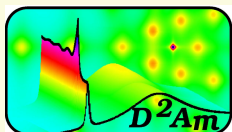


# Rayons X : détection et applications du synchrotron.

Conférence d'enseignement, EGIM 26 octobre 2005.

- Interaction Matière rayonnement 2
- Détection des rayons X 6
  - définitions 7
  - applications 11
- Synchrotron 21
  - la source 22
  - applications 25
- Conclusion 38



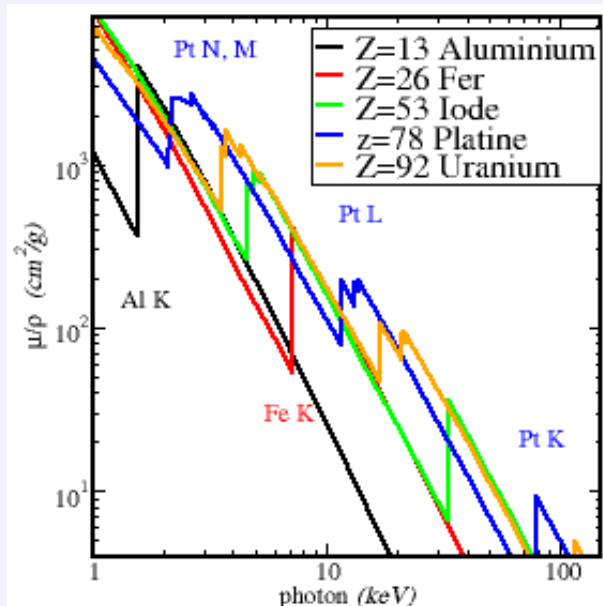
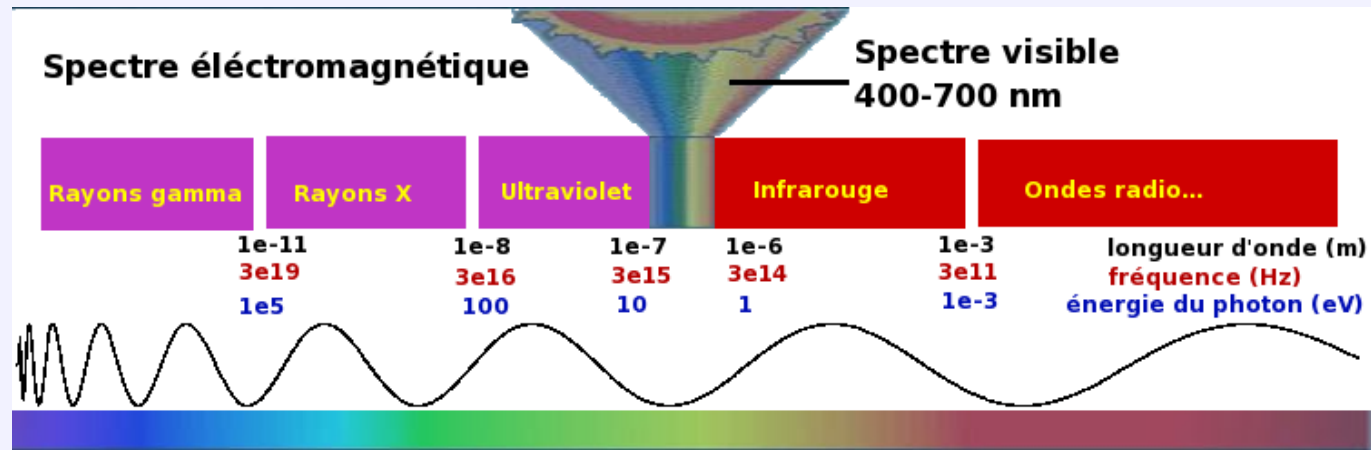
J.-F. Bézar

D2AM/CRG-ESRF

L. Cristallo, CNRS

Grenoble - France

# Onde électromagnétique ↔ Photon



## Rayons X

longueur d'onde (Å)  $\approx$  rayon atomique  
 énergie (keV) : couches profondes

## Absorption

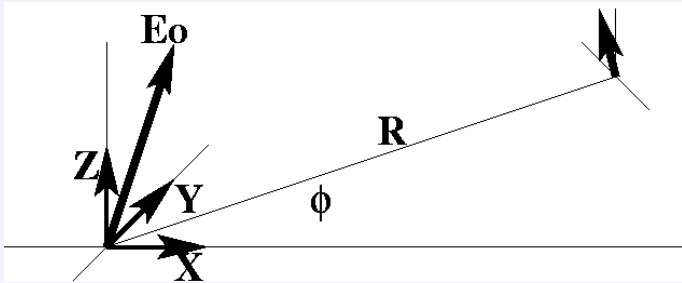
$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

$$\mu \propto 1/E^3$$

☞ Les photons transmis ne sont pas détectés !

# Diffusion du champ électrique.

Mécanisme général d'interaction, facile à visualiser dans le schéma de Warren.  
Le champ électrique associé à l'onde électromagnétique exerce une force  $\vec{F} = q\vec{E}_0 \cos(2\pi\nu t)$  sur les particules chargées.



➡ Accélération d'un électron libre :

$$\vec{\gamma} = e\vec{E}_0 \cos(2\pi\nu t) / m$$

➡ Emission d'un champ électromagnétique :

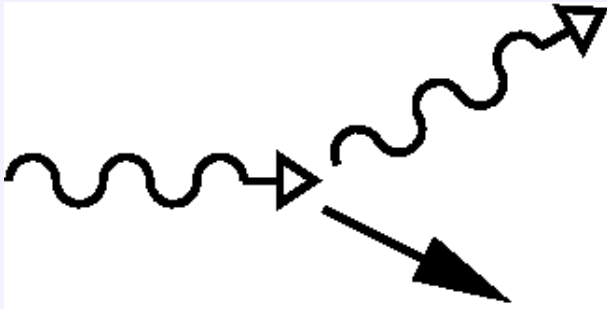
$$E = r_e / R (E_{0Y} \cos(\phi) + E_{0Z}) \cos(2\pi\nu t)$$

$$r_e = e^2 / mc^2 = 2.22 \cdot 10^{-15} \text{ m}$$

La base des expériences de diffraction, de diffusion  
mais pas/peu d'usage en détection.

# Diffusion Compton.

Le photon incident d'énergie  $h\nu$  cède élastiquement de l'énergie à l'électron diffuseur, un photon d'énergie  $h\nu'$  est diffusé.



- Conservation de l'énergie.
- Conservation de la quantité de mouvement.
- Le spectre dépend de l'angle
- $\Delta\lambda = h(1 - \cos\phi)/mc = 0.0243(1 - \cos\phi)$

Diffusion incohérente mesurée dans quelques expériences spécifiques sur les niveaux d'énergies.

Dépot d'une énergie  $h(\nu - \nu')$  dans la cible.

# Rayonnement ionisant

- Lorsque l'énergie des photons est supérieure à celle de la liaison des électrons avec l'atome, il y a ionisation et émission d'un électron dont l'énergie cinétique est :  $E_c = h\nu - E_{liaison}$ .
- Dans un approche "Warren", la force exercée par le champ est supérieure à celle de la liaison.
- Ce principe simple pour les gaz se transpose aux solides, l'électron est alors éjecté avec une certaine énergie dans la bande de conduction à partir d'une bande de valence.
- **Relaxation** : des processus multiples  
fluorescence X, électrons Auger, collisions inélastiques, freinage, chaleur....

# Détections des rayons X.

- ☞ Plusieurs événements / photon X (*visible, UV* ⇒ 1 événement / photon)
  - ☞ Un paquet de charges : durée d'existence limitée.
  - ☞ Chaleur + photons X, UV, visible.

## ☞ Les détecteurs : utilisation de ces effets.

- ☞ Chaleur : bolomètre, calibration de faisceaux blancs ...
- ☞ Fluorescence : Scintillateurs + Caméras, Intensificateurs ...
- ☞ Piégeage : Film  $Ag/Ag^+$ , "Image Plates"  $Eu$
- ☞ Collections de charge : détecteur à gaz, photodiodes, CCD en direct...

# Quelques définitions et conséquences.

☛ Peu de photons X (Poisson)  $\rightarrow (S/B)_{in}^2 = N^2/\sigma^2(N) = N$

☛ Absorption du capteur  $\rightarrow (S/B)_{out}^2 = \alpha^2 N^2 / (\alpha N + \sum b^2) \approx \alpha N$

Detection Quantum Efficiency	$DQE = (S/B)_{out}^2 / (S/B)_{in}^2$	$\leq \alpha$
Dynamique	$D = N(\text{saturation}) / B(\text{obscurité})$	$\propto N$
Gain	$G = S_{out} / S_{in}$	

Pour un système avec une cascade de processus de gain G ( $\sigma$  variance rel):

☛  $DQE = 1 / (1 + \sigma(G_1) + 1/G_1(\sigma(G_2) + 1/G_2(\sigma(G_3) + \dots)))$

☛ Maximiser G1 (G2) pour ne pas amplifier du bruit !

