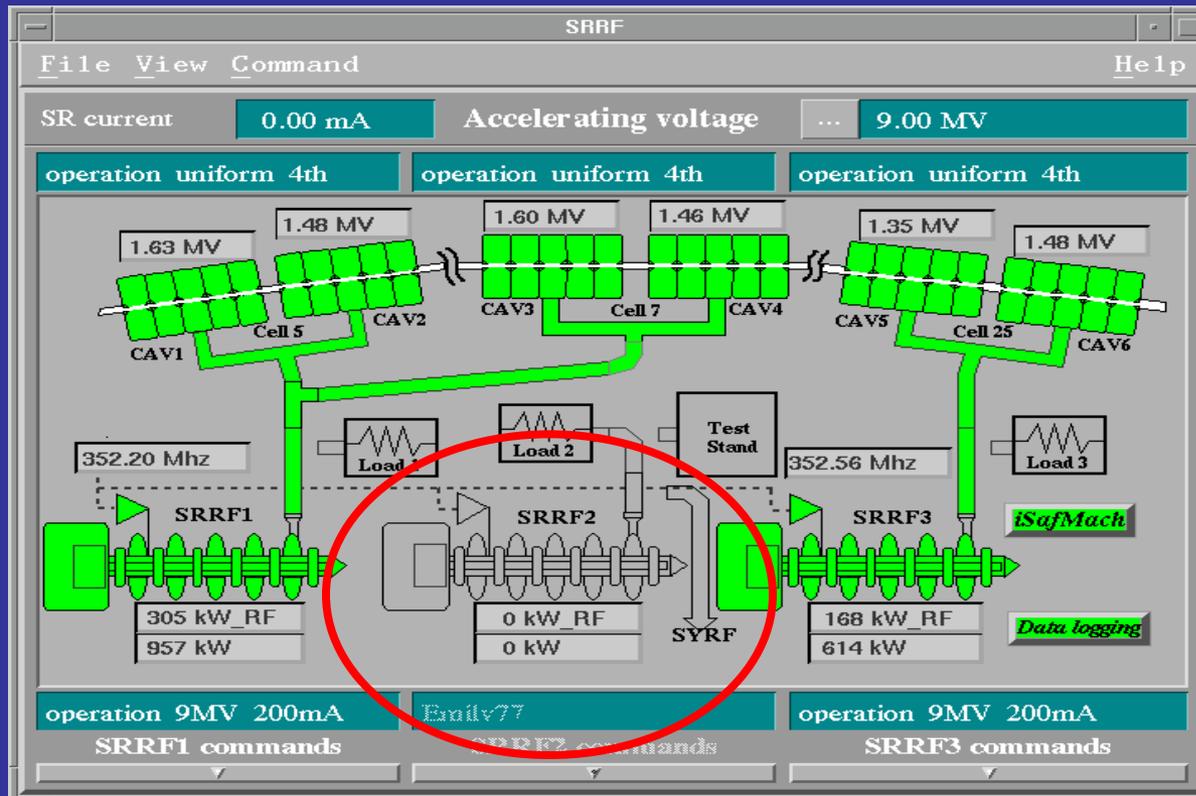


MAIS ... si panne klystron: il faut toujours 6 heures de remplacement en supposant que 2 – 3 personnes compétentes ont pu se déplacer (nuit, WE , ...) !!

## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

### 5.4.1 Diminuer le temps moyen d'une panne: redondance passive

- 1997: 1 klystron alimente 4 cavités
- + 1 nouveau klystron qui alimente 2 nouvelles cavités (6 cavités au total)



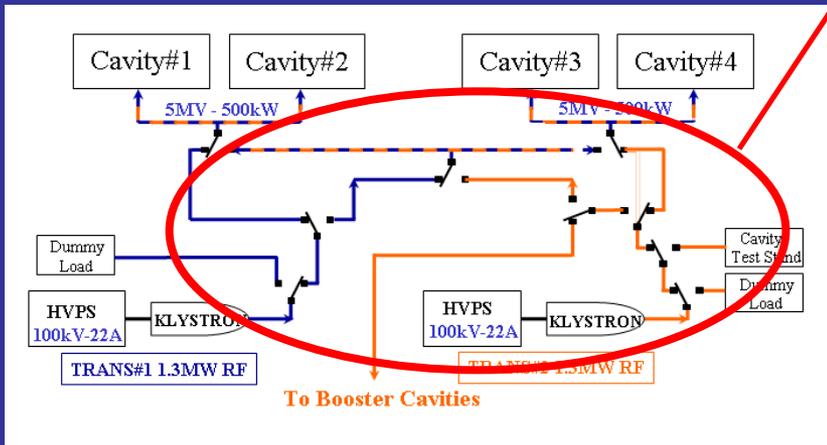
Un klystron est maintenant redondant !

## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

### 5.4.1 Diminuer le temps moyen d'une panne: redondance passive

#### AvantageS:

- Chaque klystron travaille à mi-puissance comme avant
- La puissance passe par 6 fenêtres de cavités plutôt que 4: risque de claquage de fenêtre devenu négligeable.
- En cas de panne sur le klystron 1, des switchs sur le circuit de guide d'onde permettent de connecter en quelques minutes le klystron 2 sur 4 cavités.



Résultat: Une panne de 6 heures avant 1997 ne dure plus que 15 - 30 minutes actuellement.

## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

### 5.4.1 Diminuer le temps moyen d'une panne: redondance passive

#### Exemple 2: Redondance d'alimentation de haute puissance

Dipôles:	1 alimentation	Il n'est pas concevable d'avoir 1 alimentation de réserve pour chaque famille !
Quadrupôles:	6 alimentations	
Sextupôles:	6 alimentations	

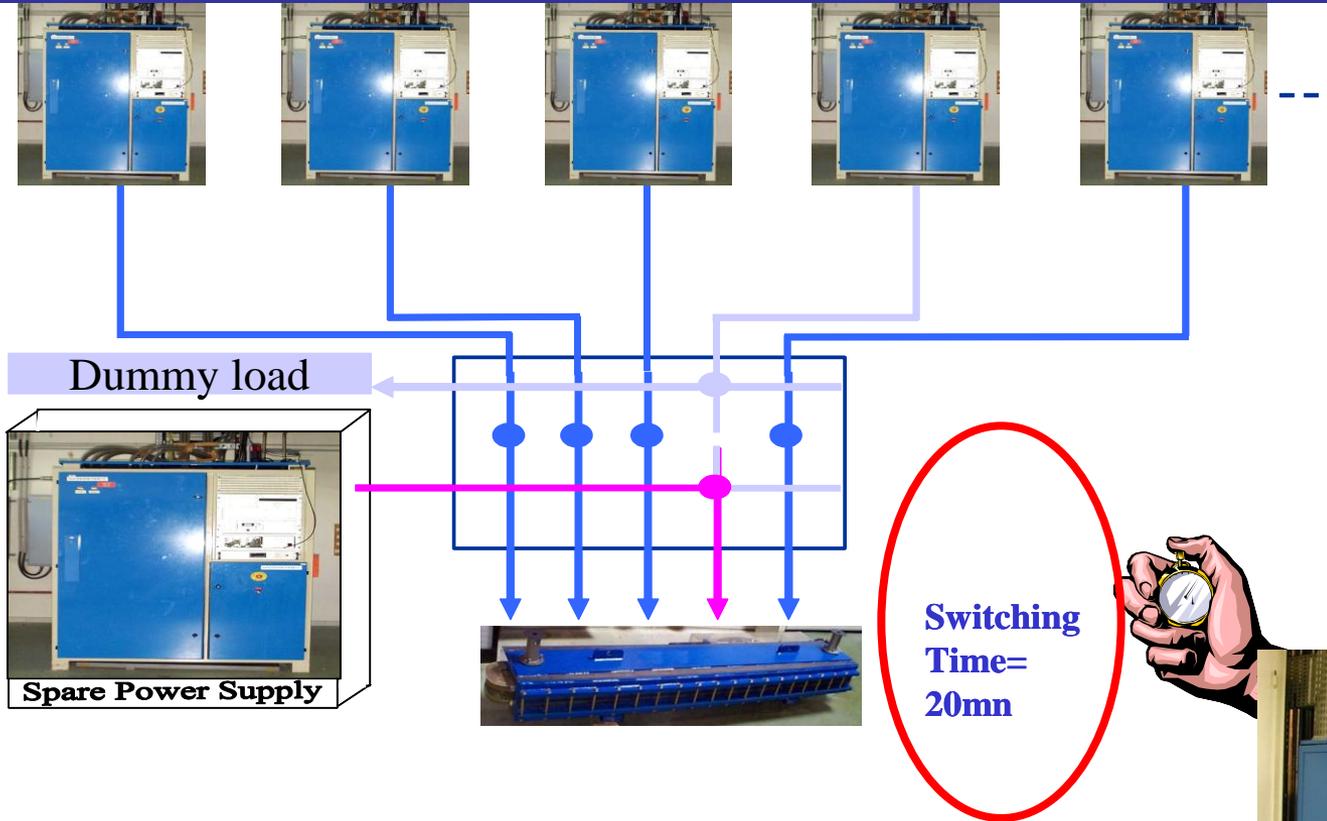
Idée 1: Avoir 1 'super-alimentation' capable de remplacer n'importe laquelle des alimentations ci-dessus !...

Mais ... il faut tout de même quelques heures pour décabler l'alimentation défailante et recabler la famille d'aimants à la « super-alimentation ».

Idée 2: Avoir une armoire géante de type matricielle, où passent tous les câbles de puissance de toutes les alimentations ainsi que les câbles de la 'super alimentation'

## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

### 5.4.1 Diminuer le temps moyen d'une panne: redondance passive



Courtesy of JM KOCH

Coût: 360 000 euros, mais Beaucoup d'heures de faisceau gagnées grâce à ce dispositif



## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

### 5.4.1 Diminuer le temps moyen d'une panne: de l'organisation !

La panne étant présente et une redondance passive étant supposée assurée, encore faut-il une organisation derrière tout cela ...

Les moyens mis en œuvre par l'opération à l'ESRF sont:

- 11 groupes d'experts joignables 24h/24h. Ils doivent être en mesure d'être présent sur site moins d'une heure après l'appel.
- Quelques procédures. Actuellement, une trentaine pour aider l'opérateur à mieux diagnostiquer et aider l'expert à distance
- Du matériel 'prêt à l'emploi' pour des réparations prévisibles. Plusieurs boîtes à outils préremplies du matériel adéquat pour une intervention sur un matériel donné
- Formation de terrain par les opérateurs. 20 % du temps de travail est effectué en horaire normal: formations / visites de terrain / discussion avec experts / travail dans d'autres groupes/ etc

## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

### 5.4.1 Diminuer le temps moyen d'une panne: de l'organisation !

- RETROUVER facilement l'information concernant une panne qui a déjà eu lieu.
  - Facile grâce à l'aide d'un logbook électronique avec un filtre perfectionné et très flexible.

Event	Accelerator	Equipment	Sub-Equipment	Message
Information	SR	SRRF	TRA2	P. Jodar : D.Boilot starts Tra2 at low power for Cavity conditioning till 12:00...
Information	SR	SRRF	TRA2	Jorn Jacob writes: We have successfully started the RF system in the 300 mA configuration (without beam). The FOC2 Voltage of TRA2 was out of range and therefore INTERLOCKED for about 25 minutes. Then, it was sufficiently warm to be inside the interlock window. For the RF experts: after some hours heating, one should probably re-adjust the Voltage Interlock level on the power supply.  For the operation group: If you have to switch to TRA2, then give about half an hour of warm up before FOC2 can be reset.
Information	SR	SRRF	TRA2	C.Niclas : D.boilot informs CTRM he stopps his test on SRRF2
Information	SR	SRRF	TRA2	C.Niclas :  we ask D.Boilot to stop the TRA2 tests : total power consumed too high
Information	SR	SRRF	TRA2	Stephane writes: D. Boilot switched TRA2 on T-Stand
Information	SR	SRRF	TRA2	Stephane writes: D. Boilot switch SRRF2 on Test stand until tomorrow
Information	SR	SRRF	TRA2	C.Niclas  D.Boilot informs CTRM : TRA2 started for tests now and hopefully until to morrow morning....it needs about 800kW
Information	SR	SRRF	TRA2	C.Niclas :  TRA2 running for tests now and hopefully during all the next night in case of trip, do not try to restart it ! in case of power limitation, please stop it (low heating)
Information	SR	SRRF	TRA2	Pierre Jodar writes: Call from D.Boilot, he restarts TRA2 for cavity conditioning...
Information	SR	SRRF	TRA2	C.Niclas SRRF : D.Boilot informs CTRM ---> TRA2 will be kept running for tests until to morrow morning (HQPS in by pass) if any problem occurs let it as it is
Information	SR	SRRF	TRA2	C.Niclas

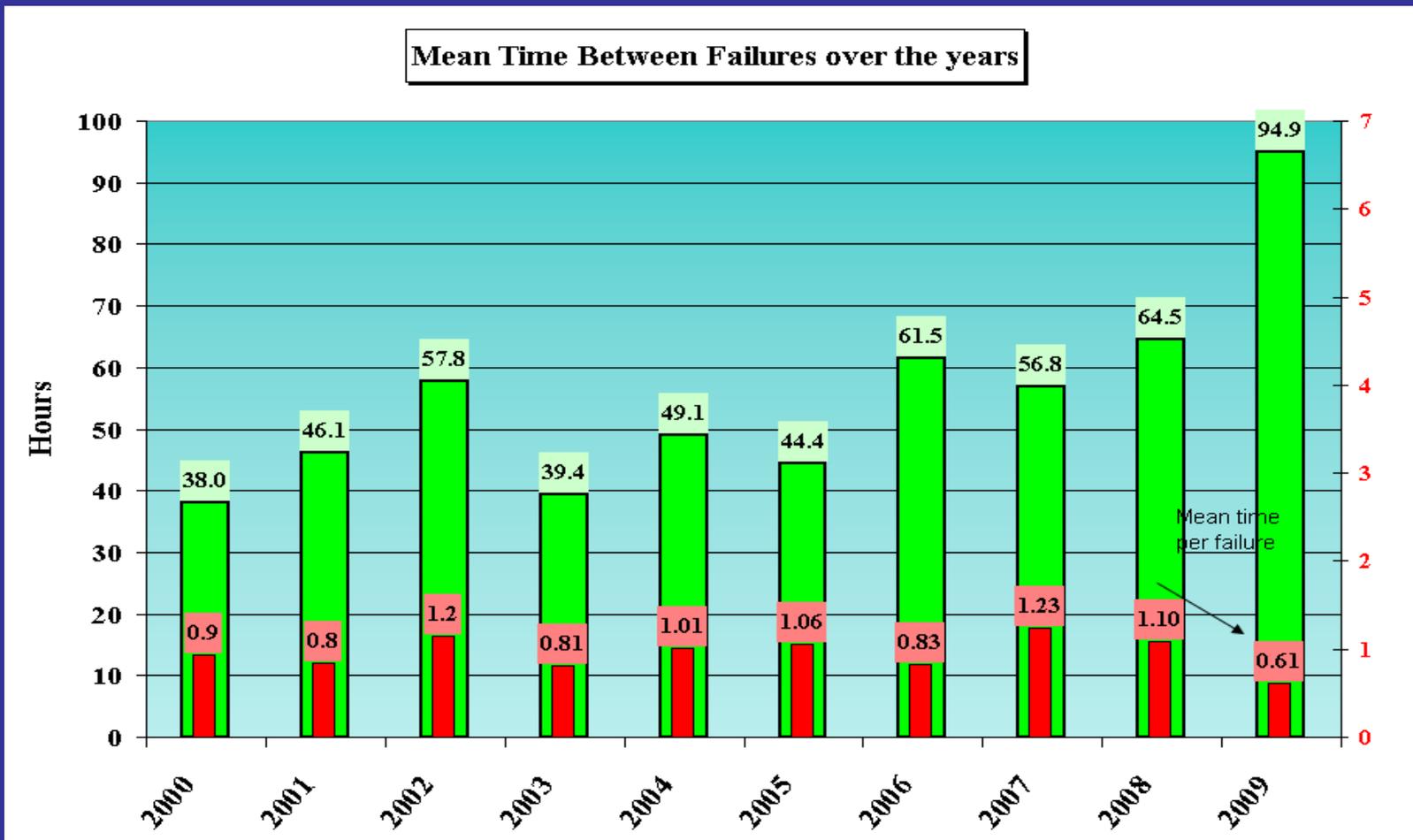
Ce filtre permet, par exemple, de retrouver TOUTES les informations enregistrées concernant le klystron N° 2 du système RF de l'anneau de stockage.

De même, toutes les procédures sont archivées dans une base de donnée et peuvent être retrouvées grâce à un filtre très performant.

## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

### 5.4.1 Diminuer le temps moyen d'une panne: conclusions

Le graphique ci-dessous illustre bien que le temps perdu du aux pannes s'est considérablement amélioré depuis 12 ans



## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

*En conclusion de l'approche globale ...*

Au quotidien, l'opérateur reste le premier maillon de la chaîne. Il est le premier face à l'événement, le constate, le décrit, l'archive et transmet à l'expert de l'équipement.

