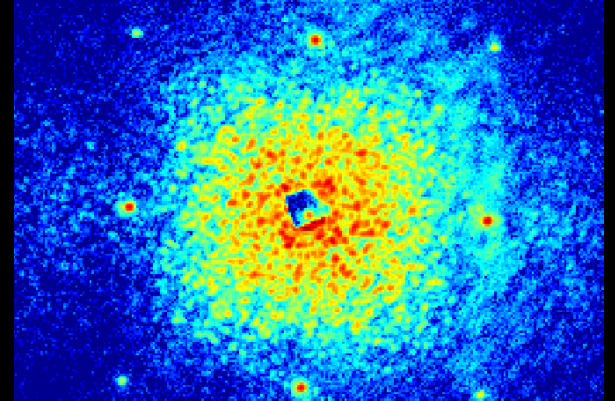


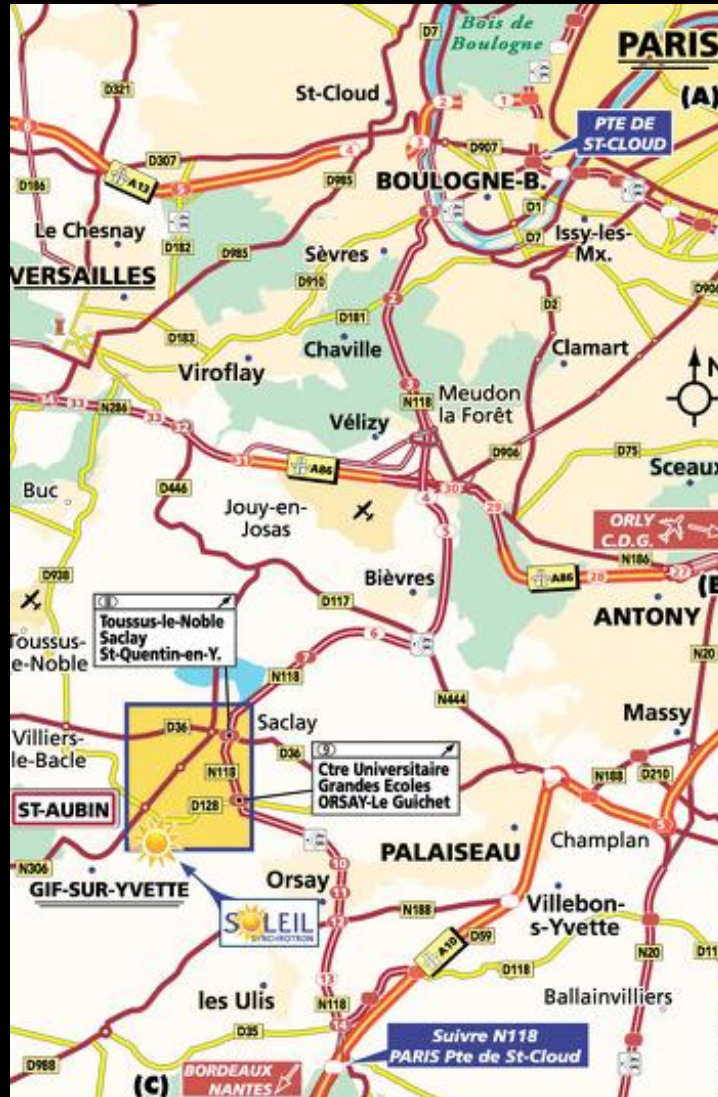
Cristaux sous lumière synchrotron



Sylvain RAVY

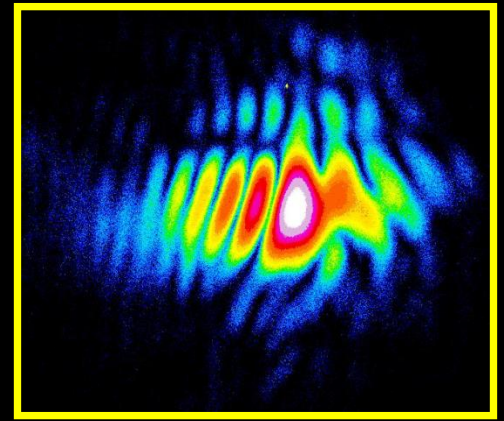
Ligne CRISTAL
Synchrotron SOLEIL
Saint Aubin
91192 Gif-sur-Yvette
France

Plateau de Saclay





Plan



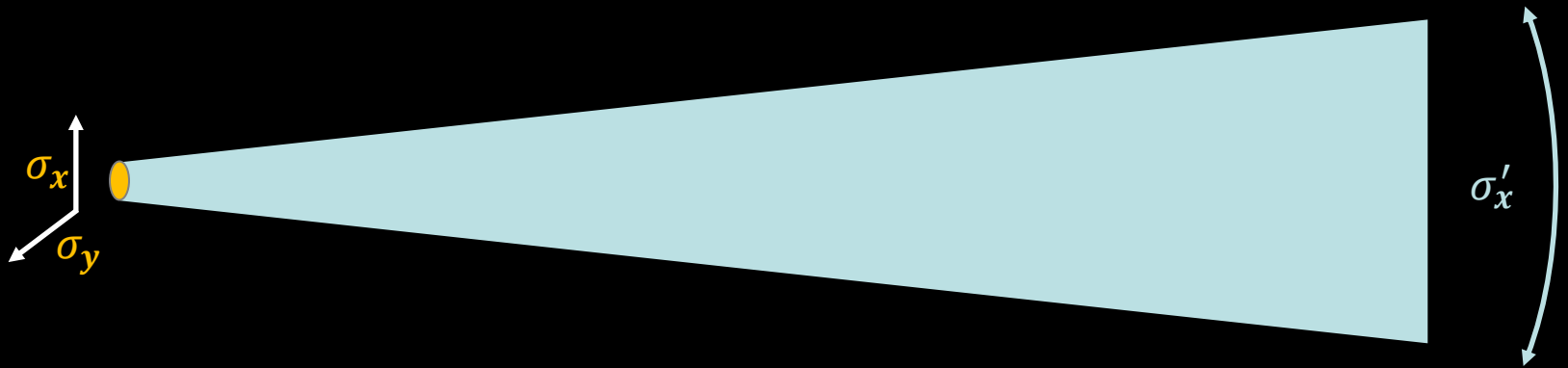
1. Rayonnement synchrotron
2. La ligne de lumière CRISTAL
3. Applications...