☛  $G \gg 1$  : processus Poissonien,  $G < 1$  : Binomial  $\sigma \propto \alpha / (1 - \alpha)$

☛ S/B limité par la statistique, autres bruits faibles (X = haute énergie)

# Résolutions

## ➡ Résolution temporelle, réponse impulsionnelle.

➡ Exponentielle (RC) ➡ reste 1% ( $5 \tau$ ),  $10^{-6}$  ( $14 \tau$ )

➡ Lorentzienne (niveaux profonds) ➡ histoire + trainages longs

## ➡ Résolution en énergie.

➡  $1h\nu$  X absorbé  $\Rightarrow \langle N \rangle$  ( $e^-$ , ions, ...)  $\rightarrow$  BRUITS  $\rightarrow$  DQE  $\blacktriangleright$

➡ N petit  $\rightarrow$  *Poisson*  $\rightarrow$  précision  $1/\sqrt{N}$   $\leftrightarrow$  facteur de FANO



# Modulation Transfert Function

➡ Résolution spatiale.

(ne concerne pas les détecteurs ponctuels)

➡ imagerie classique ➡ nb de photons minimum / détail @ bruit

$$\Rightarrow MTF(\nu = \text{ligne/mm}) = (Max - Min) / (Max + Min)$$

➡ astronomie, diffraction X ➡ tache/fond noir

➡ **Point Spread Function**

▲ FWHM → FW@0.01 → FW@0.0001

➤ résolution → capteur mince → absorption faible → DQE ➤

# Comptage/Intégration...

☞ Si idéal pas de différences.

- ☞ Comptage le bruit n'intervient pendant l'événement mais il reste des faux événements
  - ☞ Pertes de comptage (fréquence max supportée par la chaîne de mesure)
    - ↔ Saturation du tampon ( $3 \cdot 10^5 e^-$  p.e. CCD)
  - ☞ Intégration ➤ Conversion Analogique-Digitale : dynamique/calibres
    - ☞ Pour les phénomènes très rapides, l'intégration est privilégiée
      - Détecteur PIXEL (CHESS) : 8 condensateurs
- Eikenberry, J. Sync. Rad. 5, (1998) 252

# Détecteurs à gaz

L'absorption du photon X "dépose" un nombre  $N$  d'électrons "primaires"

$N = h\nu/W$  proportionnel à l'énergie du photon incident.

Création d'ions positifs et d'électrons dérivant en sens opposé

- ☞ chambre à ionisation : mesure du courant (  $nA, \mu A, \dots$  )
- ☞ détecteur à avalanche, Gain  $10^3, 10^4$  pulses  $\approx mV/\nu$
- ☞ possibilité de détecteur 0, 1 ou 2D
- ☞ utilisation de lignes à retard, de strips....
- ☞ peu de bruits mais saturations....
- ☞ progrès : séparation de l'espace de dérive et d'amplification
- ☞ fragile voire délicat à mettre en oeuvre : mélange de gaz...

J. Sync. Rad. 5, (1998) p256-262, p263-267

# Scintillateur + Photomultiplicateurs

L'absorption du photon X dans un cristal scintillateur ( NaI:TI ) permet d'obtenir de nombreux photons utilisables vers  $0.3 - 0.4\mu m$ . Ces photons sont alors captés par une photocathode qui émet des électrons amplifié dans un photomultiplicateur (Gain  $10^6$  ).

- ☞ constante de temps du scintillateur (230 ns NaI:TI, 25 ns YAP:Ce)
- ☞ gain depend de la haute tension, régime lineaire puis saturation...
- ☞ régime en courant : peu utilisé en détection des rayons X
- ☞ régime en impulsion : analyse en énergie ( 25 % )
- ☞ chaine d'analyse : mise en forme ( $0.1\mu s$ ), discrimination ...
- ☞ linéarité, double comptage...
- ☞ le bruit peut être très faible ( $0.05\nu/s$ )

# Semiconducteurs

Photon d'énergie  $E = h\nu$  absorbé  $\rightarrow$  N paires électrons trous créés  $N = E/W$ ,  
 $W$  énergie moyenne d'ionisation (indépendante de  $E$ ), différente de  $E_g$  (gap)

N est un petit nombre de particules, statistique de Poisson modifié (facteur de Fano) car les relaxations ne sont pas indépendantes  $\sigma(N) = \sqrt{F \cdot N}$

Détecteur	w (eV)	F	$E_g(300K)$	intrinsic $\rho\Omega/cm$
Si	3.62	0.12	1.115	2.3e5
Ge	2.96	0.12	0.665	47
HgI2	4.22	0.1	2.13	

- ☛ champ électrique pour séparer les porteurs de charge libres.
- ☛ jonction P-N pour éviter un fort courant d'obscurité, résistance parallèle de  $1M\Omega cm^2$  pour une tension appliquée nulle, courant d'obscurité  $\propto T^{3/2} e^{-E_G/kT}$

mode intégration  
photodiodes

mode impulsion  
spectromètres

impulsion amplifiée  
diodes à avalanches

# Photodiode en mode intégration.

applicable si  $\tau_{elect} \gg \tau_{mort}$

- ☛ **mode photovoltaïque** : diode non polarisée, les charges diffusent vers la jonction où elles sont séparées.
- ☛ **mode photoconducteur** : un champ sépare les charges dans tout le volume, plus rapide  $\approx 100 \text{ ns}$ , résistance parallèle monte à  $1 \text{ G}\Omega\text{cm}^2$
- ☛ typiquement montage optimisé gamme  $10 \text{ nA} \rightarrow 10^7 - 10^8 \nu/s$

	photovoltaïque	photoconducteur
$I_{obscurite}$	$5 \text{ pA/cm}^2$	$3 \text{ nA/cm}^2$
	lent : comptage long	adapté aux "forts" courants

stabilité thermique  $I_{obscurite}$  double en  $7 \text{ K}$  à l'ambient

10 keV : utilisable de  $10^3 - 10^{12} \nu/s$ , recommandé  $> 10^6 \nu/s$

# Photodiode en mode impulsion.

**Spectromètre** : applicable si  $\tau_{elect} \ll \tau_{mort}$

- ➡ taux de comptage modéré : reset de l'ampli
  - ➡ Si(Li) (130 K)  $\rightarrow \Delta E = 135 eV$  (FWHM), Mn( $K_{alpha} \approx 5.9 keV$ ), HgI<sub>2</sub> 250eV mais ambient
  - ➡ Ge donne une meilleure résolution (W plus faible, N plus grand) mais 100K pour réduire le courant d'obscurité
  - ➡ Résolution  $\Delta E^2 = \Delta E_{intrinsic}^2 + \Delta E_{elect}^2$ , augmente le temps de comptage 20 $\mu s$  typ,  $2 \cdot 10^4 \nu/s$  (Mais structure temporelle du faisceau)
  - ➡ pic d'échappement : fluorescence du détecteur
- Avec refroidissement Peltier : 250 eV (5 mm<sup>2</sup>) ... 900 eV (25 mm<sup>2</sup>) ...  $\rightarrow$  controle

# Diode à avalanche

Une diode suivie d'un compteur proportionnel monolytique, plusieurs régions :  
détection, avalanche (fortement polarisée 1000 V), collection

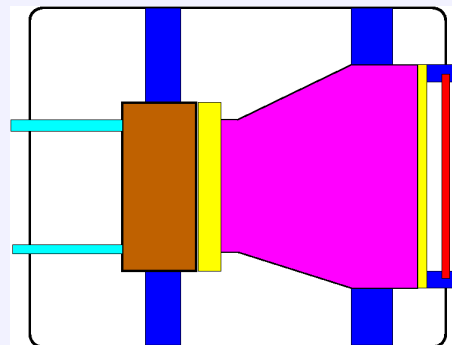
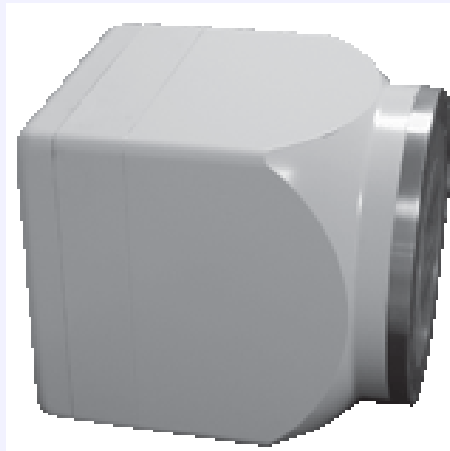
- ☛ temps de montée rapide 0.2-1.5 ns
- ☛ résolution en énergie 640 eV (Fe55) ( $20 \text{ mm}^2$  APD)
- ☛ problème d'absorption
- ☛ en compteur, on doit atteindre les  $10^8 \nu/s$
- ☛ coût de fonctionnement lié aux risques de claquages

