

**L'ESRF:**

**Principe**

**Description**

**Fonctionnement au jour le jour**

**Upgrade aujourd'hui et demain**

# PLAN DE L'EXPOSÉ

## Partie 1: L'ESRF

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



## Partie 2: L'ESRF EN FONCTIONNEMENT

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

## Partie 3: L'ESRF AUJOURD'HUI et DEMAIN

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

# 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
  - UPGRADE

# 1. INTRODUCTION ET CONTEXTE

## → 2 grandes familles d'accélérateurs

Accélérateurs  
linéaires



Accélérateurs  
circulaires

## → 3 grandes familles d'application

Physique  
des hautes  
énergies

Sources de  
lumière

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

En général la machine est conçue 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 **performance et innovation.**

## 1. INTRODUCTION ET CONTEXTE

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

Fiabilité

Qualité et performances

Maintenance

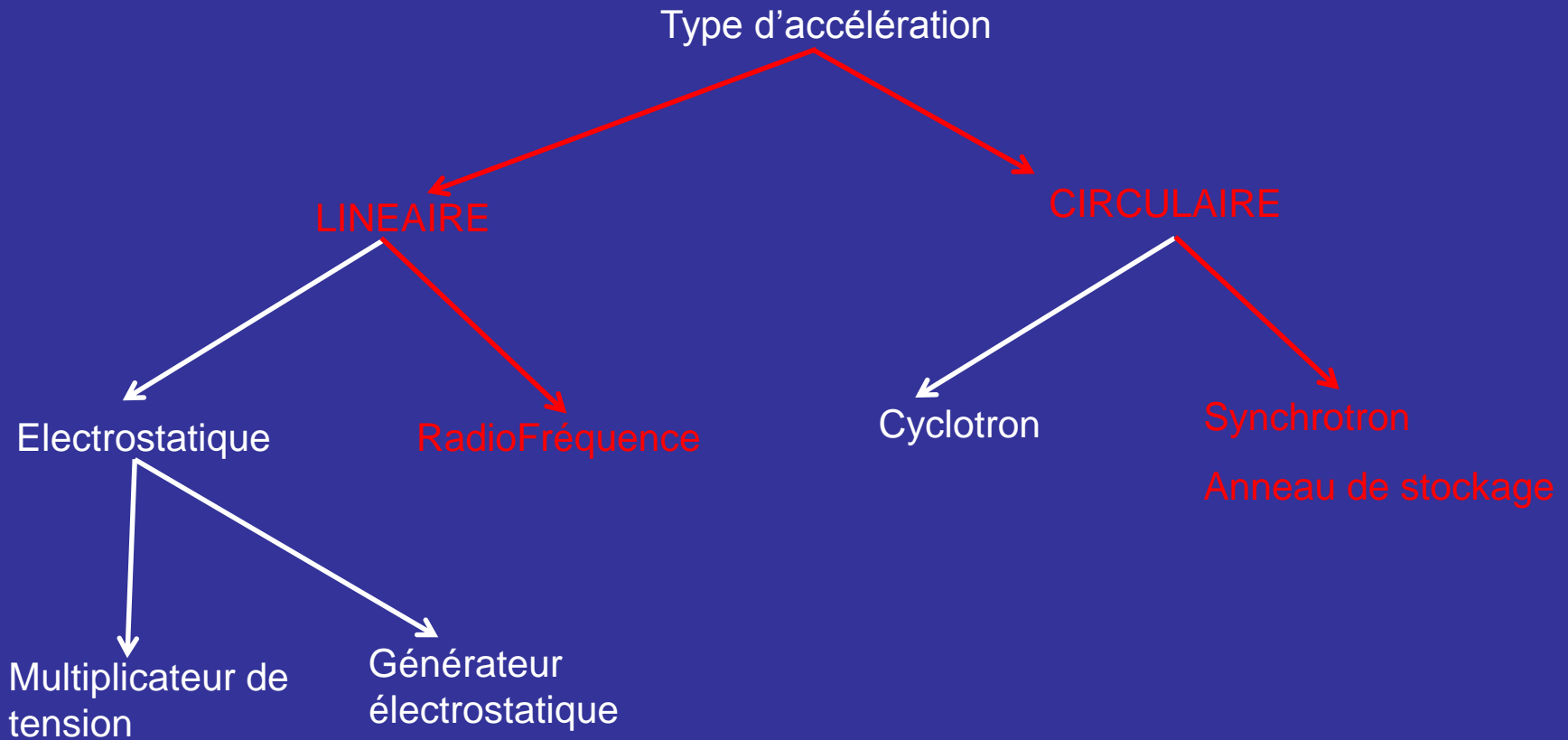
Développements

## 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 ACCÉLERATEURS DE L'ESRF
- FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE GLOBALE
- FONCTIONNEMENT AU JOUR LE JOUR: APPROCHE QUOTIDIENNE
- UPGRADE

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

### *Les grandes familles d'accélérateurs*

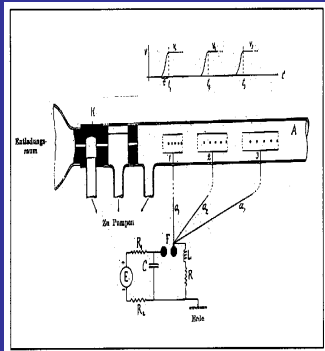


## 2. Une TRÈS BRÈVE histoire des accélérateurs jusqu'à l'ESRF

### Les accélérateurs linéaires à Radio Fréquence

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

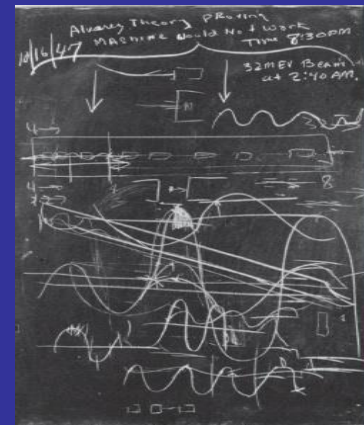
1924: Ising conçoit le premier 'Linac' sur papier



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 bétaatron



1952: le premier synchrotron (cosmotron)



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

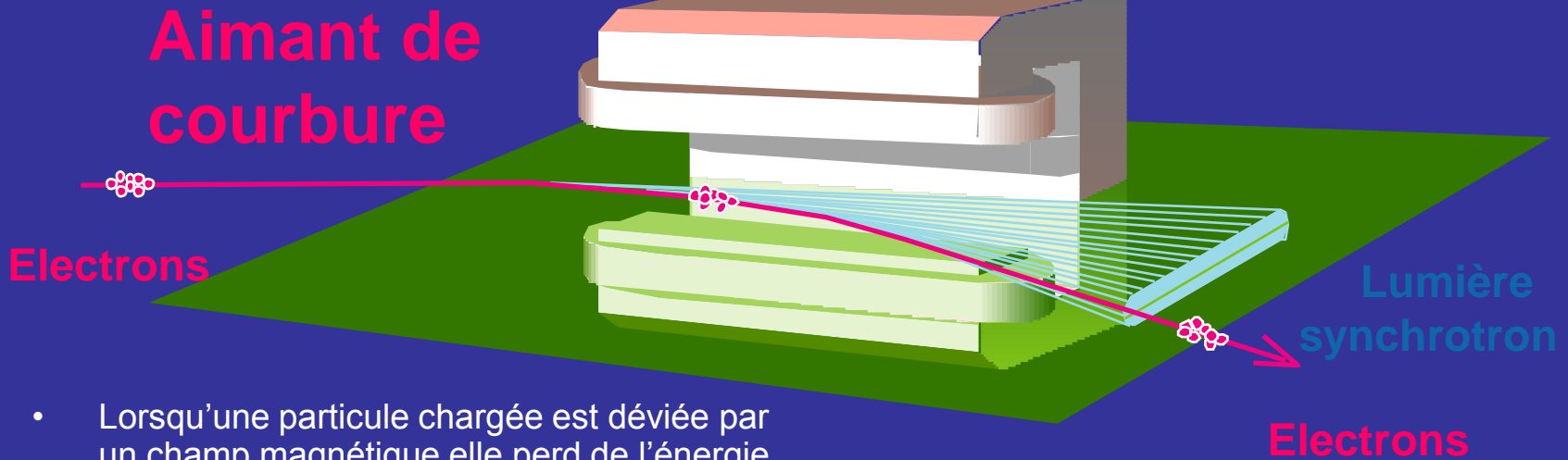


1989: Inauguration du LEP (CERN) : collisionneur e-e<sup>+</sup>



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

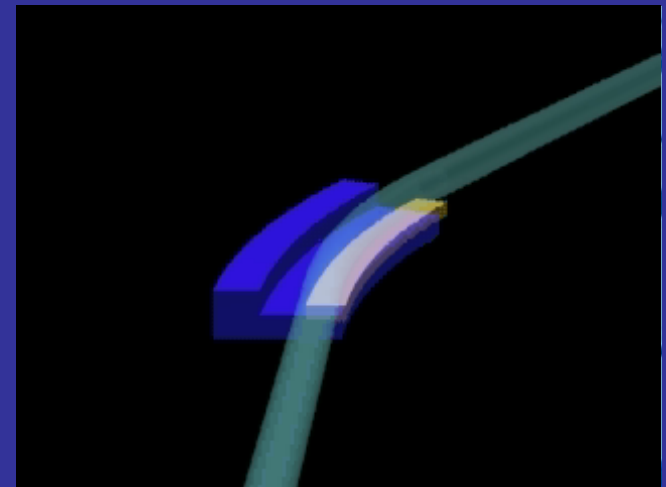
### Le rayonnement synchrotron



- Lorsqu'une particule chargée est déviée par un champ magnétique elle perd de l'énergie en rayonnant des photons
- On peut montrer que la puissance perdue par une particule est:

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

Les électrons sont des particules légères  $\rightarrow m$  est petit  
 $\rightarrow P$  est énorme à cause de la puissance 4 ! C'est pour cela qu'on accélère des électrons à l'ESRF





## 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

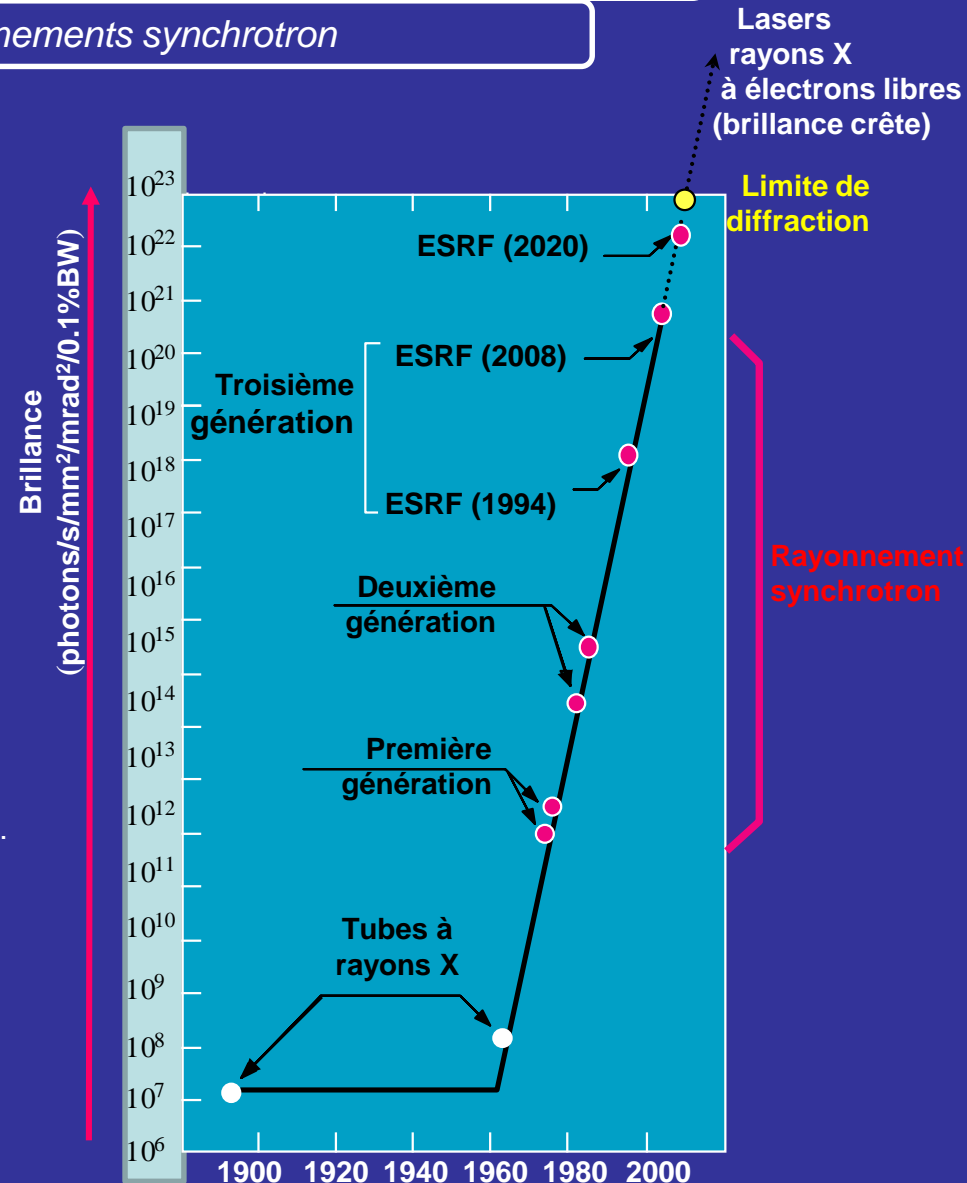
**Brilliance =**  
photons /s / mm<sup>2</sup> /mrad<sup>2</sup> /0.1% bande passante

Nombre de photons par seconde

Taille horizontale \*verticale

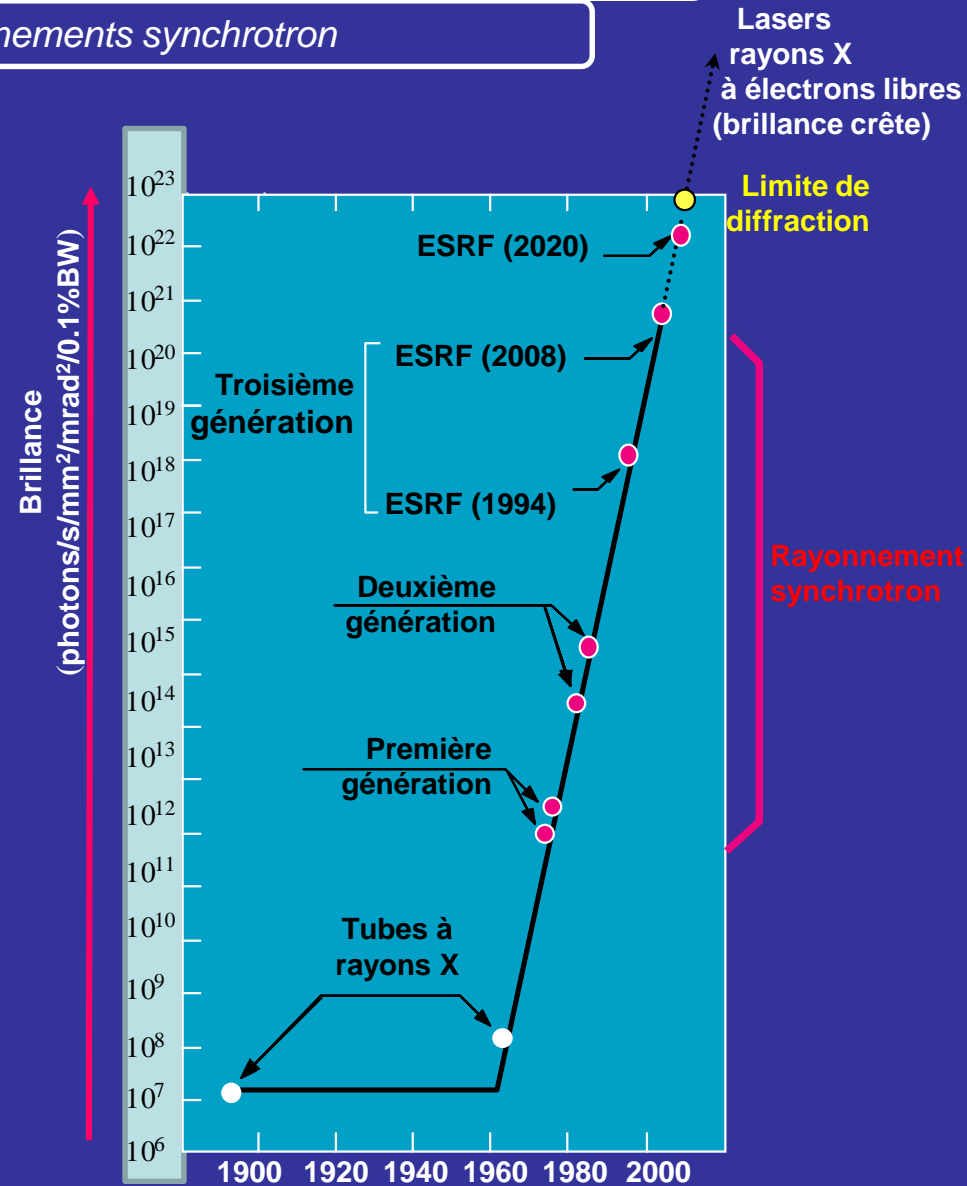
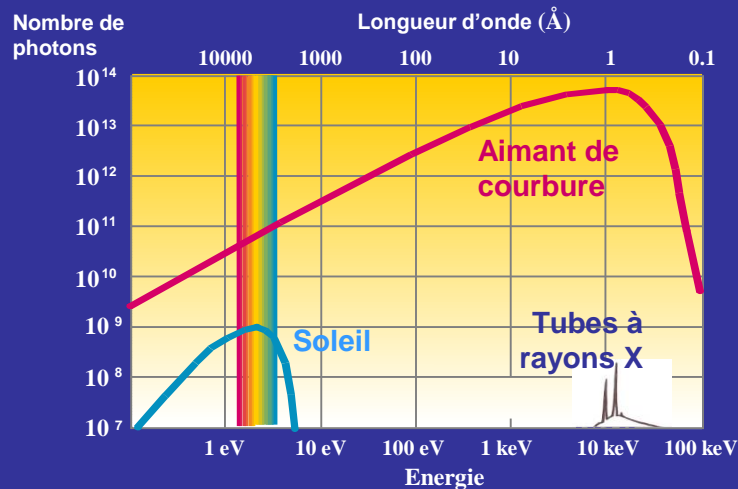
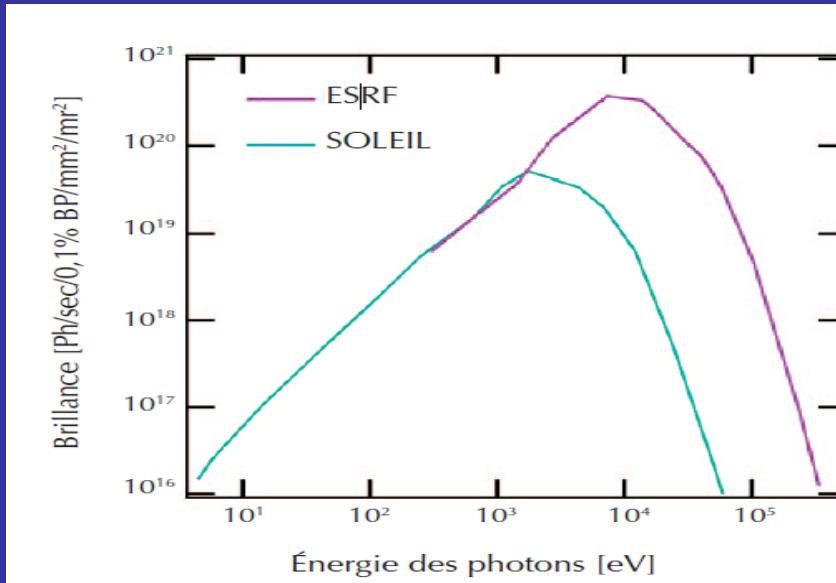
Divergence horizontale \*verticale