1. Le rayonnement synchrotron



Rayonnement synchrotron et brillance



Flux : en ph/s
Energie (keV), longueur d'onde (nm)
Taille de la source σ_x, σ_y : en mm
Divergence σ'_x, σ'_y : en mrad

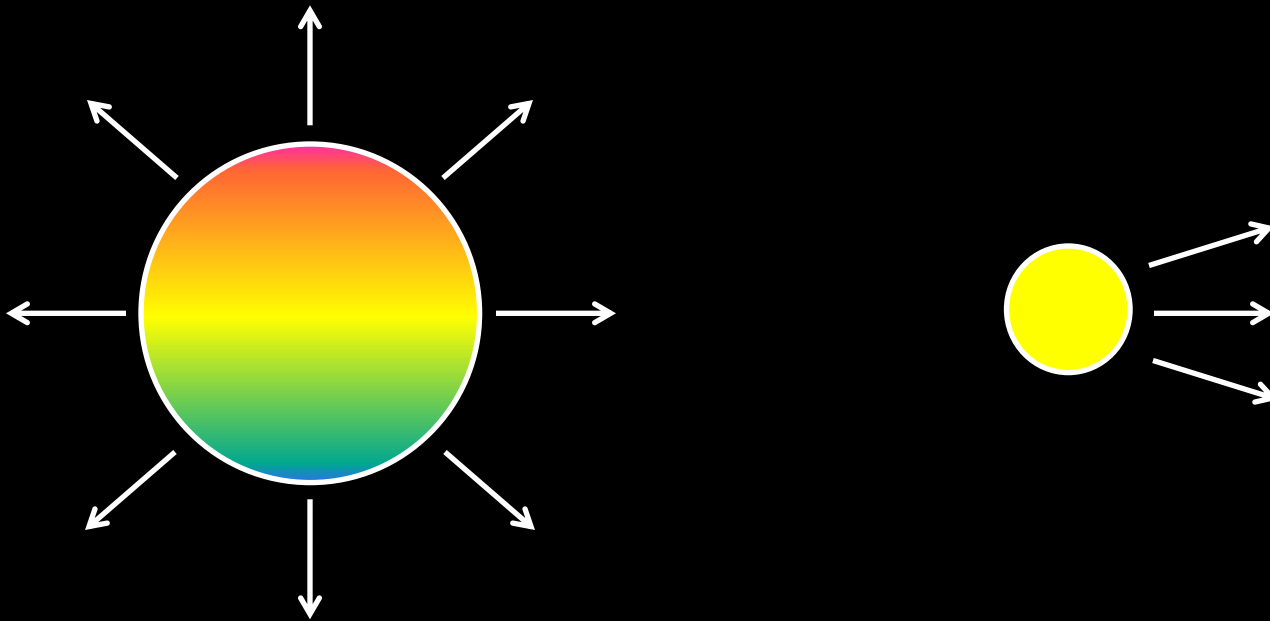
Brillance spectrique (spectral brilliance/brightness):
Flux rapporté à la taille et la divergence de la source

par $\frac{\Delta E}{E} = \frac{1}{1000}$ de bande passante

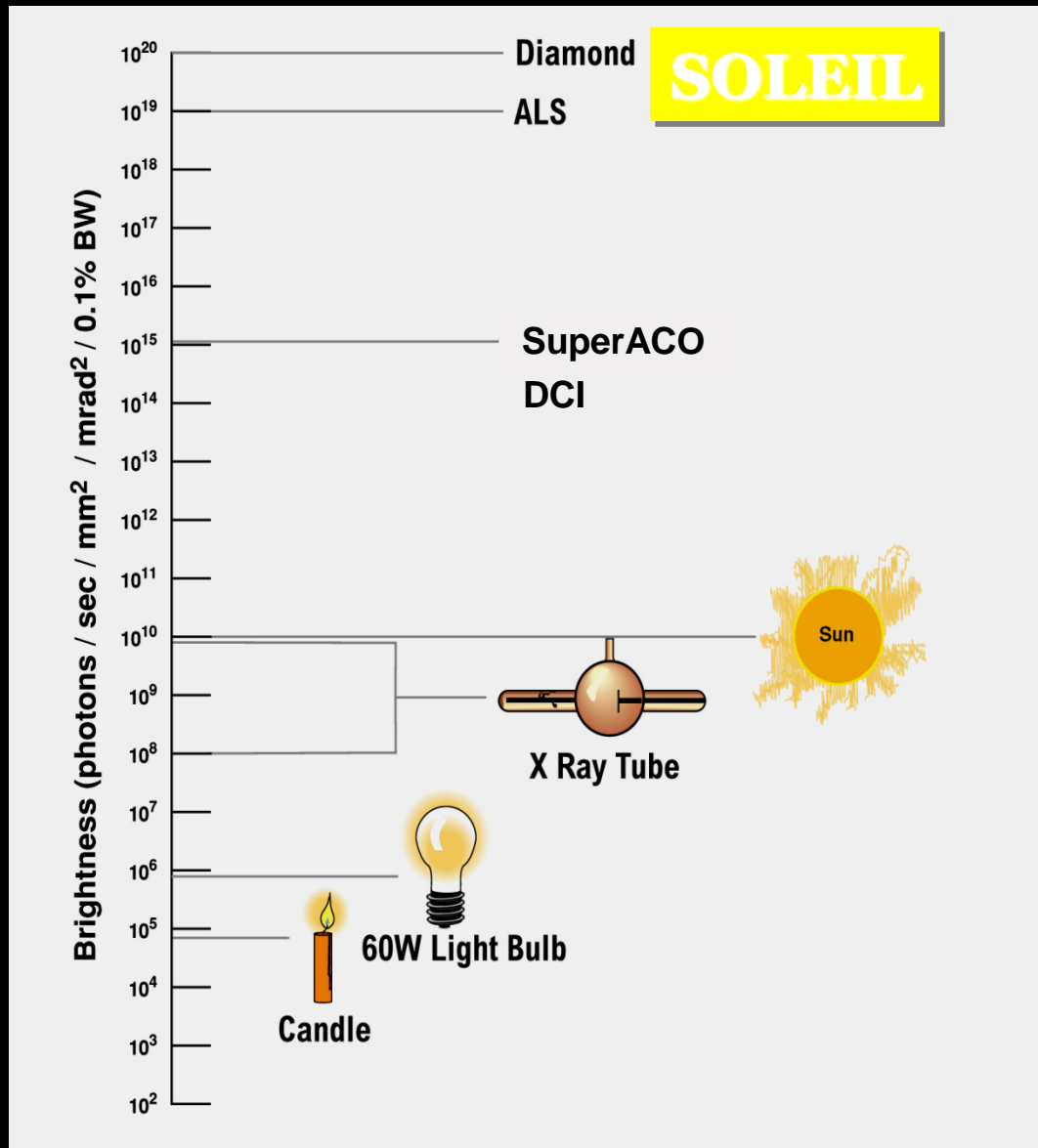
ph.s⁻¹.mm⁻².mrad⁻².0,1%bw (= UB)