Application : synchrotron



# CCDs/Pixel pour rayons X

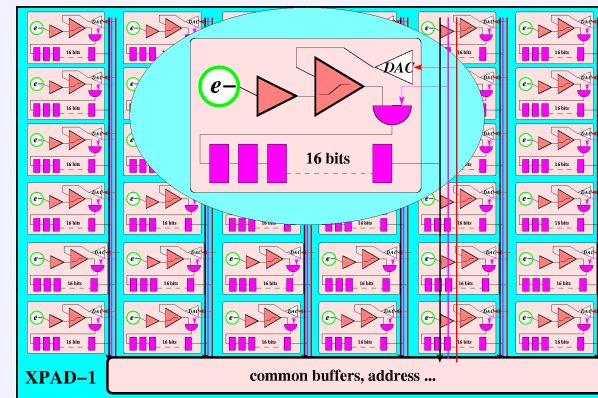
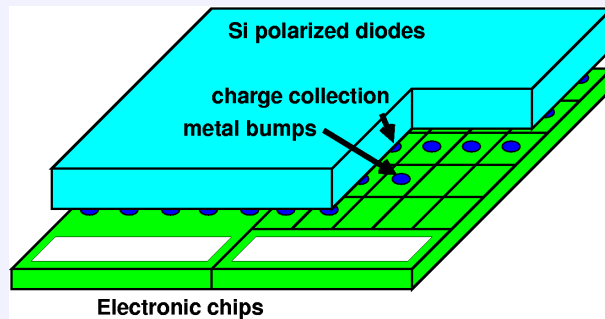
Capteur, pixel X	CCD direct silicium	CCD fluo écran fluo	Pixel silicium
Pixel X	$20\mu m$	$50\mu m$	$150\mu m$
Matrice	$1000 \times 1000$	$4000 \times 4000$	$1000 \times 1000$
couplage		optique (+intens)	électrique
$1\nu$ @ $10keV$	$3000e^-$	$1 - 5e^-$	$3000e^-$
saturation	$10^2\nu$	$10^5\nu$	
Res. energie	10%		10%
Lecture	90% temps mort	1s	0.001s
Flux Max	$10^4\nu/s/capteur$		$10^6\nu/s/pixel$
Obturbateur	X	X/optique	intégré
Dynamique		14-16b	
Sensibilité	$0.001\nu/s/pixel$	$0.5\nu/s/pixel$	$0.01\nu/s/pixel$
Etat	CCD spéciaux	courant	prototype



# caméra CCD pour rayons X

- écran fluorescent, efficace entre 6-20 keV : conversion en optique visible
- dispositif optique : fibre pour réduire la dimension des pixels
- capteur CCD typiquement de 1152 x 1248 refroidi par Peltier
- convertisseur 16 bits (430kHz) ou 14 bits (1 MHz)
- refroidisseur stabilisé pour le Peltier
- PC acquisition, 2Mo /images
- correction du courant d'obscurité
- correction du champ plat
- 1 e<sup>-</sup> / photon détecté

# Détecteur à pixels hybrides

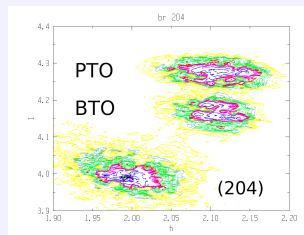
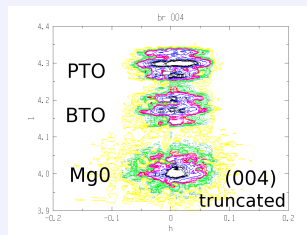


ASIC adaptable au problème : l'avenir

XPAD1 : Boudet *et al.*, NIM A510 (2003) 41-44,

Berar *et al.*, J. Appl. Cryst. 35 (2002) 471-476

27 (17 PbTiO<sub>3</sub>, 17 BaTiO<sub>3</sub>) superlattice / MgO :



Reciprocal maps are recorded scanning the XPAD detector and rebuilt from the collected reciprocal slices. Compared to standard data collection the time can be reduced by 100.

# CMOS Pixel pour rayons X

Pixel CMOS ↔ pixels monolithiques mélangeant capteur et mesure.

- ☛ une électronique réduite à minima :  $\approx 10$  transistors / pixel
- ☛ pixels petits  $25\mu m$  : le champ est celui de l'implant
- ☛ surface morte non négligeable
- ☛ lecture externe et goulot d'étranglement

## Silicium amorphe, Selenium amorphe

- ☛ très grande dimension  $\approx 20cm$
- ☛ scintillateur nécessaire (Si), souvent épitaxié
- ☛ lecture externe et goulot d'étranglement

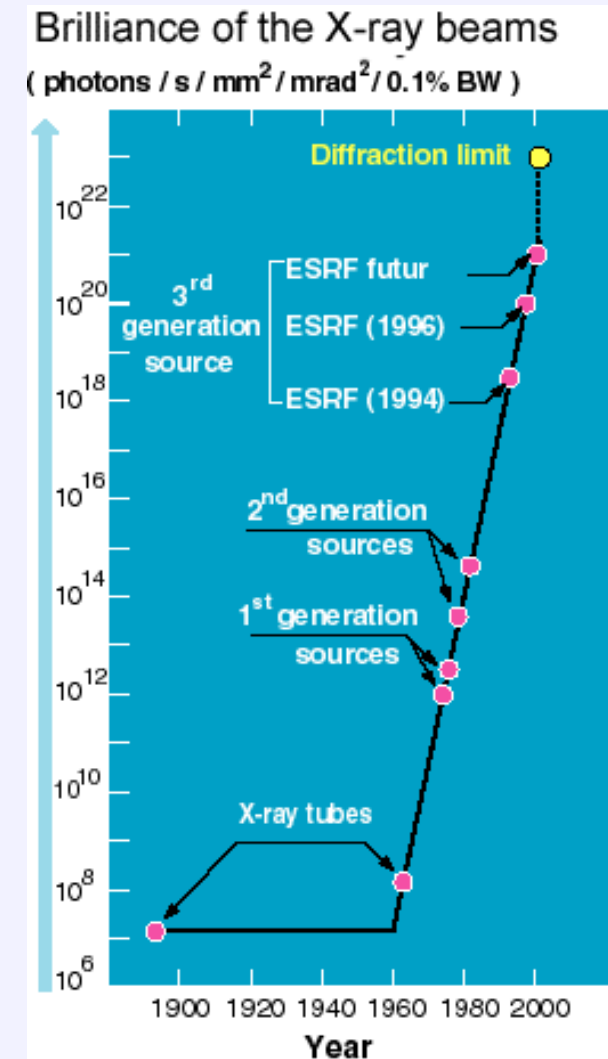
➤ TRIXEL, BIOSPACE ... radiologie

# Le synchrotron

## Une source de rayon X.

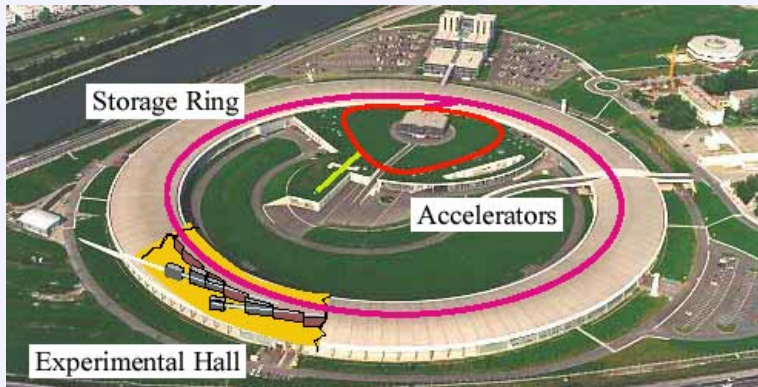
Pour un physicien, la principale caractéristique d'une source est sa brillance. Néanmoins quelques applications, plus sensibles au flux, relèvent de sources plus classiques.

- ➔ ESRF (6GeV)
- ➔ SOLEIL (2.7GeV)
- ➔ APS (US), PF (Japon)
- ➔ Anka, Diamond, SLS, ...
- ➔ Brookhaven, Darisbury, Desy, ...



<http://www.esrf.fr>, <http://www.synchrotron-soleil.fr>

# L'ESRF - la machine en 2000.



**Accélérateur linéaire 200 MeV.**

**Booster Synchrotron, 300 m :** amène les paquets d'électrons à 6 GeV.

**Storage Ring, 844 m :**

200 mA, durée de vie  $\approx 50$  h.

6 accelerating cavities at 352 Mhz

2x32 bending magnet

**particule ultra relativiste**

$$\gamma = E/mc^2 \approx 12000$$

Puissance rayonnée par particule / tour

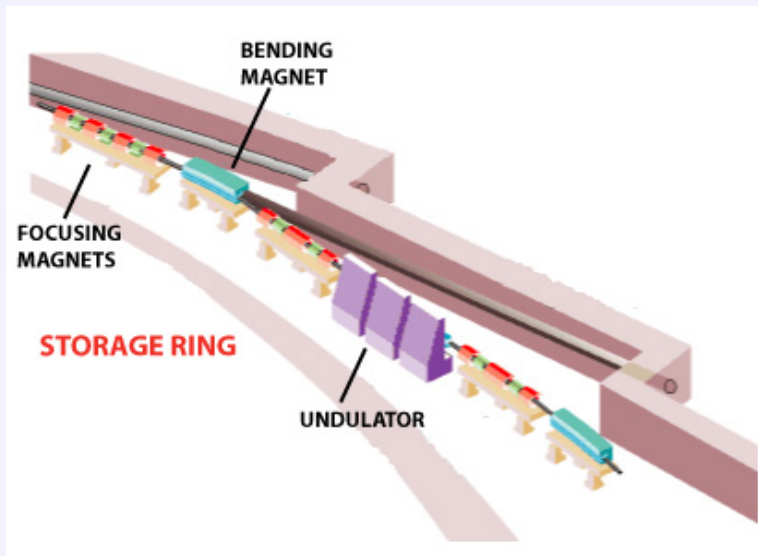
$$P = 4/3\pi e^2 \gamma^4 / \rho$$

Puissance stockée [MW]