L'expert analyse s'il s'agit d'un cas probablement isolé ou non

Le cas échéant, l'expert a pour mission de mettre en œuvre des outils pour éviter la panne, diminuer sa fréquence, mettre en œuvre des outils, des procédures pour diminuer le temps de panne si elle survient encore.

Lorsqu'on veut un accélérateur fiable, on doit avoir une politique globale de fiabilité, de maintenance préventive, etc ... qui, en effet, peut se révéler couteuse.

Mais rappelons qu'une heure de perdue coute 14 000 euros !...

## 6. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE QUOTIDIENNE

- INTRODUCTION
- Une TRÈS BRÈVE histoire des accélérateurs jusqu'à l'ESRF
- L'ESRF AUJOURD'HUI
- LES ACCÉLERATEURS DE L'ESRF
- FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE
- FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE QUOTIDIENNE
- CONCLUSIONS et REMERCIEMENTS

## 6. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE QUOTIDIENNE

### *Objectif*

Le chapitre précédent indiquait des exemples de tâches de fond (long – moyen terme) qui ont une influence sur l'opération des accélérateurs au quotidien, notamment en termes de fiabilité.



Cette partie se concentrera plus sur les outils de contrôle de la qualité du faisceau gérée au quotidien par la salle de contrôle.

## 6. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE QUOTIDIENNE

### *Les différents modes de faisceau*

Différents types d'utilisateurs → compromis quant au mode délivré

Les différents possibilités de structure de faisceau sont décidées tous les 6 mois.

Certaines expériences demandent:

- un mode intense et uniforme
- un mode intense avec un trou dans la structure (gap)
- un mode intense et structuré en temps
- un mode peu intense (pour avoir un bunch court) avec structure en temps.

Au quotidien, un des rôles de l'opérateur est de remplir les accélérateurs 2 à 6 fois par jour dans un mode défini. L'opérateur doit également établir la procédure de remplissage, la tester et la rendre compréhensible pour ses collègues. Certains modes sont assez complexes.

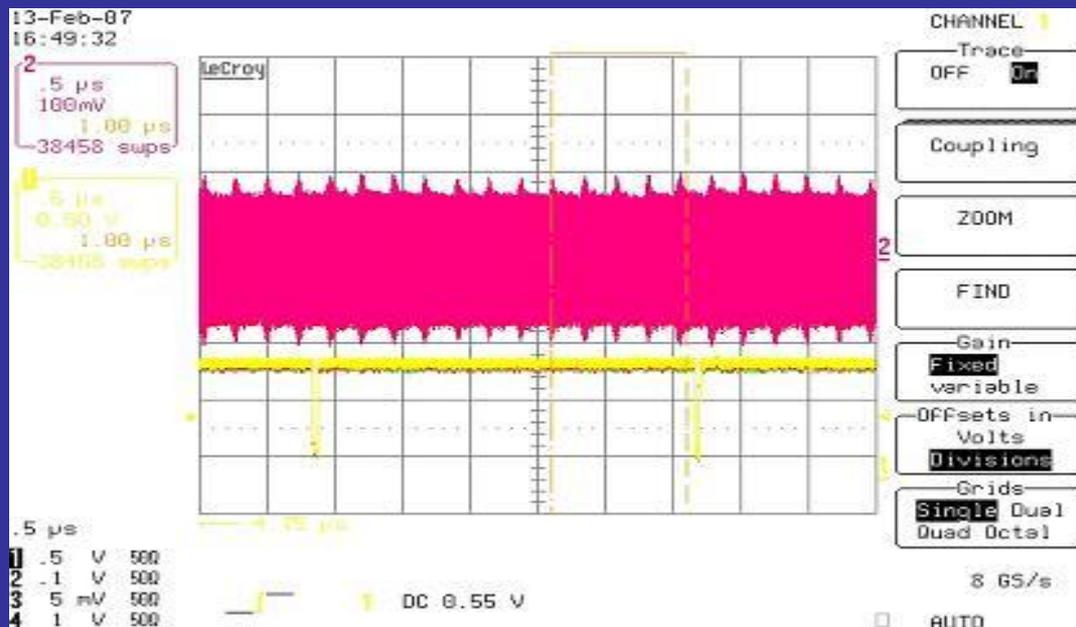
## 6. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE QUOTIDIENNE

### 6.1.1: Les différents modes de faisceau: le mode uniforme

Rappelons qu'il y a 992 espaces disponibles dans l'anneau de stockage et qu'un système de timing performant permet d'y placer « l'intensité qu'on veut à l'endroit que l'on veut », ce qui offre une infinité de possibilités.

- **Le mode uniforme**

Il est le plus simple à décrire puisque dans ce cas, la totalité des buckets disponibles est occupée, soit 992 bunches. Il est délivré à 200 mA

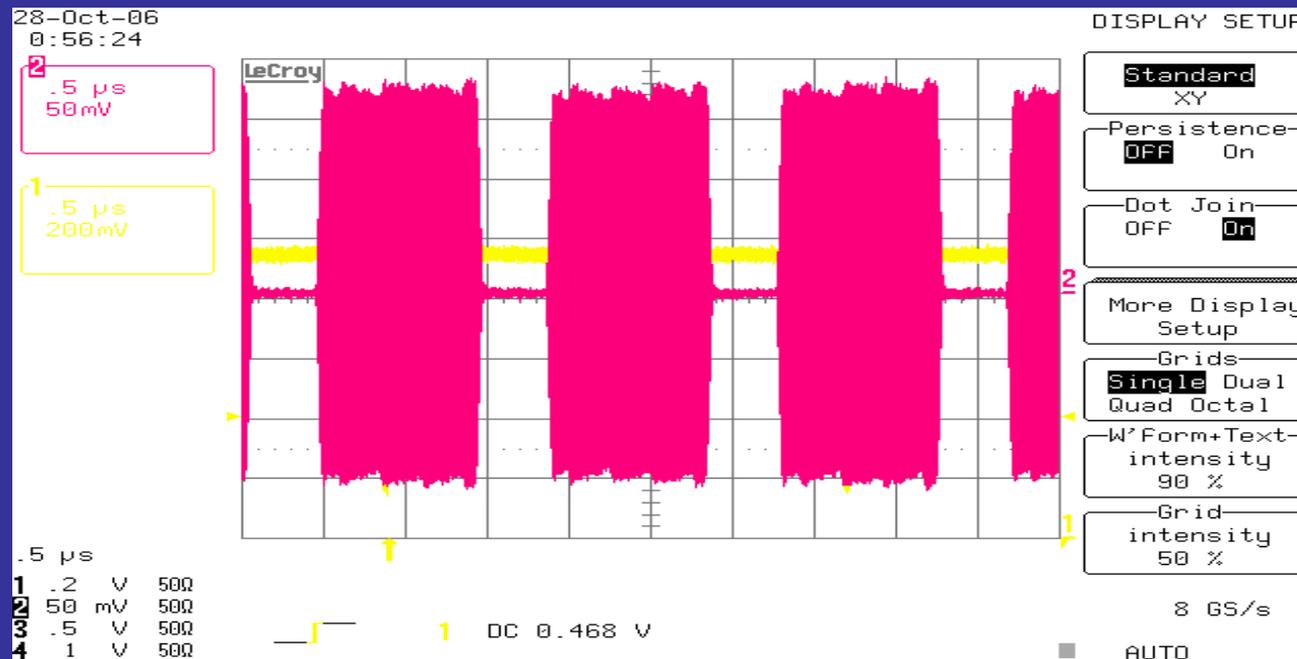


## 6. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE QUOTIDIENNE

### 6.1.2 Les différents modes de faisceau: le mode 2 \* 1/3

- **Le mode 2 \* 1/3**

2 \* 1/3 de la circonférence sont remplis. Ils sont séparés par 2 gaps vides (1/6 de la circonférence). La présence de ces gaps élimine les ions piégés par le faisceau lorsque les conditions de vide ne sont pas parfaites (ce qui n'est pas le cas du mode uniforme).



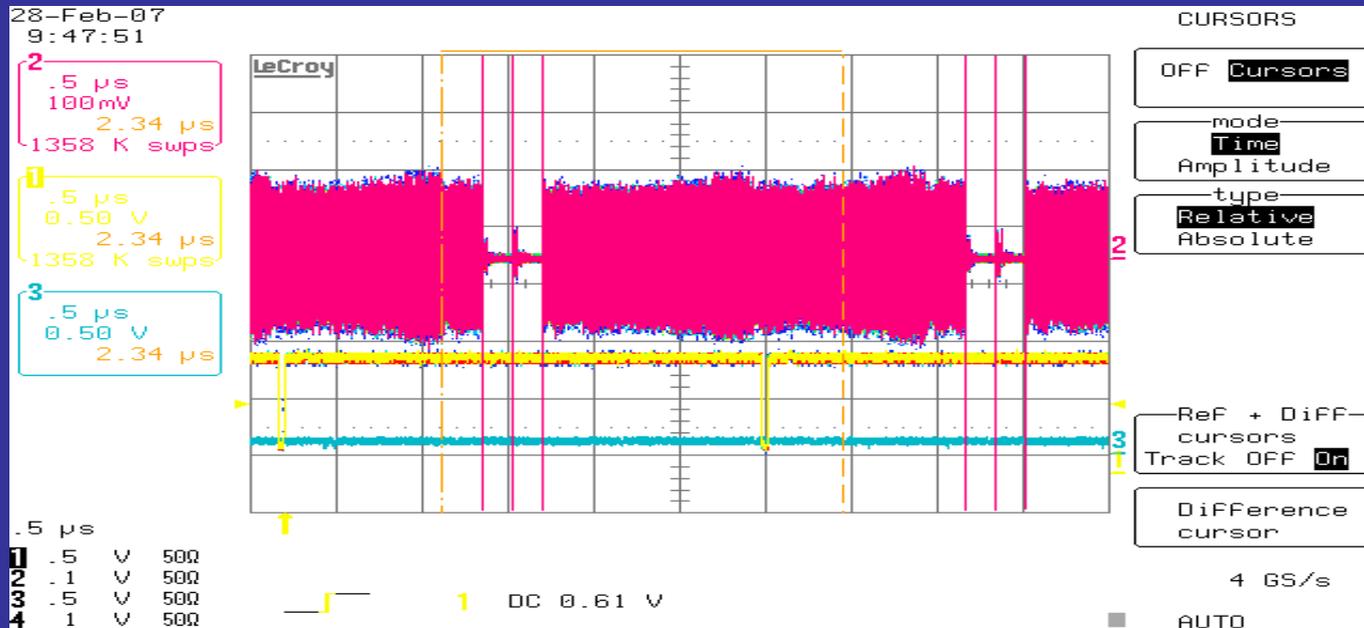
## 6. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE QUOTIDIENNE

### 6.1.3 Les différents modes de faisceau: le mode 7/8 + 1

- Le mode 7/8 + 1

Structuré en temps et de haute intensité.

7/8 de la circonférence est remplie d'électrons (c'est-à-dire 868 bunches – donc 0.23 mA / bunch). Le gap de 1/8 est rempli avec un bunch de 2 mA. L'objectif est de satisfaire tant les utilisateurs ayant besoin d'une grande intensité que ceux ayant seulement besoin d'un single bunch.

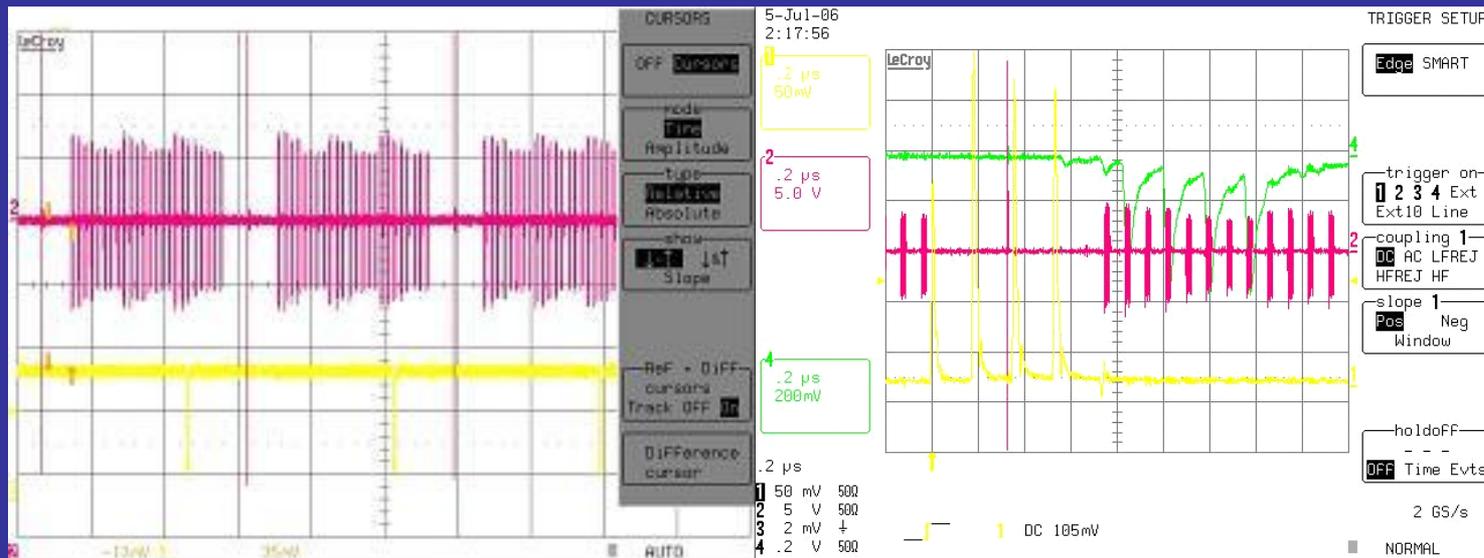


## 6. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE QUOTIDIENNE

### 6.1.4 Les différents modes de faisceau: le $24 * 8 + 1$

- **Le mode  $24 * 8 + 1$**

Satisfait les utilisateurs ayant besoin d'intensité, ceux ayant besoin de structure en temps (24 paquets de 8 bunches) et ceux ayant seulement besoin d'un seul bunch. 24 paquets de 8 bunches sont répartis sur  $\frac{3}{4}$  de la circonférence. Le quart restant est vide à l'exception d'un single bunch de 4 mA en son centre. L'intensité totale: 200 mA.

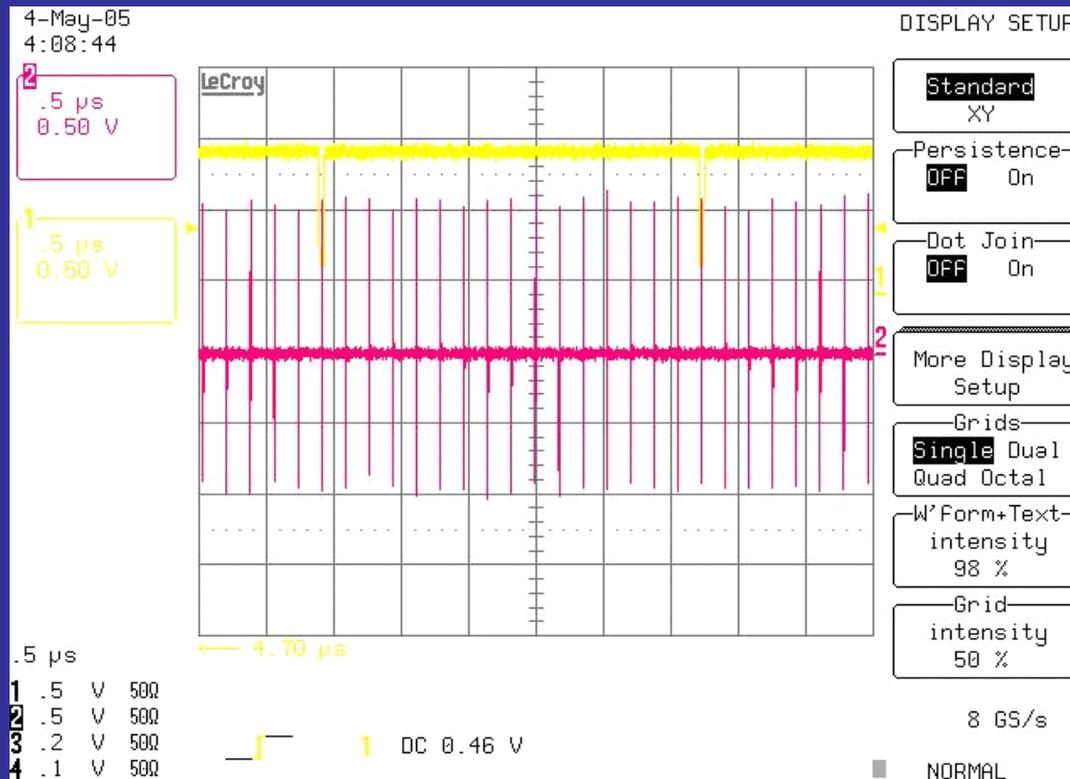


## 6. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE QUOTIDIENNE

### 6.1.5 Les différents modes de faisceau: le 16 bunch

- Le mode 16 bunch

16 bunches sont répartis de manière équidistante sur les 844 mètres avec une intensité de 5.6 mA / bunch, soit un courant total de 90 mA.