Source de rayons X

Plus une source est :
Intense
Petite
Peu divergente
Monochromatique
plus elle est **brillante**

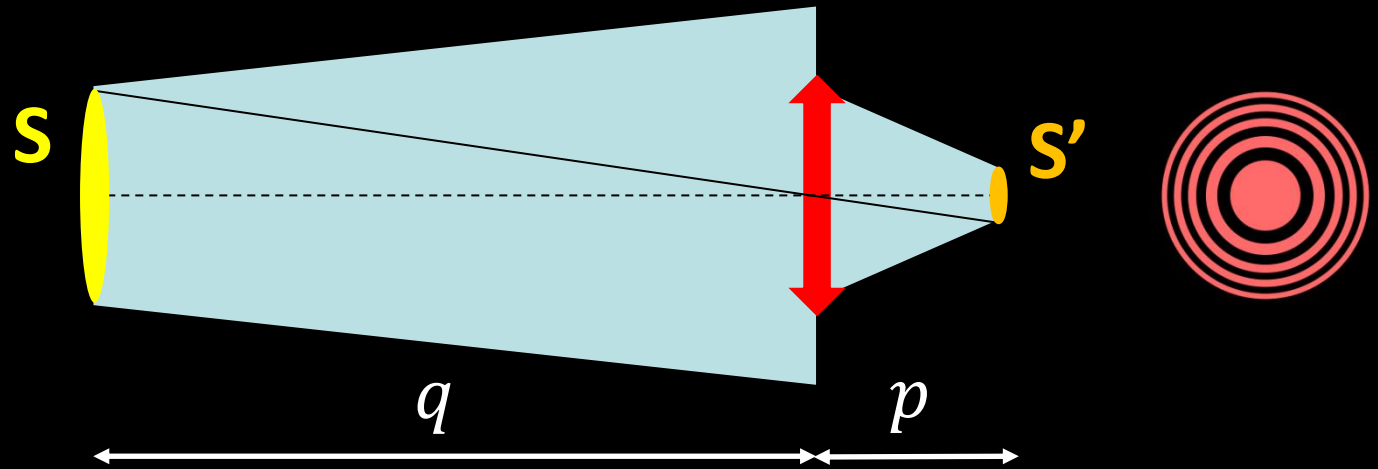


Le rayonnement synchrotron : brillance $\times 10^{10}$!!!



Pourquoi ?

Pourquoi une source brillante ?



$$S' = \frac{p}{q} S$$

Comment ?

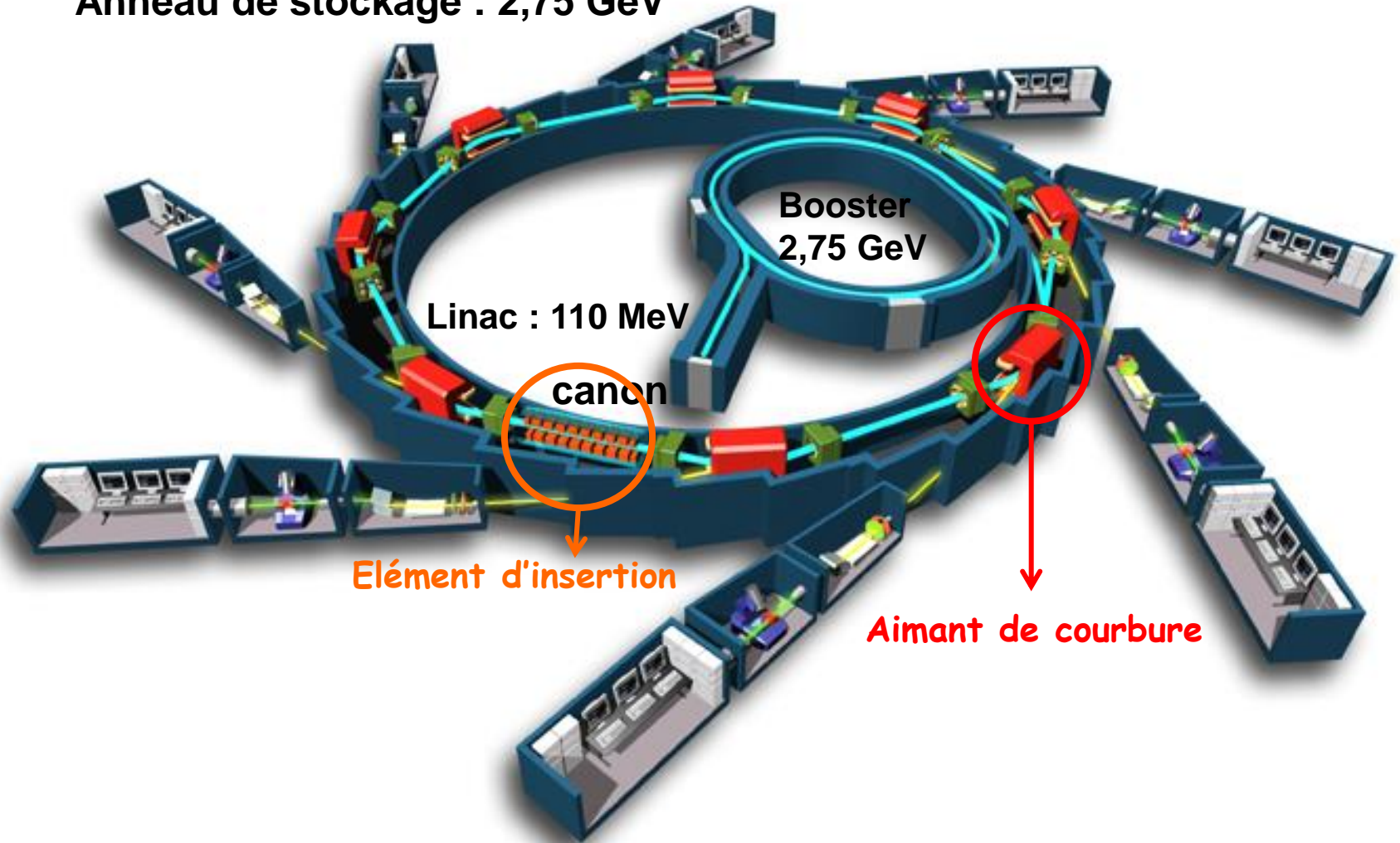
Pour obtenir de petits faisceaux ($\mu m \rightarrow nm$)