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



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

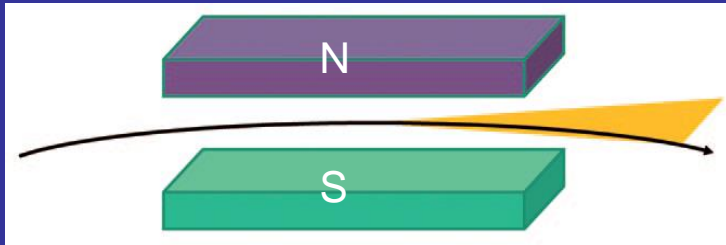
### Les sources de rayonnements synchrotron



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

### *Les sources de rayonnements synchrotron*

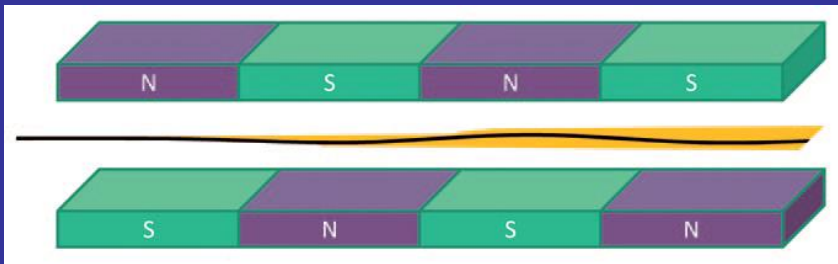
#### De la deuxième:



Rayonnement d'un aimant de courbure (dipôle): deux pôles, nord et sud, créent un champ magnétique homogène. Un électron qui passe dans ce champ magnétique est soumis à une accélération transverse et est dévié. Des photons sont émis tangentiellement à la trajectoire, dans un cône de faible ouverture (en jaune).

*Les dipôles sont des éléments de base d'un accélérateur circulaire*

#### → à la troisième génération



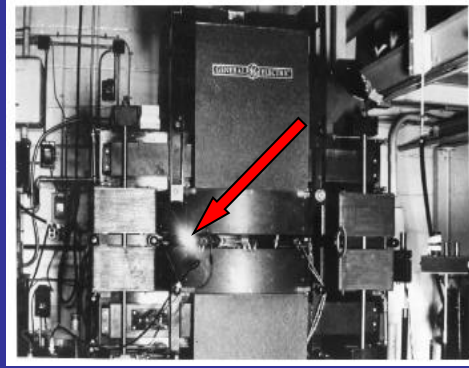
Rayonnement d'un onduleur: l'électron est dévié par une série d'aimants. Le cône dans lequel est émis le rayonnement est beaucoup plus étroit pour un onduleur que pour un dipôle.

*Les onduleurs sont des éléments spécifiques insérés dans un accélérateur circulaire*

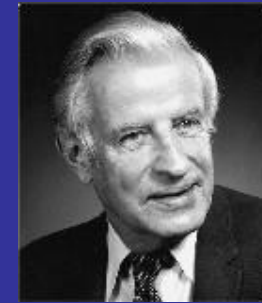
## 2. Une TRÈS BRÈVE histoire des accélérateurs jusqu'à l'ESRF

### *Les sources de rayonnements synchrotron*

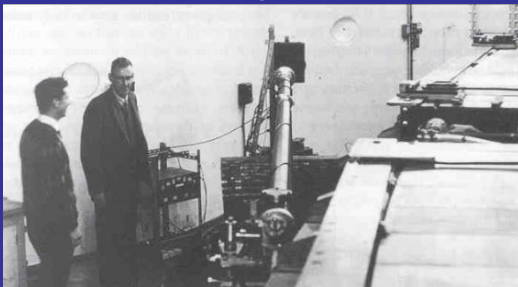
1947: Première observation du rayonnement synchrotron



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

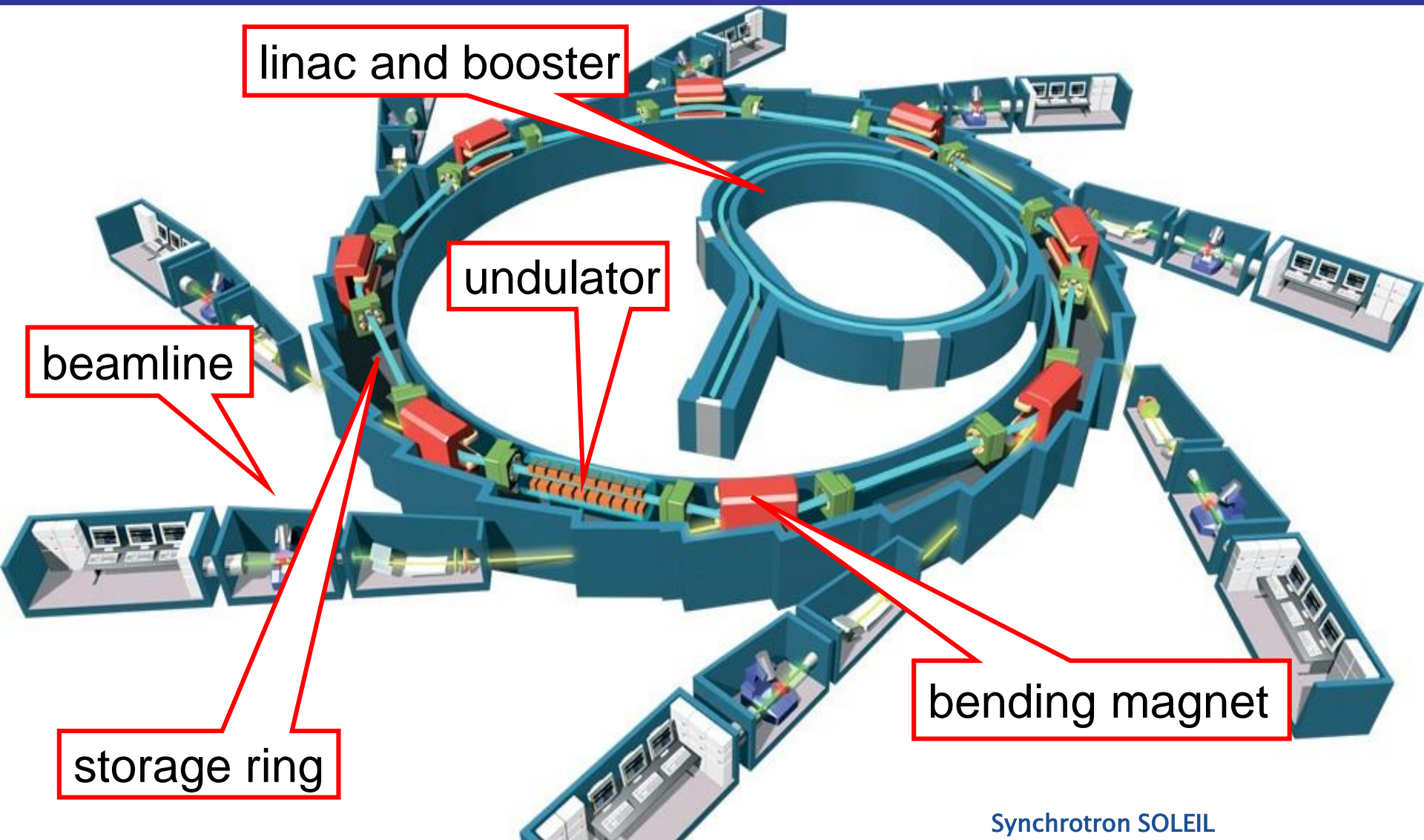


1994: Inauguration de l'ESRF, source de rayons X de 3ème génération



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

*Les sources de rayonnements synchrotron*



Synchrotron SOLEIL



## 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

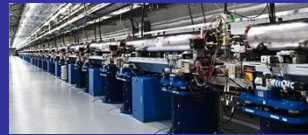


Petra III



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

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



LCLS

SACLA



European XFEL

Fermi



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

### *Les sources de rayonnements synchrotron*

Si vous n'avez pas d'accélérateur ... observez là au télescope !





### 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
- UPGRADE

### 3. L'ESRF AUJOURD'HUI

## Un modèle de coopération internationale



#### Membres:

France	27,5 %
Allemagne	24 %
Italie	13,2 %
Royaume-Uni	10,5 %
Russie	6 %
Benesync	5,8 %
(Belgique, Pays-Bas)	
Nordsync	5 %
(Danemark, Finlande, Norvège, Suède)	
Espagne	4 %
Suisse	4 %

Contribution en % au budget

#### Associés:

Israël	1,5 %
Autriche	1,3 %
Centralsync	1,05%
(République Tchèque, Hongrie, Slovaquie)	
Pologne	1 %
Portugal	1 %
Afrique du Sud	0,3 %

Source de lumière de 3ème génération

Localisation :	Grenoble, France
Participants :	19 pays
Budget annuel :	100 millions €
Personnel :	600 <b>dont 40 nationalités différentes</b>
Premiers utilisateurs :	1994
<b>Statut :</b>	<b>Société civile de droit français</b>



#### Excellence scientifique mondiale

- **6 500 visites** scientifiques/an dont **4 000 utilisateurs**
- **2 000 propositions d'expériences/an : 900 acceptées**,  
1 550 sessions expérimentales
- **30 %** des recherches liées à des **applications industrielles**
- 4 Prix Nobel parmi les utilisateurs ESRF
- 25 166 articles de référence sur la période 1994-2014 !
- ~1 900 publications par an : ~5 par jour !
- Une qualité et une fiabilité de services reconnues

### 3. L'ESRF AUJOURD'HUI

Un site unique pour la recherche scientifique



European Synchrotron Radiation Facility



Institut Laue-Langevin



FMBI  
European Molecular Biology Laboratory



Institut de Biologie Structurale



european photon & neutron science campus

GIANT

INNOVATION CAMPUS





### 3. L'ESRF AUJOURD'HUI



● **1988** 12 États membres signent la création de l'ESRF

● **1992** 1<sup>er</sup> faisceau d'électrons dans l'anneau de stockage

● **1994** Inauguration : 15 lignes de lumière

● **1998** 40 lignes de lumière

● **2009-2015** Upgrade Programme Phase I

● **2012** Nouveau design pour l'anneau de stockage

● **2015** *Lancement de l'Upgrade Programme Phase II*



### 3. L'ESRF AUJOURD'HUI ET DEMAIN

2009  
2015 Upgrade PHASE I – 180 M€

- Création d'une nouvelle génération de lignes de lumière (19 stations expérimentales)
- Création d'un nouveau hall expérimental de 8 000m<sup>2</sup>
- Amélioration et renouvellement de la plupart des équipements scientifiques
- Amélioration des accélérateurs et des sources

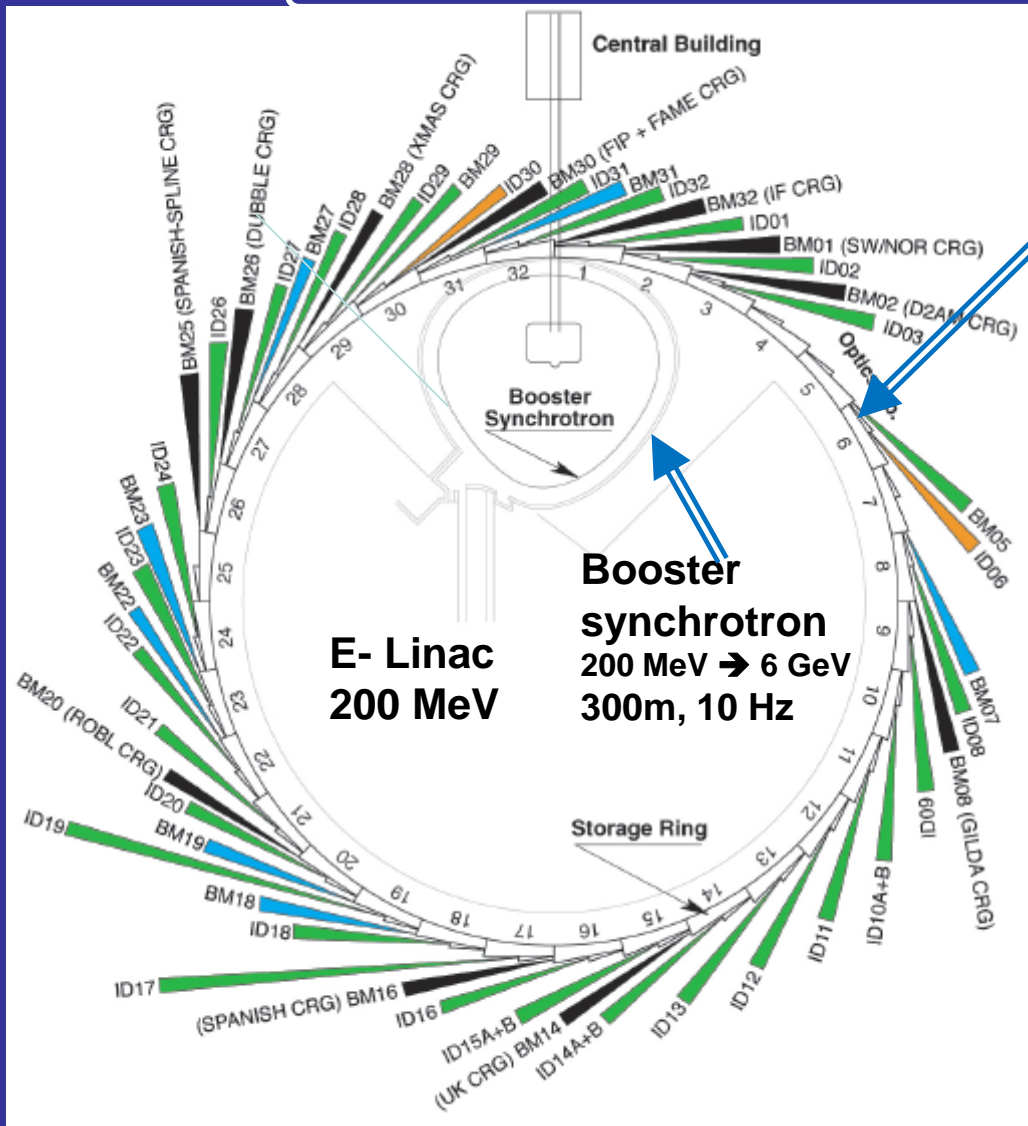
2015 Upgrade PHASE II – 150 M€  
2022 Lancée en juin 2015

- **Construction d'un nouvel anneau de stockage**, au sein de l'infrastructure existante, avec des performances 100 fois supérieures aux propriétés actuelles de l'ESRF
- Création de lignes de lumière
- Programme ambitieux d'instrumentation
- Stratégie renforcée de « *big data* »



### 3. L'ESRF AUJOURD'HUI

#### Les lignes de lumière



**Anneau de stockage  
6GeV, 844 m**

<b>Energy</b>	<b>GeV</b>	<b>6.04</b>
<b>Multibunch Current</b>	<b>mA</b>	<b>200</b>
<b>Horizontal emittance</b>	<b>nm</b>	<b>4</b>
<b>Vertical emittance</b>	<b>pm</b>	<b>3.5</b>