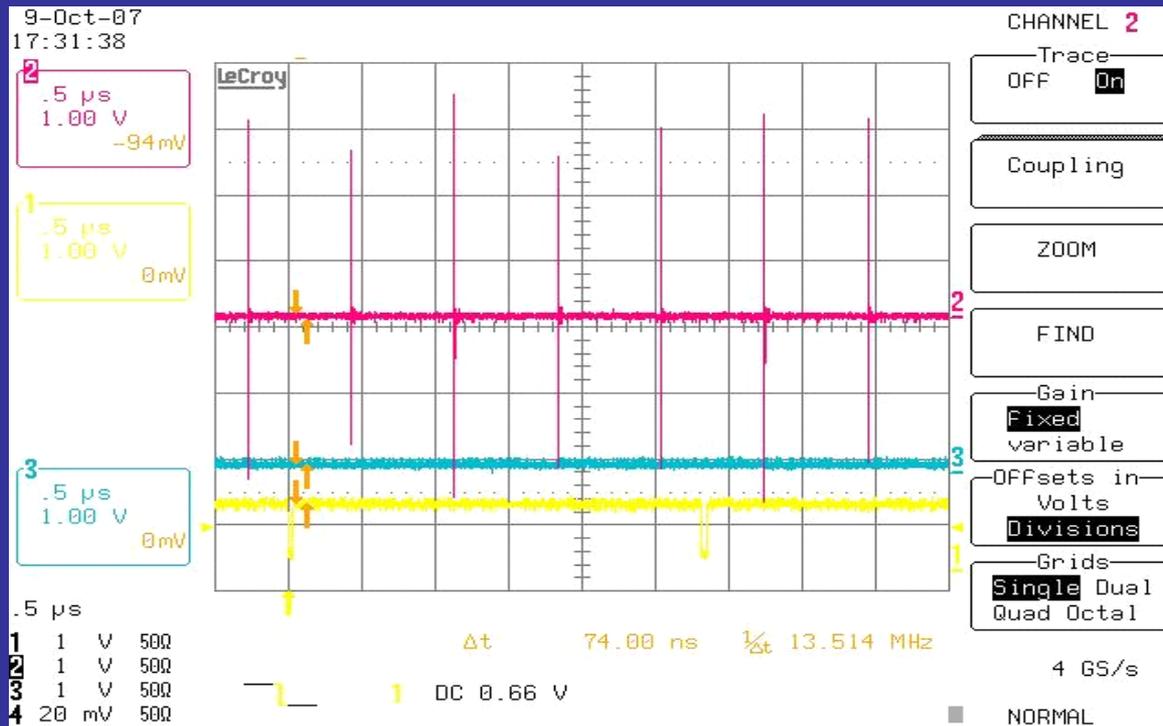


## 6. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE QUOTIDIENNE

### 6.1.6 Les différents modes de faisceau: le $4 * 10 \text{ mA}$

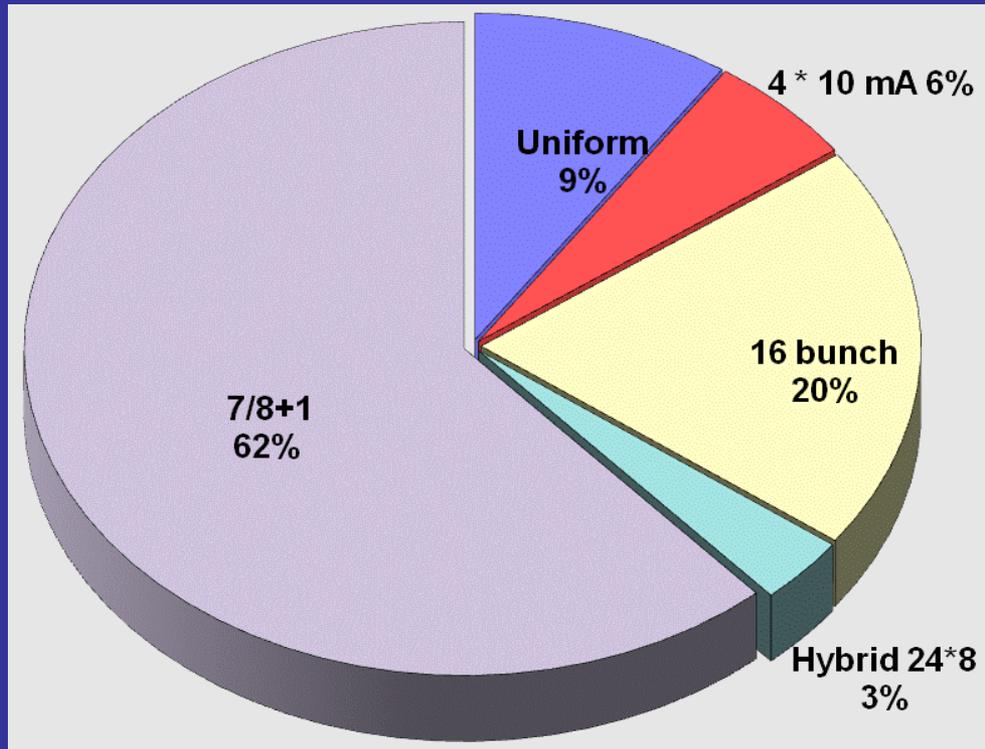
- Le mode  $4 * 10 \text{ mA}$

4 bunches de  $10 \text{ mA}$  sont réparties uniformément sur la circonférence avec une intensité de  $10 \text{ mA}$  / bunch soit une intensité totale de  $40 \text{ mA}$



## 6. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE QUOTIDIENNE

### 6.1.7 Les différents modes de faisceau: répartition annuelle



91 % du temps de faisceau en mode structure temporelle

## 6. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE QUOTIDIENNE

### 6.2.1 Les critères de qualité du faisceau: la pureté

#### Contôle de la pureté

Les modes structurés en temps nécessitent tous une étape supplémentaire: le 'cleaning'.

Pourquoi: certaines expériences nécessitent l'observation d'une 'décroissance' suite à l'excitation par un paquet principal. Des paquets parasites peuvent réexciter l'échantillon pendant la décroissance qu'on souhaite la moins perturbée possible.

L'objectif est de supprimer tous les électrons 'parasites' se trouvant dans les paquets adjacents au paquet principal

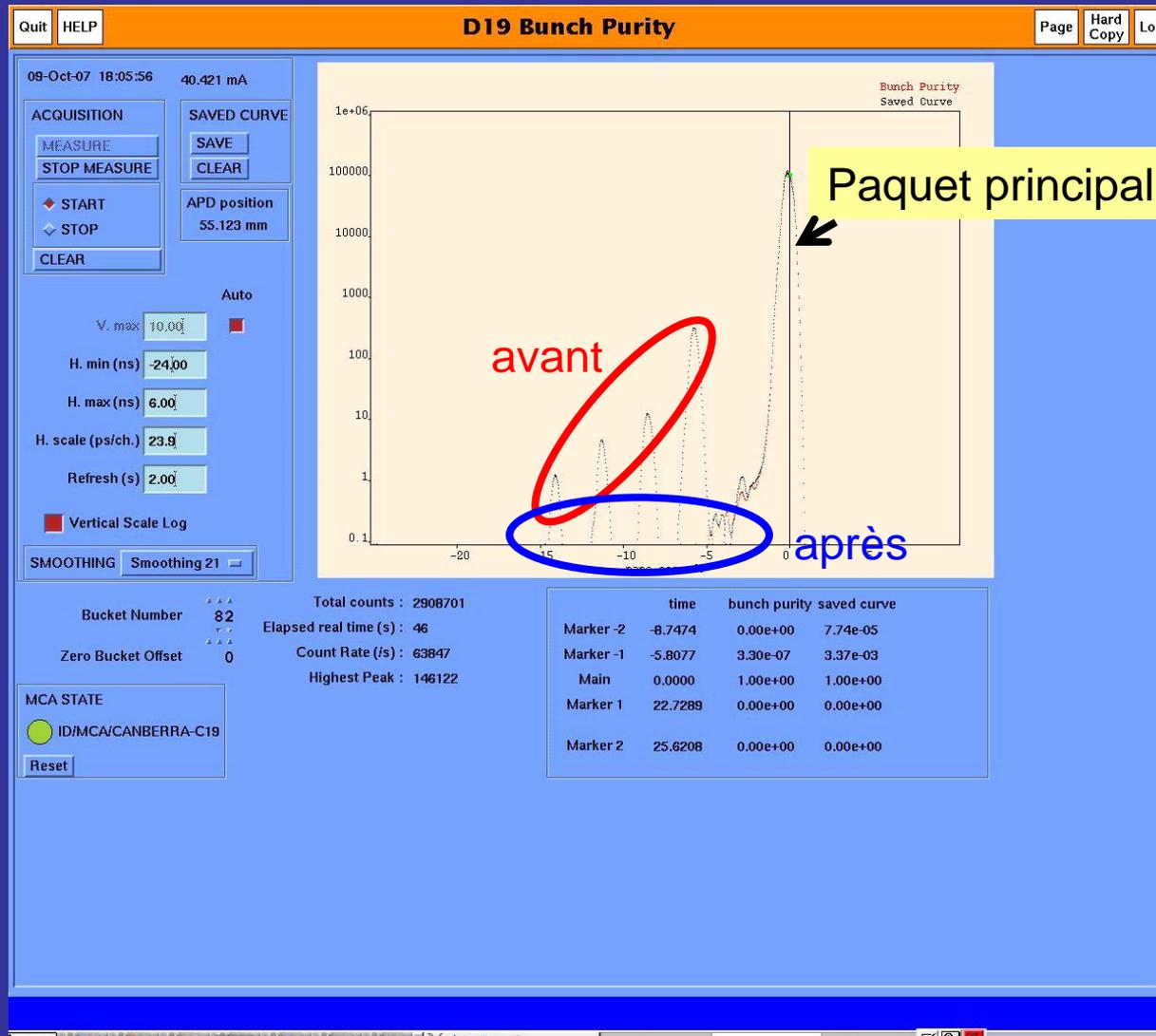
Méthode: le point de fonctionnement dépend de l'intensité.

Donc, un paquet 'parasite' peu intense, n'a pas le même point de fonctionnement que le paquet principal très intense.

On va donc exciter les paquets parasites a LEUR fréquences de résonance, faire grossir ces paquets et les raboter à l'aide de scrapers ! Le paquet principal ne ressentant pas cette fréquence de résonance puisqu'il n'a pas le même point de fonctionnement, va rester intact !

# 6. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE QUOTIDIENNE

## 6.2.1 Les critères de qualité du faisceau: la pureté



## 6. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE QUOTIDIENNE

### 6.2.2 Les critères de qualité du faisceau: le temps de vie

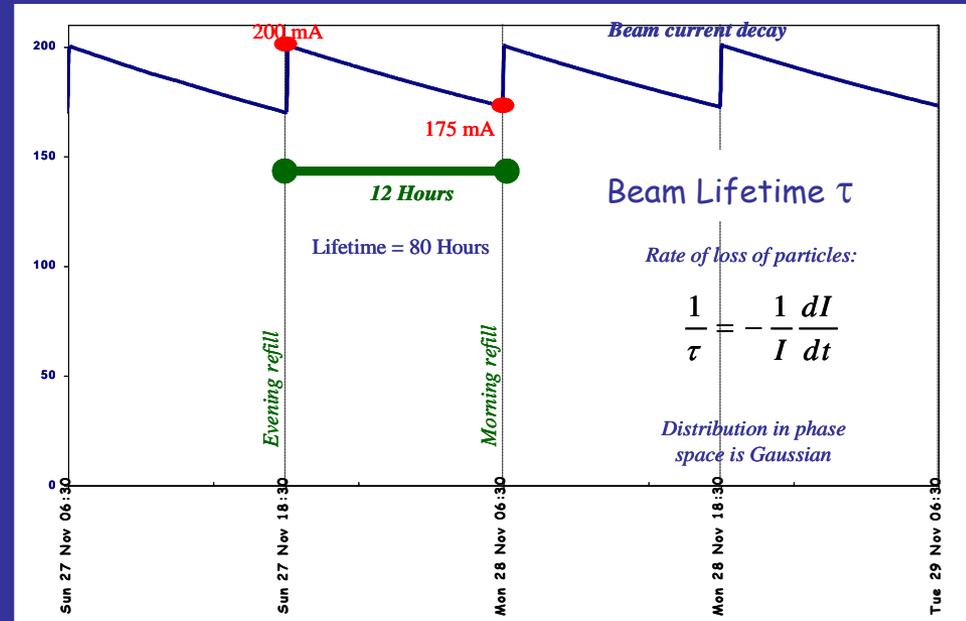
La décroissance en courant dépend de:

- La qualité du vide
  - ➔ Probabilité de collision avec le gaz résiduel
- Nombre d'électrons par paquet donc du courant total
  - ➔ Probabilité de collision à l'intérieur du paquet d'électrons
- Optique de la machine
  - ➔ Acceptance dynamique transverse et longitudinal
- Dimensionnement de la chambre à vide
  - ➔ Acceptance transverse

$$\frac{1}{\tau} = -\frac{1}{I} \frac{dI}{dt}$$

$$\frac{1}{\tau} = \sum_i \frac{1}{\tau_i}$$

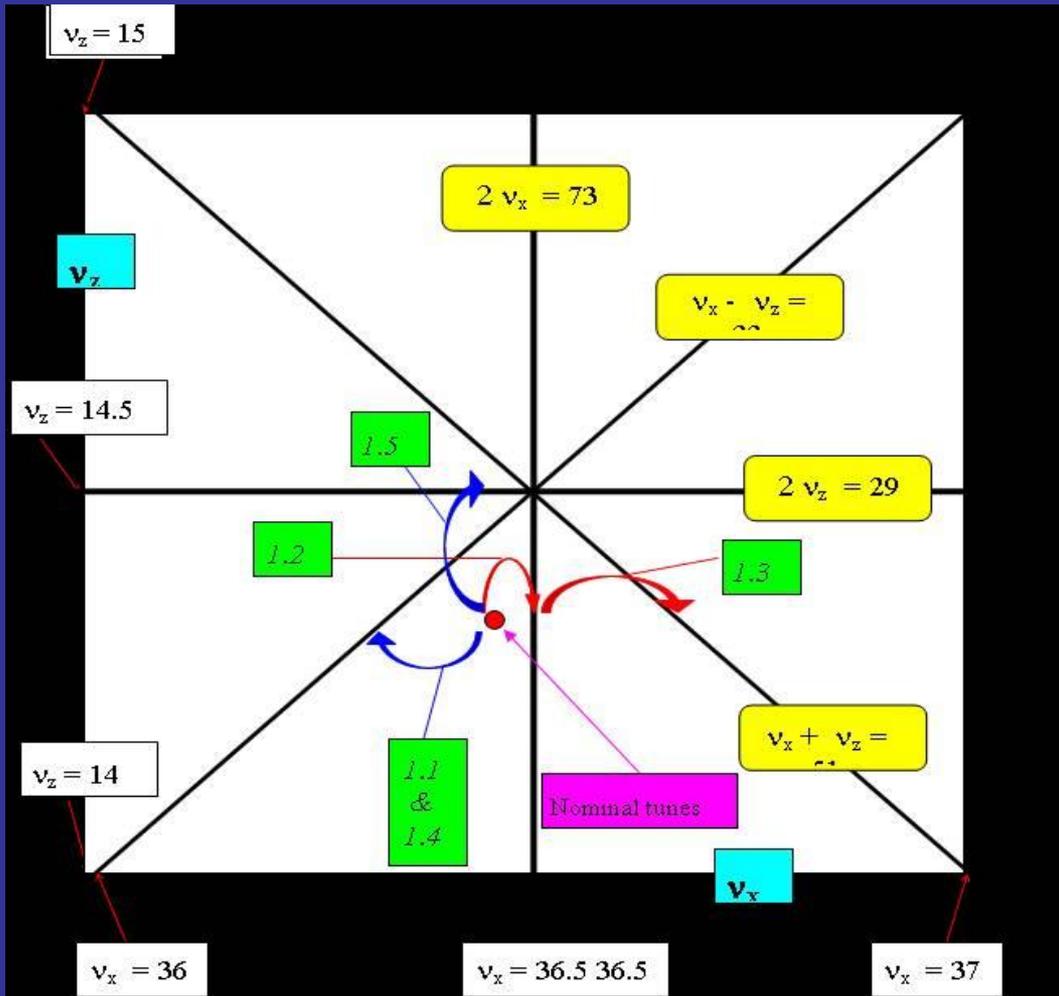
Les paramètres qui vont déterminer le temps de vie du faisceau feraient l'objet d'un cours de dynamique de faisceau, hors du cadre de ce cours. Nous ne citerons ici que les paramètres sur lesquels les opérateurs peuvent agir au quotidien.