Les focaliser ($q = 100 m, p = 0.1 m$)

Obtenir des ondes planes... (faisceaux cohérents !)

Le RS : produit par des électrons relativistes

Anneau de stockage : 2,75 GeV



Booster
2,75 GeV

Linac : 110 MeV
canon

Elément d'insertion

Aimant de courbure

Le site de SOLEIL le 1 août 2013



Des électrons relativistes

Les électrons ont une énergie :

$$W = \gamma m_e c^2$$

$$\text{SOLEIL} : \gamma = \frac{2,75 \text{ GeV}}{511 \text{ keV}} = 5381 \left(\frac{1}{1,86 \cdot 10^{-4}} \right)$$

$$\text{ESRF} : \gamma = \frac{6 \text{ GeV}}{511 \text{ keV}} = 11740 \left(\frac{1}{8,5 \cdot 10^{-4}} \right)$$

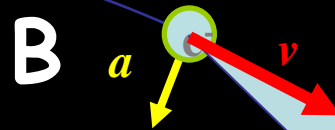
et une vitesse :

$$v = \beta c ; \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

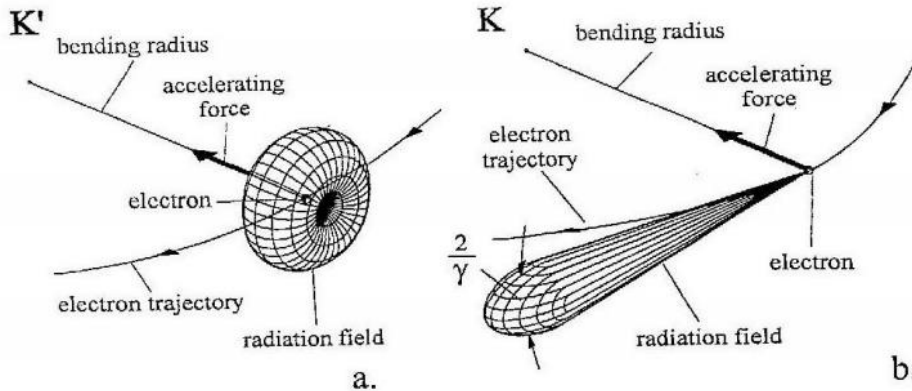
$$\text{SOLEIL} : \beta = 0,999999982$$

Rayonnement synchrotron

- 1898 : A. Liénard pose les équations du rayonnement synchrotron
- 1912 : G.A. Schott calcule le rayonnement synchrotron
- 1947 : F. Elder, R. Langmuir et H. Pollock



1947
Première observation
de lumière synchrotron
70 MeV
GE, Schenectady, NY



$$W = \gamma m_e c^2$$

$$\text{Angle} : \gamma^{-1}$$

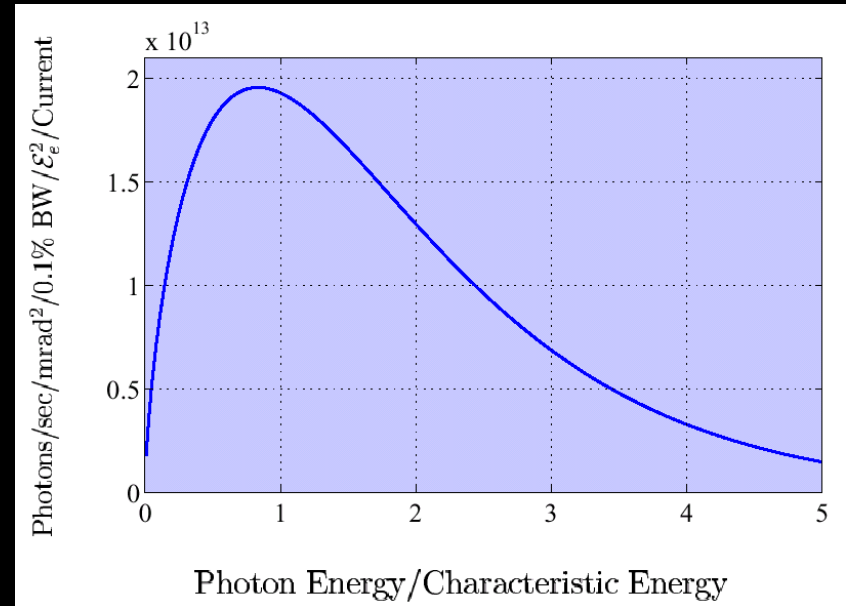
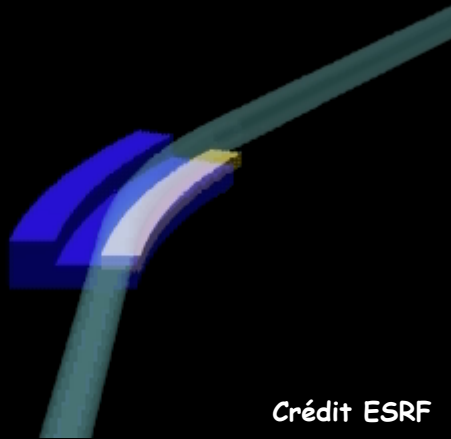
$$1,86 \cdot 10^{-4} \text{ rad} \\ = 0,01^\circ$$