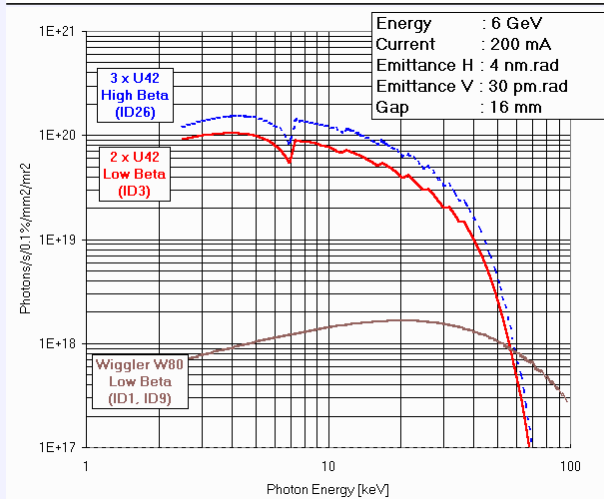
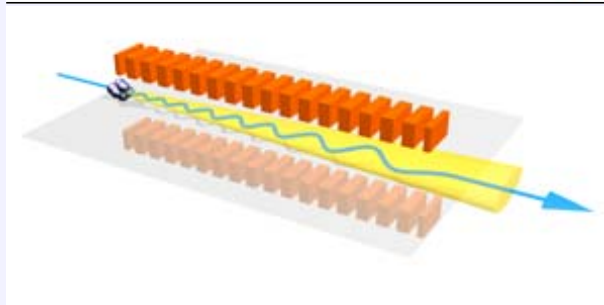
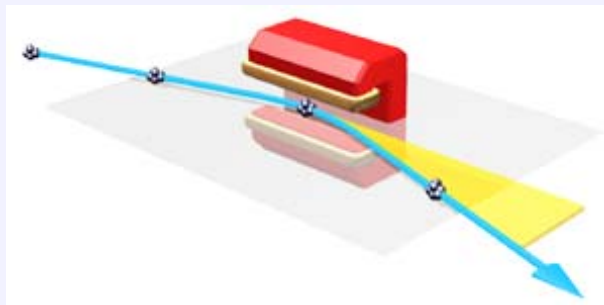
$$P_f = 1000EI \text{ [GeV, A]}$$

Puissance rayonnée [MW]

$$P_r = 1.266E^2 B^2 IL \text{ [GeV, T, A, m]}$$



# Source calculable.



L'angle d'émission  $1/\gamma = 80\mu rad$   $\gamma \gg 1$

**Aimants de courbure** : sources primaires

$r = 20m$   $B = 8T$   $I = 200A$

Source  $0.1 * 0.3 mm^2$   $0.1 * 1.0 mrad^2$

Spectre continu  $5 - 25 keV$   $2.5 - 0.5 \text{ \AA}$

Flux  $10^{12} \nu/s$  avec  $\delta E/E = 10^{-4}$

Energie médiane  $E_c = 0.665 BE^2$

**Eléments d'insertion** : sources optimisées

$K = \alpha\gamma$   $\alpha$  déviation

$K \gg 1$  wiggler  $2N$   $K < 1$  onduleur  $N^2$

**Onduleur** :  $10^{19} \nu/s/mm^2/mrad^2/0.1\%bw$

Source  $0.1 * 0.1 mm^2$   $0.1 * 1.0 mrad^2$

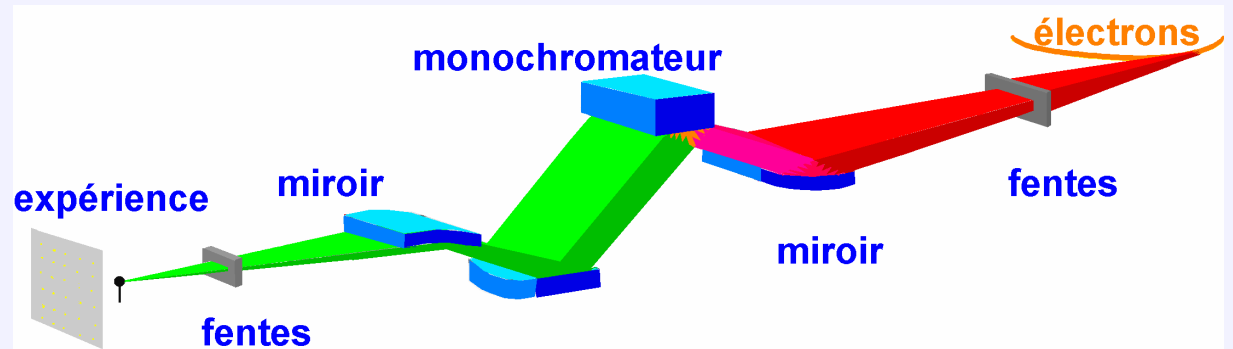
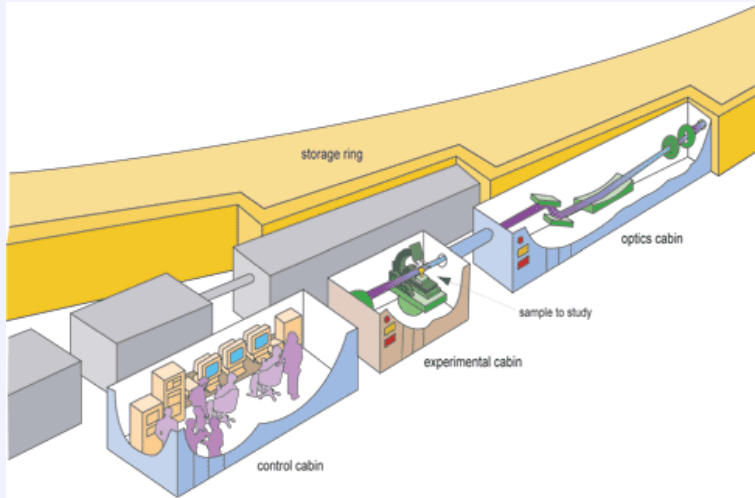
Flux  $10^{15} \nu/s$  avec  $\delta E/E = 10^{-4}$

Raies accordables :  $2 - 50 keV$   $8 - 0.2 \text{ \AA}$



# De la source à l'expérience.

distance source-expérience  
30 – 100 *m*



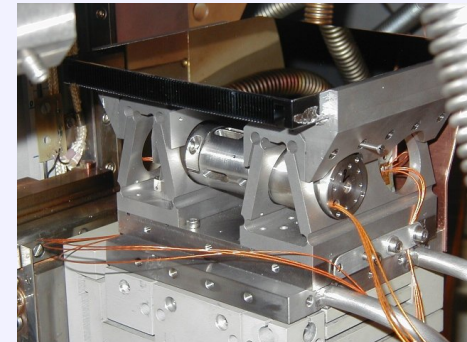
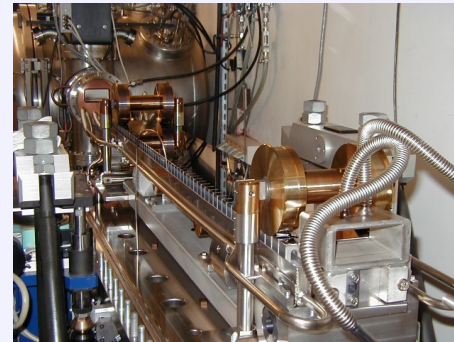
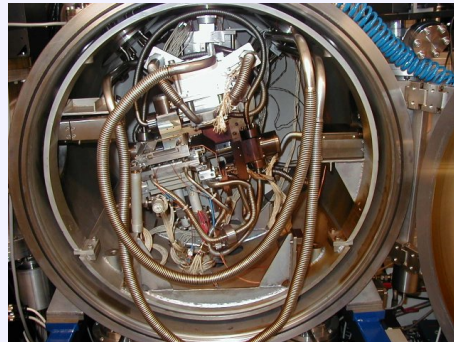
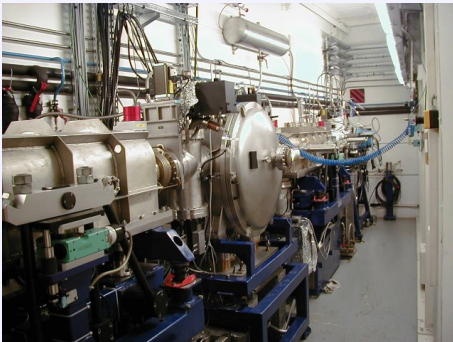
monochromatisation  $\implies E/E \ 10^{-4}$

miroir : focalisation + harmoniques

au point focal  $0.05 \times 0.1 \text{ mm}^2$

fentes (diffusion)

obturbateurs (sécurité),...





# Les nouvelles expériences

Dues à la qualité de la source (brillance).