## 6. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE QUOTIDIENNE

### 6.2.2 Les critères de qualité du faisceau: le temps de vie

- Les corrections de résonance:



- Chaque semaine, lorsqu'un mode est testé avant d'être livré la semaine suivante aux utilisateurs, une correction de résonance est effectuée.

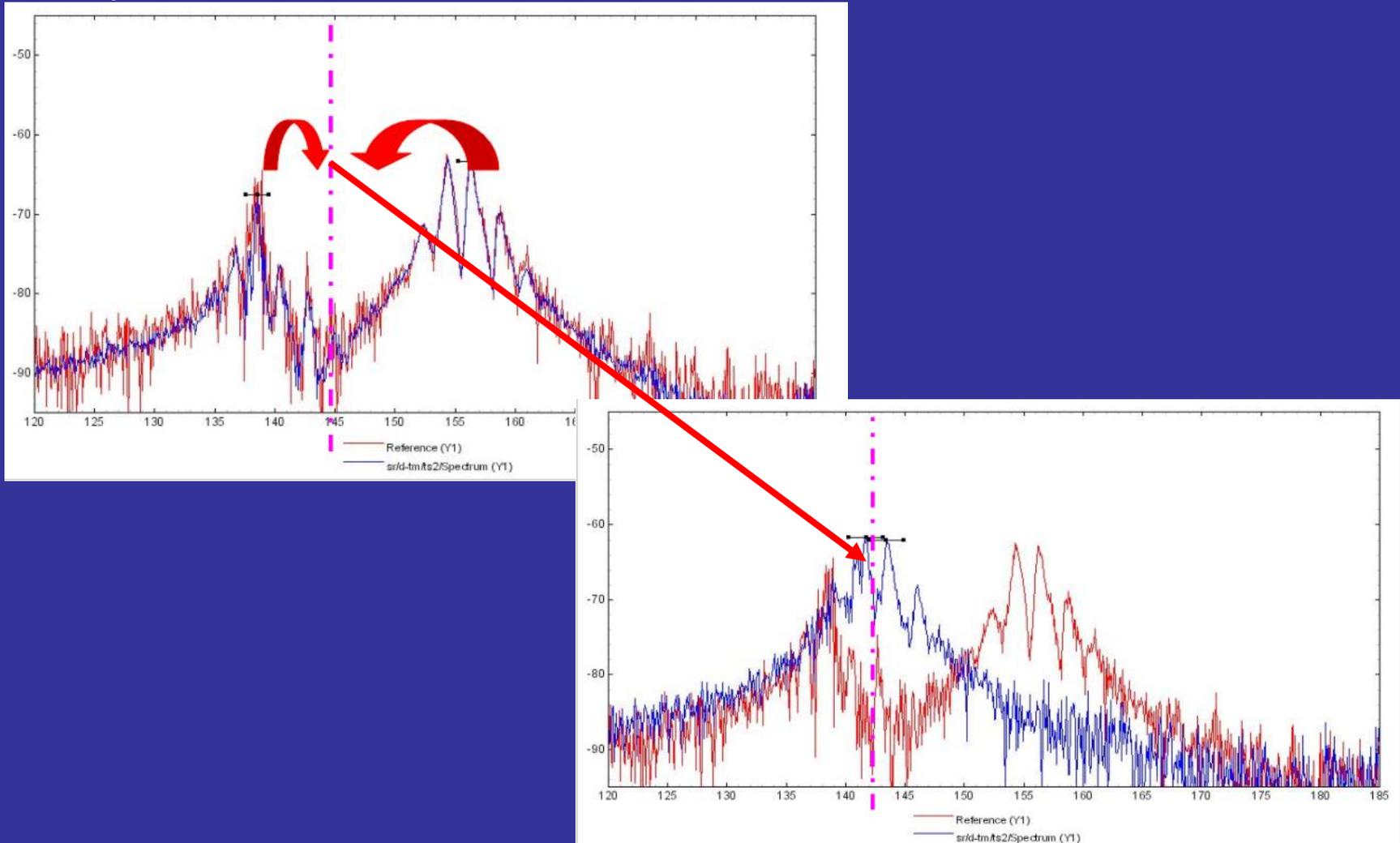
- La correction consiste à approcher volontairement les tunes du faisceau près de ces lignes de résonance et même, sur les résonances afin de trouver le réglage des correcteurs qui vont permettre au faisceau de survivre près de ces lignes.

- **La qualité de cette correction influencera le temps de vie, la vitesse d'injection, la saturation de l'injection du faisceau à des intensités élevées et les tailles de faisceau (les émittances).**

## 6. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE QUOTIDIENNE

### 6.2.2 Les critères de qualité du faisceau: le temps de vie

#### Exemple de correction de résonance



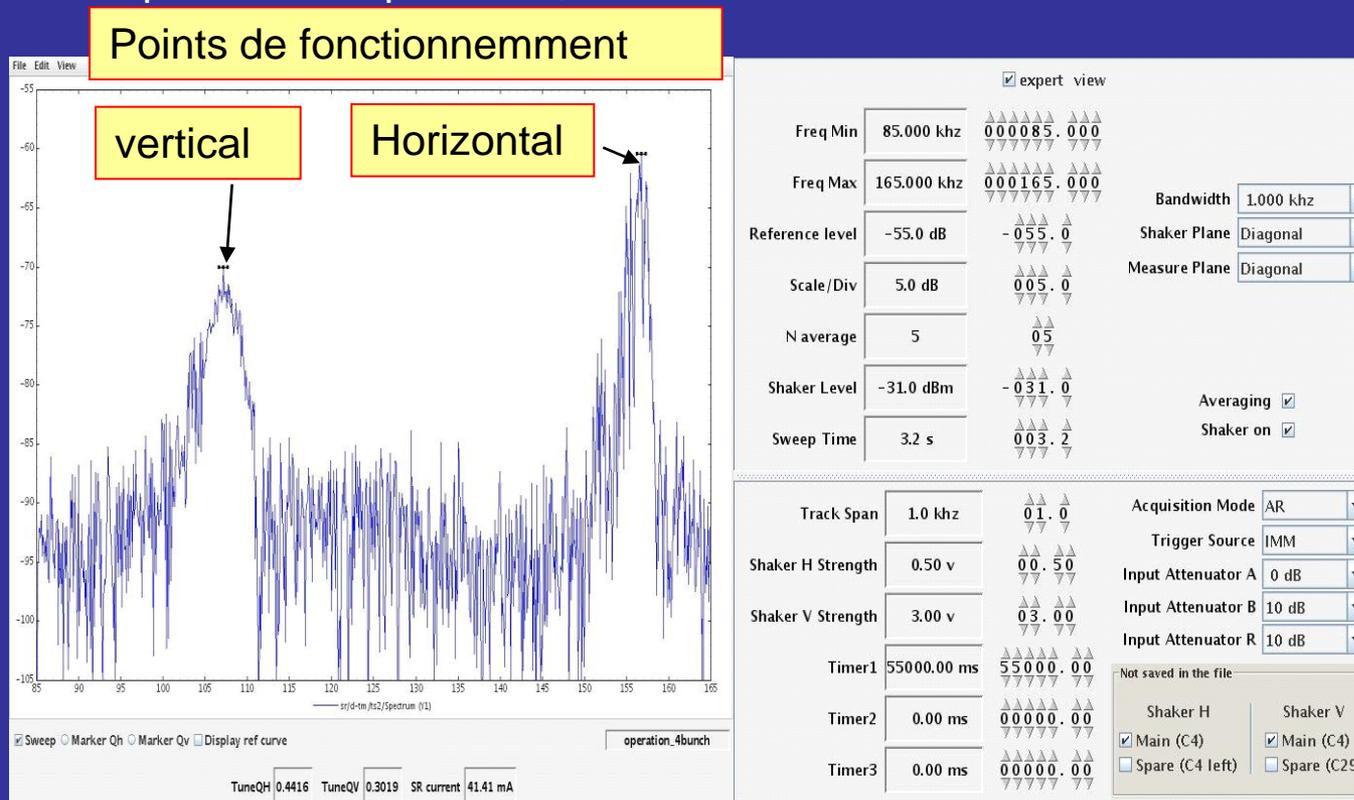
## 6. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE QUOTIDIENNE

### 6.2.2 Les critères de qualité du faisceau: le temps de vie

- Le point de fonctionnement:

L'opérateur doit vérifier qu'il n'y pas de dérive anormale du point de fonctionnement.

Conséquences: temps de vie, taille faisceau.



## 6. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE QUOTIDIENNE

### 6.2.2 Les critères de qualité du faisceau: le temps de vie

- Le vide dans l'anneau de stockage:

L'opérateur est rapidement alerté de la moindre anomalie du niveau de vide à n'importe lequel des 224 endroits où se trouve une jauge.

Le niveau de vide dans l'anneau de stockage a une incidence directe sur le temps de vie du faisceau.

Dans des conditions nominales, un accident de temps de vie ou une dégradation lente pourraient indiquer les prémices d'une fuite de vide.

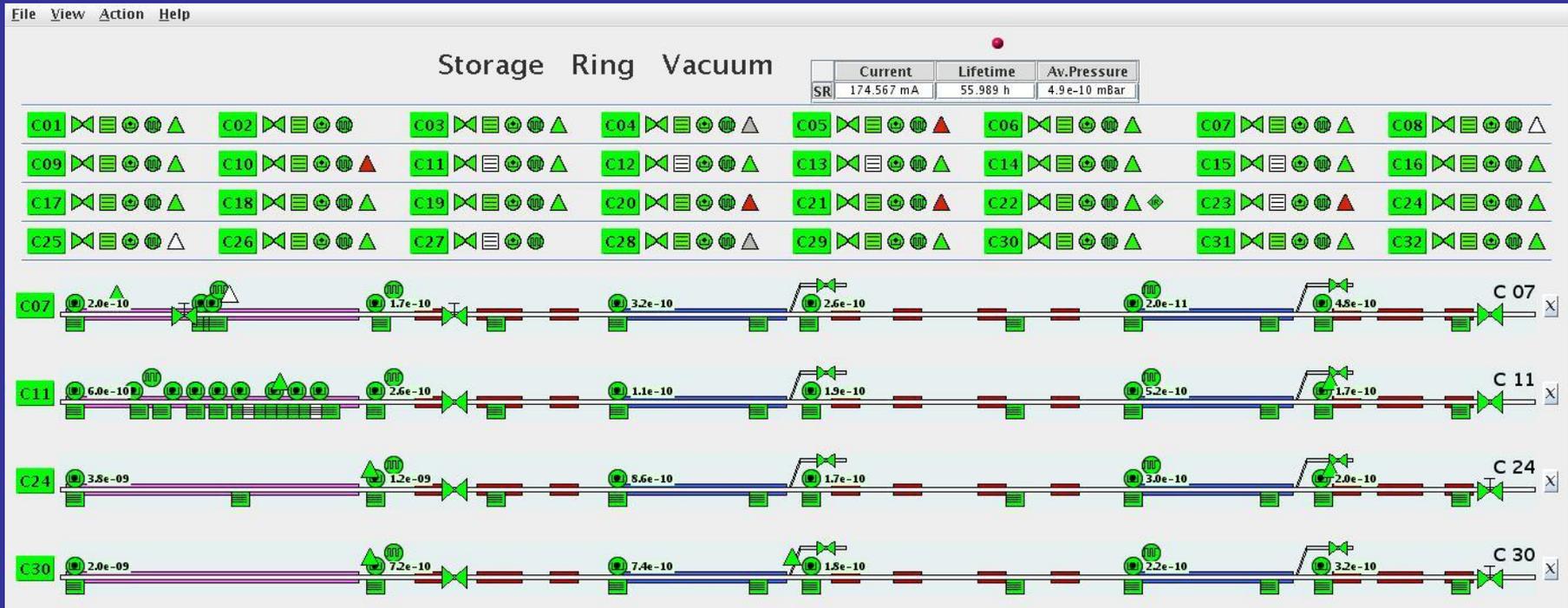
Plusieurs outils existent pour détecter un endroit éventuel où le vide pourrait se détériorer.

Une lecture directe des jauges de vide avec une mémorisation des points les plus hauts depuis X minutes dans un but de comparaison.

# 6. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE QUOTIDIENNE

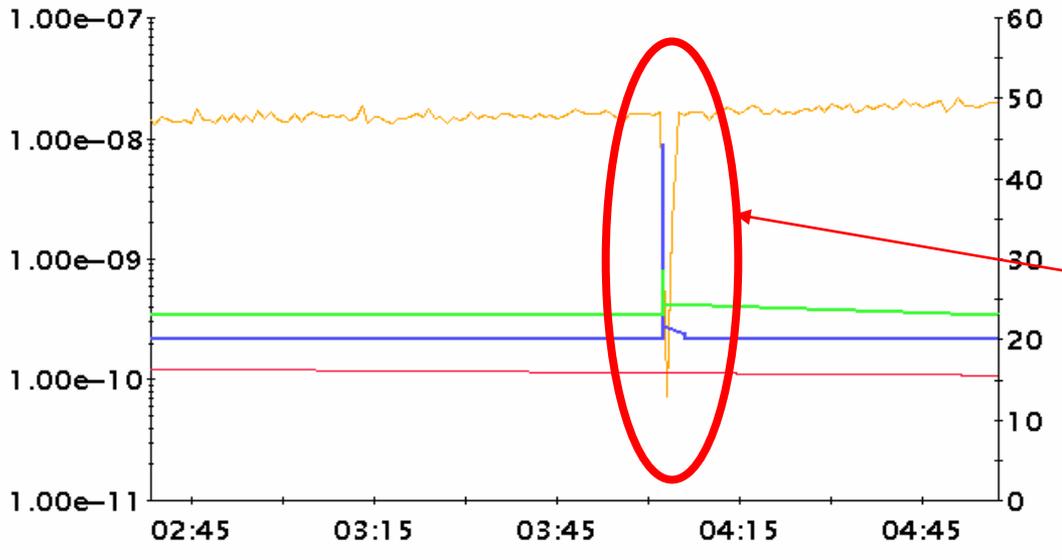
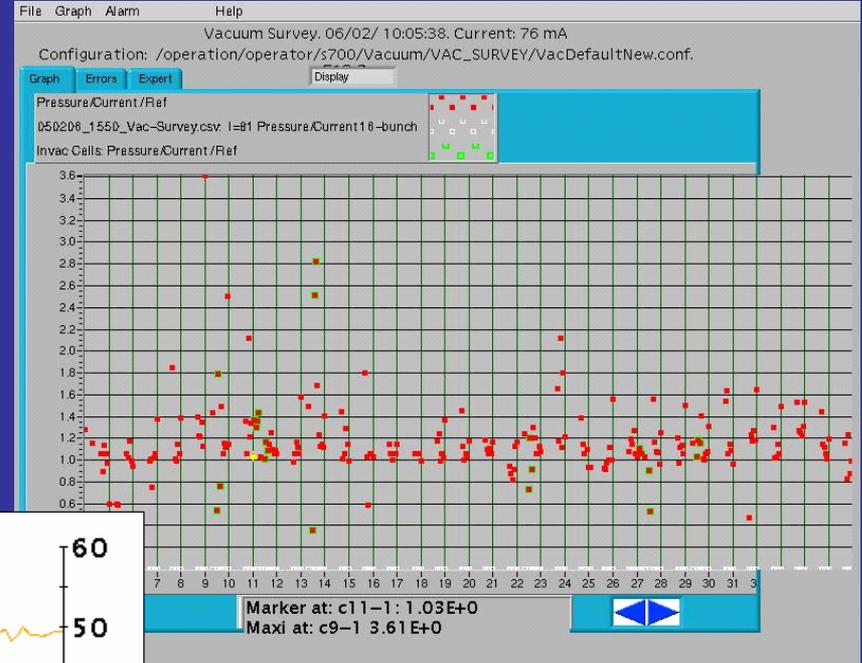
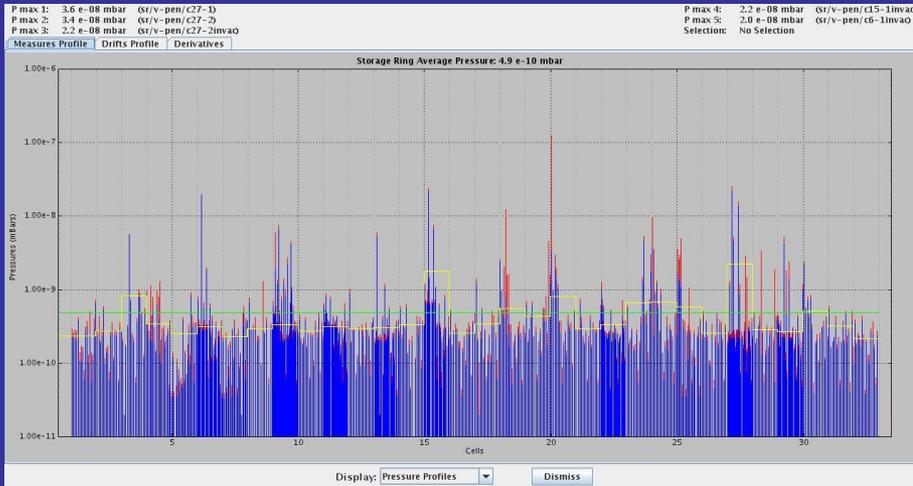
## 6.2.2 Les critères de qualité du faisceau: le temps de vie