Simulation

Lancer le programme de Tsumoru Shintake
RIKEN/Spring-8

<http://www.shintakelab.com/en/enEducationalSoft.htm>

Aimant de courbure (bending magnet)



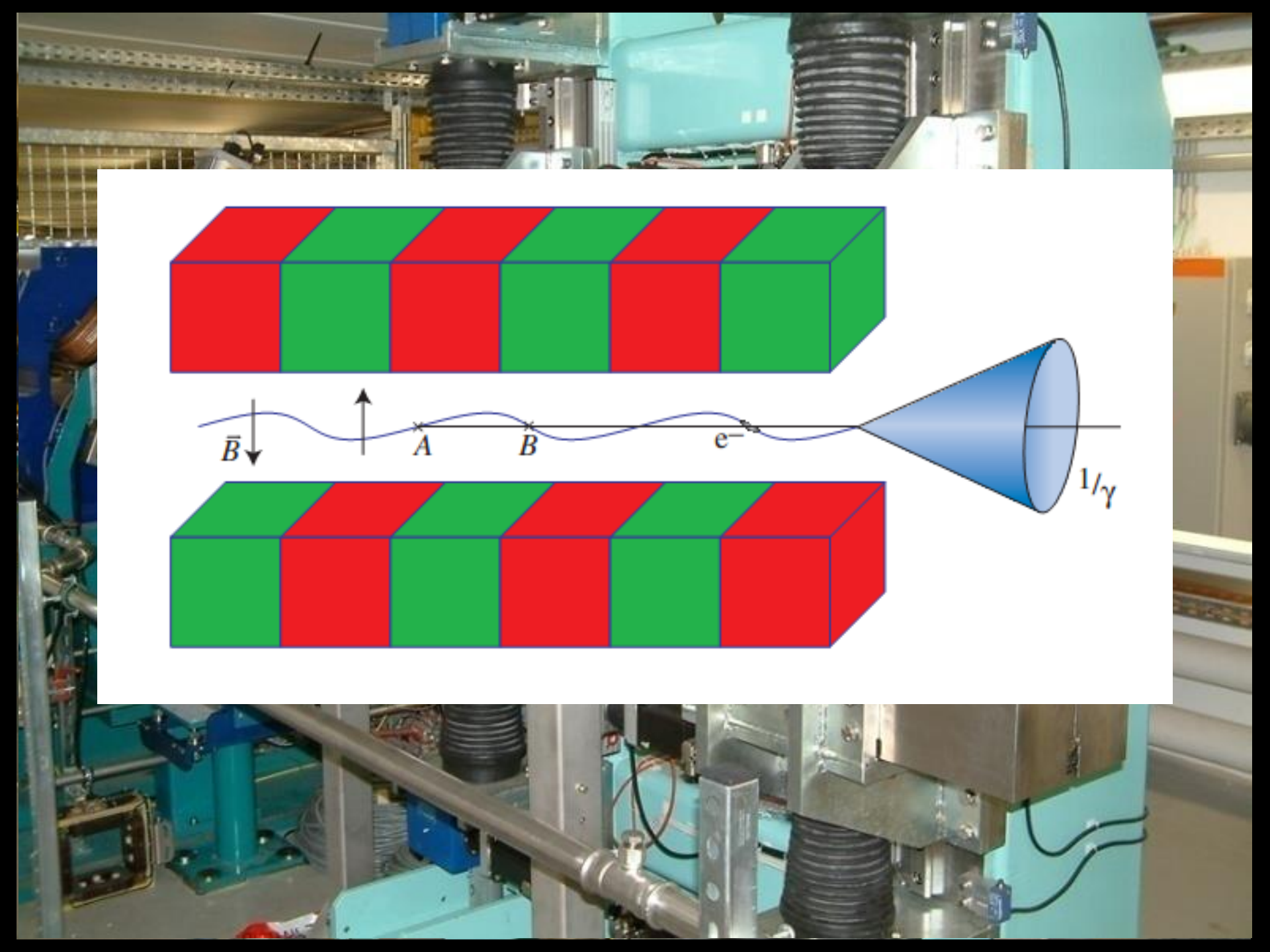
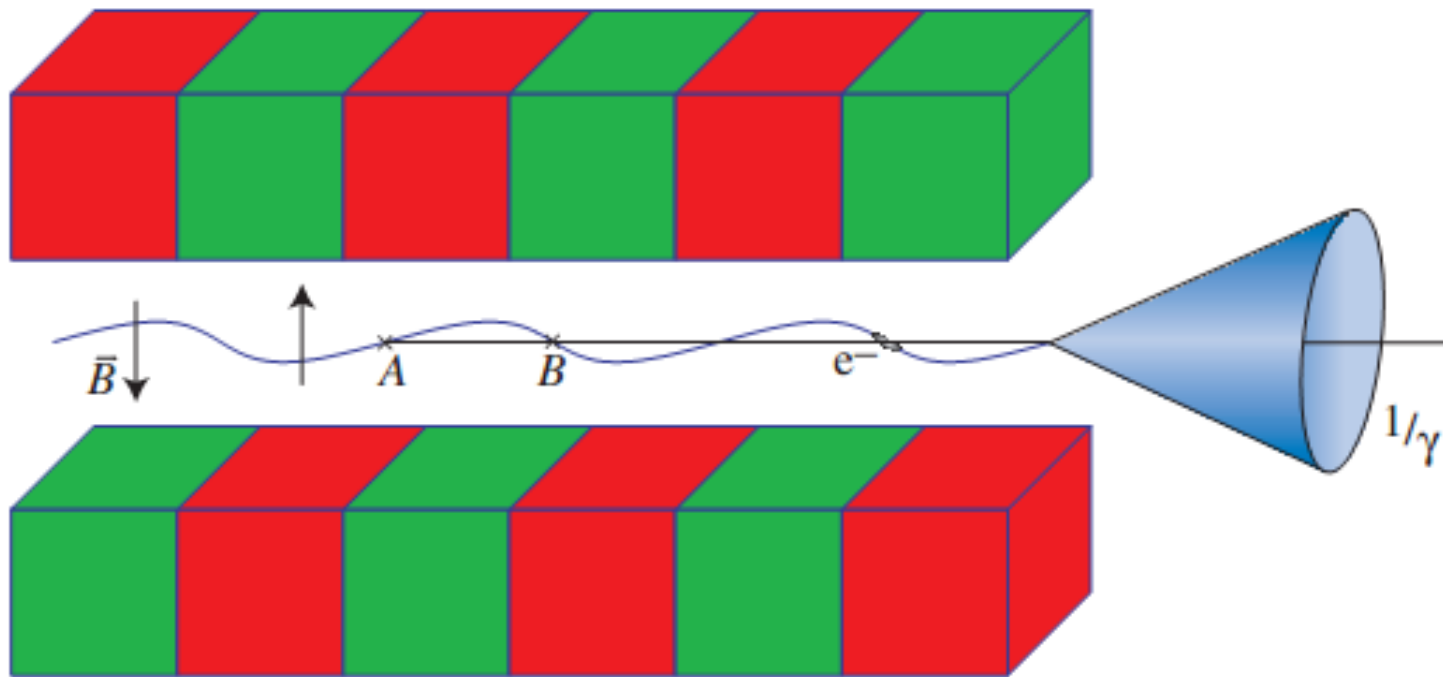
- Faisceau pulsé 352 MHz
- 416 paquets de 70 ps, séparés de 3 ns