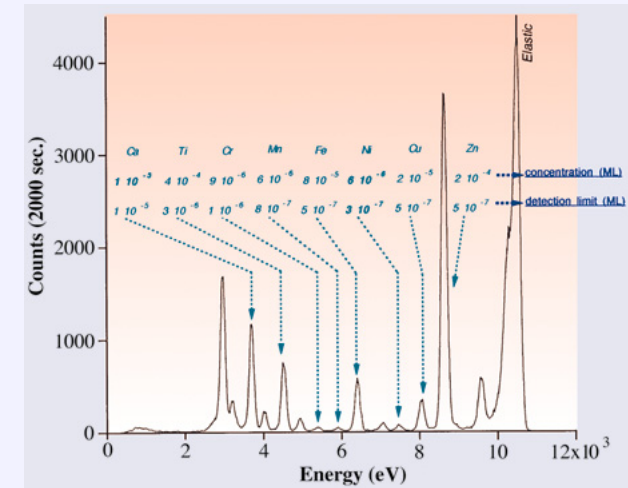
- ☞ Radiographie avec possibilité d'utiliser le contraste de phase
- ☞ Scanner : 3D + résolution  $\ll 50\mu m$
- ☞ Microscopie X, vide non nécessaire : objet vivant ?
- ☞ Faisceau cohérent : très haute résolution.
- ☞ Micrographie : microactuateurs, micromoteurs, ...
- ☞ Structures d'intêtet biologique, ...

# Fluorescence X

Un élément excité par absorption d'un photon X émet un rayonnement de fluorescence dont l'énergie est plus faible.

Traces d'impuretés sur un wafer de Si. On peut noter le pic élastique et le Compton due à la matrice Si.

ESRF Highlights 1996/1997 beamline.



Les technologies 0.18 *micron* d'intégration des CI suppose une meilleure détection des contaminants, le seuil de  $10^{10} \text{at./cm}^2$  (équivalent à  $10^{-5}$  monocouches) n'est plus adapté. Il était obtenu par des mesures de laboratoire. Ce projet permettait d'obtenir pour Ni un seuil de détection de  $2 \times 10^8 \text{at./cm}^2$  soit compte tenu d'une profondeur de pénétration de  $30 \text{Å}$  la réponse d'environ  $10^5$  atomes repartis dans le substrat.

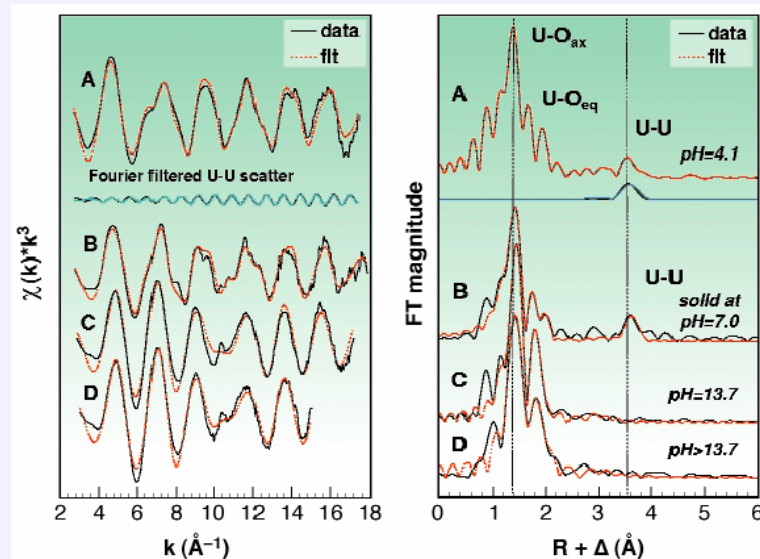
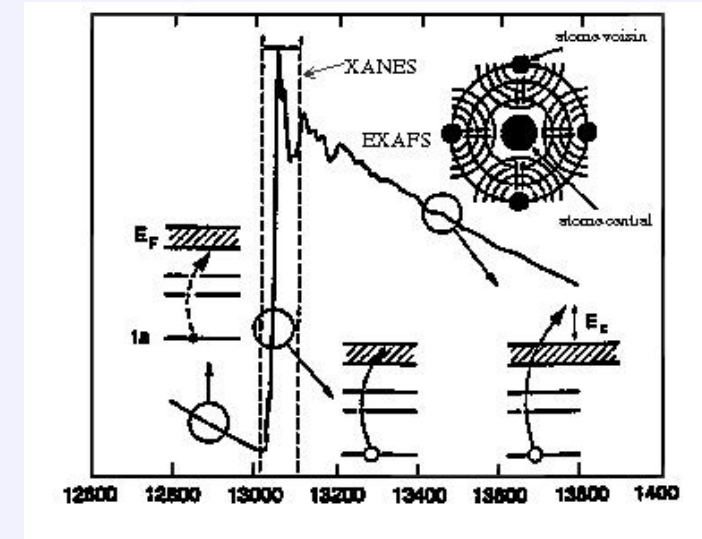
# Spectroscopies X

## XANES :

X-ray Absorption Near Edge Spectroscopy  
état chimique : valence et symétrie du site

## EXAFS :

Extended X-ray Absorption Fine Spectroscopy  
connaissance de la distribution autour d'un atome  
sensibilité quelques ppm : environnement



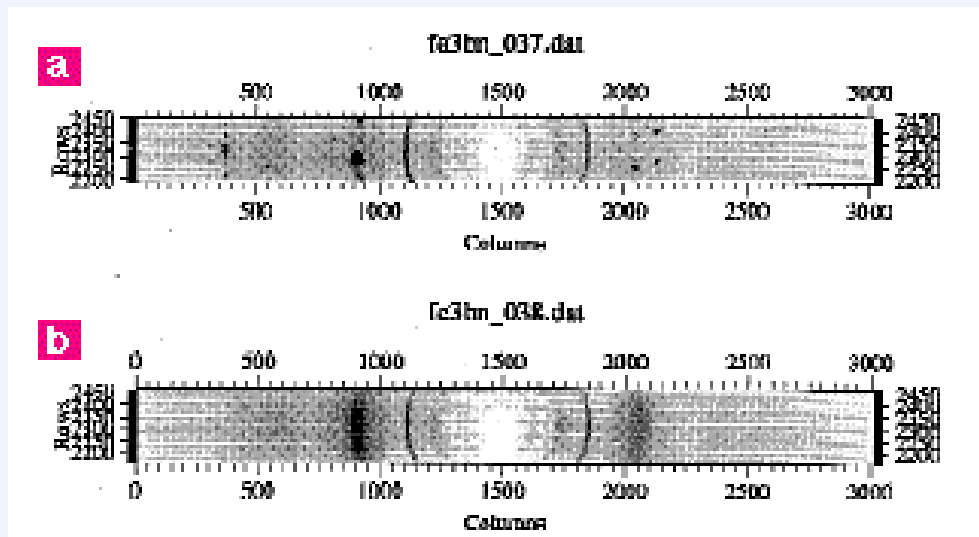
Sonde les états vides proche du niveau de Fermi en fonction de la probabilité de transition  $E - E_o \equiv E_f \rightarrow kR = 1$

Expérience et dépouillement qualitatif assez rapide  
Calcul complexe pour rendre compte finement de la mesure.

L'onde associée à l'électron éjecté est diffusée par les nuages électroniques des atomes voisins interférences ( oscillations de Kronig ou Exafs  $kR \gg 1$  ) : environnement local de l'atome absorbeur

# Diffraction à haute pression.

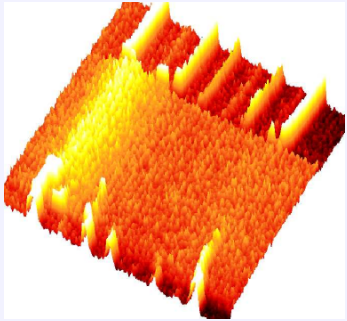
Les très haute pression ne peuvent se réaliser que sur de petits volumes. Typiquement on utilise des enclumes diamants pour accéder à ces états qui possèdent des intérêts pour la physique des milieux denses et aussi pour comprendre l'intérieur des planètes...



Fe 2Gpa,  
solide 1500°C ou liquide 1800°C  
ESRF Highlights 97-98  
D Hausermann, ID30  $\approx 80keV$

Images obtained just before and just after melting are shown. This technique gives the melting curve of iron with a high precision, and the integration of the diffraction images gives the radial distribution function from the first and second diffraction rings. Remaining spots are associated with the cell.

# Diffraction à haute température.



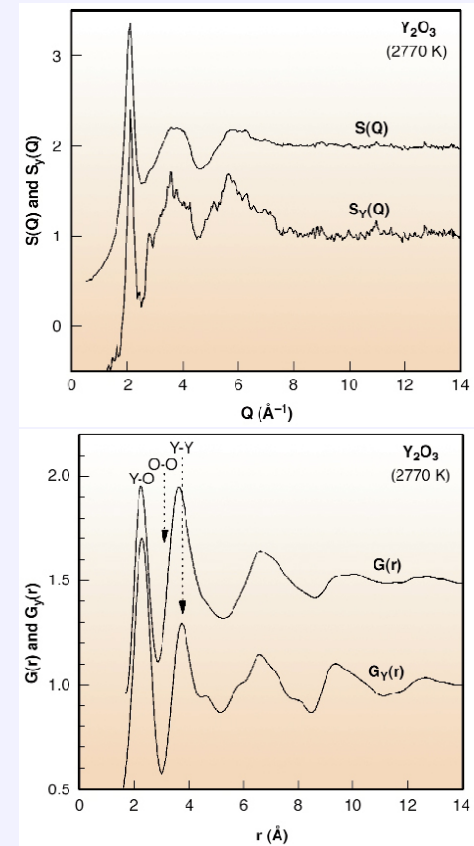
La diffusion permet de remonter aux distribution de paires dans tous les composés avec plus de précision que l'EXAFS au prix d'expériences plus longues.