- Le vide dans l'anneau de stockage:



# 6. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE QUOTIDIENNE

## 6.2.2 Les critères de qualité du faisceau: le temps de vie

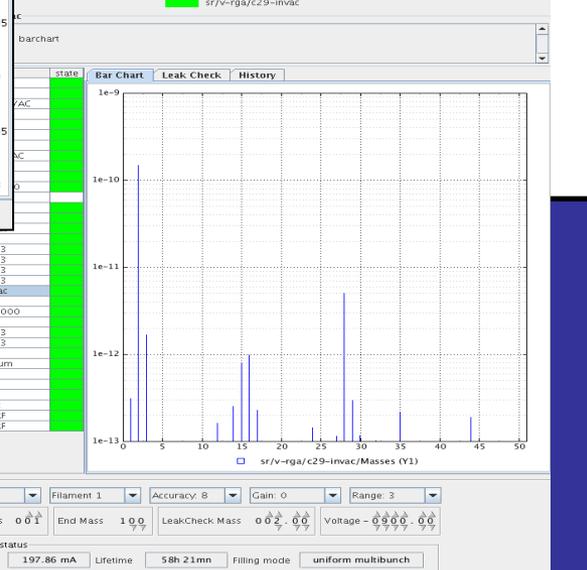
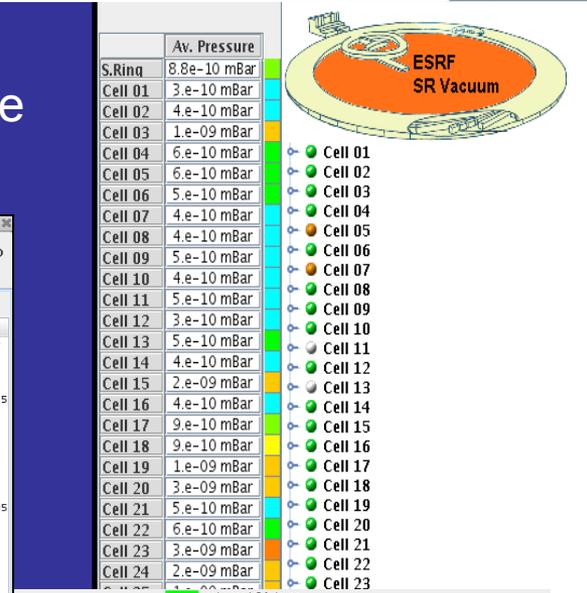
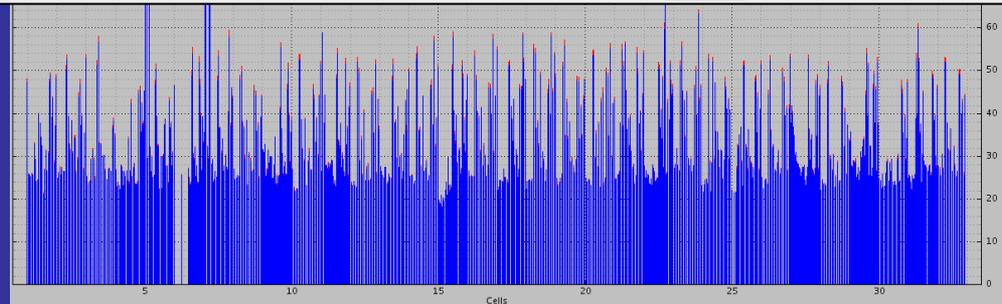
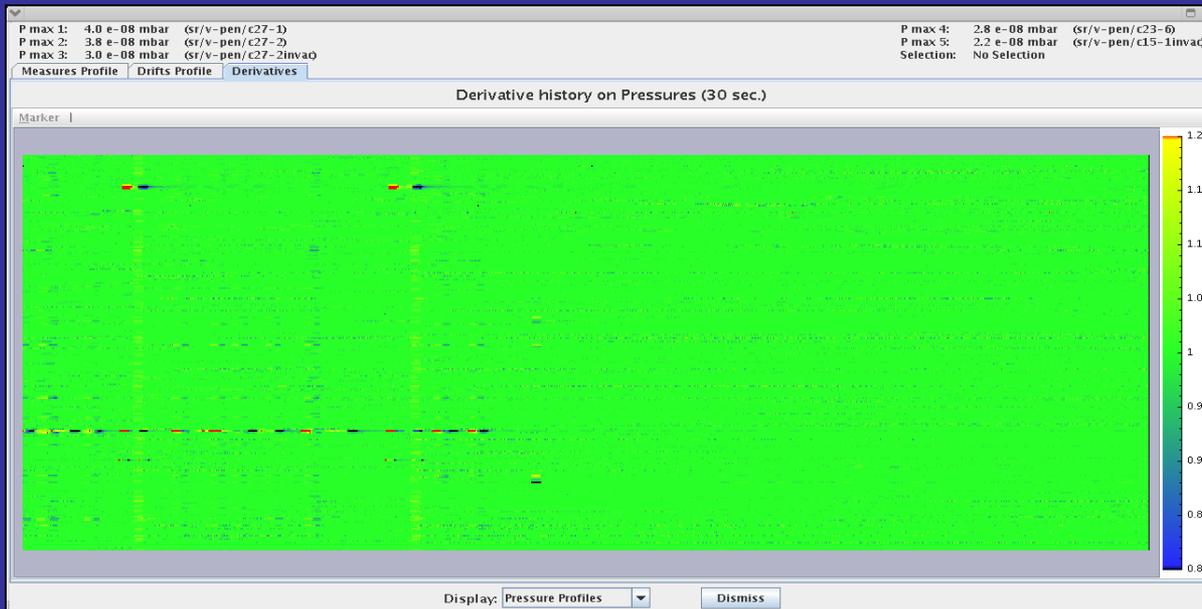


Accident de durée de vie corrélée à une remontée de pression.

# 6. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE QUOTIDIENNE

## 6.2.2 Les critères de qualité du faisceau: le temps de vie

On line et archivage des pressions, températures, et analyses de gaz résiduels pour l'ensemble de la machine (SR,B,Linac, FrontEnd)



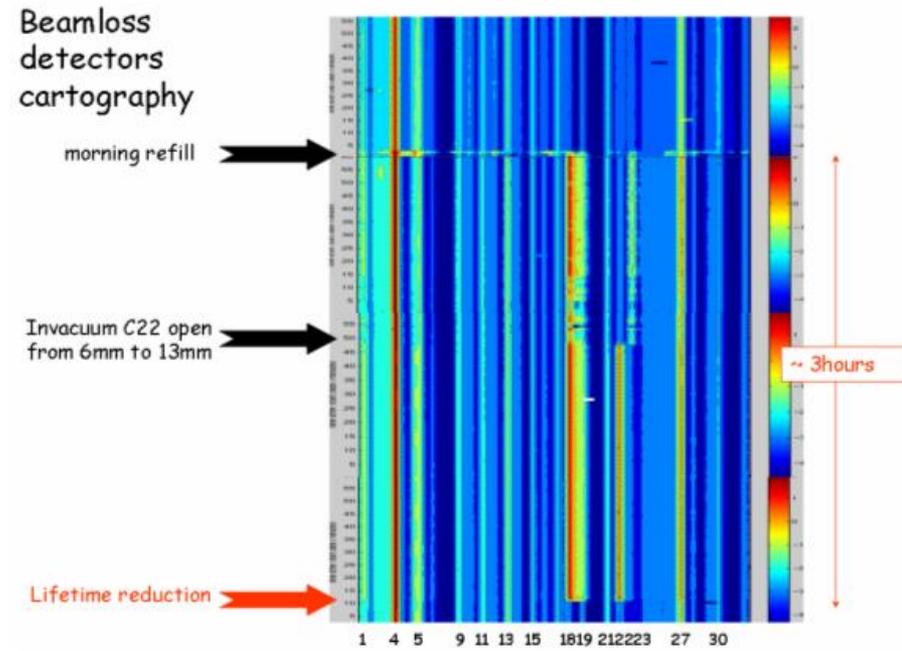
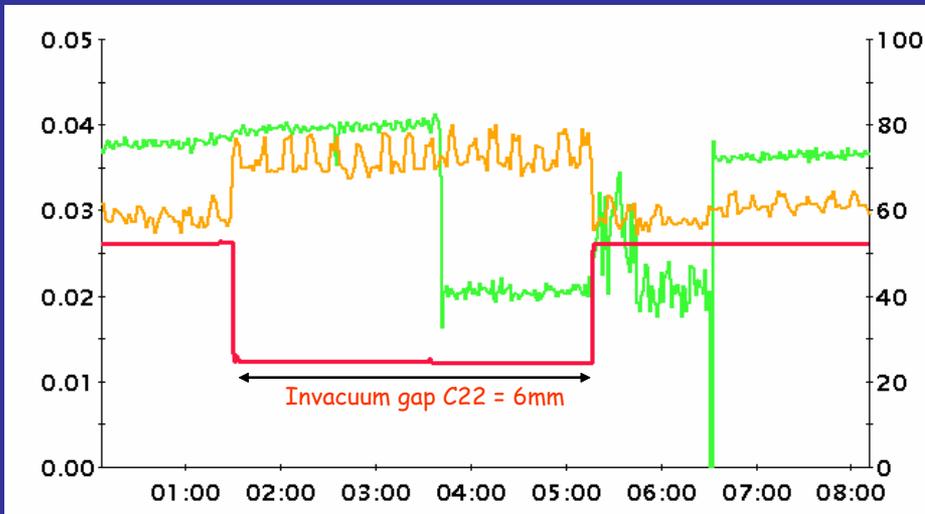
## 6. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE QUOTIDIENNE

### 6.2.2 Les critères de qualité du faisceau: le temps de vie

- Les mouvements de gap des éléments d'insertion:

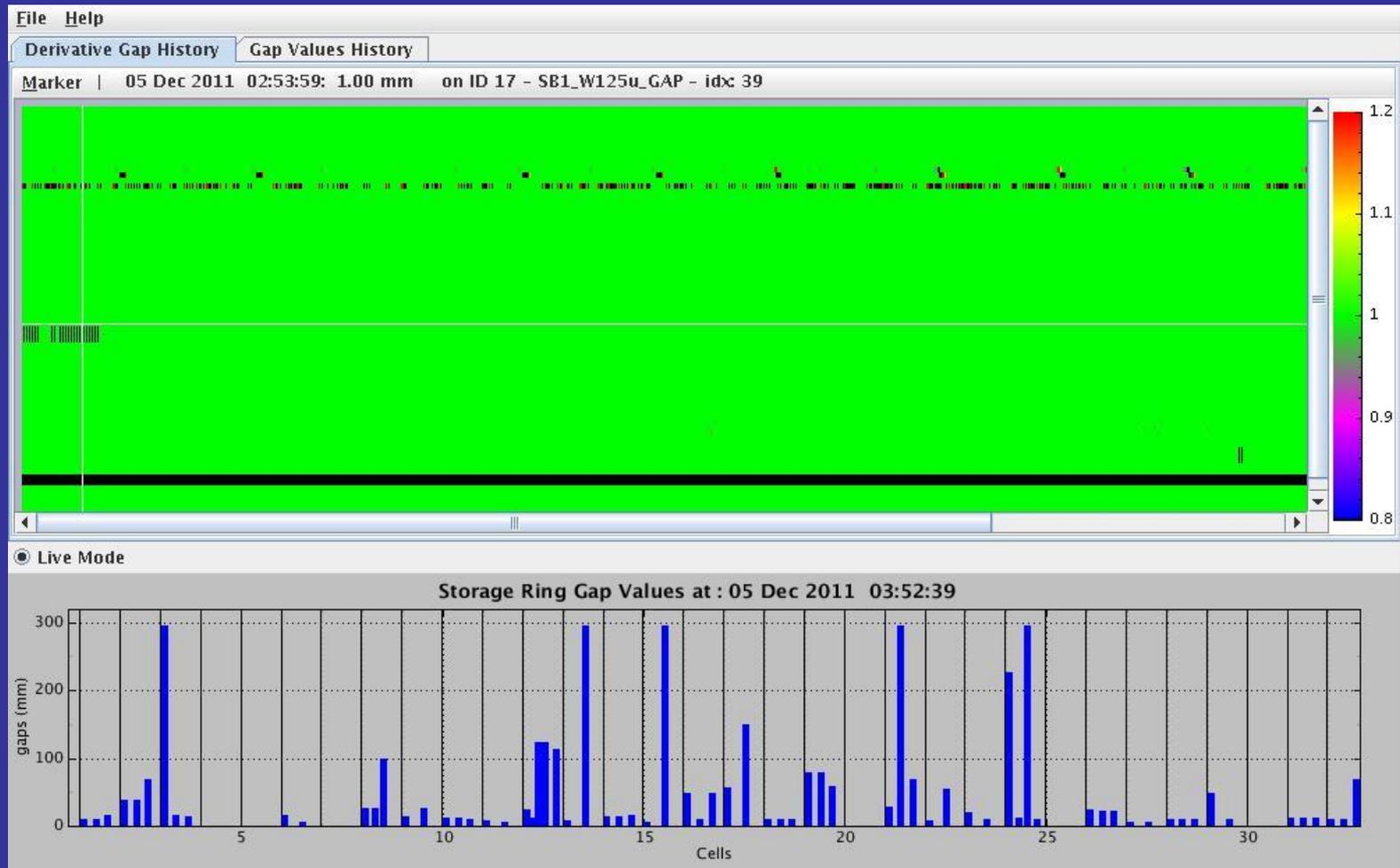
Entres autres causes possibles, une chute de durée de vie peut être liée à un changement de champ magnétique d'une mâchoire d'un des 70 éléments d'insertion installés ou de la réduction de l'ouverture physique par fermeture d'un onduleur sous vide.

L'opérateur devra essayer de corréléer un accident de temps de vie à un mouvement de gap afin de signaler aux experts une dégradation possible de l'élément d'insertion.



## 6. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE QUOTIDIENNE

### 6.2.2 Les critères de qualité du faisceau: le temps de vie

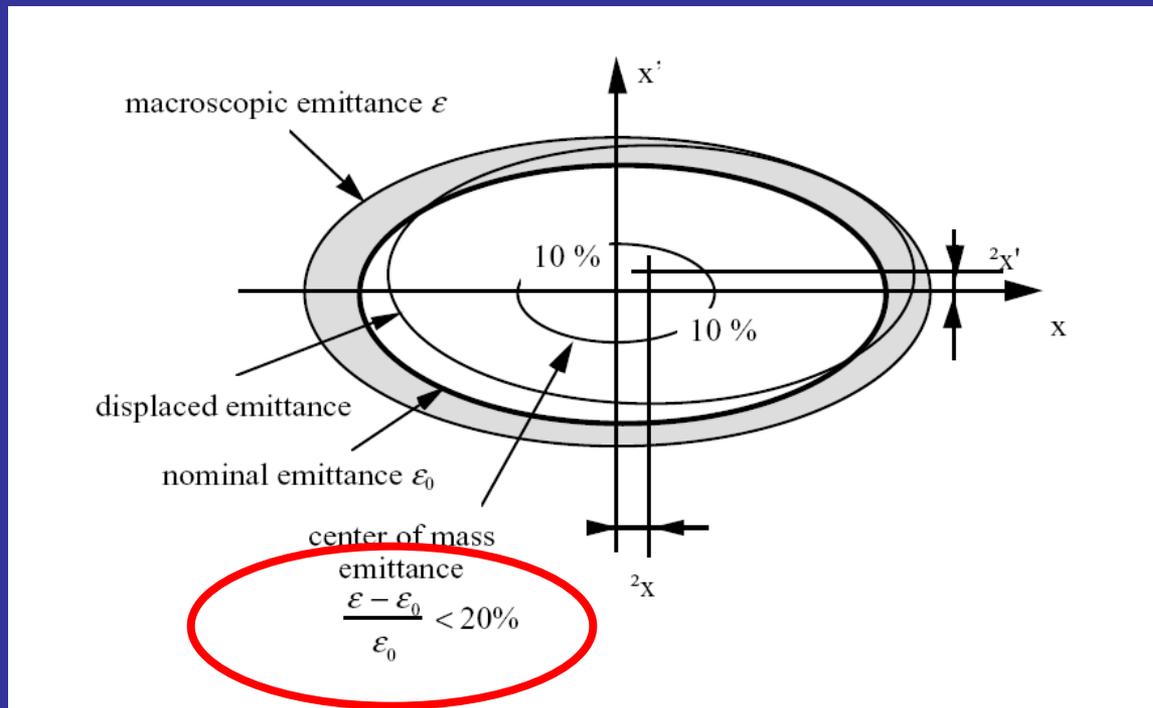


## 6. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE QUOTIDIENNE

### 6.2.2 Les critères de qualité du faisceau: la stabilité du faisceau

Aussi critique que la fiabilité du faisceau est la **stabilité du faisceau**

L'opérateur dispose d'outils pour monitorer ce paramètre à tout endroit de l'anneau



Il est convenu que le grossissement en émittance ne devait pas dépasser 20 %: on tolère 10 % de variation par rapport à la position du faisceau et 10 % par rapport à sa divergence.