Rayonnement blanc
Énergie caractéristique (critique)

Source pulsée et
accordable

$$\hbar\omega_c(\text{keV}) = 0,665 W(\text{GeV})^2 B(\text{T})$$

SOLEIL : 0,665 (2,75)² 1,75 = 8,8 keV
ESRF : 19,2 keV



Les électrons sont relativistes... ...alors un peu de relativité !

On considère un référentiel inertiel R' animé d'une vitesse \bar{v} par rapport à R

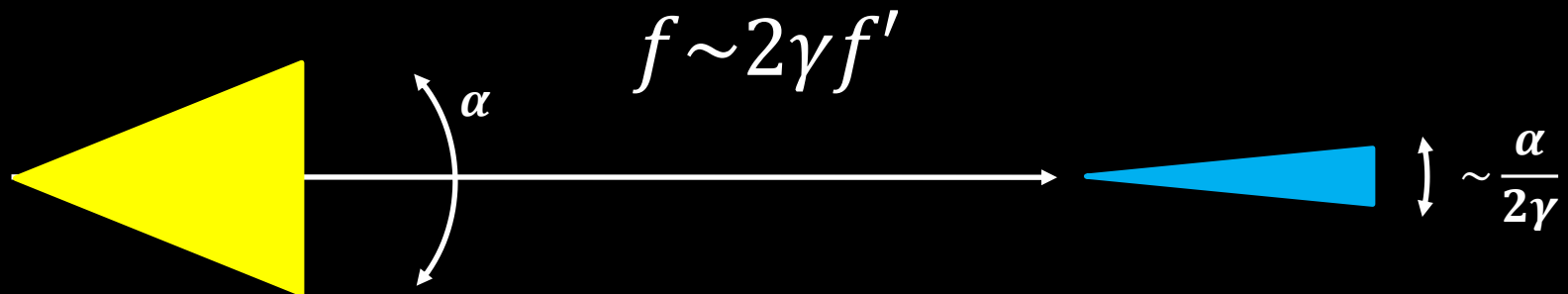
La contraction des longueurs :

Un objet de longueur L dans R mesure L' dans R' :

$$L' = L/\gamma$$

L'effet Doppler relativiste:

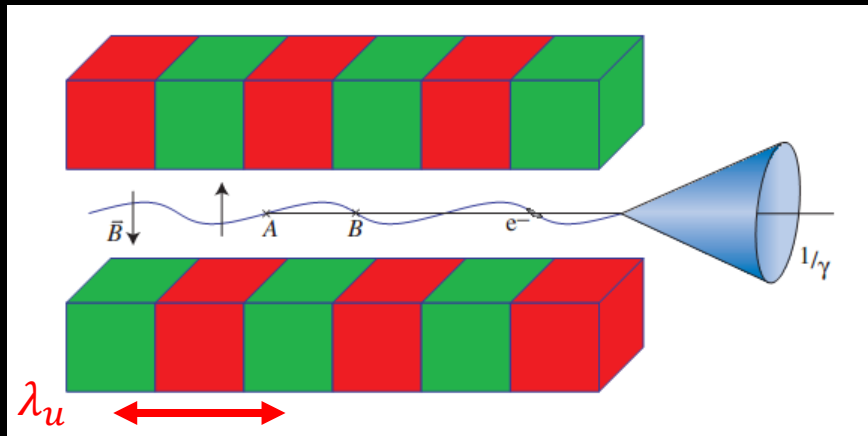
Soit une source émettant à une fréquence f' , dans un cône d'angle α
Dans le repère R , la fréquence devient :



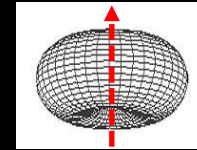
Sources de 3G : Onduleurs

Onduleur de **période magnétique** λ_u (20 mm)
 Dans l'onduleur, les électrons prennent du retard
 $\bar{v} = \bar{\beta}c$ avec $\bar{\beta} < \beta$

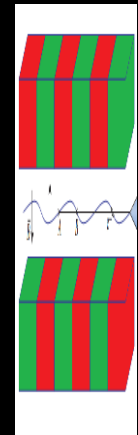
Dans le repère R', les électrons font un « 8 »



Rayonnement d'antenne

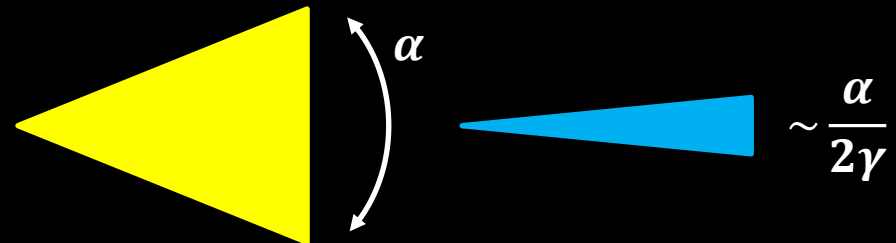


Pour l'é : $\lambda_u \rightarrow \lambda_u/\gamma$
 $f_u = \gamma(\bar{\beta}c/\lambda_u)$
 (15 GHz à 75 THz)