AXS experiments performed on levitated liquid yttrium oxide ( $Y_2O_3$ ) at 2770 K. The measurements were carried out at two energies below and above the yttrium K absorption edge at the BM02 beamline. The principle of the method is to subtract the two measured intensities to extract the yttrium structure factor  $S_Y(Q)$ , containing information on the local environment of yttrium atoms.

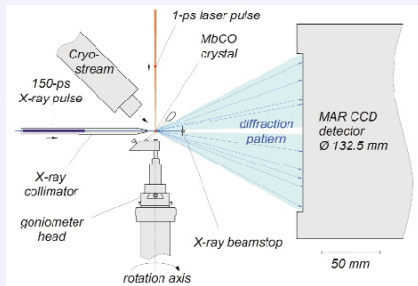
Hennet *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. B, (2003).

*Fig. 1: Average structure factor  $S(Q)$  measured at 16.75 keV and yttrium structure factor  $S_Y(Q)$  for liquid  $Y_2O_3$  at 2770 K.*

*Fig. 2: Average pair correlation function  $G(r)$  obtained at 16.75 keV and yttrium pair correlation function  $G_Y(r)$  for liquid  $Y_2O_3$  at 2770K.*



# Diffraction résolue en temps.



## Picosecond Crystallography: Myoglobin in Action

Proteins perform their life-giving function dynamically while interacting with other molecules. On the time-resolved beamline ID09B, the first ever movie of a protein executing its function with sub-nanosecond time resolution was produced.

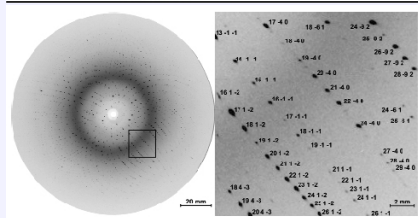


Fig. 1: Experimental setup used to acquire picosecond time-resolved X-ray diffraction data. The crystal is photolysed by a laser pulse and then probed by a time delayed X-ray pulse ( $\approx 100ps$ ).

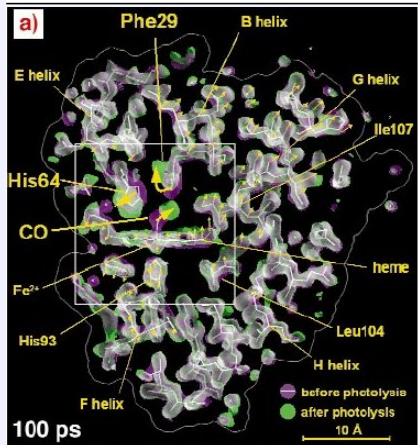


Fig. 2: One of 155 time-resolved Laue diffraction images recorded from a single crystal. This exposure represents the diffracted intensity from 32 X-ray pulses with the laser-to-X-ray delay set to 100 ps, accumulated over 10 seconds.

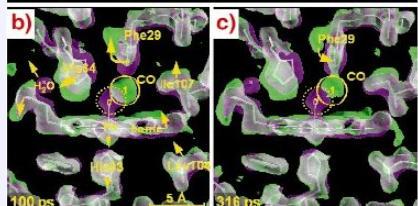
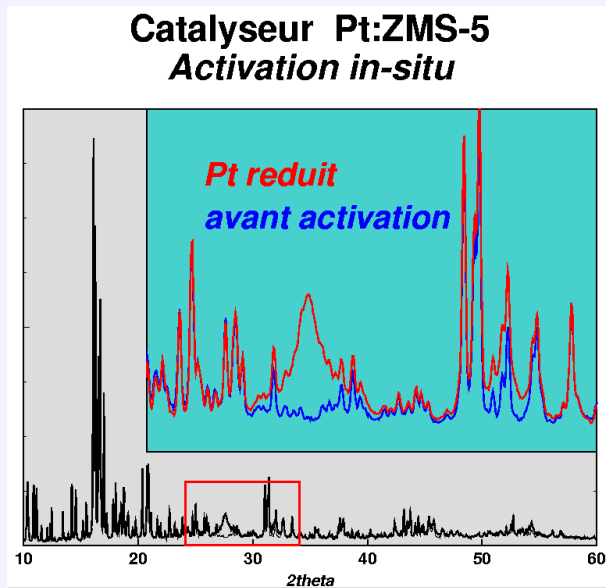


Fig. 3: 1.8 Å resolution electron density maps determined at from Laue diffraction data. The CO does not immediately escape into the surrounding water from this site, but is still found inside the protein after three microseconds as it migrates through an interconnected web of hydrophobic cavities and seeks an escape channel.

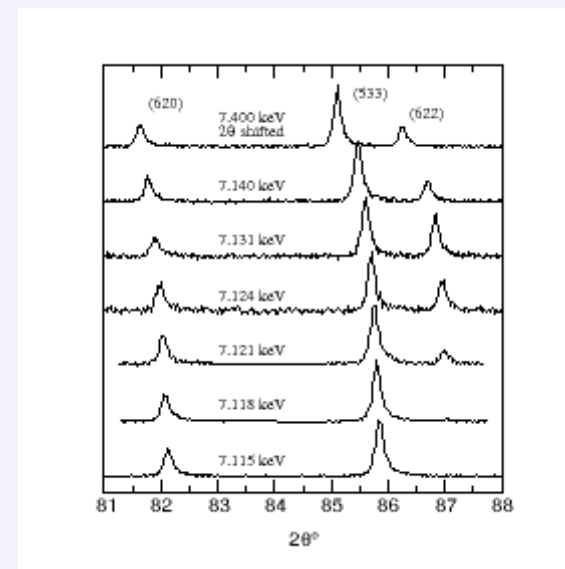
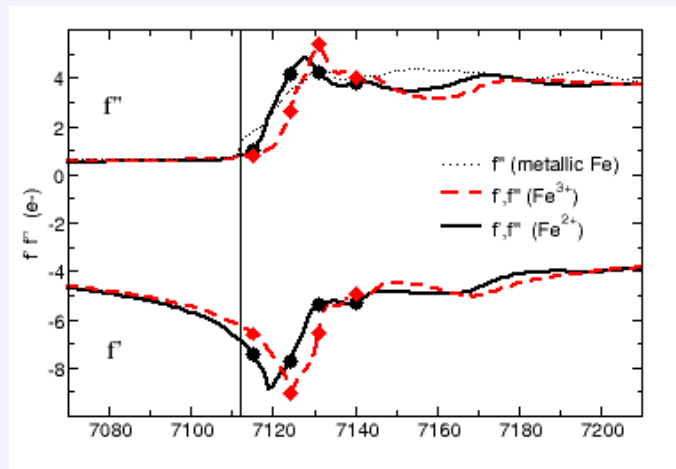
F. Schotte *et al.*, Science,(2003). ESRF Highlight, (2003).



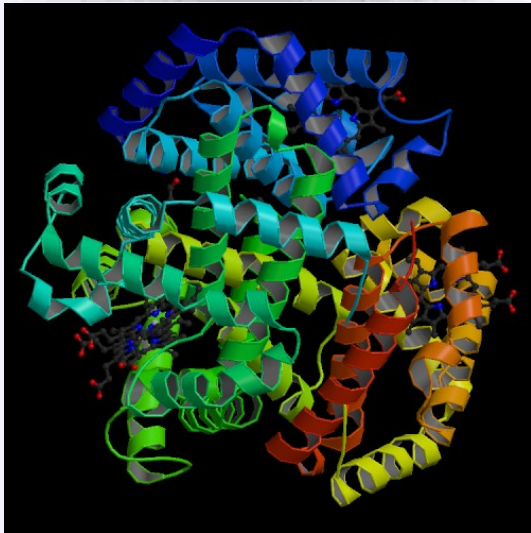
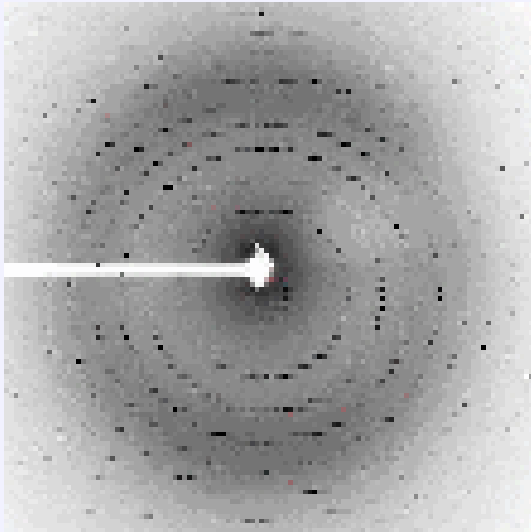
# Diffraction anomale



Lors de la résonance d'absorption d'un atome, les termes  $f'$  et  $f''$  du facteur de diffusion ne sont plus négligeable, ils varient fortement sur quelques eV. La différence entre deux diagrammes voisins est alors caractéristique de la phase contenant l'élément.



# Cristallographie des protéines



La résolution structurale de protéine, virus . . . est un des secteur les plus demandeur de faisceau synchrotron : il n'y a pas d'équivalent au laboratoire.