## 6. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE QUOTIDIENNE

### 6.2.2 Les critères de qualité du faisceau: la stabilité du faisceau

Connaissant les fonctions  $\beta$  aux différents points sources de l'anneau de stockage et l'émittance mesurée, on en déduit les tailles de faisceau à ces endroits et donc, la tolérance acceptée.

Le tableau suivant résume les tolérances pour les sections high  $\beta$  , low  $\beta$  horizontales et pour le plan vertical:

	<i>Horizontal</i>		<i>Vertical</i>
Emittances	4 nm		30 pm
$\beta$ function	2.5	35	2.5
Beam size	45 $\mu\text{m}$	380 $\mu\text{m}$	9 $\mu\text{m}$
<b>Required stability</b>	<b>4.5 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>38 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>0.9 <math>\mu\text{m}</math></b>

Ces critères sont-ils respectés ?

## 6. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE QUOTIDIENNE

### 6.2.2 Les critères de qualité du faisceau: la stabilité du faisceau

La stabilité en position doit s'étudier sur:

#### ➤ Court terme

- Réduction des perturbations!
- Feedback rapide

#### ➤ Moyen terme

- Correction de l'orbite fermée

#### ➤ Long terme

- Réalignement des aimants

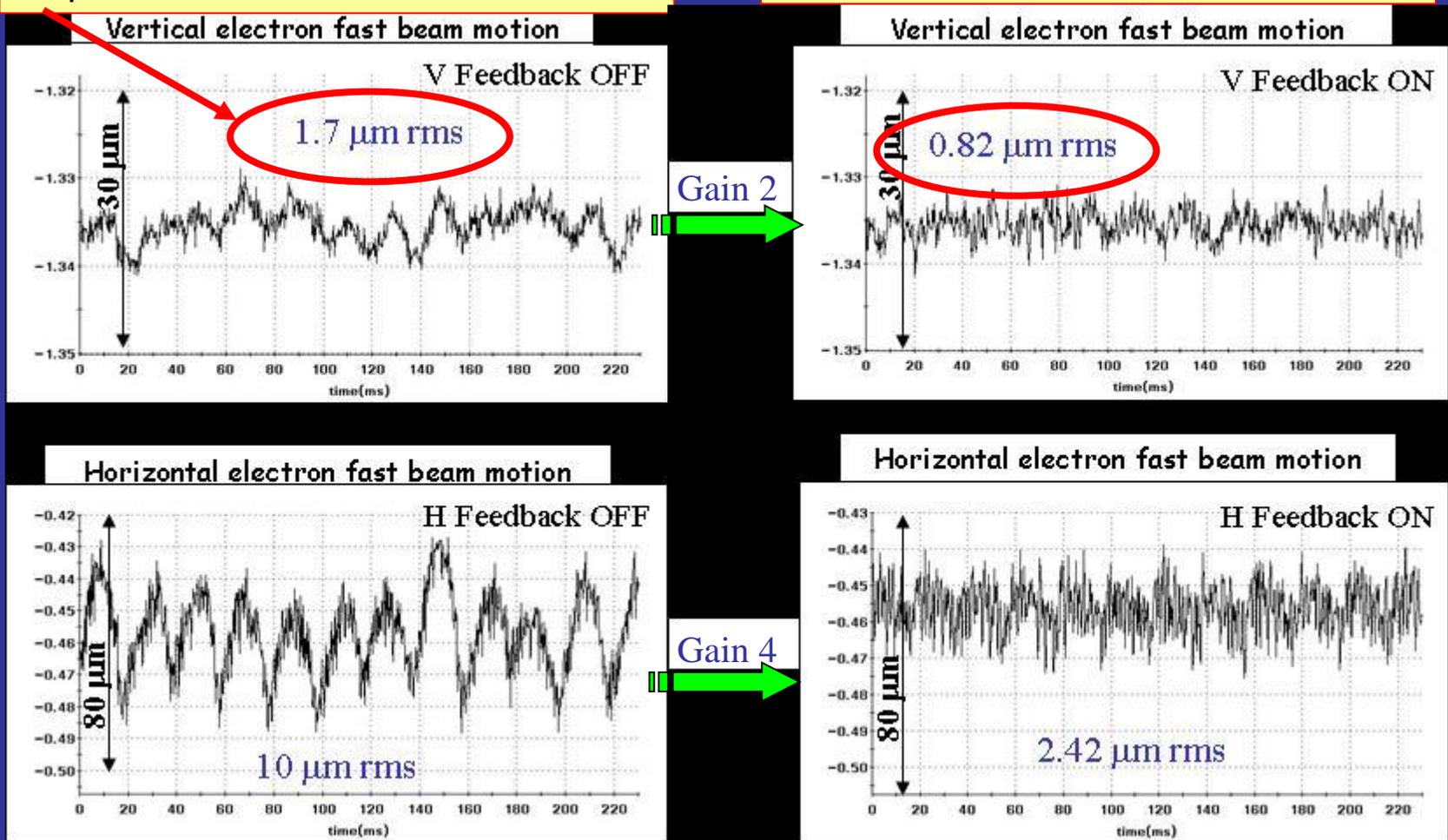
## 6. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE QUOTIDIENNE

### 6.2.2 Les critères de qualité du faisceau: la stabilité du faisceau

- Stabilité court terme ( inférieure à la seconde)

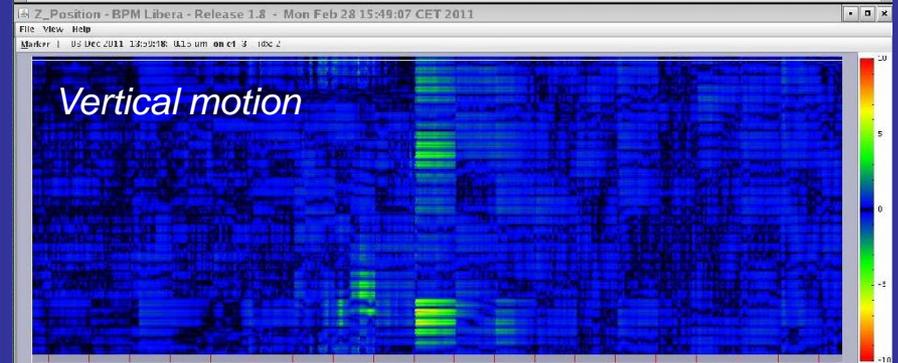
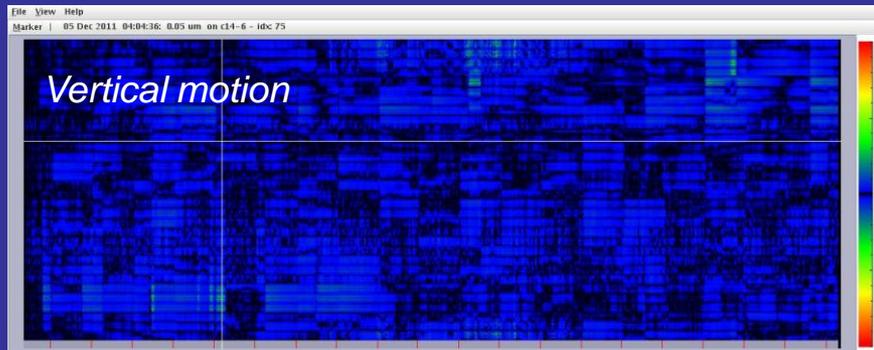
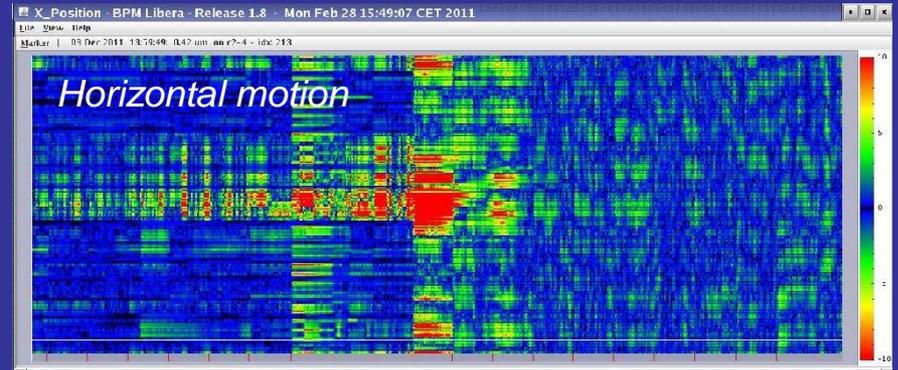
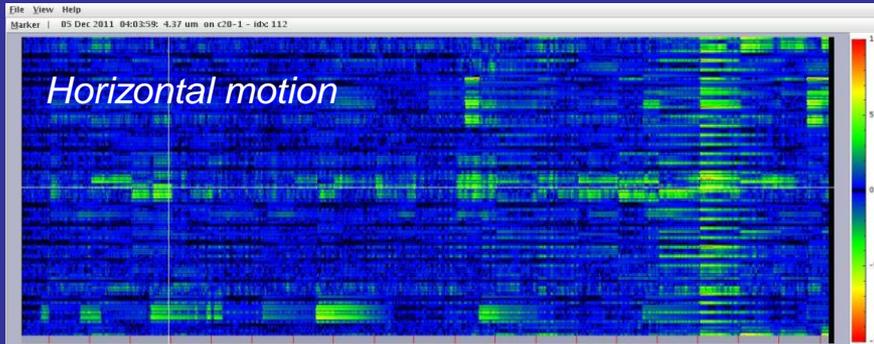
SANS feedback, le critère n'est pas respecté en Vertical!

AVEC feedback, le critère est respecté de justesse ( $< 0.9 \mu\text{m rms}$ )



## 6. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE QUOTIDIENNE

### 6.2.2 Les critères de qualité du faisceau: la stabilité du faisceau



## 6. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE QUOTIDIENNE

### 6.2.2 Les critères de qualité du faisceau: la stabilité du faisceau

Le feedback agit dans chaque plan:  
le critère de stabilité est très largement respecté dans le plan horizontal et à la limite dans le plan vertical...

Ce feedback est constitué de 32 BPMs, 24 correcteurs corrigeant la position à une fréquence de 4.4 kHz ! Ce, sur une bande en fréquence allant de 0.1 à 150 Hz.

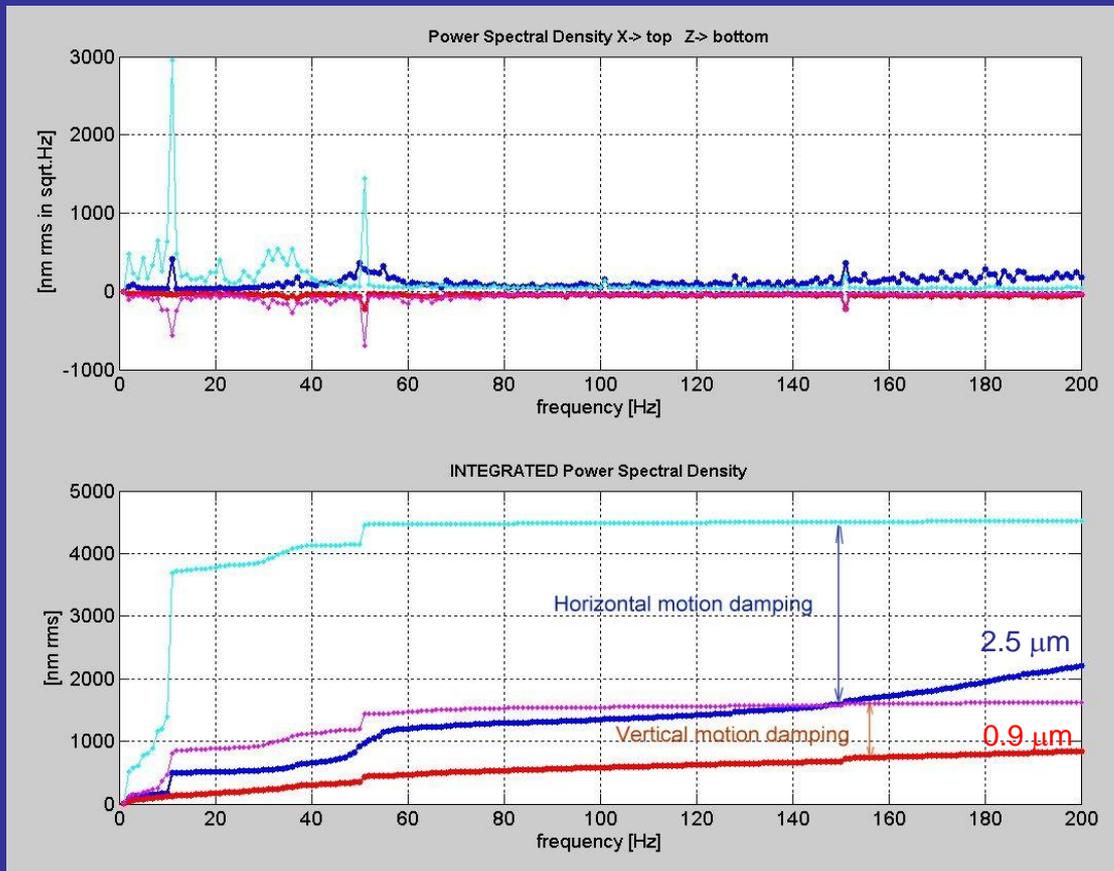
Dans le plan vertical, le feedback permet de gagner un facteur 2.  
Dans le plan horizontal, le feedback permet de gagner un facteur 4.

Au quotidien, l'opérateur vérifie ces critères et, en cas de non-respect des critères, a les moyens de détecter si la cause provient d'un capteur fautif ou d'un correcteur fautif.

## 6. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE QUOTIDIENNE

### 6.2.2 Les critères de qualité du faisceau: la stabilité du faisceau

Un nouveau feedback corrigeant du DC à 200 Hz system est en test.



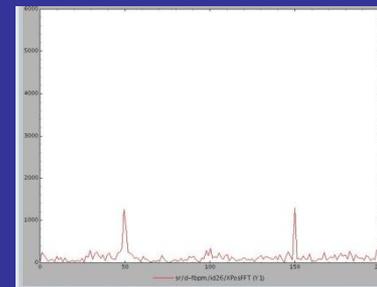
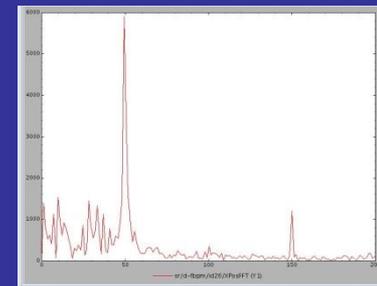
224 BPMs / 96 steerers  
Average over 224 BPMs

Horizontal OFF

Horizontal ON

Vertical OFF

Vertical ON



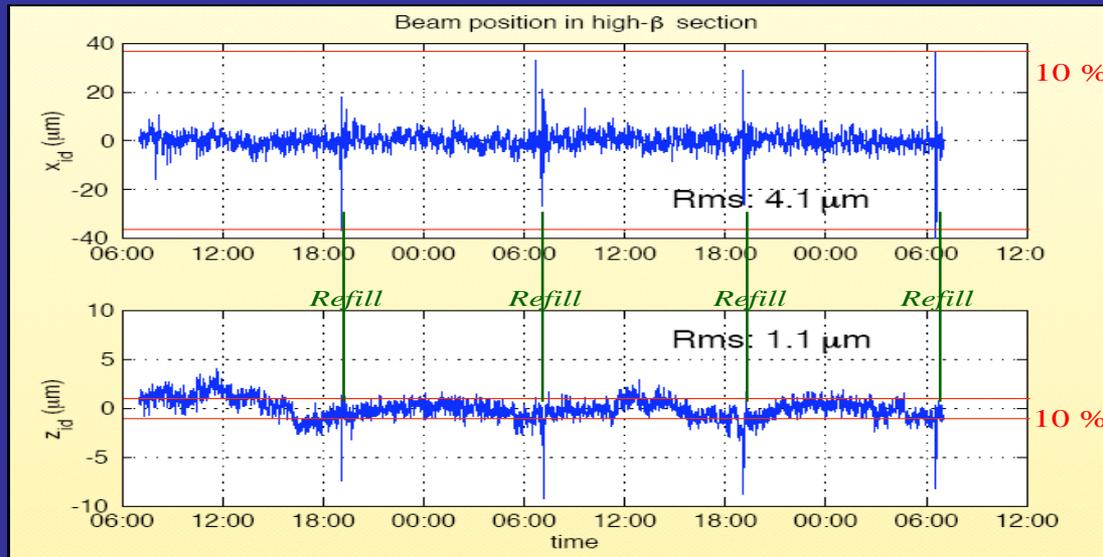
## 6. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE QUOTIDIENNE

### 6.2.2 Les critères de qualité du faisceau: la stabilité du faisceau

- Stabilité moyen terme (l'heure)

Stabilité du faisceau: essentiellement affectée par la variation de charge thermique due au changement d'intensité du faisceau pendant sa décroissance.