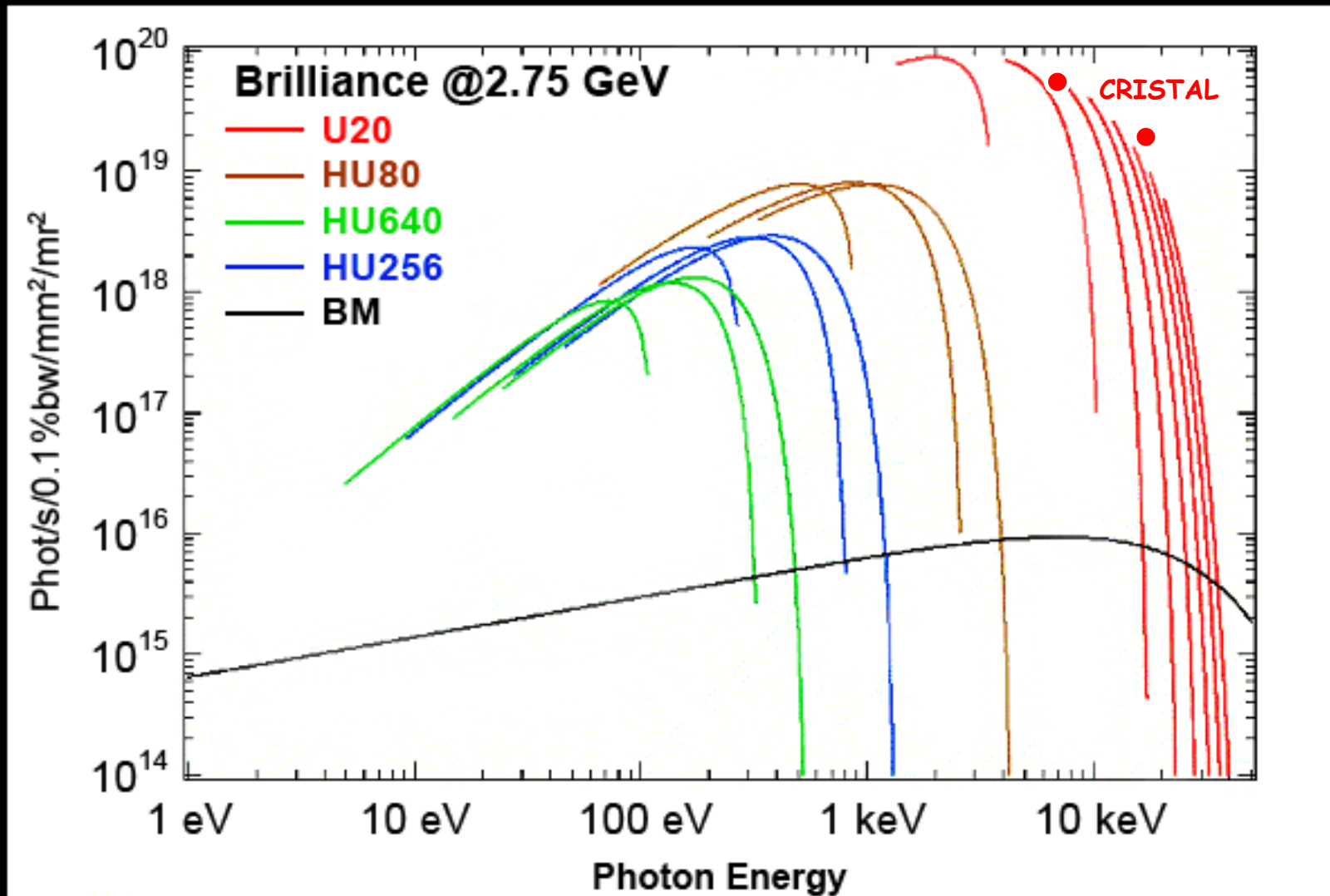
Dans le repère du laboratoire
 Effet Döppler

$f = 2\gamma f_u$
 75 THz à 10^{18} Hz (RX)