**32 sections droites**

**42 Beamlines**

**12 sur dipoles**

**30 sur éléments d'insertion**

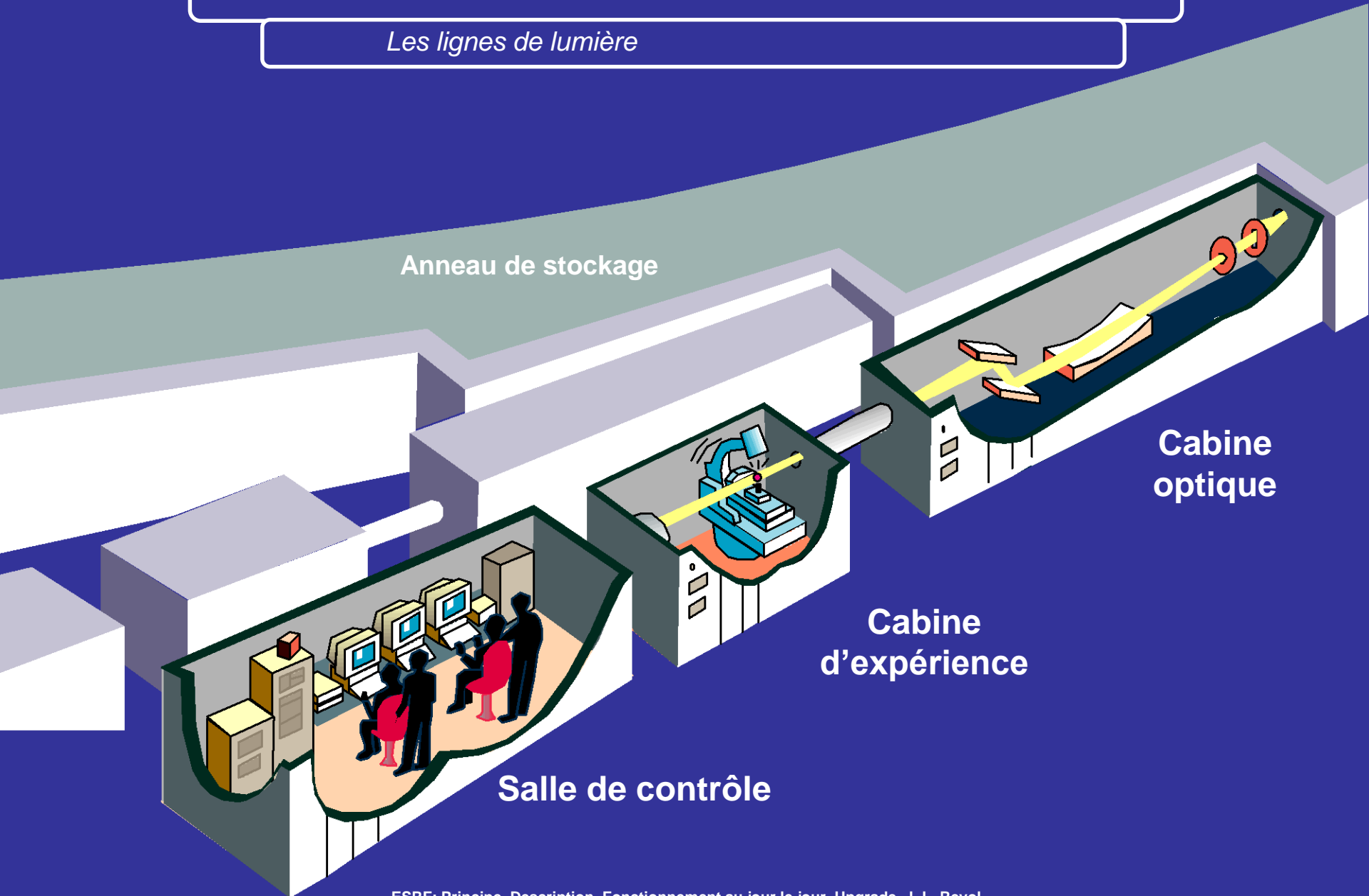
*72 insertion devices:*

*53 in-air undulators, 6 wigglers,  
11 in-vacuum undulators, including  
2 cryogenics*



### 3. L'ESRF AUJOURD'HUI

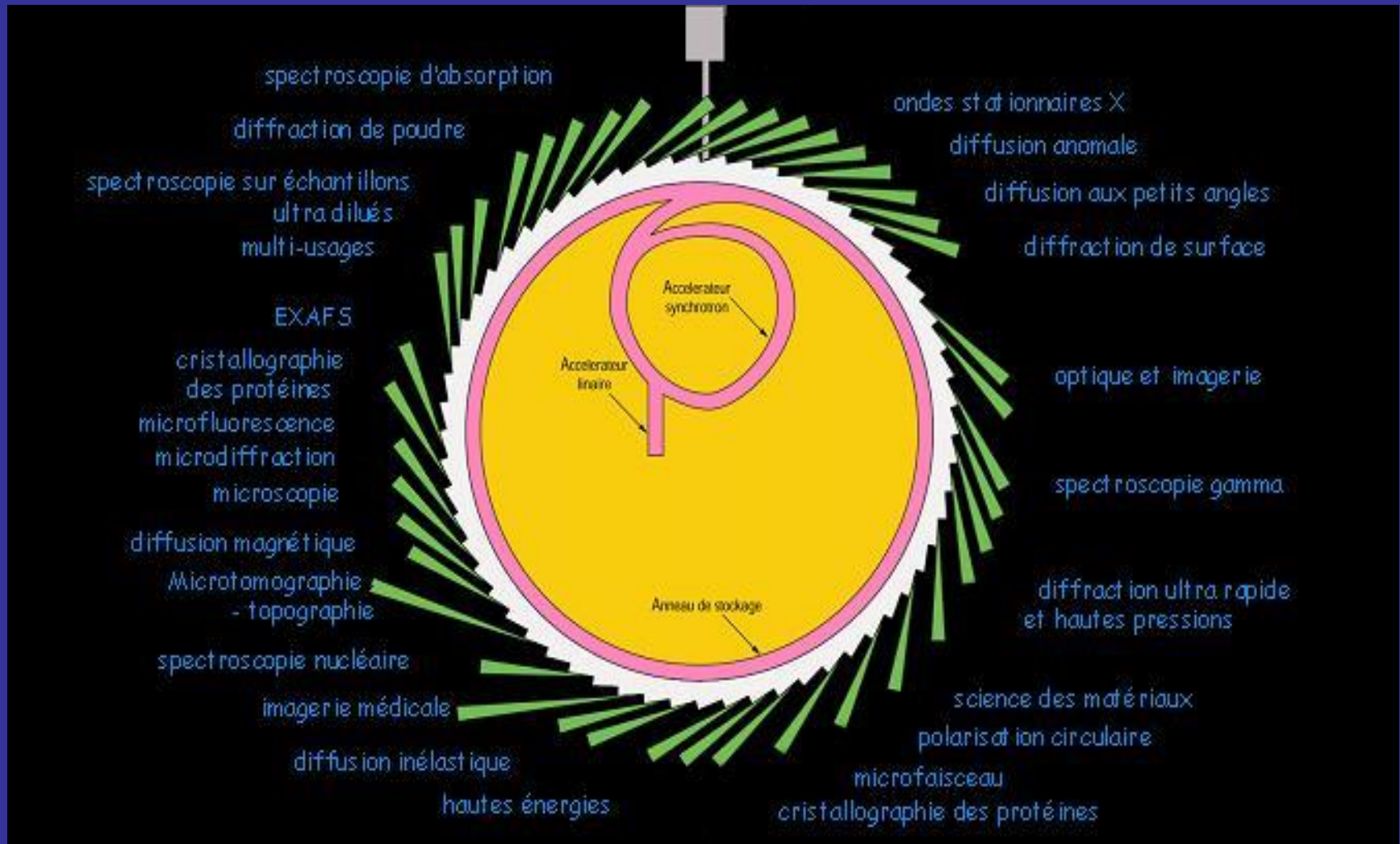
*Les lignes de lumière*





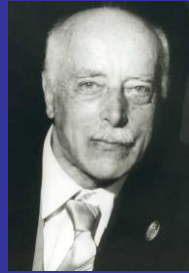
### 3. L'ESRF AUJOURD'HUI

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

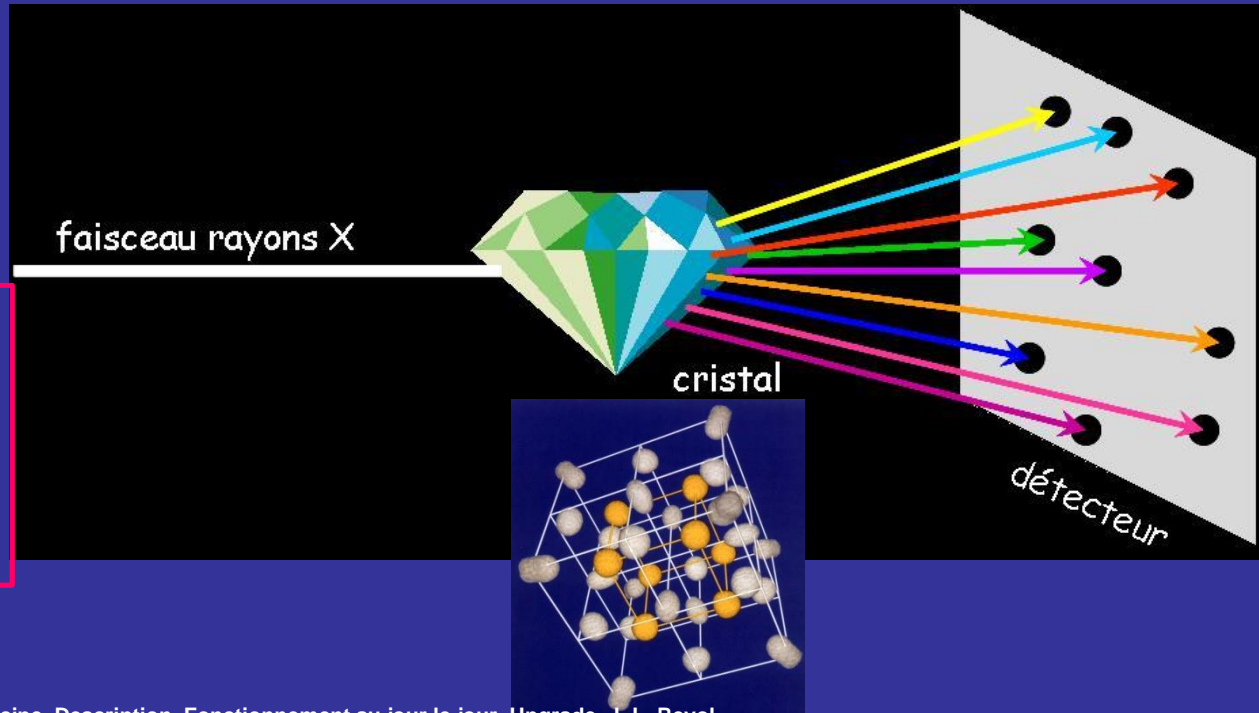
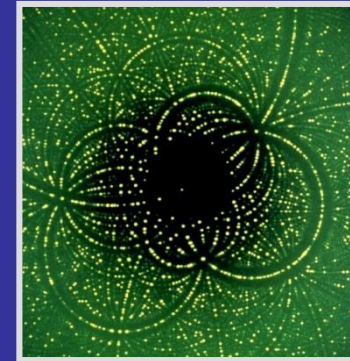


### 3. L'ESRF AUJOURD'HUI

#### 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

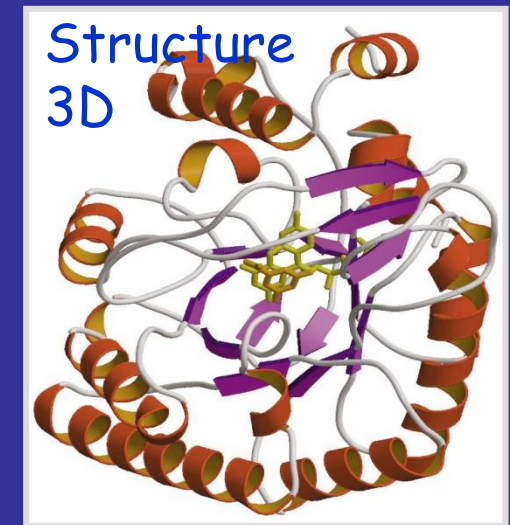
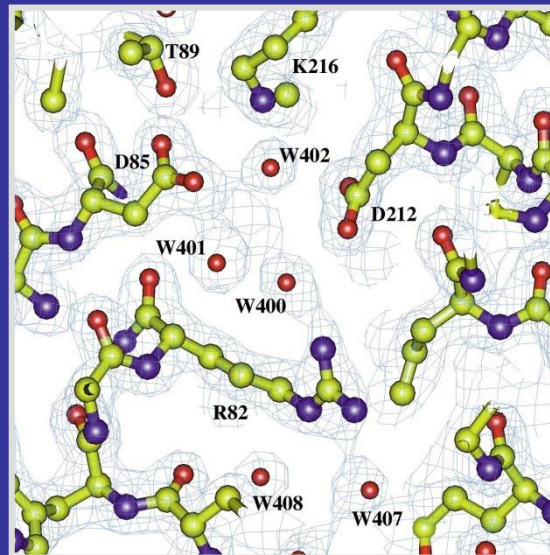
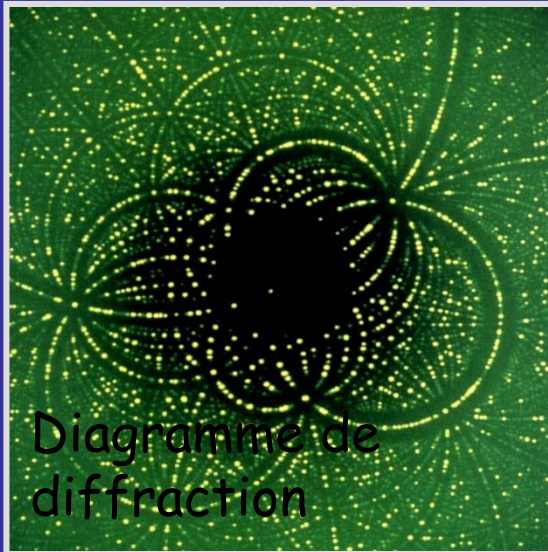
$d$  : distance entre 2 plans d'atomes

$n$  : 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

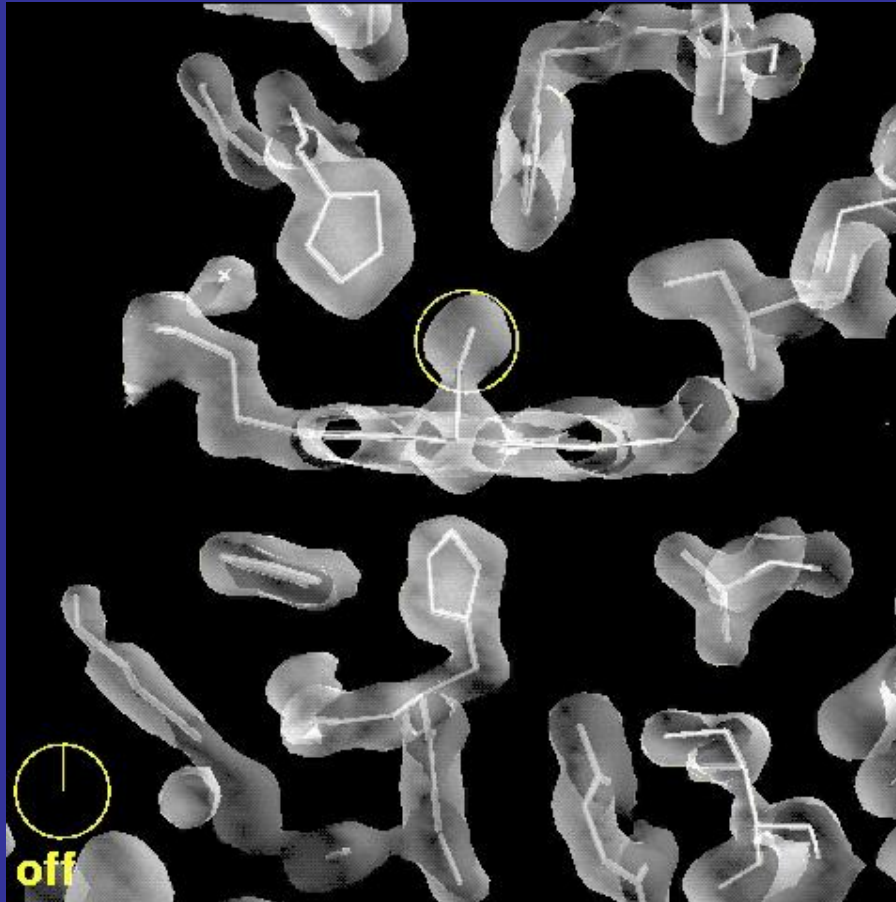


### 3. L'ESRF AUJOURD'HUI

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

#### Exemple 2 : la Biologie

Filmer une protéine en action avec une précision inégalée



Faisceau:

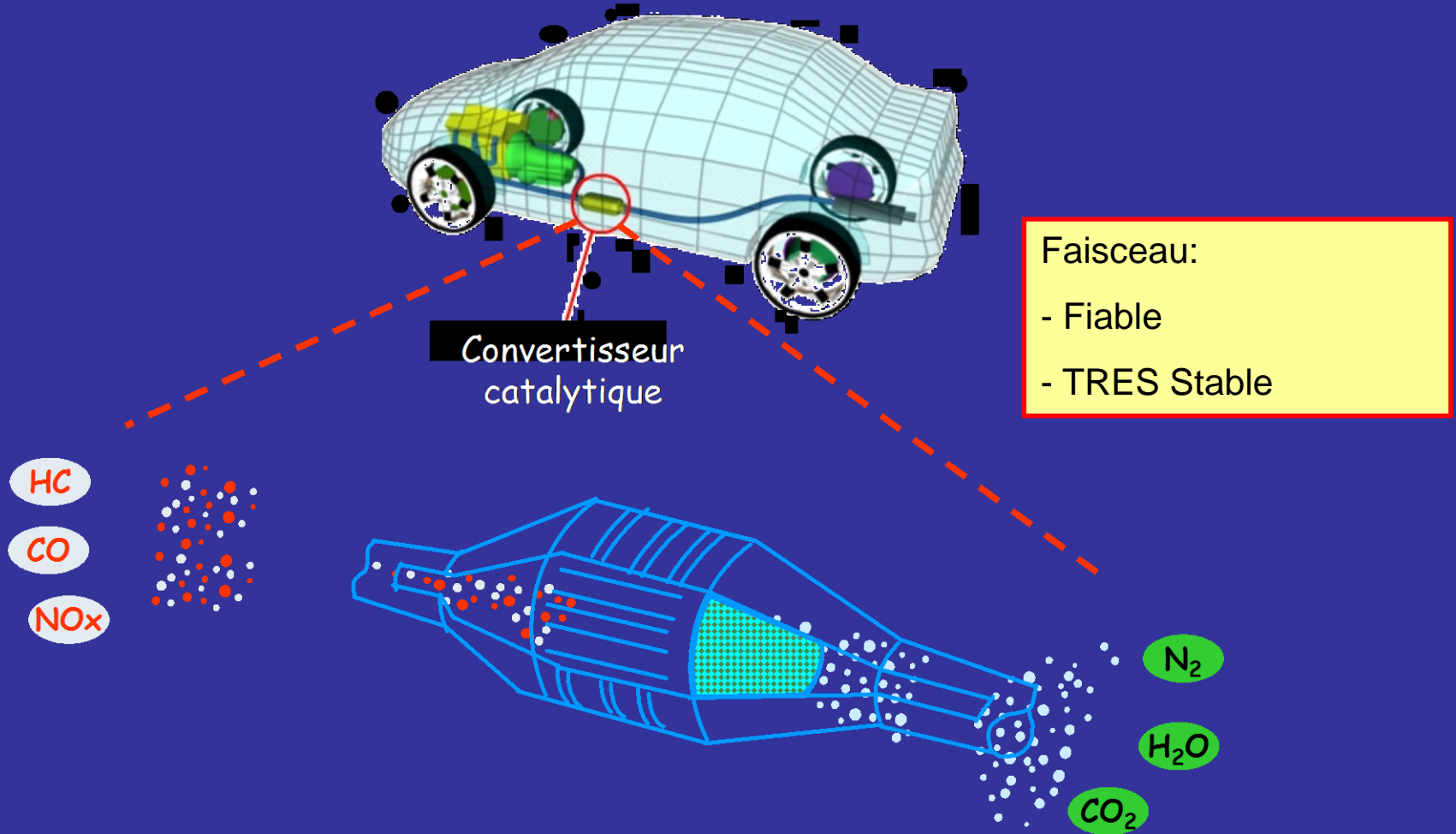
- Fiable
- Stable
- Structuré en temps

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

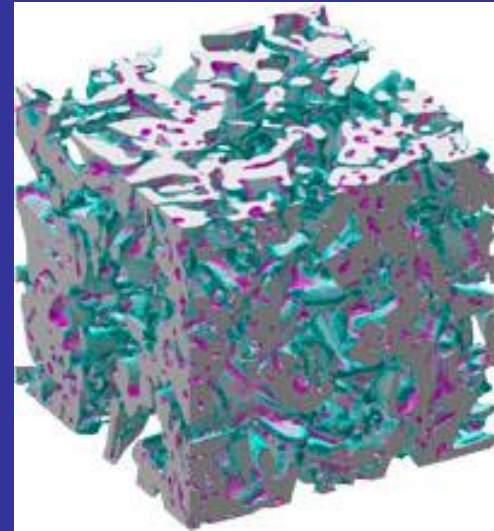
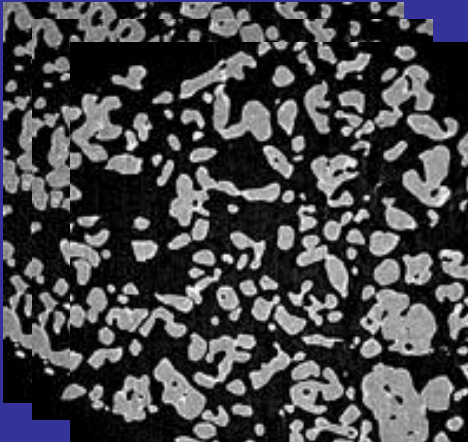


### 3. L'ESRF AUJOURD'HUI

*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.



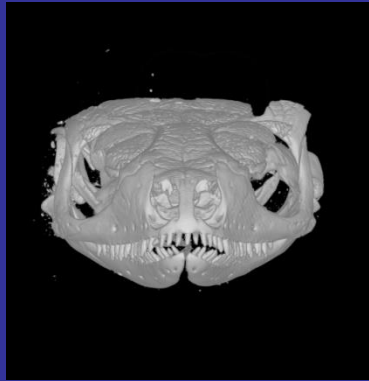
Faisceau:

- Fiable
- Stable

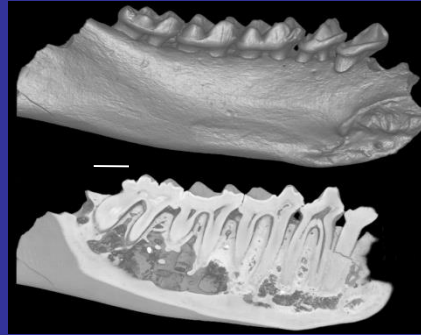
### 3. L'ESRF AUJOURD'HUI

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

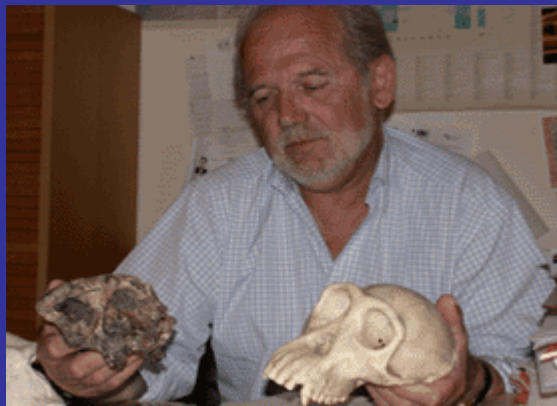
#### Exemple 5 : la paléontologie



#### Mâchoires d'ancêtres du singe



#### Toumai, notre plus vieil ancêtre



Faisceau:

- TRES Fiable (scans)
- Intense



### 3. L'ESRF AUJOURD'HUI

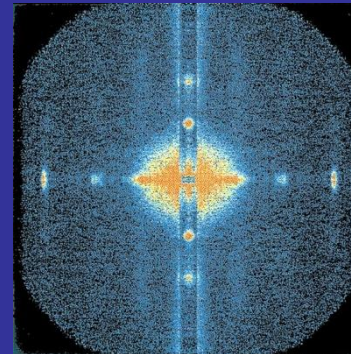
*Quels types de science peut-on faire à l'ESRF ?*

#### Exemple 6 : les matériaux

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



... permet de comprendre ses étonnantes propriétés mécaniques



Faisceau:

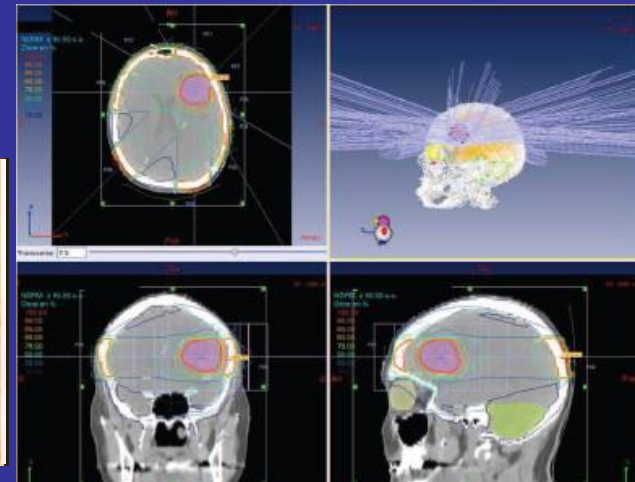
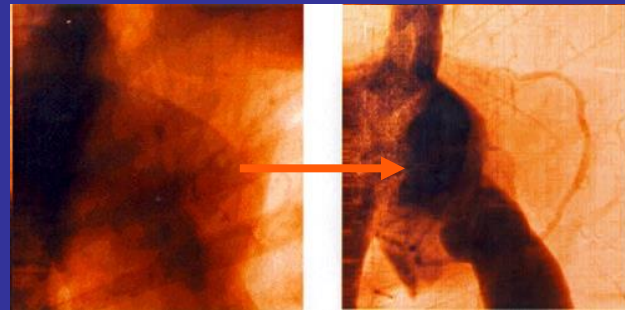
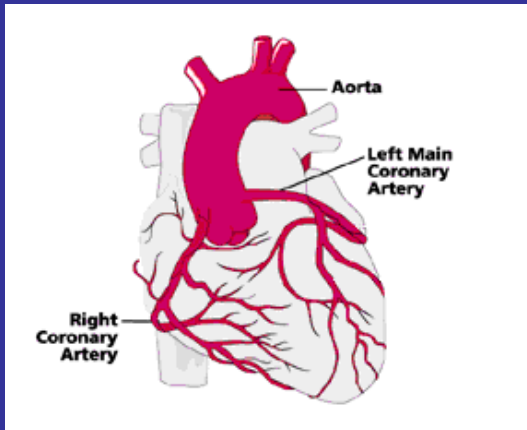
- Stable
- Petite dimension

### 3. L'ESRF AUJOURD'HUI

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

#### Exemple 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:

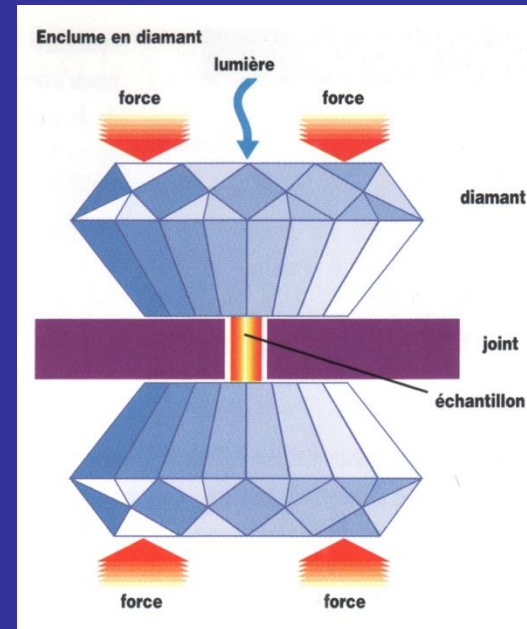
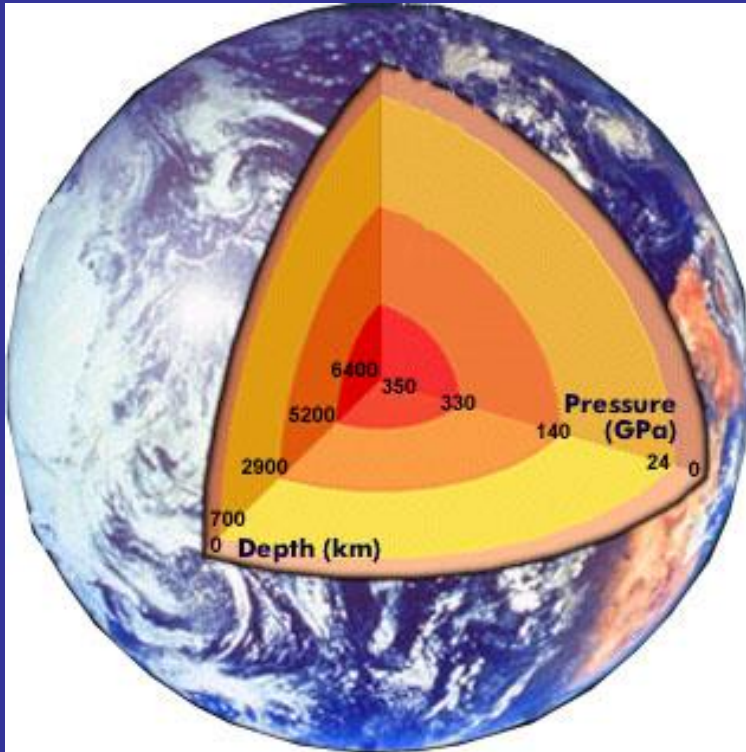
- TRES Fiable

### 3. L'ESRF AUJOURD'HUI

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

#### Exemple 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

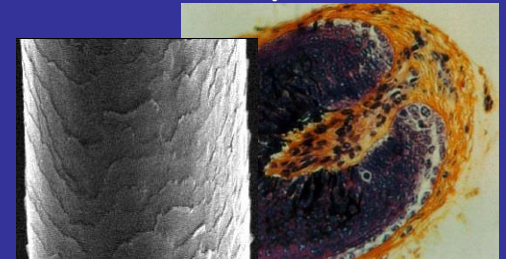
*Quels types de science peut-on faire à l'ESRF ?*

#### Exemple 9 : la recherche industrielle

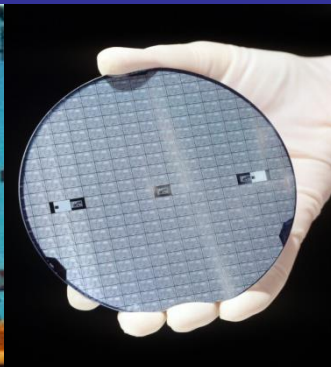
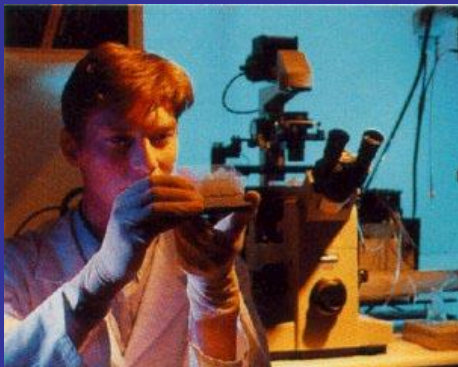
- **Bâtiment**