Crystal Structure Of The Cathodic Hemoglobin Isolated From The Antarctic Fish *Trematomus Newnesi*

Exp. Method: X-ray Diffraction

Classification: Oxygen Storage/Transport

Deposition Date: 13-Jul-2005 Release Date: 02-Aug-2005

Resolution [Å]: 1.80 R-Value: 0.186

Space Group: P 1 Unit Cell: [Å]: a 58.10 b 60.80 c 61.23

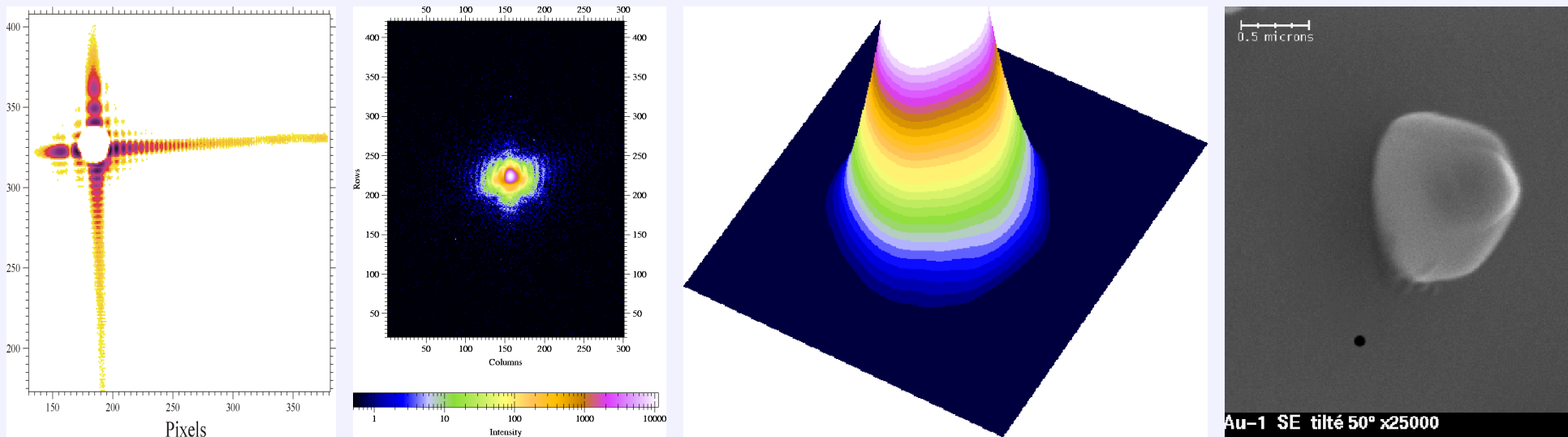
angles [°]:  $\alpha$  80.73  $\beta$  81.36  $\gamma$  62.01

Atoms: 5045



# Coherence

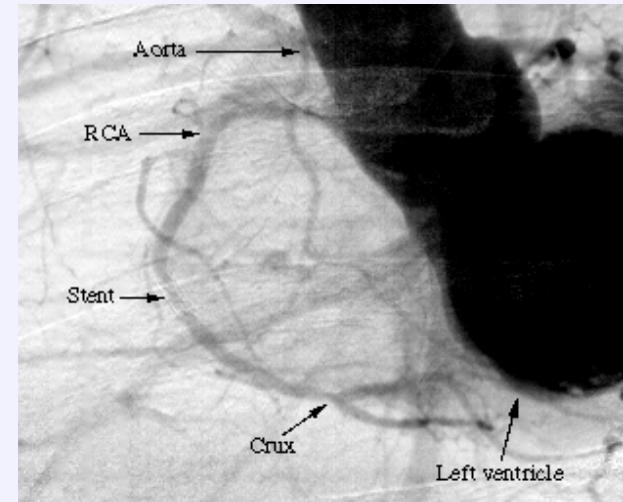
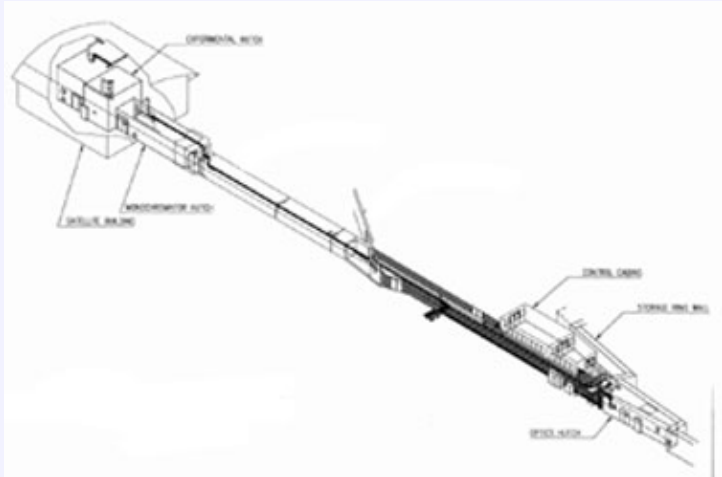
Il est possible d'extraire la partie cohérente du faisceau et donc de réaliser les mêmes expériences qu'avec un laser : diffraction de fentes, diffraction d'un objet, figure de forme, reconstitution espace direct



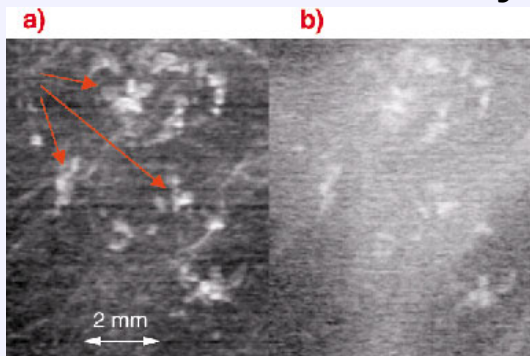
Diffraction cohérente d'une particule d'or et reconstruction de l'épaisseur selon la direction de diffraction.

De nombreux travaux visent à reconstruire les objets depuis les images ayant perdu l'information sur la phase. Miao *et al.*, Phys. Rev. Lett.,(2005).

# Medical beamline



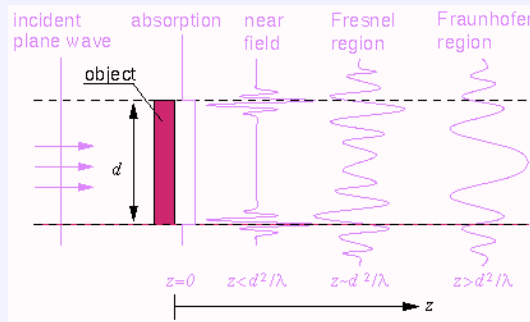
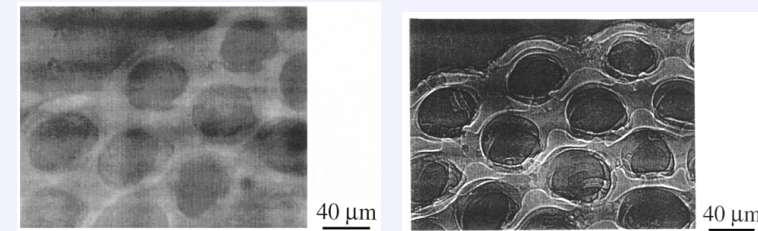
Intravenous synchrotron angiogram of the first patient at the ESRF taken in a left anterior oblique (LAO) projection and conventional selective coronary angiography of the same patient, performed the same day at the cardiological unit of the hospital after arterial catheterization.



Diffraction Enhanced Image planar projection of a ductal carcinoma with malignant microcalcifications (indicated by arrows); b) conventional radiograph of the sample imaged with the same detector and dose at 33 keV.

# Imagerie

In radiography with partially coherent X rays as they are available at the ESRF, both phase and absorption effects play an important role in the formation of a transmission image.



Contact : The intensity distribution is a pure absorption image.  
 Near field : Contrast is given by changes in the refractive index.  
 Fresnel region : Image loses more resemblance with the object.  
 Fraunhofer region : The image intensity is the Fourier transform of the object transmission function.