Les chambres à vide subissent des contraintes thermiques et déplacent d'autant les quadrupôles.



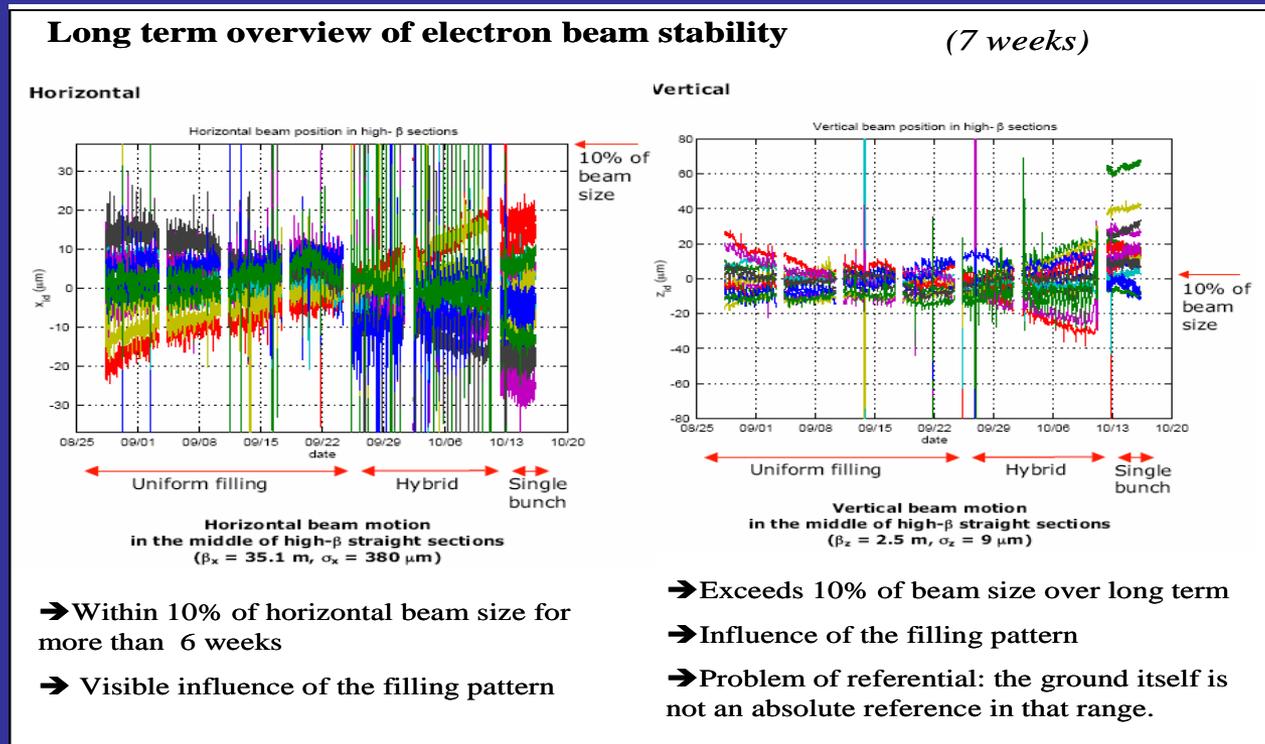
Sur une durée de 2 jours, le critère est à nouveau largement respecté dans le plan horizontal et limite dans le plan vertical.

Pour corriger ces dérives, une correction automatique est appliquée toutes les 30 secondes (méthode SVD).

## 6. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE QUOTIDIENNE

### 6.2.2 Les critères de qualité du faisceau: la stabilité du faisceau

- Stabilité long terme ( jours - semaines)

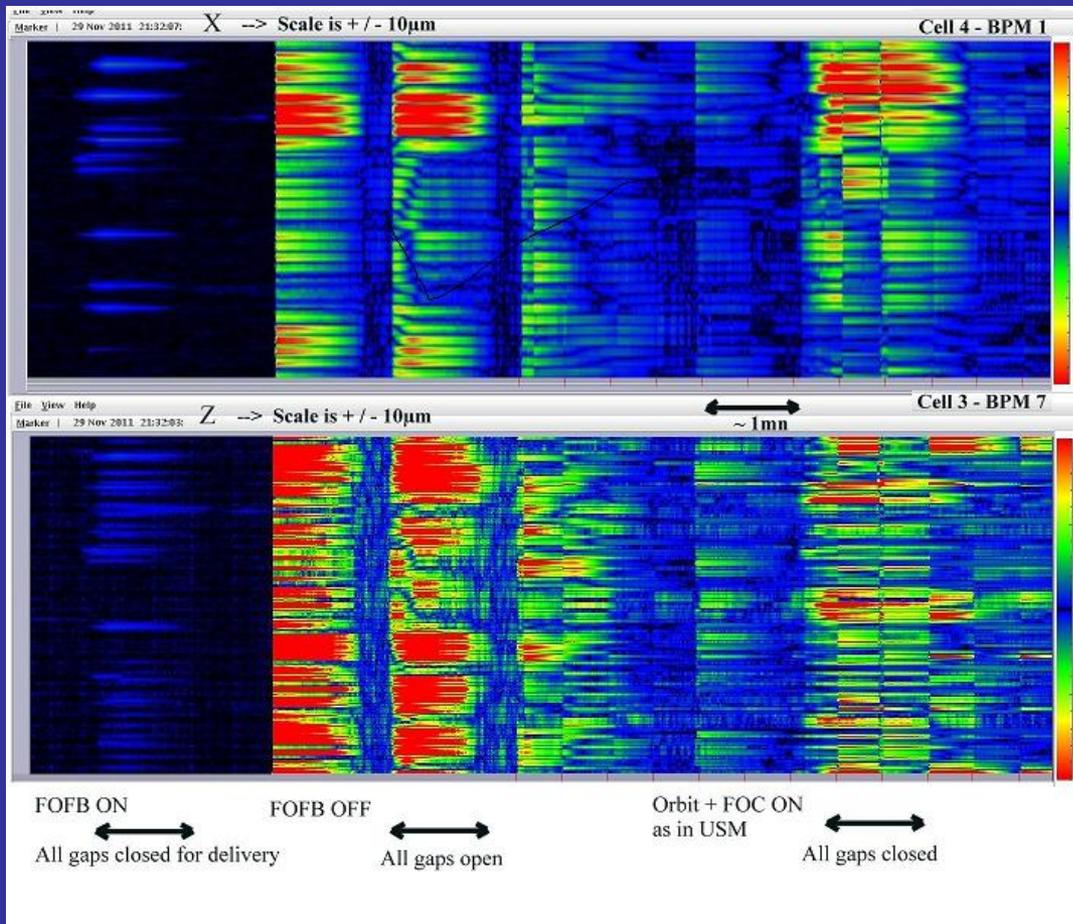


Critère respecté dans le plan horizontal mais plus dans le plan vertical.  
De plus, cela dépend essentiellement du mode de remplissage

## 6. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE QUOTIDIENNE

### 6.2.2 Les critères de qualité du faisceau: la stabilité du faisceau

Un nouveau feedback corrigeant du DC a 200 Hz system est en test.



Amélioration de de la zone autour de 0.1 Hz correspondant aux mouvements des mécaniques des onduleurs.

## 6. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE QUOTIDIENNE

### 6.2.2 Les critères de qualité du faisceau: la stabilité du faisceau

Tableau résumé:

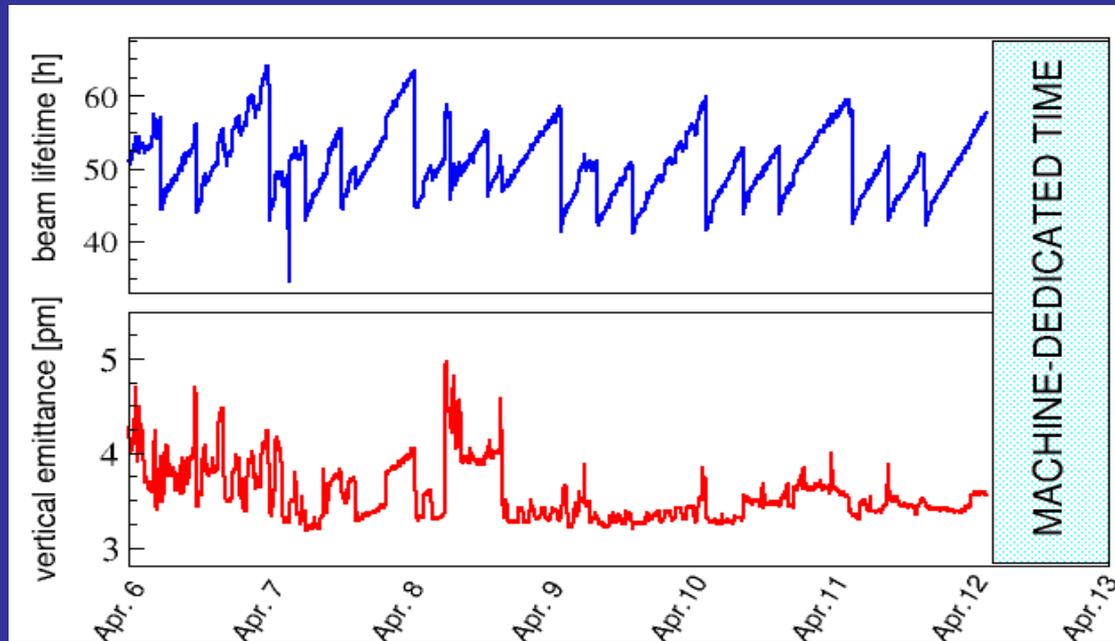
	<i>Horizontal</i>	<i>Vertical</i>
<b>10% Beam size</b>	<b>38 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>0.9 <math>\mu\text{m}</math></b>
<i>One week</i>	<b>11 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>8 <math>\mu\text{m}</math></b>
<i>One day</i>	<b>5 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>2 <math>\mu\text{m}</math></b>
<i>One hour</i>	<b>5 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>2 <math>\mu\text{m}</math></b>
<i>One minute</i>	<b>5 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>2 <math>\mu\text{m}</math></b>
<i>One second</i>	<b>2 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>1 <math>\mu\text{m}</math></b>

Les dérives en position sont dominées par des mouvements très lents.

La stabilité à court terme est la plus importante car les expériences sont généralement de courtes durées.

## 6. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE QUOTIDIENNE

### 6.2.2 Les critères de qualité du faisceau: la stabilité de l'emittance

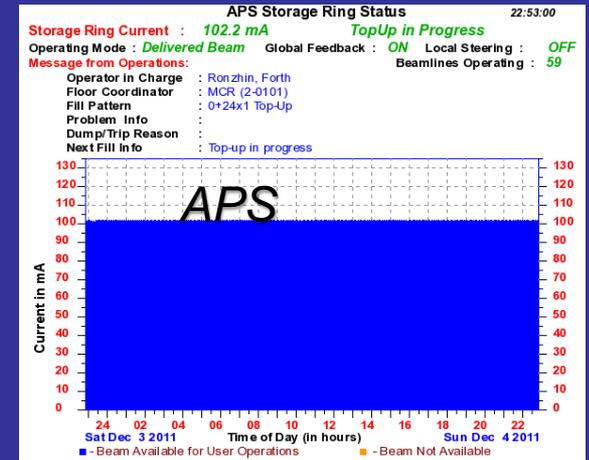
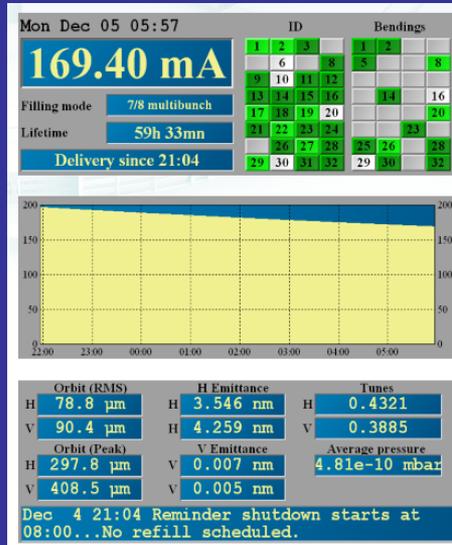
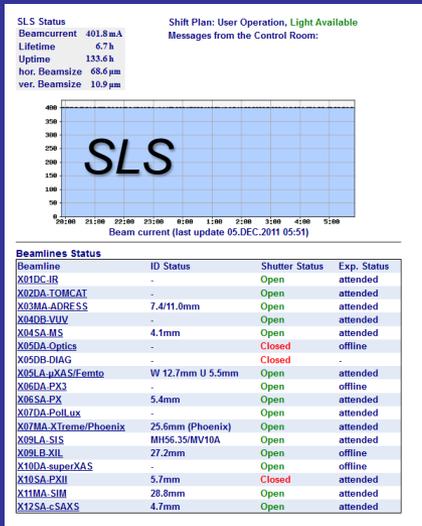
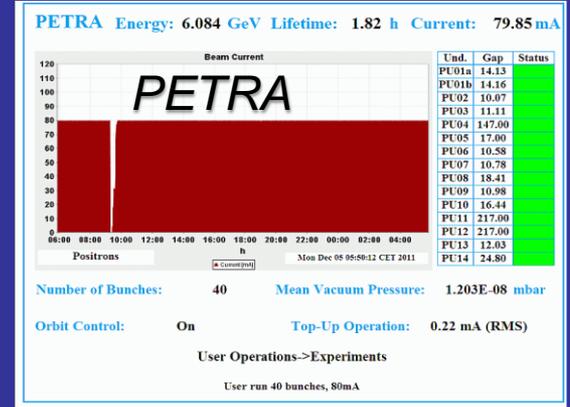


Les corrections de couplage peuvent évoluer dans le temps. En 2011, l'ESRF a fait un effort particulier pour réduire et maintenir l'emittance verticale:

- Nouvelle méthode globale de correction
- Skew quadrupole pour corriger certains effets d'onduleurs
- Correction automatique en cas de dérive

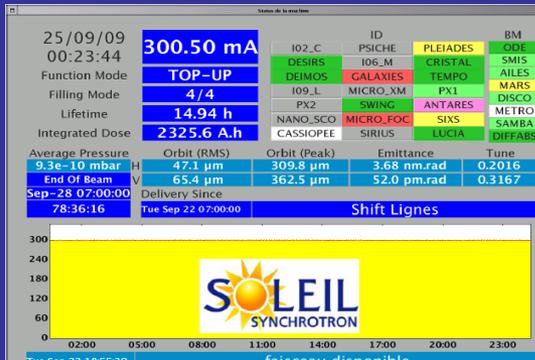
# 6. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE QUOTIDIENNE

## 6.2.2 Le Top-up



## 6. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE QUOTIDIENNE

### 6.2.2 Le Top-up (ou injection fréquente)



Maintien du courant ( $\Delta I/I < 1\%$ ) par une injection régulière  
→ 1 seul injection toutes les 5 à 8 mn  
(2mA/injection sur ¼ de machine)

Avantages:

Courant constant = charge thermique constante sur les optiques  
→ stabilité du faisceau en position et en intensité sur l'échantillon

Inconvénient:

Stabilité légèrement dégradée durant l'injection

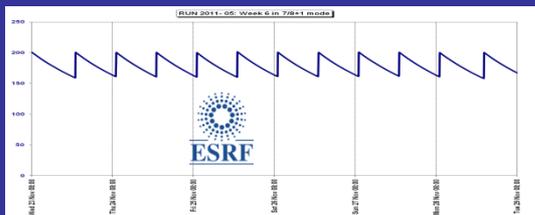
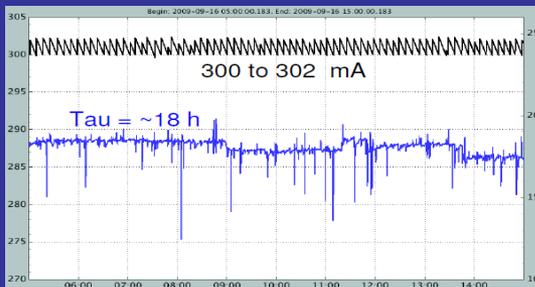
→ durée de quelques millisecondes (injection+damping time)

→ due aux aimants d'injection (kickers et septums)

→ grossissement de la source en taille 20% en Hor. et 200% en Vert

Mise à disposition d'un signal de synchro

→ suppression des données durant l'injection (peu utilisé)



Nécessaire en cas de faible durée de vie (SOLEIL = 18h),

Faible énergie des électrons et/ou très petite emittances

Non nécessaire pour l'ESRF:

Durée de vie supérieure à 45 h → Top-up toutes les 12 heures →  $\Delta I = 20\%$