- **Cosmétiques**



- **Microélectronique**



- **Pharmacie**



Faisceau:  
- TRES Fiable

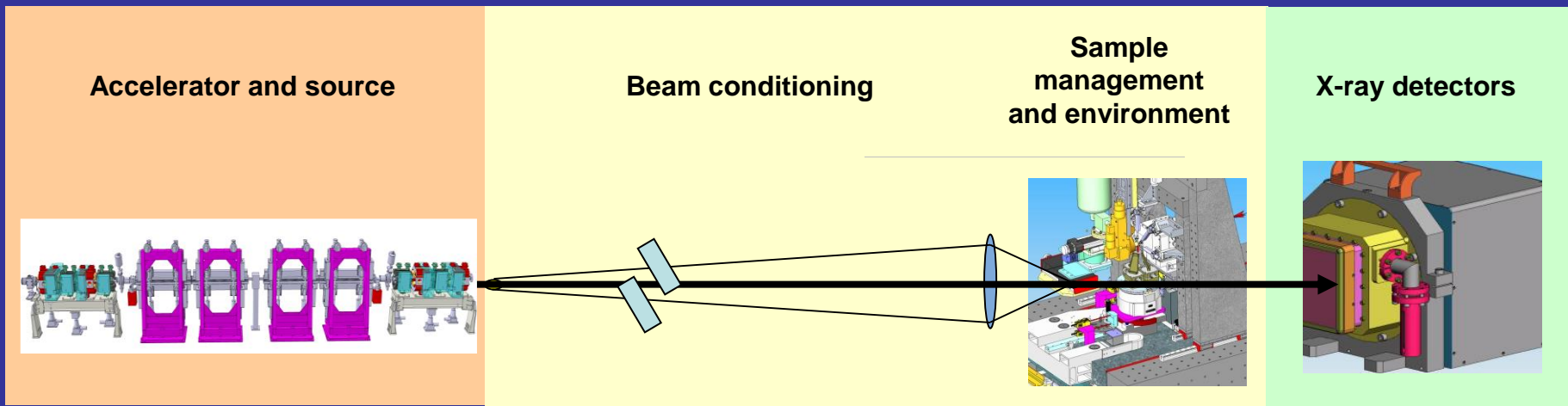
### 3. L'ESRF AUJOURD'HUI

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





## 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
- UPGRADE

## 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

### Présentation générale

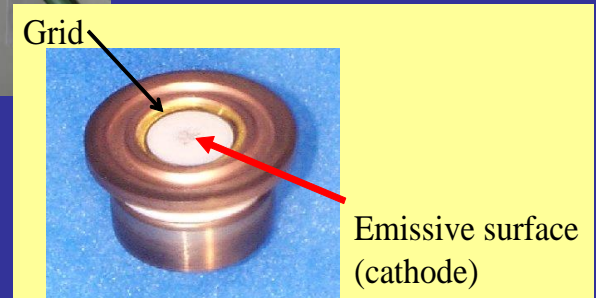


## 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

### 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*



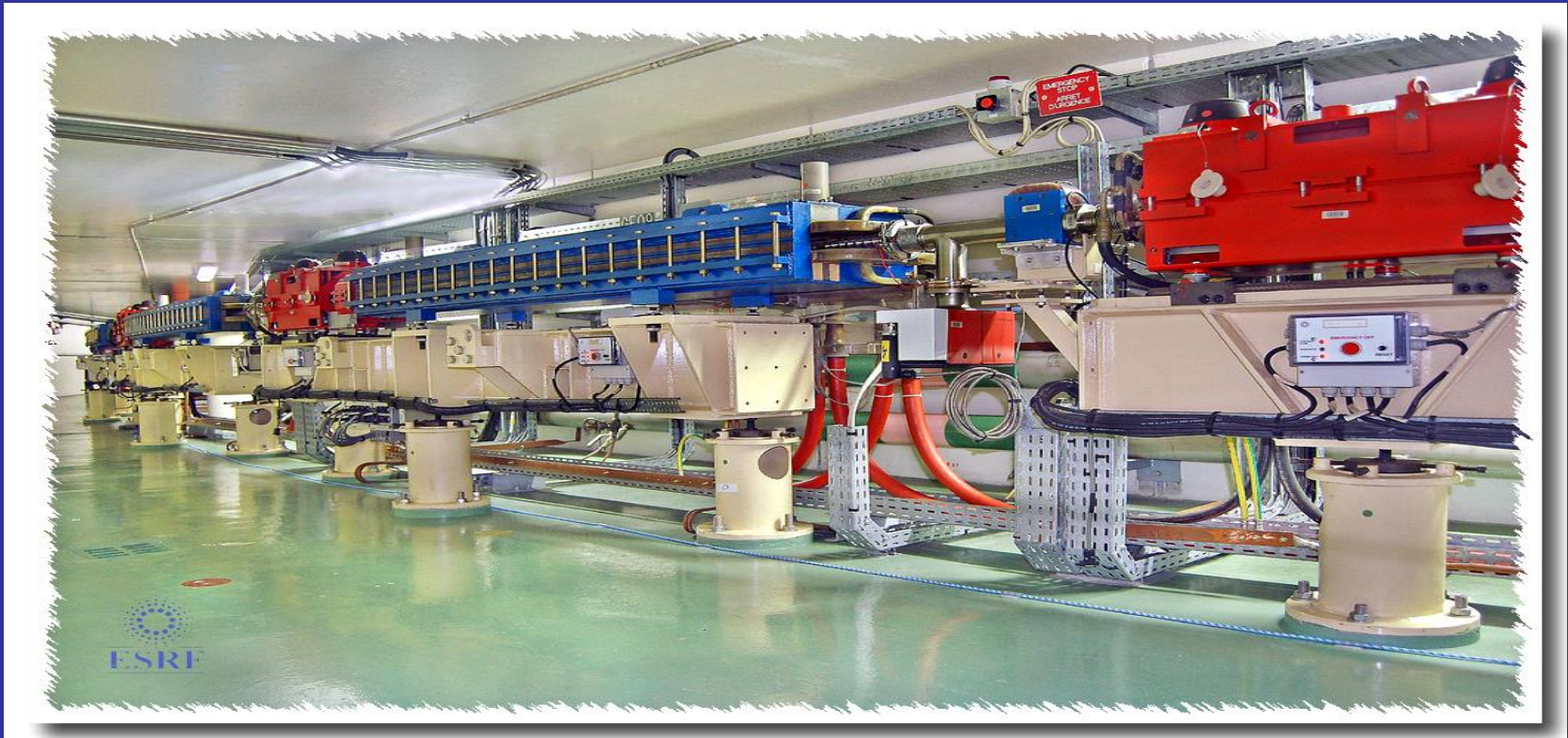
- Longueur: 16 mètres
- Composants principaux: 2 aimants de déviation, 7 quadrupôles, 2 paires d'aimants correcteurs
- Diagnostics: écrans amovibles + rayonnement synchrotron





## 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

The screenshot shows a control interface for the Booster magnets. At the top, a green bar indicates "Bpss is ON". The main area displays a schematic of the magnet chain with labels for "QFoc", "Dipole", and "QDefoc". Below this, there are control panels for "Q.Defoc AC", "Q.Defoc DC", "Q.Foc AC", "Q.Foc DC", "Dipole AC", and "Dipole DC". A red circle highlights the "Q.Defoc AC" and "Dipole AC" controls. The interface also shows "Energy Calculated 6.039 GeV" and "At t0 plus 49.0 ms". A graph titled "Booster Tune" is visible at the bottom right. The bottom of the screen features a "System Master" button, a "Reset" button, and "System Status" (OFF, Stand By, ON) and "Settings Files" (Operation, Economy) buttons.



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

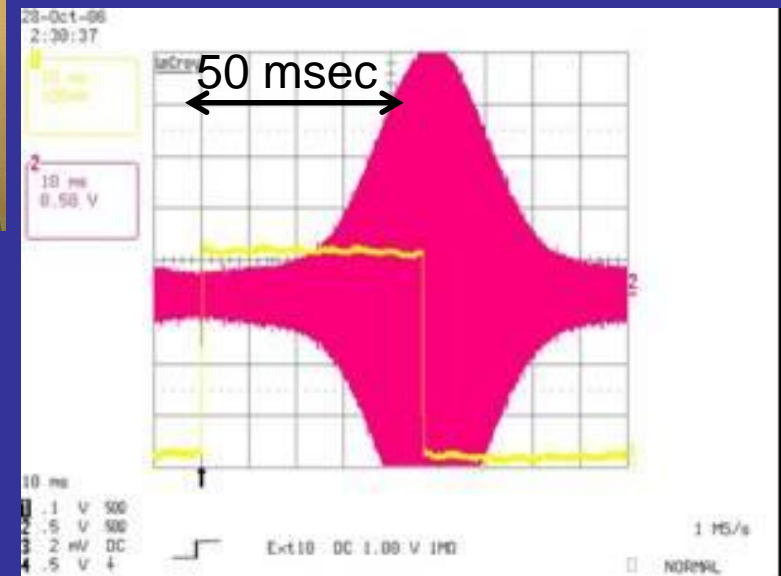


## 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

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



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

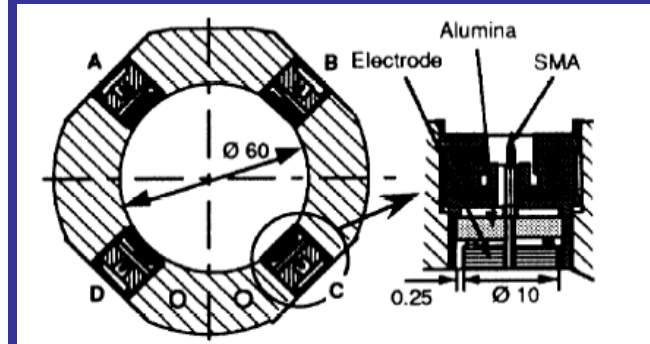
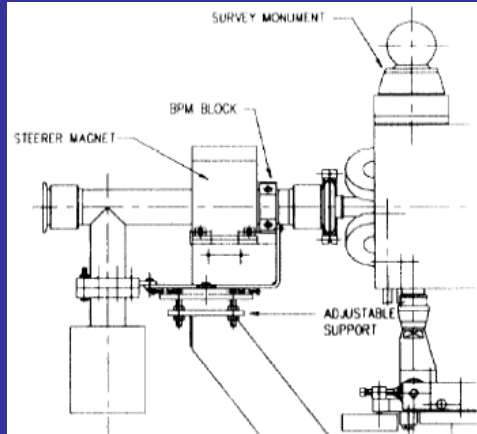
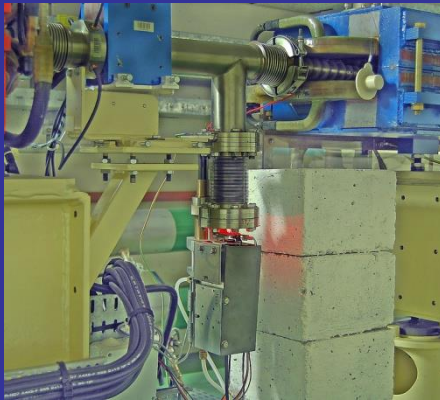


# 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

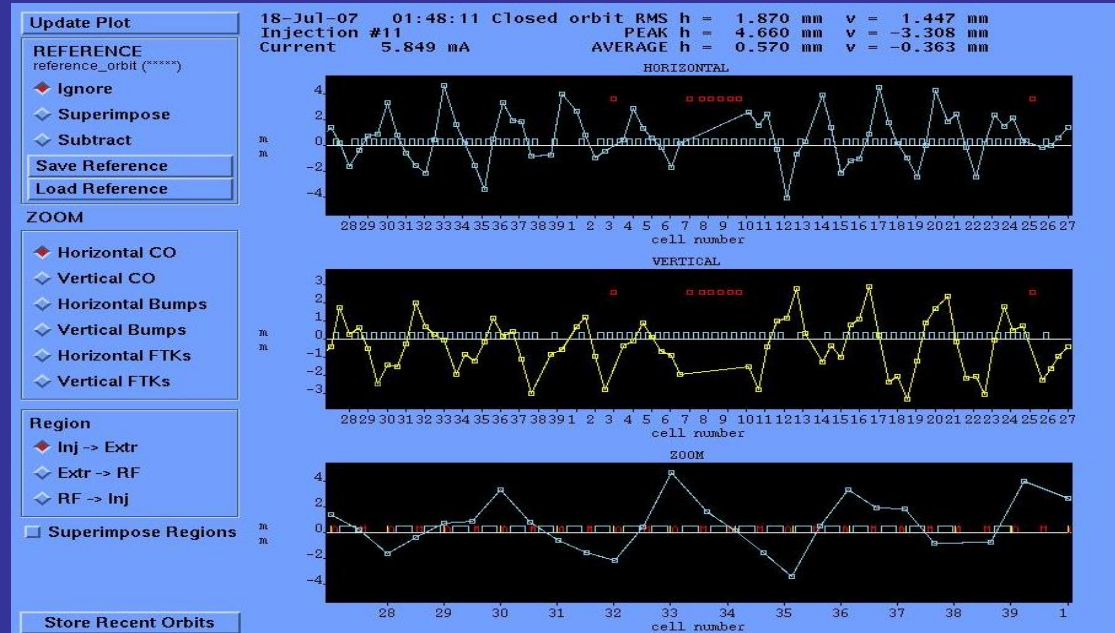
Le synchrotron (ou Booster): Les outils de diagnostic

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

+ 8 Ecrans amovibles



+ Synchrotron light monitors

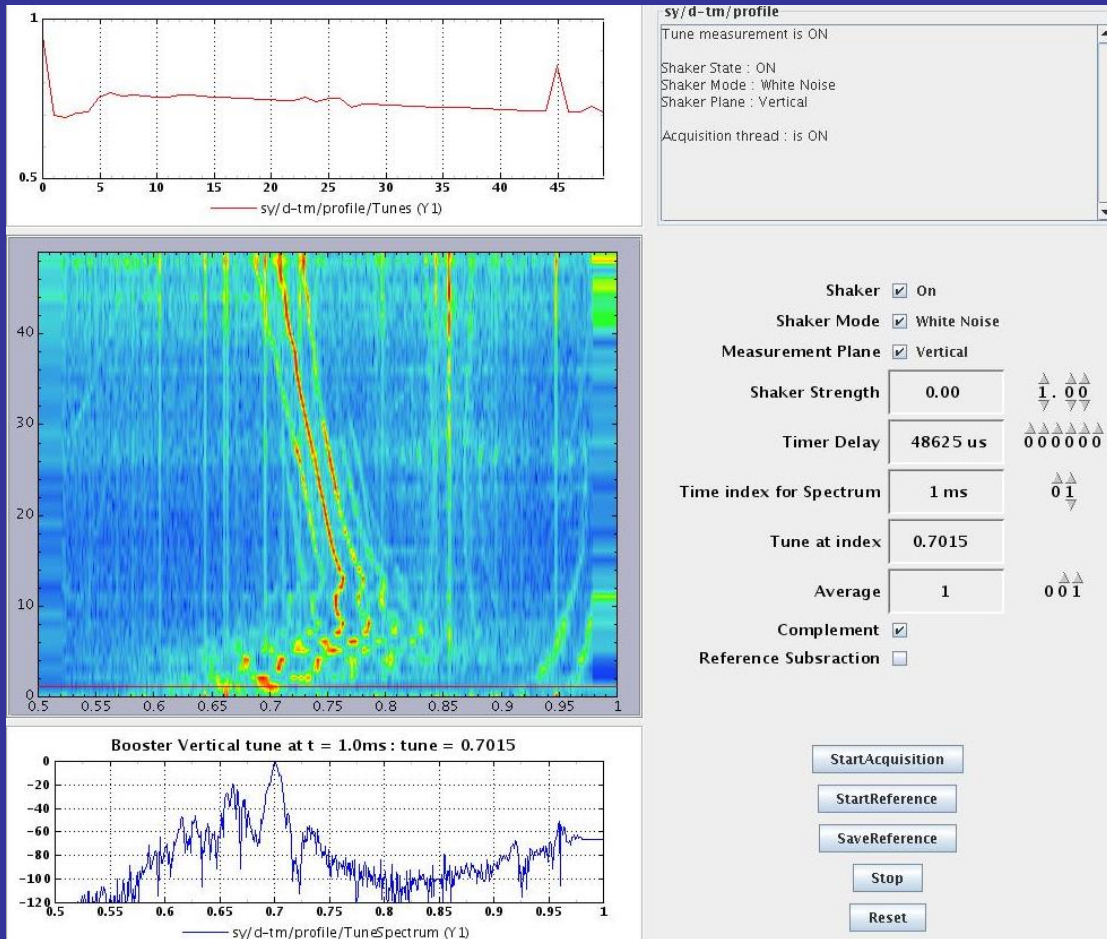




# 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

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

Mesure des tunes tout le long du cycle d'accélération



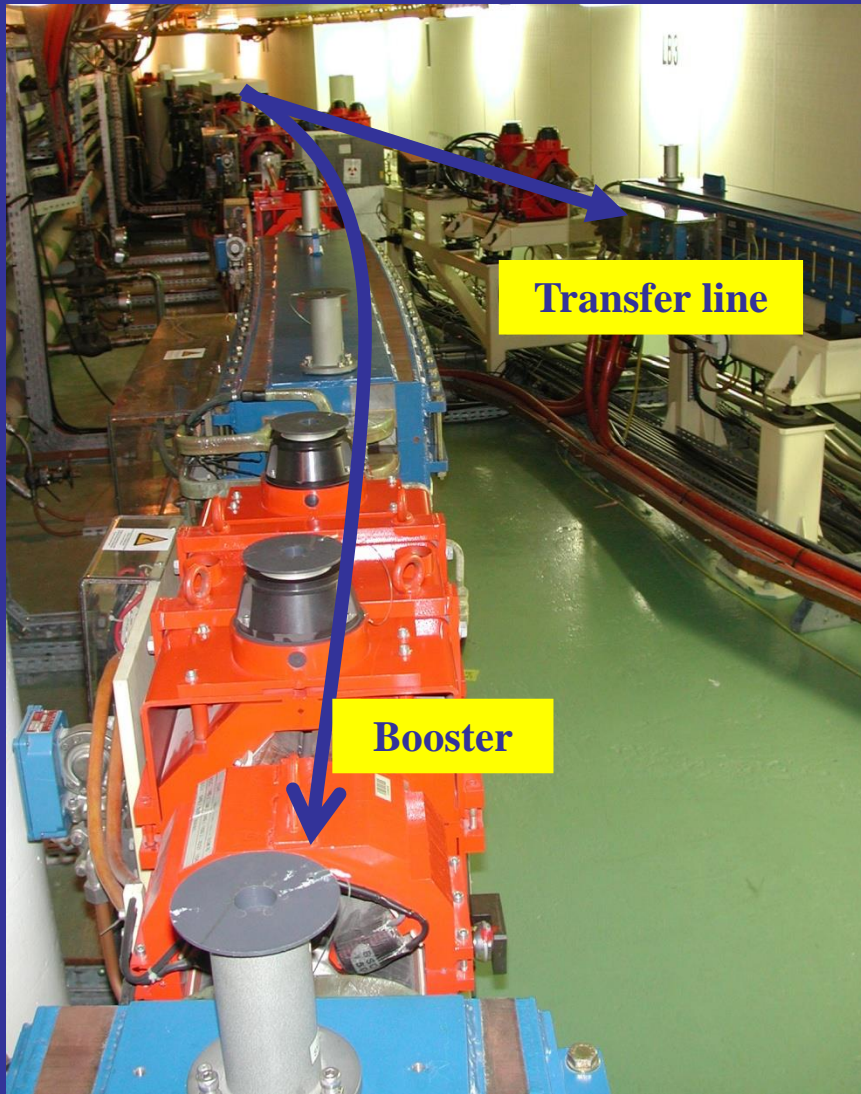
Le tune? C'est le nombre d'oscillations du faisceau dans chacun des plans le long d'une circonférence. Seule la partie décimale présente un intérêt.