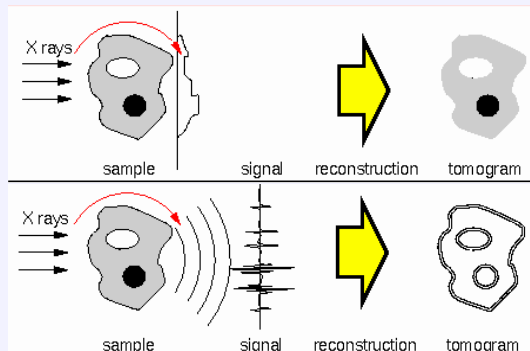
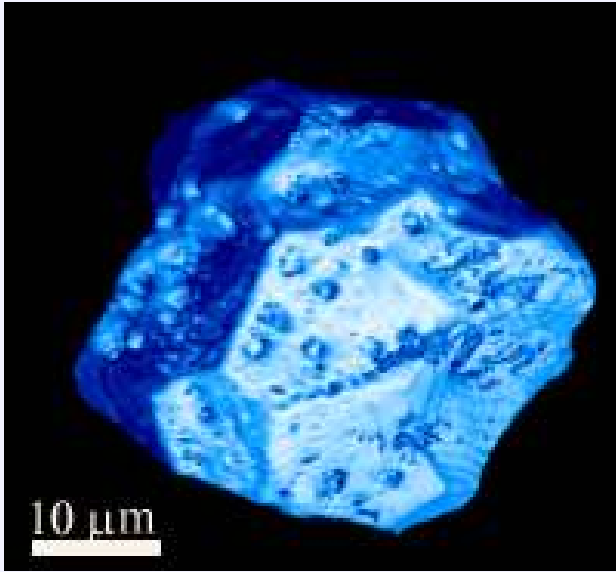


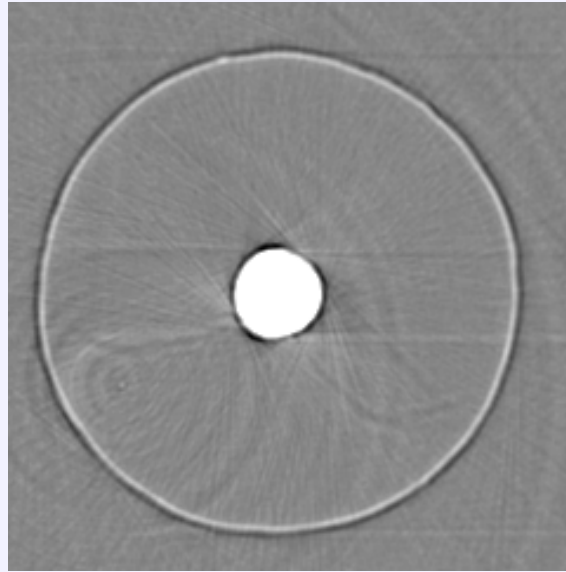
Figure 2: In absorption-contrast tomography, the tomographic reconstruction yields the averaged attenuation coefficient for every voxel in the sample.

Figure 3: Near-field coherent imaging gives phase contrast in regions of a highly-localized change in the refractive index of the sample.

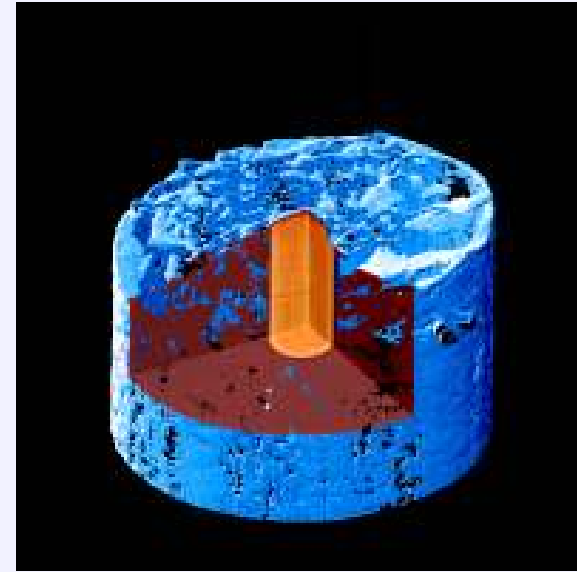
# Microscopie-Tomographie



particule  $UO_2$



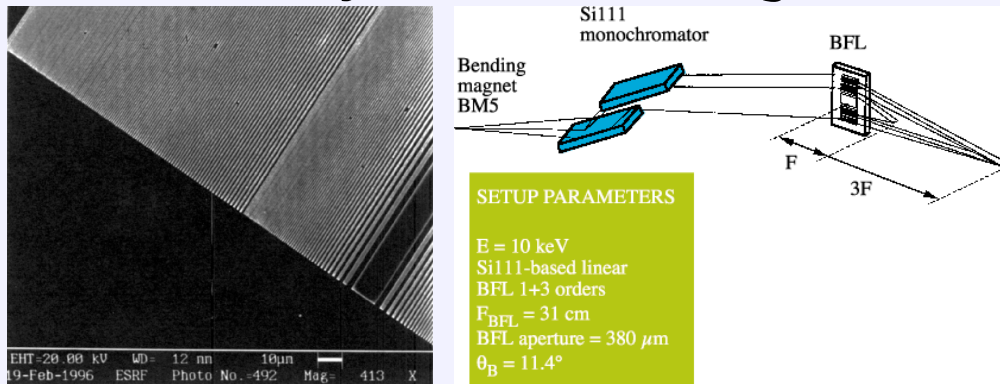
fibre de bore



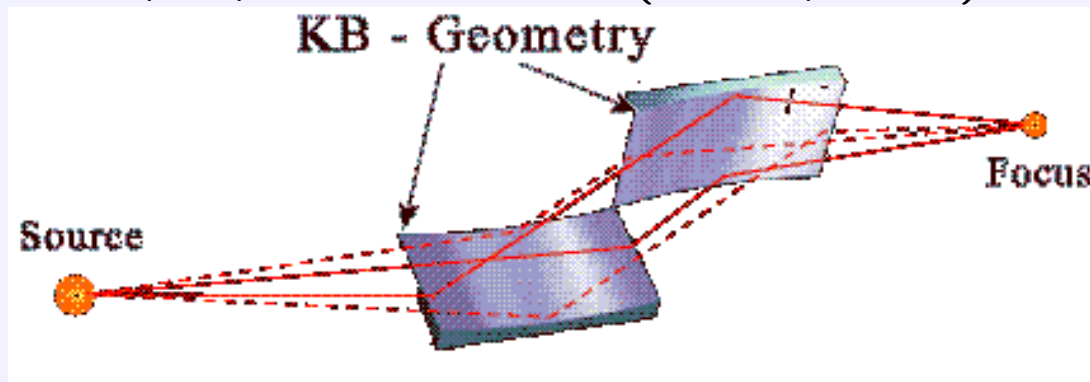
ID22 is a multitechnique hard x-ray microprobe focused on x-ray fluorescence, absorption and diffraction on the micrometer scale. The beamline is located at a high-beta section of the storage ring, and combines a two-undulators source with an achromatic focusing optics. As a result, the configuration provides a focused monochromatic beam of about  $3.5 \times 1.5 \mu m^2$  with a flux up to  $10^{12} ph/s$  between 6.5 and 18 keV.

# Optiques X

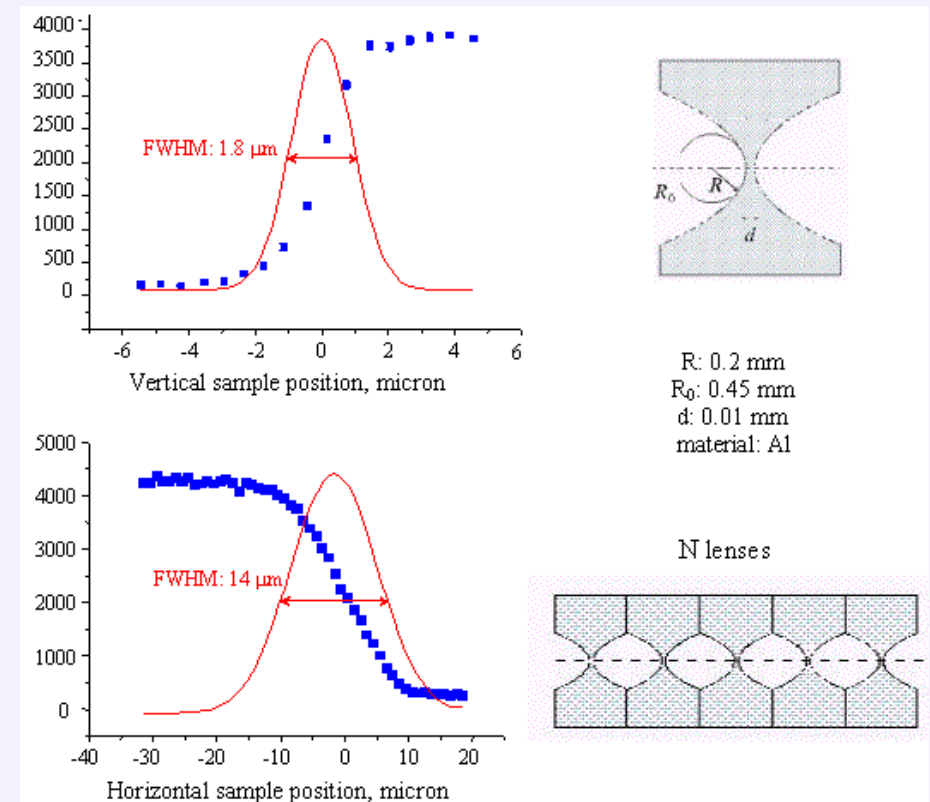
Ces progrès de la source sont associés à des nouvelles optiques capables de focaliser les rayons X dans la gamme micronique.



Optique de Fresnel (zone plates)



Kirkpatrick-Baez miroirs à gradient d'indice.



Lentille réfractive.

# Conclusion

- Le synchrotron est un outil qui ouvre de nouvelles perspectives pour l'étude des matières condensés et des molécules même complexes (virus).
- Les détecteurs sont très en retard sur la source synchrotron.
- De nouvelles sources de rayons X : excitation Laser et Free Electron Laser.
- L'instrumentation de laboratoire a fait de gros progrès, nouveaux générateurs, miroirs de multicouches, détection CCD...
- Toute expérience sur les TGE (synchrotron) passe par une préparation approfondie en laboratoire.