# 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

*Planifier le fonctionnement, la maintenance et le développement*

Jan 2010	Feb 2010	Mar 2010	Apr 2010	May 2010	Jun 2010	Jul 2010	Aug 2010	Sep 2010	Oct 2010	Nov 2010	Dec 2010	Jan 2011
Fri 01	Mon 01	Mon 01	Thu 01	Sat 01	Tue 01	Thu 01	Sun 01	Wed 01	Fri 01	Mon 01	Wed 01	Sat 01
Sat 02	Tue 02	Tue 02	Fri 02	Sun 02	Wed 02	Fri 02	Mon 02	Thu 02	Sat 02	Tue 02	Thu 02	Sun 02
Sun 03	Wed 03	Wed 03	Sat 03	Mon 03	Thu 03	Sat 03	Tue 03	Fri 03	Sun 03	Wed 03	Fri 03	Mon 03
Mon 04	Thu 04	Thu 04	Sun 04	Tue 04	Fri 04	Sun 04	Wed 04	Sat 04	Mon 04	Thu 04	Sat 04	Tue 04
Tue 05	Fri 05	Fri 05	Mon 05	Wed 05	Sat 05	Mon 05	Thu 05	Sun 05	Tue 05	Fri 05	Sun 05	Wed 05
Wed 06	Sat 06	Sat 06	Tue 06	Thu 06	Sun 06	Tue 06	Mon 06	Wed 06	Sat 06	Mon 06	Thu 06	Fri 06
Thu 07	Sun 07	Sun 07	Wed 07	Fri 07	Mon 07	Wed 07	Thu 07	Tue 07	Mon 07	Tue 07	Fri 07	Mon 07
Fri 08	Mon 08	Mon 08	Thu 08	Sat 08	Tue 08	Thu 08	Sun 08	Wed 08	Fri 08	Mon 08	Wed 08	Sat 08
Sat 09	Tue 09	Tue 09	Fri 09	Sun 09	Wed 09	Mon 09	Thu 09	Sat 09	Tue 09	Thu 09	Sun 09	Fri 09
Sun 10	Wed 10	Wed 10	Sat 10	Mon 10	Thu 10	Sat 10	Tue 10	Fri 10	Sun 10	Wed 10	Mon 10	Mon 10
Mon 11	Thu 11	Thu 11	Sun 11	Tue 11	Fri 11	Sun 11	Wed 11	Sat 11	Mon 11	Thu 11	Sat 11	Tue 11
Tue 12	Fri 12	Fri 12	Mon 12	Wed 12	Mon 12	Mon 12	Thu 12	Tue 12	Tue 12	Fri 12	Sun 12	Wed 12
Wed 13	Sat 13	Sat 13	Tue 13	Thu 13	Sun 13	Wed 13	Fri 13	Mon 13	Wed 13	Sat 13	Mon 13	Thu 13
Thu 14	Sun 14	Sun 14	Wed 14	Fri 14	Mon 14	Wed 14	Thu 14	Tue 14	Thu 14	Tue 14	Thu 14	Fri 14
Fri 15	Mon 15	Mon 15	Thu 15	Sat 15	Tue 15	Thu 15	Sun 15	Wed 15	Fri 15	Mon 15	Wed 15	Sat 15
Sat 16	Tue 16	Tue 16	Fri 16	Sun 16	Wed 16	Fri 16	Mon 16	Thu 16	Sat 16	Tue 16	Thu 16	Sun 16
Sun 17	Wed 17	Wed 17	Sat 17	Mon 17	Thu 17	Sat 17	Tue 17	Fri 17	Sun 17	Wed 17	Fri 17	Mon 17
Mon 18	Thu 18	Thu 18	Sun 18	Tue 18	Fri 18	Sun 18	Wed 18	Sat 18	Mon 18	Thu 18	Sat 18	Tue 18
Tue 19	Fri 19	Fri 19	Mon 19	Wed 19	Sat 19	Mon 19	Thu 19	Tue 19	Tue 19	Fri 19	Sun 19	Wed 19
Wed 20	Sat 20	Sat 20	Tue 20	Thu 20	Sun 20	Tue 20	Fri 20	Mon 20	Wed 20	Sat 20	Mon 20	Thu 20
Thu 21	Sun 21	Sun 21	Wed 21	Fri 21	Mon 21	Wed 21	Sat 21	Tue 21	Thu 21	Sun 21	Tue 21	Fri 21
Fri 22	Mon 22	Mon 22	Thu 22	Sat 22	Tue 22	Thu 22	Sun 22	Wed 22	Fri 22	Mon 22	Wed 22	Sat 22
Sat 23	Tue 23	Tue 23	Fri 23	Sun 23	Wed 23	Fri 23	Mon 23	Thu 23	Sat 23	Tue 23	Thu 23	Sun 23
Sun 24	Wed 24	Wed 24	Sat 24	Mon 24	Thu 24	Sat 24	Tue 24	Fri 24	Sun 24	Wed 24	Fri 24	Mon 24
Mon 25	Thu 25	Thu 25	Sun 25	Tue 25	Fri 25	Sun 25	Wed 25	Sat 25	Mon 25	Thu 25	Sat 25	Tue 25
Tue 26	Fri 26	Fri 26	Mon 26	Wed 26	Sat 26	Mon 26	Thu 26	Tue 26	Tue 26	Mon 26	Fri 26	Wed 26
Wed 27	Sat 27	Sat 27	Tue 27	Thu 27	Sun 27	Tue 27	Fri 27	Mon 27	Wed 27	Sat 27	Mon 27	Thu 27
Thu 28	Sun 28	Sun 28	Wed 28	Fri 28	Mon 28	Wed 28	Sat 28	Tue 28	Thu 28	Sun 28	Tue 28	Fri 28
Fri 29	Mon 29	Mon 29	Thu 29	Sat 29	Tue 29	Thu 29	Sun 29	Wed 29	Fri 29	Mon 29	Wed 29	Sat 29
Sat 30	Tue 30	Tue 30	Fri 30	Sun 30	Wed 30	Fri 30	Mon 30	Thu 30	Sat 30	Tue 30	Thu 30	Sun 30
Sun 31	Wed 31	Wed 31	Sat 31	Mon 31	Thu 31	Sat 31	Tue 31	Mon 31	Sun 31	Wed 31	Fri 31	Mon 31

➤ Service aux utilisateurs:

5640 heures

5 runs par an

Des modes d'opération définis 1 an à l'avance

➤ Développement machine: 1296 heures

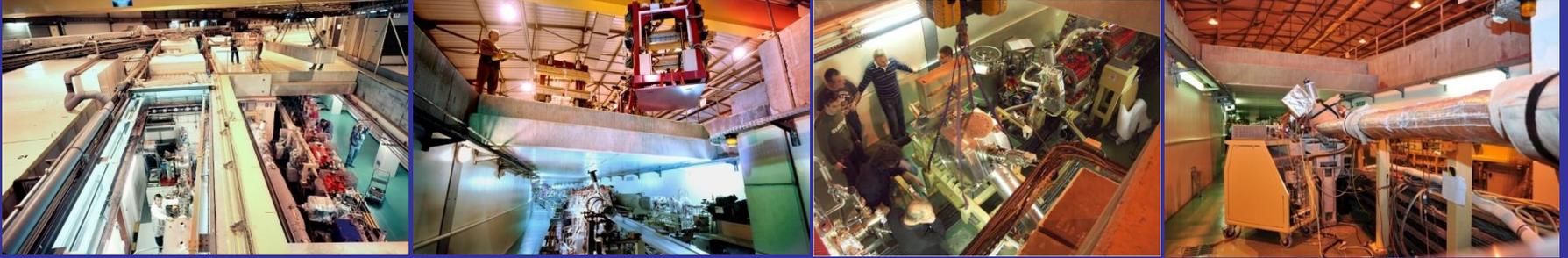
4 jours en début de run et 1 journée par semaine en cours de run

➤ Arrêt: 1824 heures

2 arrêts longs en hiver et en été et 3 arrêt court

## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

### *Période d'arrêt*



Les arrêts sont nécessaires pour:

- Les travaux de maintenance
- La mise à jour des équipements
- Les nouvelles installations

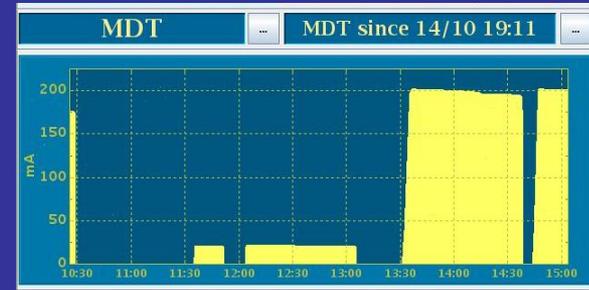
Une période de redémarrage de 4 jours est prévue pour:

- La remise en service des équipements
- Le test des nouveaux équipements
- Le reconditionnement vide

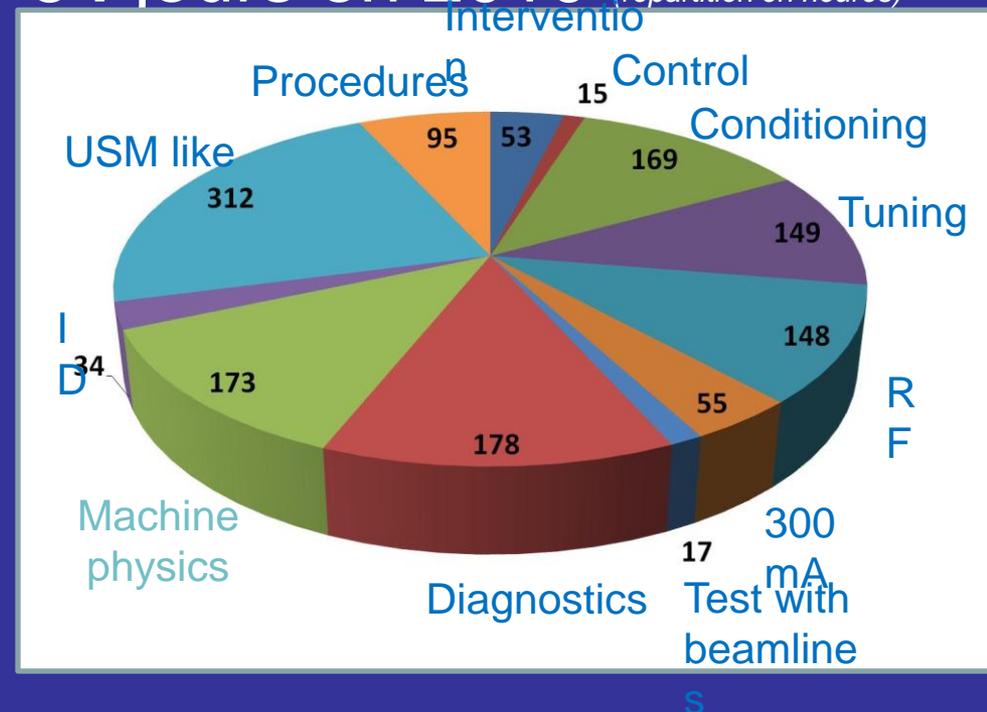
## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

*Période développent machine*

- Intervention pour réparation ou maintenance
- Préparation du mode utilisateur
- Etude de physique machine
- Test de nouveaux équipements
- Test de nouveau mode d'opération

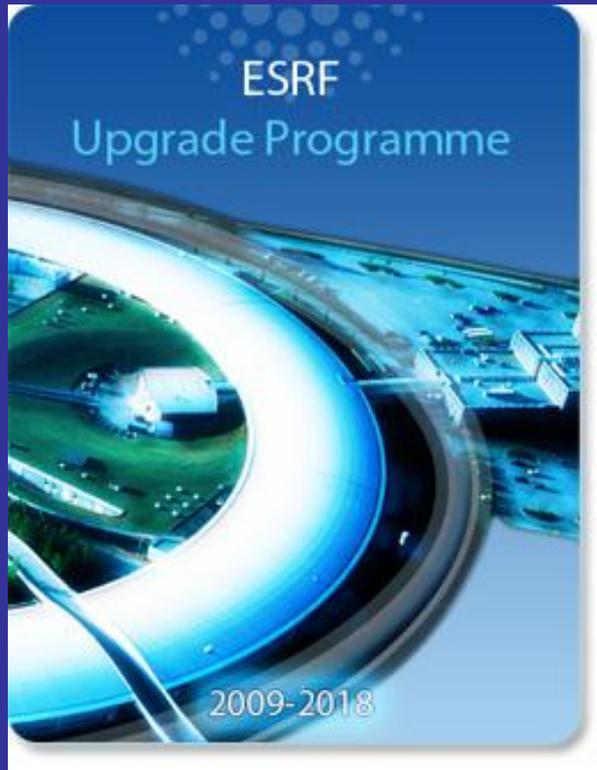


**54 jours en 2010** *(repartition en heures)*



## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

### *Upgrade*



### ESRF Upgrade 2008-2017

**Un programme de développement (Upgrade) en parallèle de l'opération.**

#### **Phase 1 (2009-2015):**

- **Upgrade de la source**
- **Extension du Hall Expérimental**
- **8 Nouvelles lignes de lumière**
- **Mise à jour de nombreuses lignes**
- **Développement de l'instrumentation beamline**

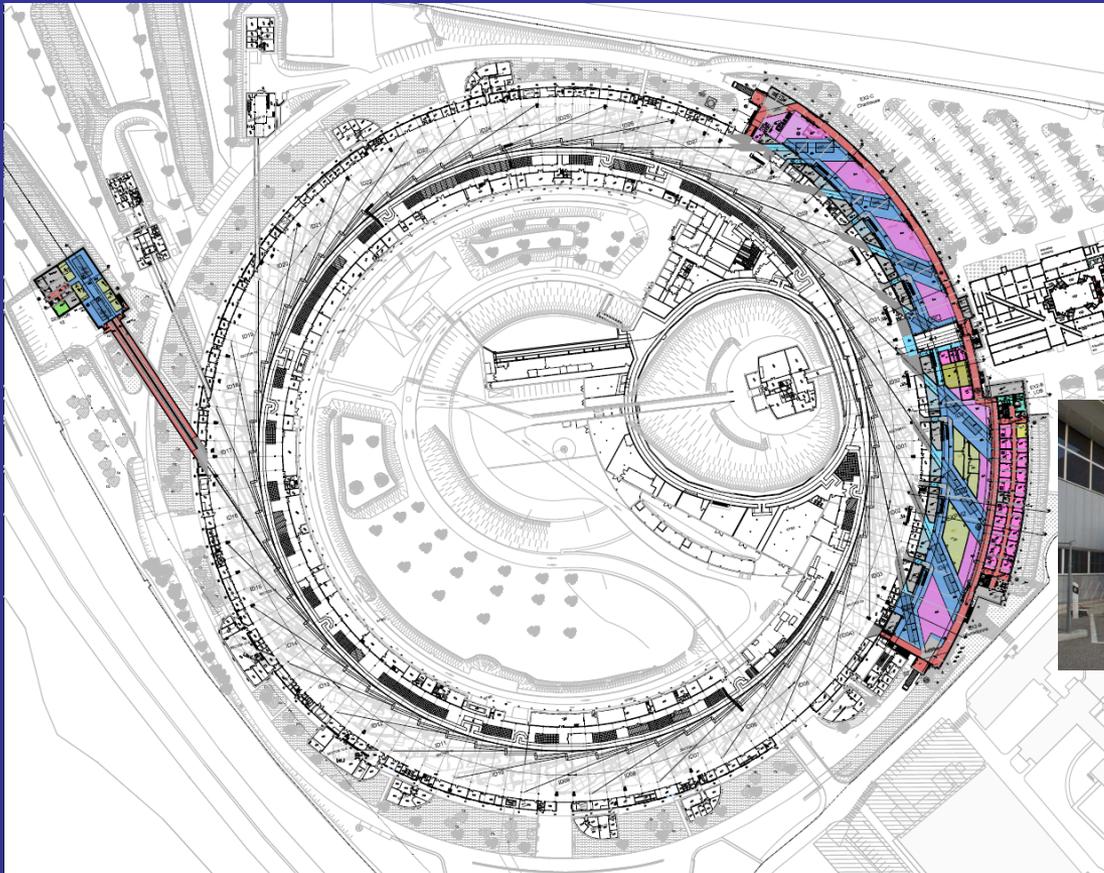
## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

*Upgrade*

Beamlines  
Augmentation de la capacité



Début des travaux: October 2011



## 5. FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE

### *Upgrade de la machine*

- Upgrade of BPM electronics
  - Improvement of the beam position stability
  - Coupling reduction
  - New position feedback
- 6 m long straight sections
  - No change in magnet lattice
  - Canted straight sections
- 7 m straight sections
  - Lattice symmetry breaking
  - New magnets necessary
- Cryogenic in-vacuum undulators
- Diagnostics developments
- New RF Transmitters
- New RF Cavities

## CONCLUSIONS:

- L'opération des accélérateurs au quotidien ne se définit pas de manière intrinsèque
- Elle est la conséquence de contraintes imposées par l'excellence de la recherche effectuée sur les accélérateurs.
- De ces contraintes, découleront un cadre de travail pour l'opération au quotidien
- L'objectif a également été de montrer que l'opération au quotidien n'est viable que si des tâches de fond – long terme – sont entreprises sans cesse pour améliorer la fiabilité des accélérateurs et les outils de diagnostic qui permettront d'anticiper les pannes au plus tôt.



# Installation Européenne de Rayonnement Synchrotron



## Remerciements:

Laurent Hardy le créateur de ce cours

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