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*



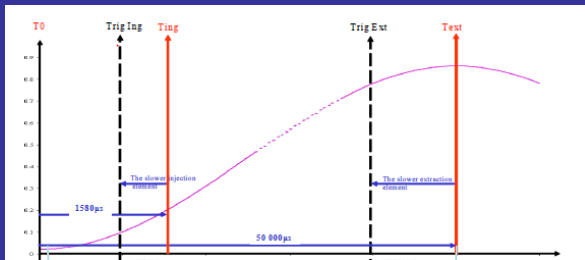
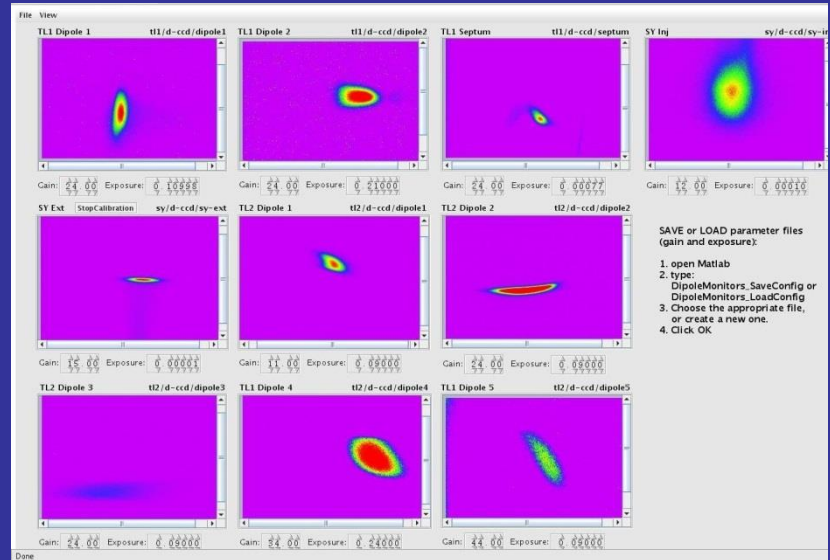
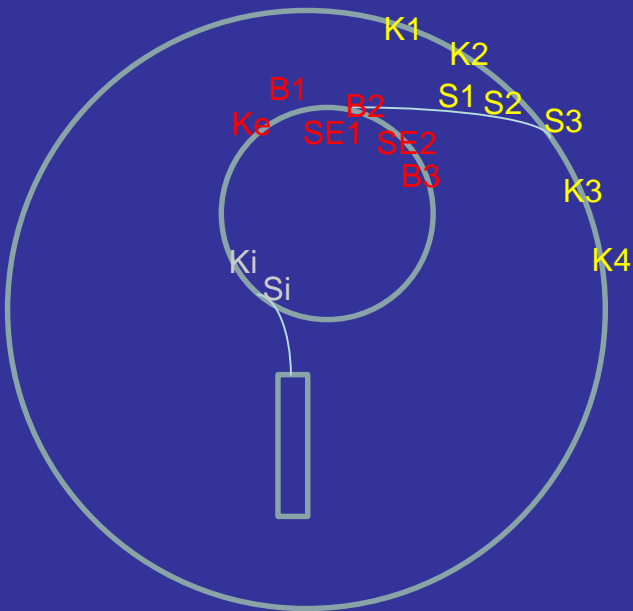
Objectif:

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

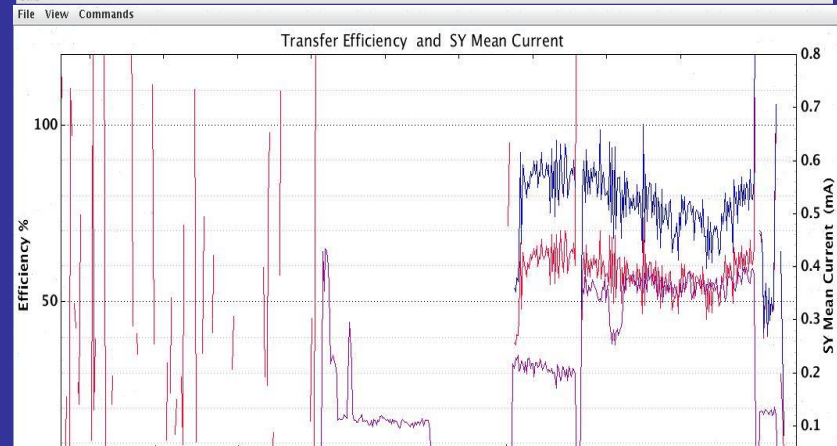
- 5 aimants de déviation (alimentés en série avec ceux du Booster)
- 14 quadripoles
- 9 écrans amovibles
- Beam Position Monitors
- Ecrans rayonnement synchrotron (1 écran / dipole)
- Longueur: 65 mètres

# 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

## Injection/extraction



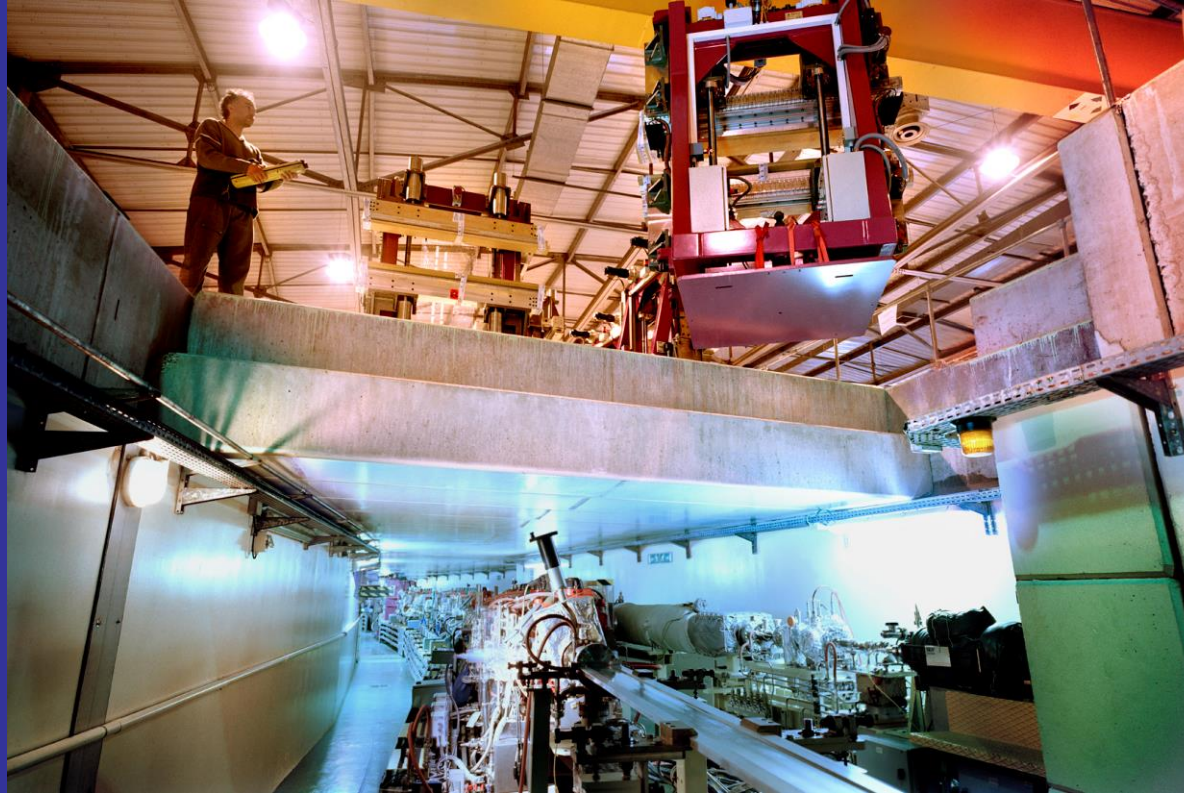
Un cycle d'injection = 50 ms





## 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

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



Stocker un faisceau d'électrons de 6 GeV

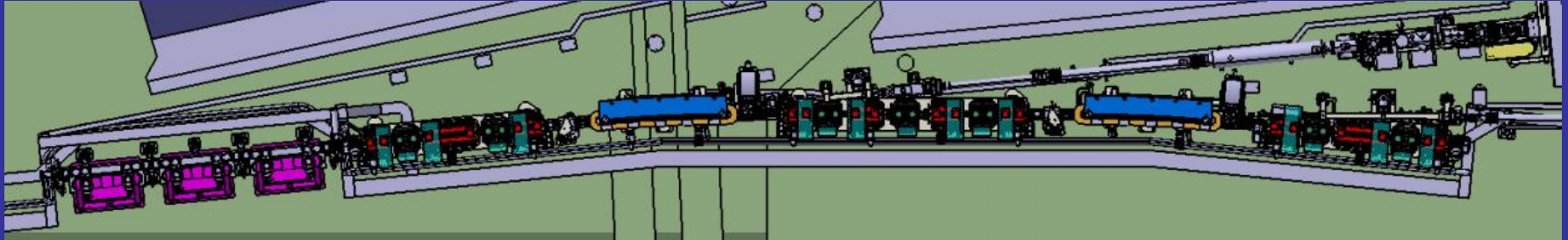
Source de rayons X (aimants de déviation, éléments d'insertion)

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



## 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

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



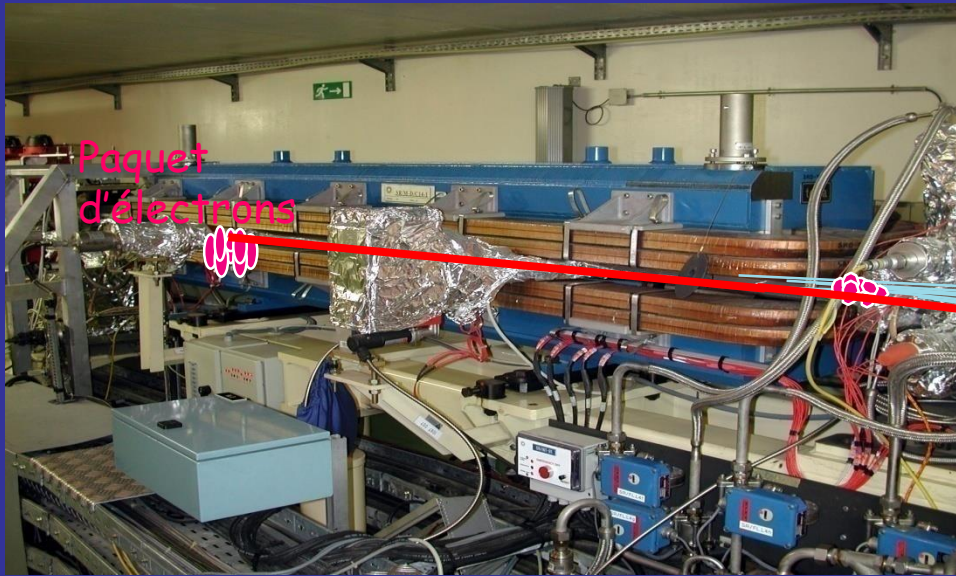
- Circonférence: 844 mètres
- 16 super-périodes de 2 cellules miroirs → 32 cellules
- Energie: 6 GeV
- Intensité nominale: 200 mA
- Intensité record: 300 mA
- Emittance: 4nm rad
- Couplage habituel: 0.1 %



## 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 A

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

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

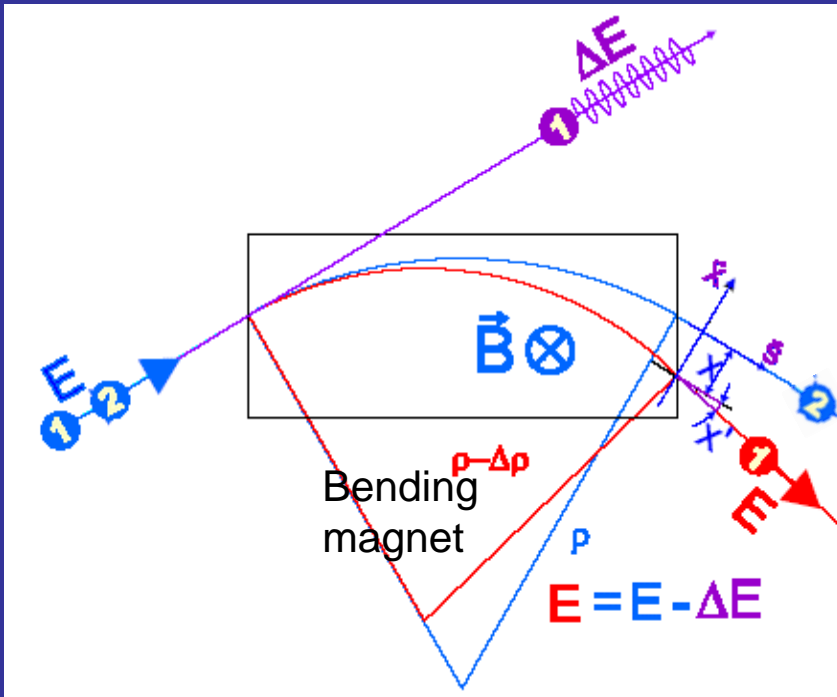
**Energy lost per turn of ring by one electron**

$$\Delta E_{[\text{keV}]} = 88.5 \frac{E_{[\text{GeV}]}^4}{\rho_{[\text{m}]}} = 4.6 \text{ MeV}$$

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.

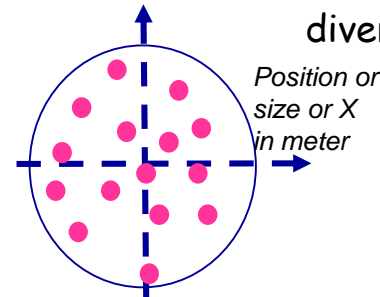
- même énergie à la sortie de l'aimant
- reste sur la trajectoire de référence

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

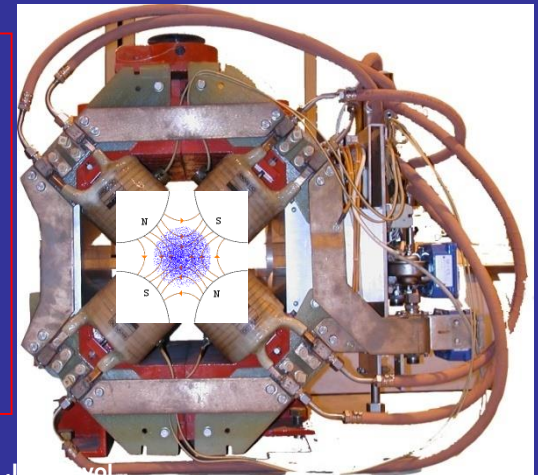


Nom	Nombre	Courant
QF2	32	216 A
QD3	32	- 334 A
QD4	64	- 415 A
QF5	64	411 A
QD6	32	- 491 A
QF7	32	375 A

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 bêtatroniques, etc

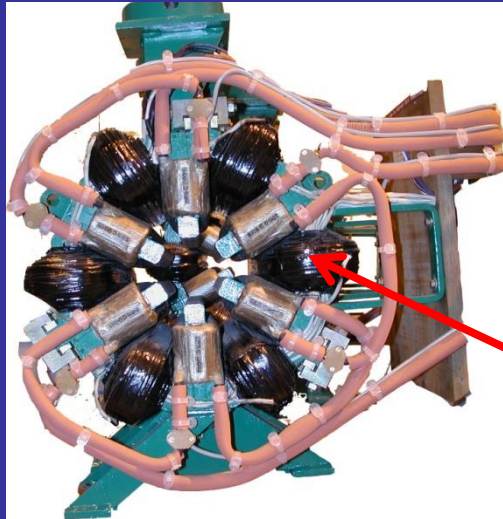




## 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

### 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 bêtatroniques
- l'ouverture dynamique,
- et donc sur le temps de vie du faisceau

6.01 GeV

5.99 GeV

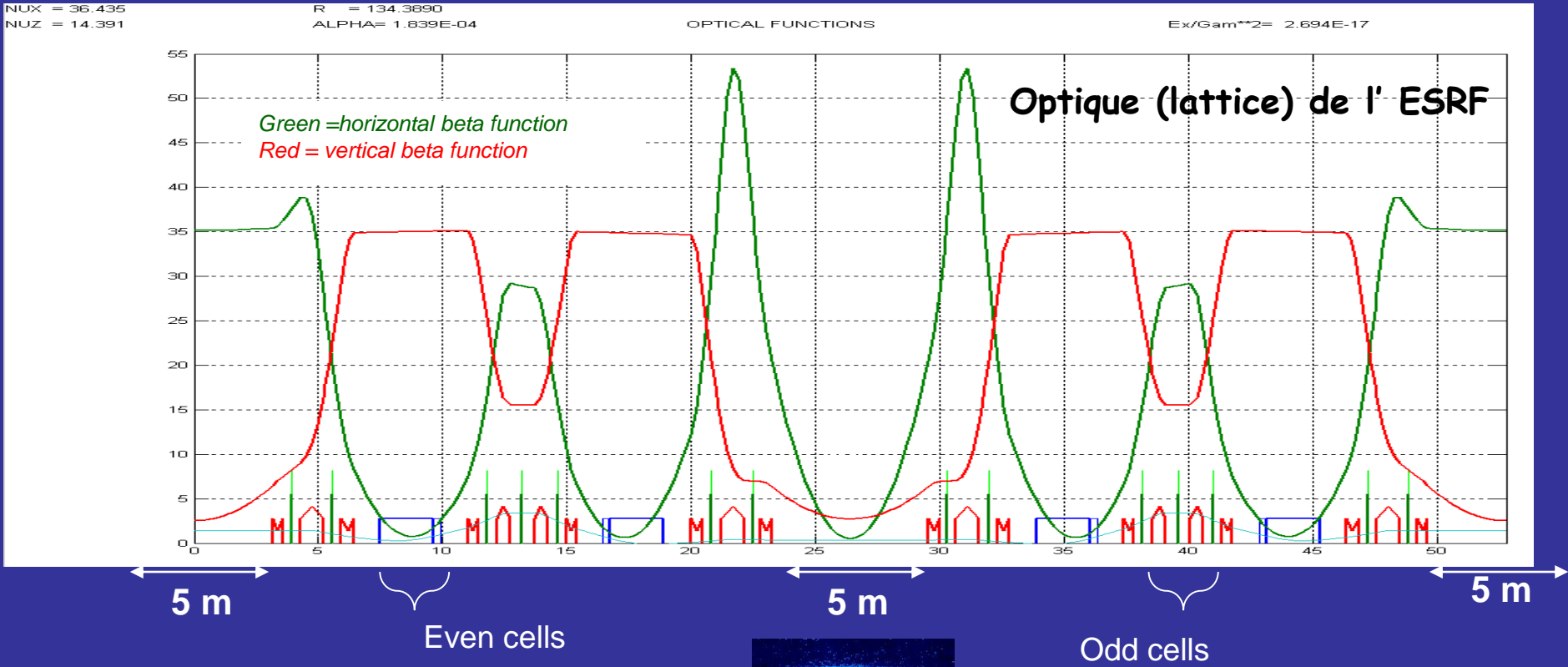
Un sextupôle agit comme:

- 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

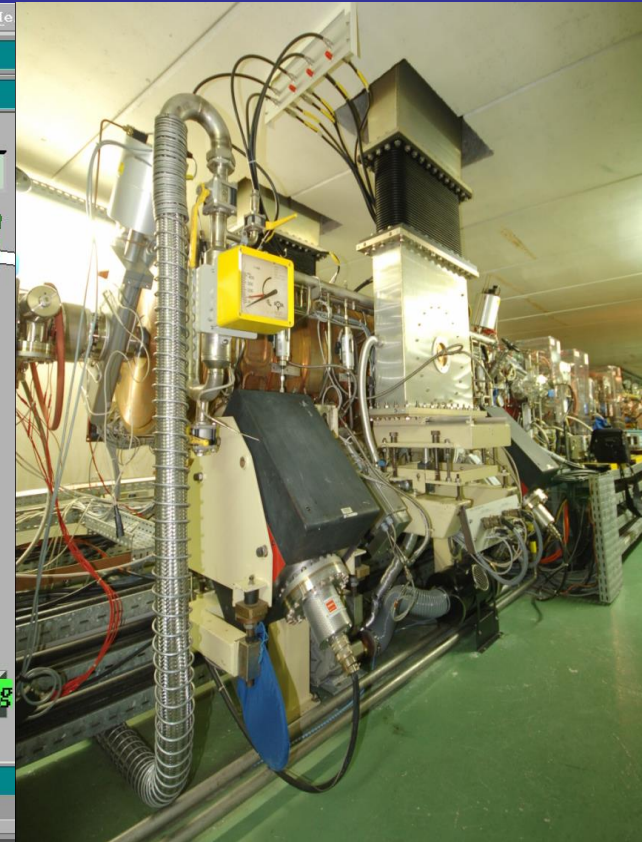
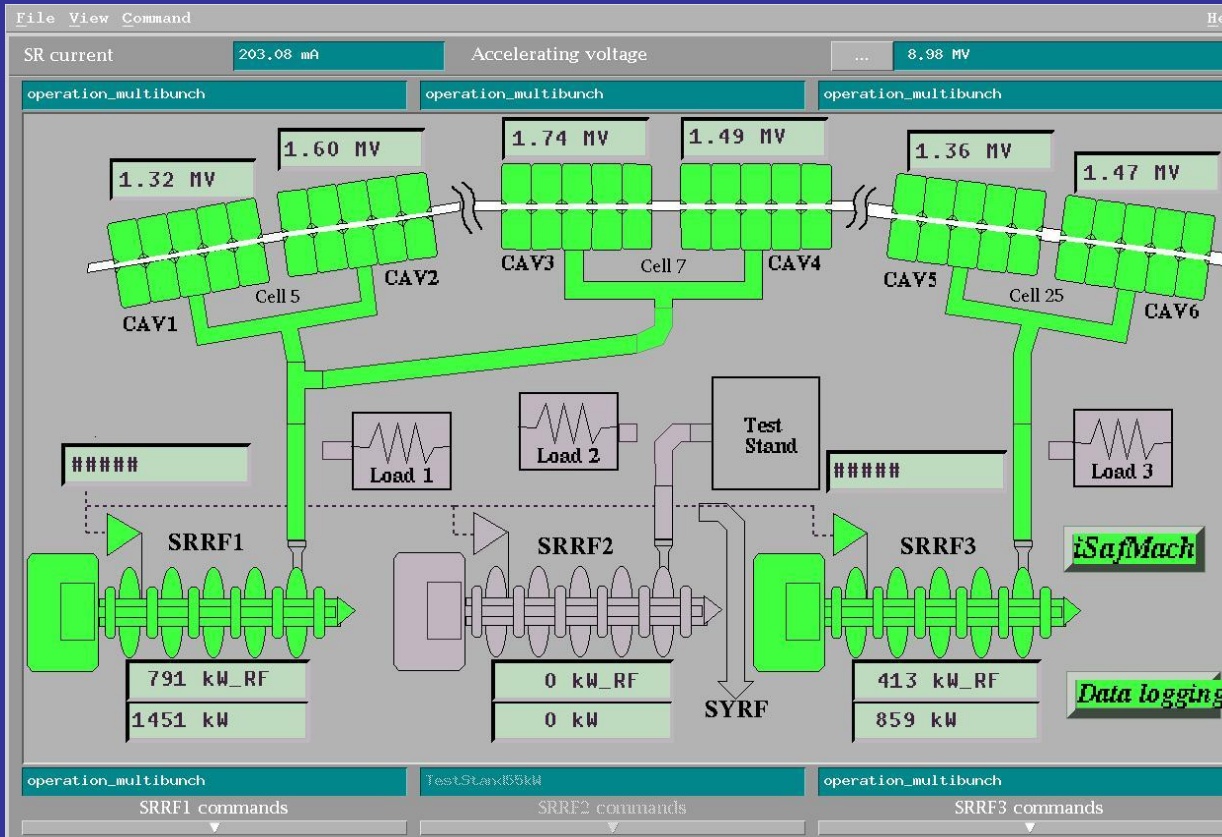
$$\sigma_x = \sqrt{\epsilon_x \beta_x} \quad \sigma'_x = \sqrt{\epsilon_x / \beta_x}$$

$$\sigma_y = \sqrt{\epsilon_y \beta_y} \quad \sigma'_y = \sqrt{\epsilon_y / \beta_y}$$

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

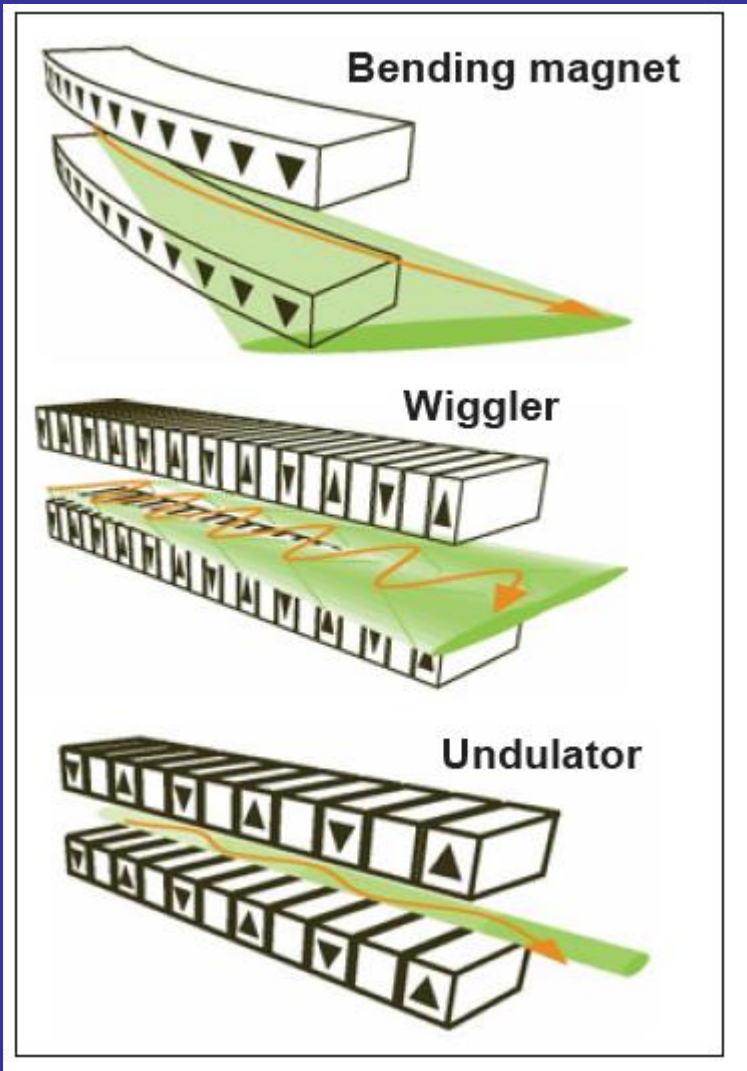
*L'anneau de stockage: Les éléments d'insertion*



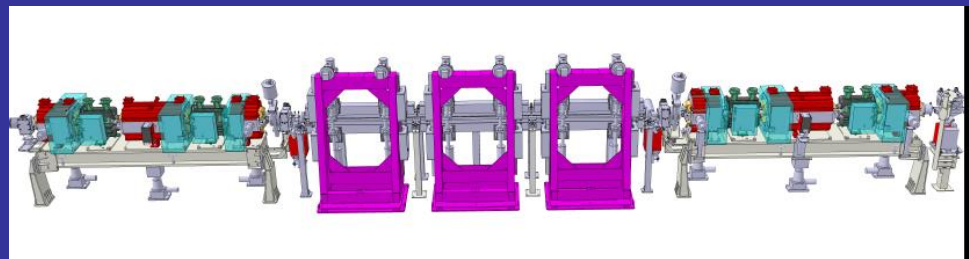


## 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

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



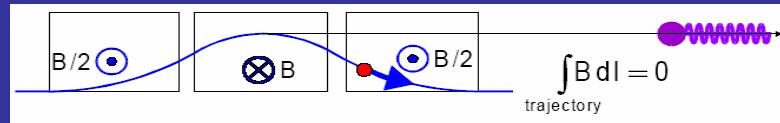
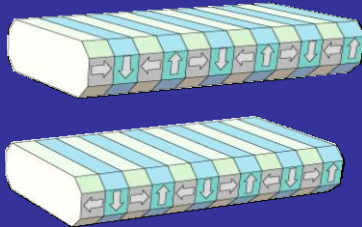
Rôle: produire des rayons X avec des propriétés spécifiques et différentes de ceux émis par les dipôles (bending magnets), par exemple, spectre en énergie variable, polarisation, brillance plus élevée.



## 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

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

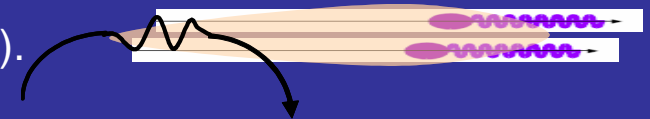
Généralement conçu « sur mesure » pour une ligne de lumière



Deux grandes familles:

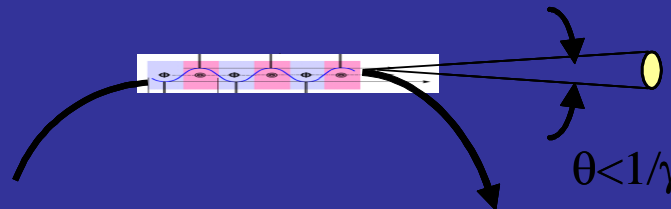
Wigglers : Petits nombres de périodes, champs magnétiques élevés.

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



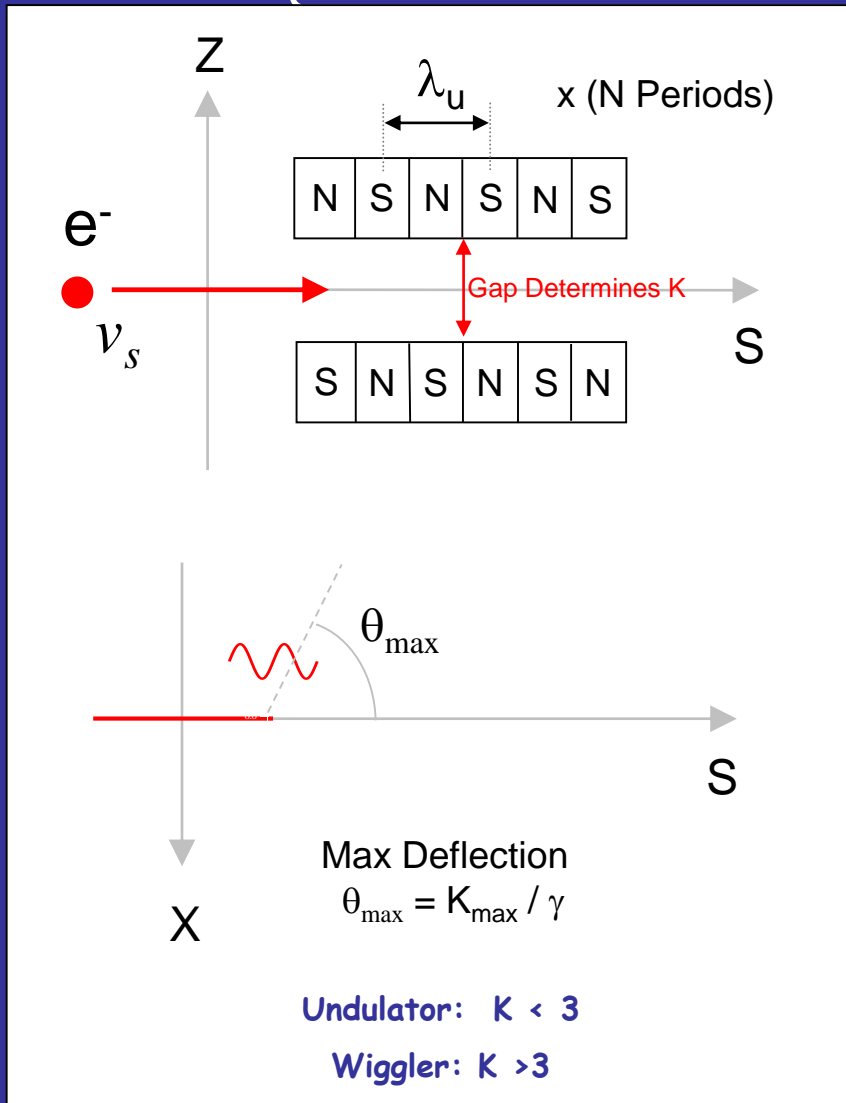
Onduleurs : Grand nombre de périodes.

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

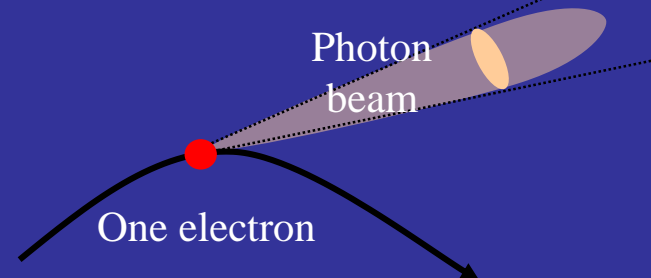
$$K = 0.0934 \lambda_u [\text{mm}] B_{\text{peak}} [\text{T}]$$

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



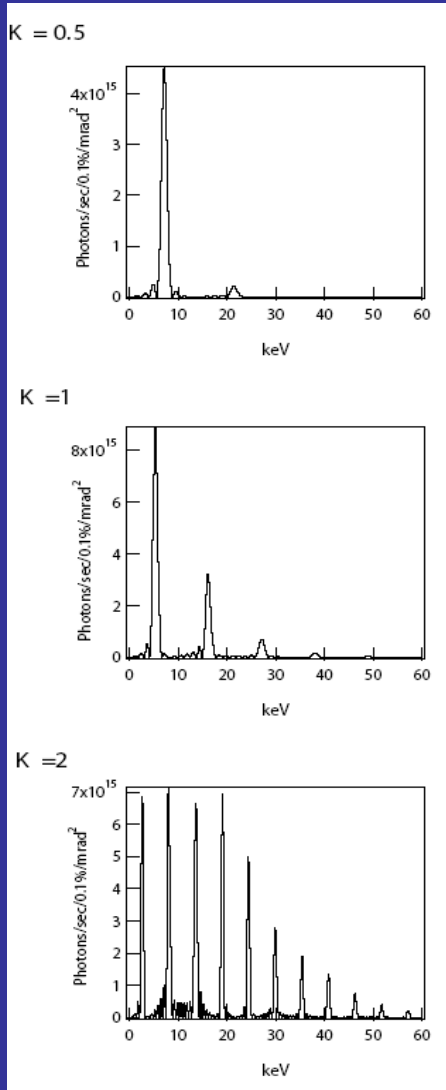
$$\Psi = \frac{1}{\gamma} = \frac{1}{E/E_0}$$

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

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

## 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:

$$\mathcal{E}_{[\text{keV}]} = 0.950 \frac{E^2_{[\text{GeV}]}}{\left(1 + \frac{K^2}{2}\right) \lambda_u [\text{cm}]}$$

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

La puissance totale émise est:

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

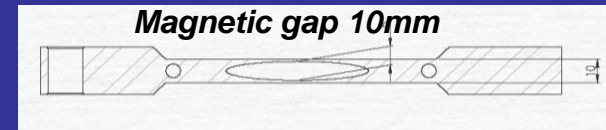
La conception d'un onduleur dépend fortement des besoins de la ligne.



## 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

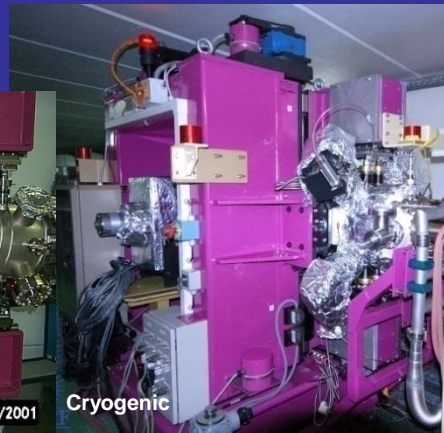
*L'anneau de stockage: Les éléments d'insertion*

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!!

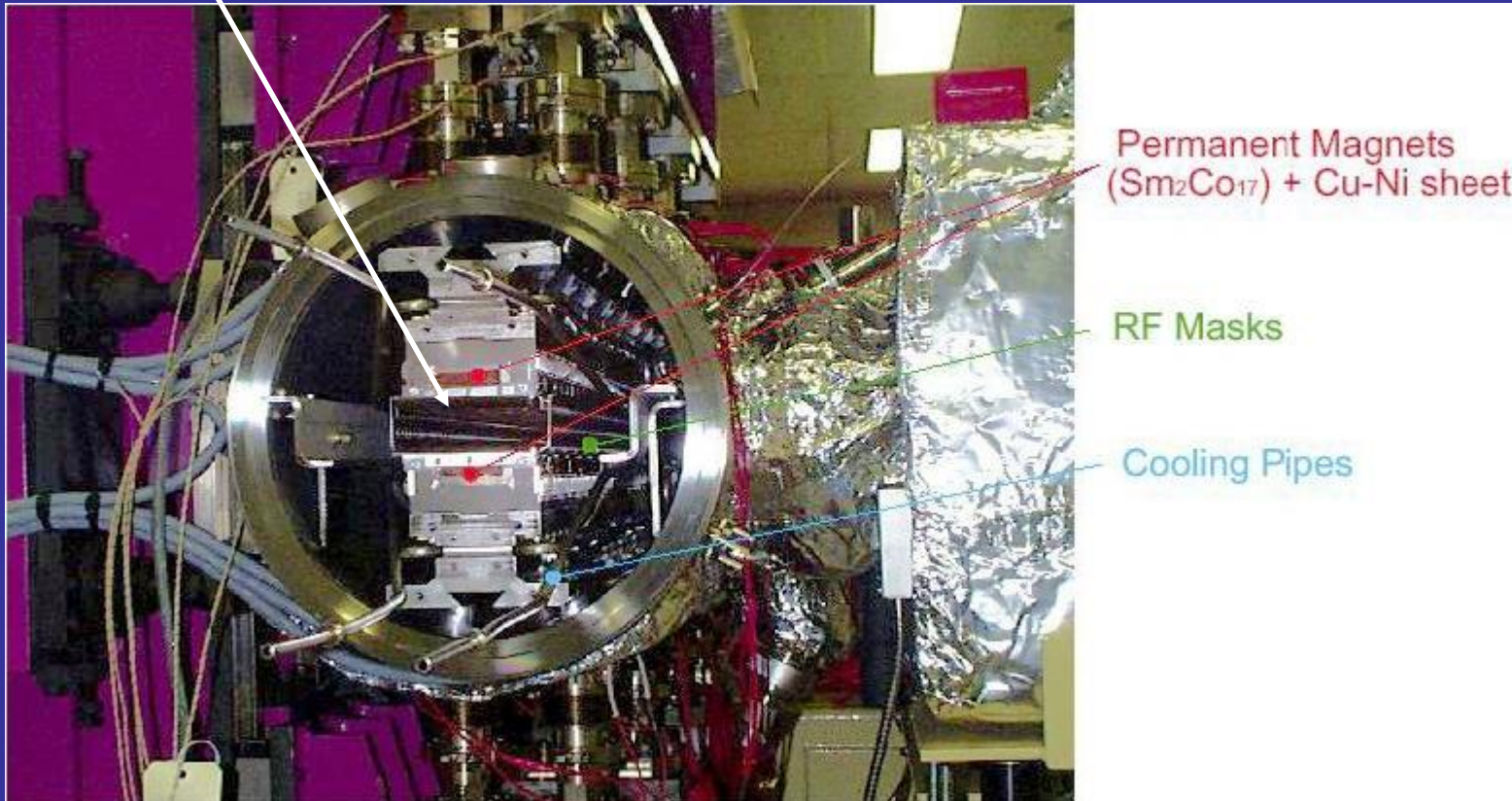
Efficiency: 2% !

*(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*

# Cryogenic Permanent Magnet Undulator

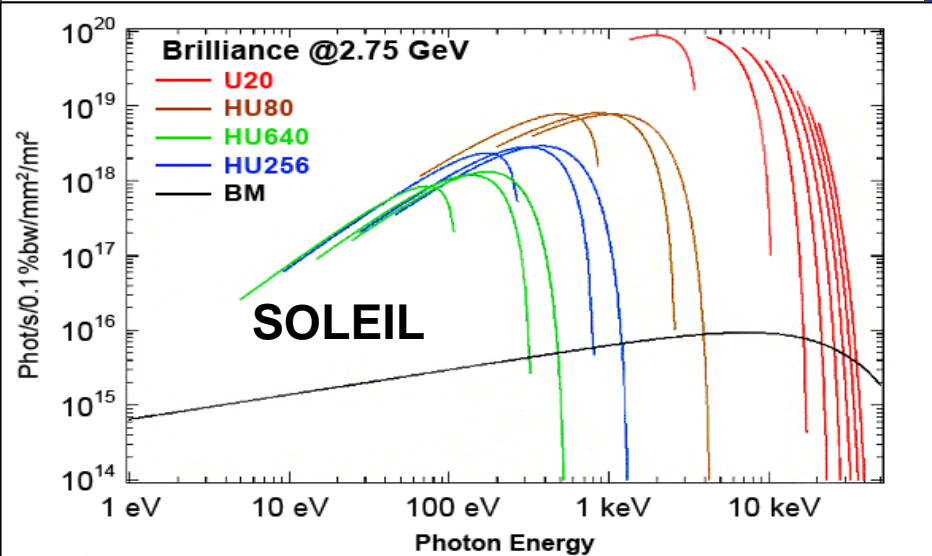
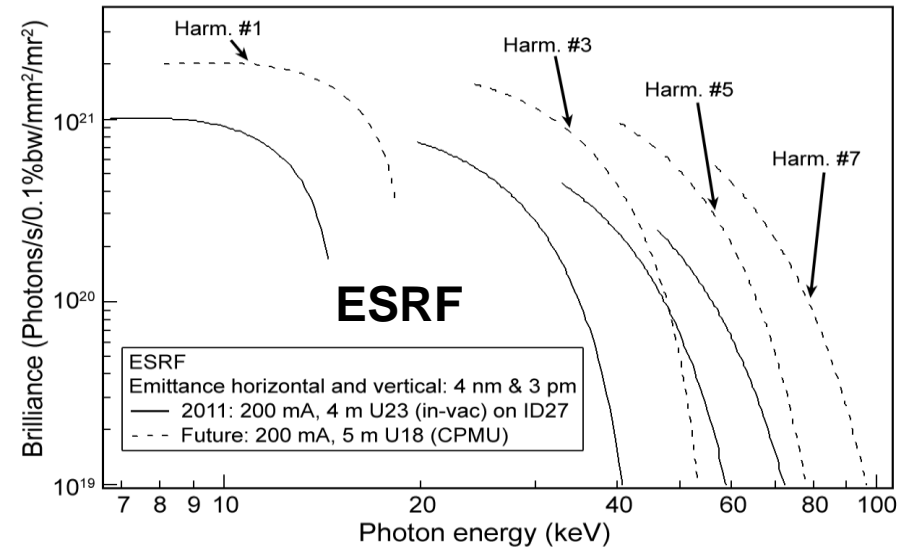
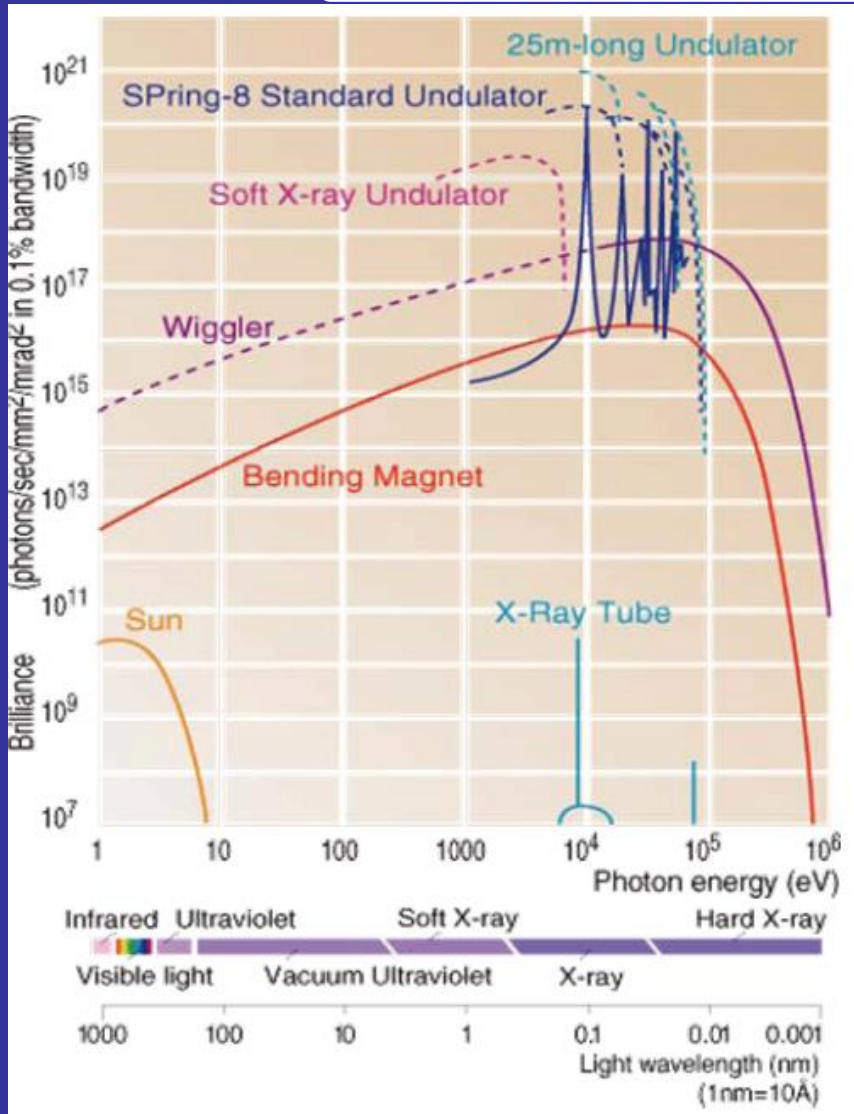
*C'est un undulateur Invac avec un refroidissement utilisant l'azote liquide plutôt que l'eau .*

- Les aimants sont plus résistant au radiation a basses température .
- Cette augmentation de résistance permet l'utilisation d'aimant plus fort champs (~25%) .
- Le champ des aimants augmente lorsque la température diminue (~8% entre ambient et 150 K ) .
- On peut avoir une source de photon X plus intense pour une même période .



# 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

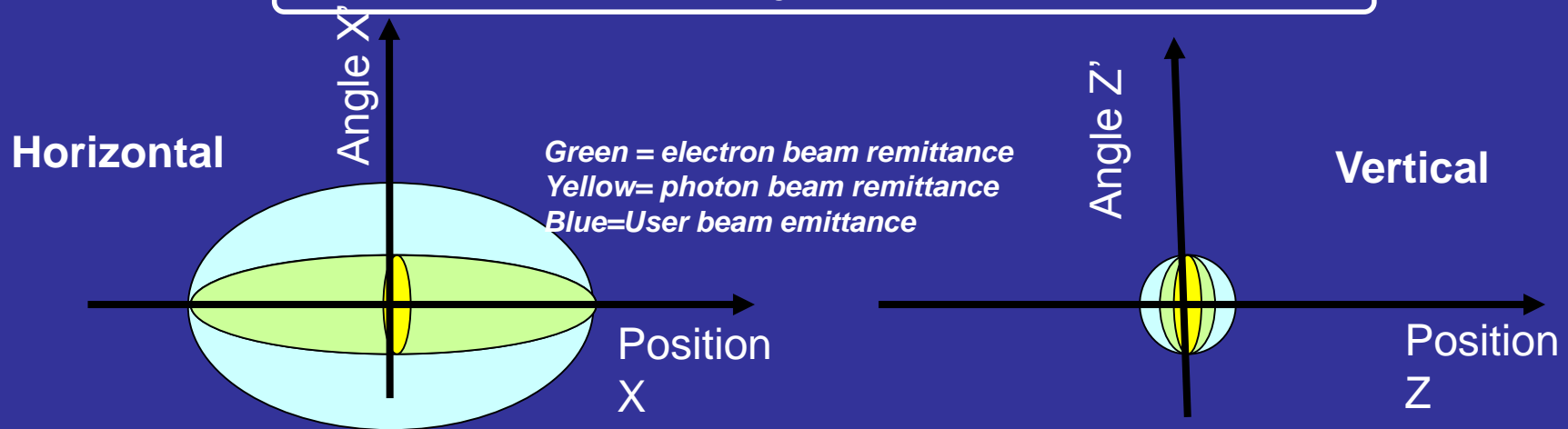
## L'anneau de stockage: Les éléments d'insertion





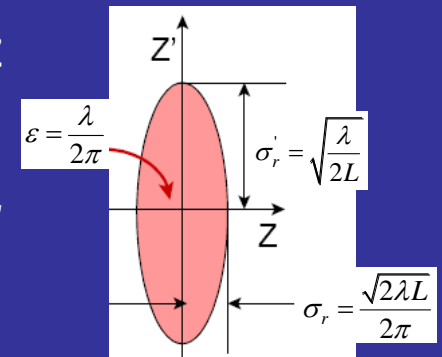
## 4. LES ACCELERATEURS DE L'ESRF

L'anneau de stockage: Les éléments d'insertion



- 1) *Les électrons sont dispersés en position et en angle (emittance) dans le plan horizontal (optique de la machine) et dans le plan vertical (couplage du aux imperfections).*
- 2) *Pour un seul électron, les photons émis par un onduleur sont eux même dispersés en position et en angle qui dépendent de la longueur d'onde et de la longueur de l'onduleur.*
- 3) *L'émission du faisceau X utilisateur est la convolution (contribution) des deux émissions.*

Undulator Photon beam emittance of one electron.



## 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( <math>\mu</math>m)</i>	<i>Divergence( <math>\mu</math>rad)</i>
			<b>0.016</b>	<b>6</b>	<b>3</b>

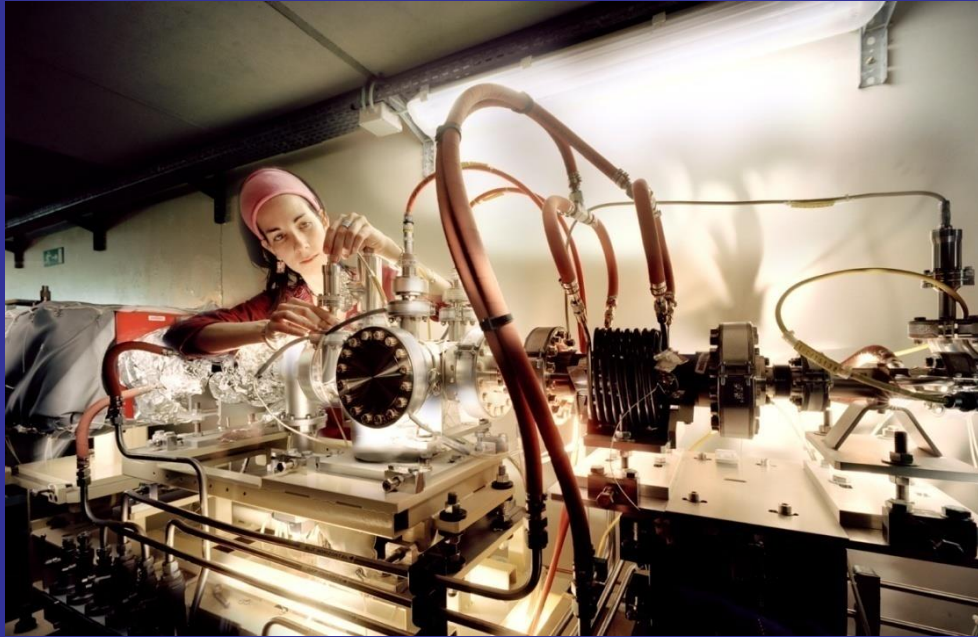
Electron energy	GeV	<b>6</b>	<i>Electron beam emittance</i>		
Coupling		0.2%			
		<i>Beta (m)</i>	<i>Emittance (nm)</i>	<i>Size( <math>\mu</math>m)</i>	<i>Divergence( <math>\mu</math>rad)</i>
"high beta section"	Horizontal	35.6	<b>4.0</b>	<b>377</b>	<b>11</b>
	Vertical	2.5	<b>0.006</b>	<b>4</b>	<b>2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

<i>User beam emittance</i>			<i>Emittance (nm)</i>	<i>Size( <math>\mu</math>m)</i>	<i>Divergence( <math>\mu</math>rad)</i>
	Horizontal		<b>4.1</b>	<b>377</b>	<b>11</b>
	Vertical		<b>0.023</b>	<b>7</b>	<b>3</b>

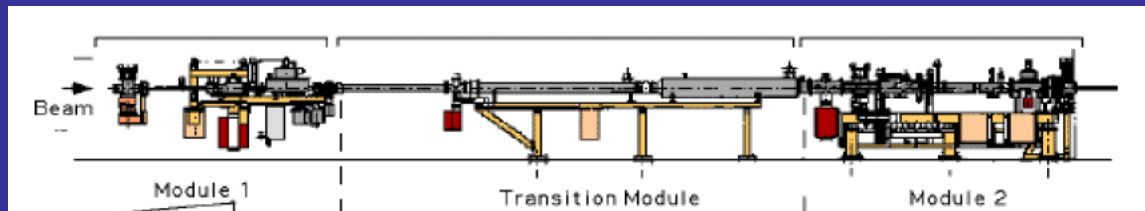
*Proche de la limite de diffraction (single électron photon beam emittance)  
dans le **plan vertical**.*

## 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