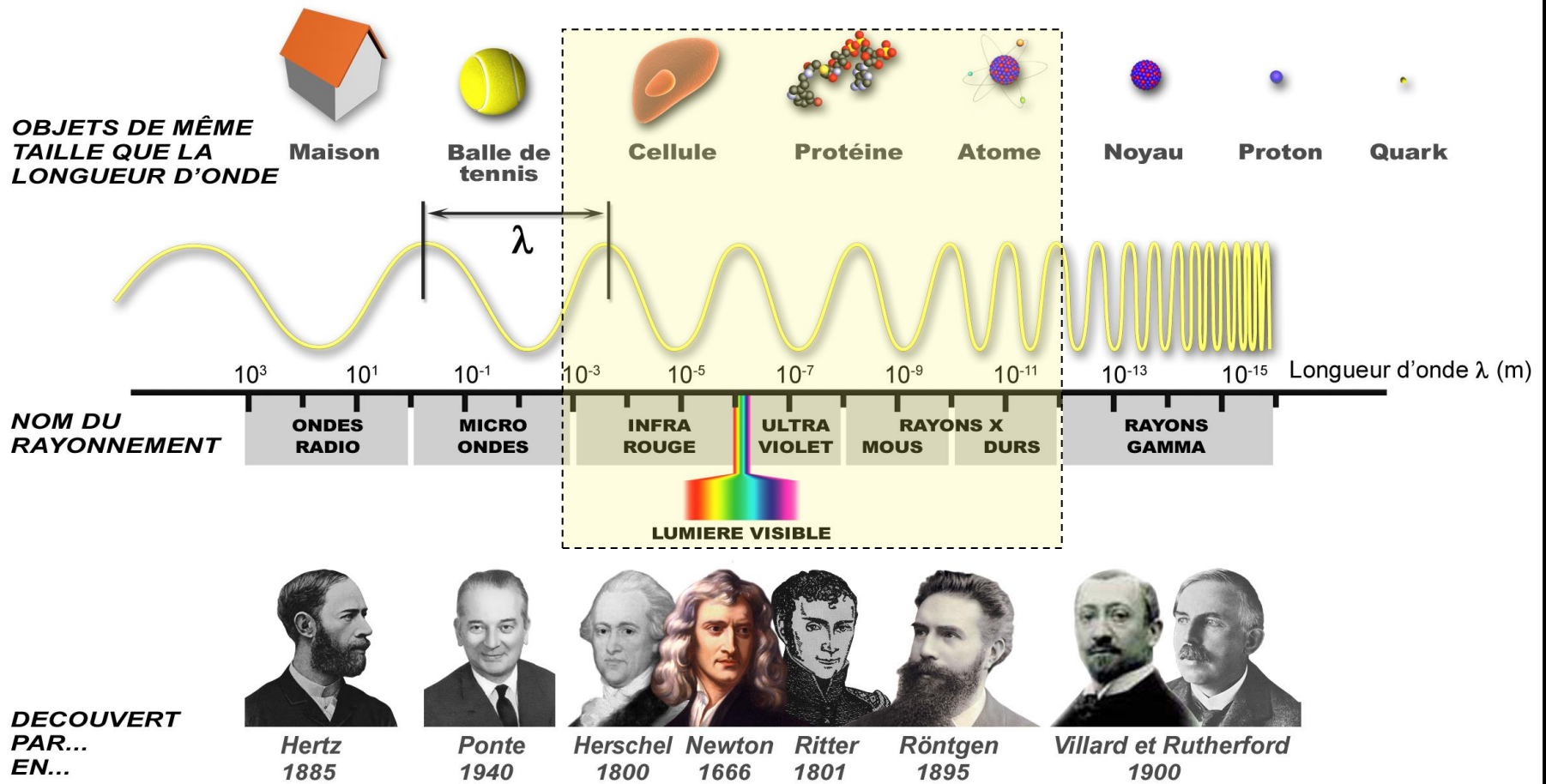
Sources de 3G : Onduleurs

Sources très brillantes (10^{20} UB)



Une gamme spectrale étendue

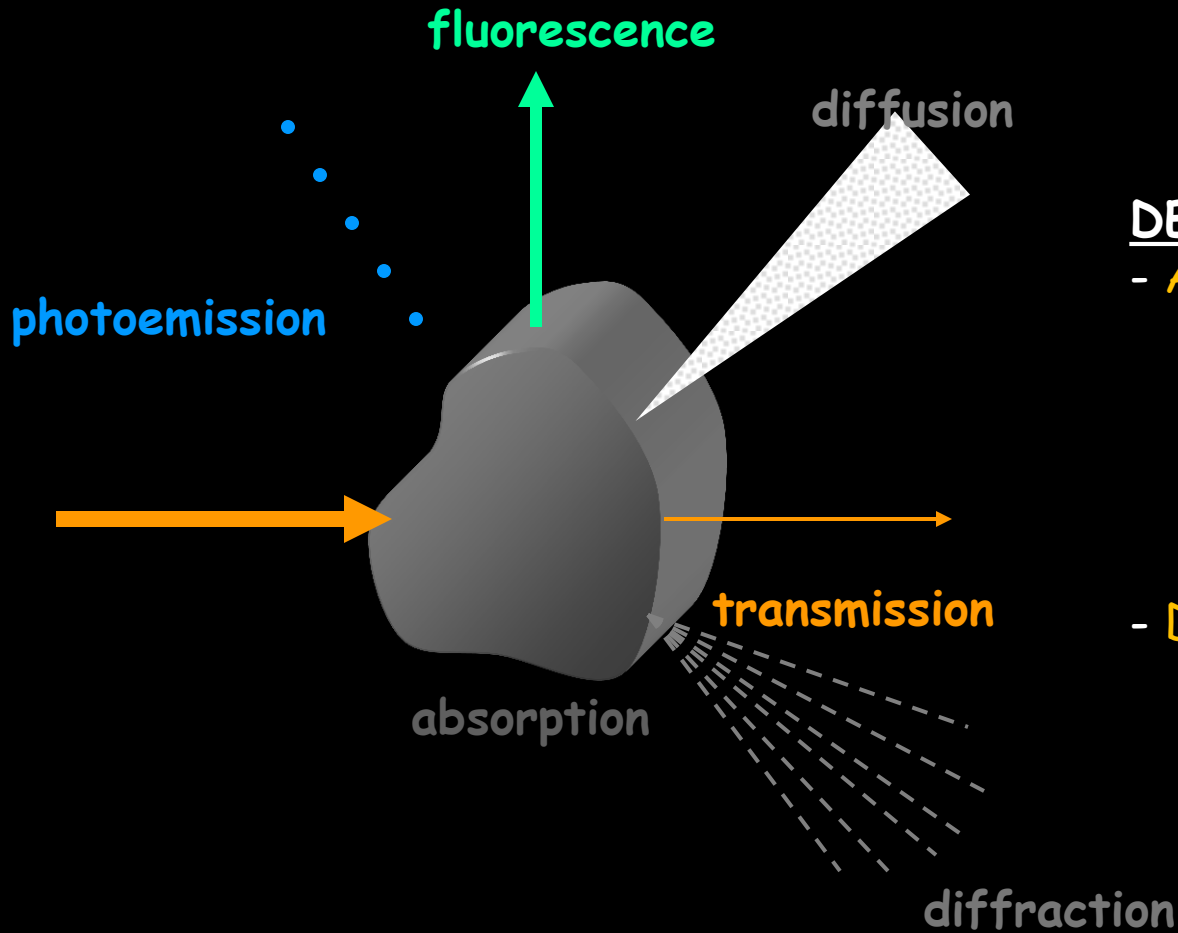
Des IR lointains aux RX durs



Les principaux centre de rayonnement synchrotrons dans le monde



Les interactions lumière/matière



DEUX PROCESSUS !

- Absorption

- EXAFS
- Photoemission
- Fluorescence

- Diffusion (scattering)

- Diffraction

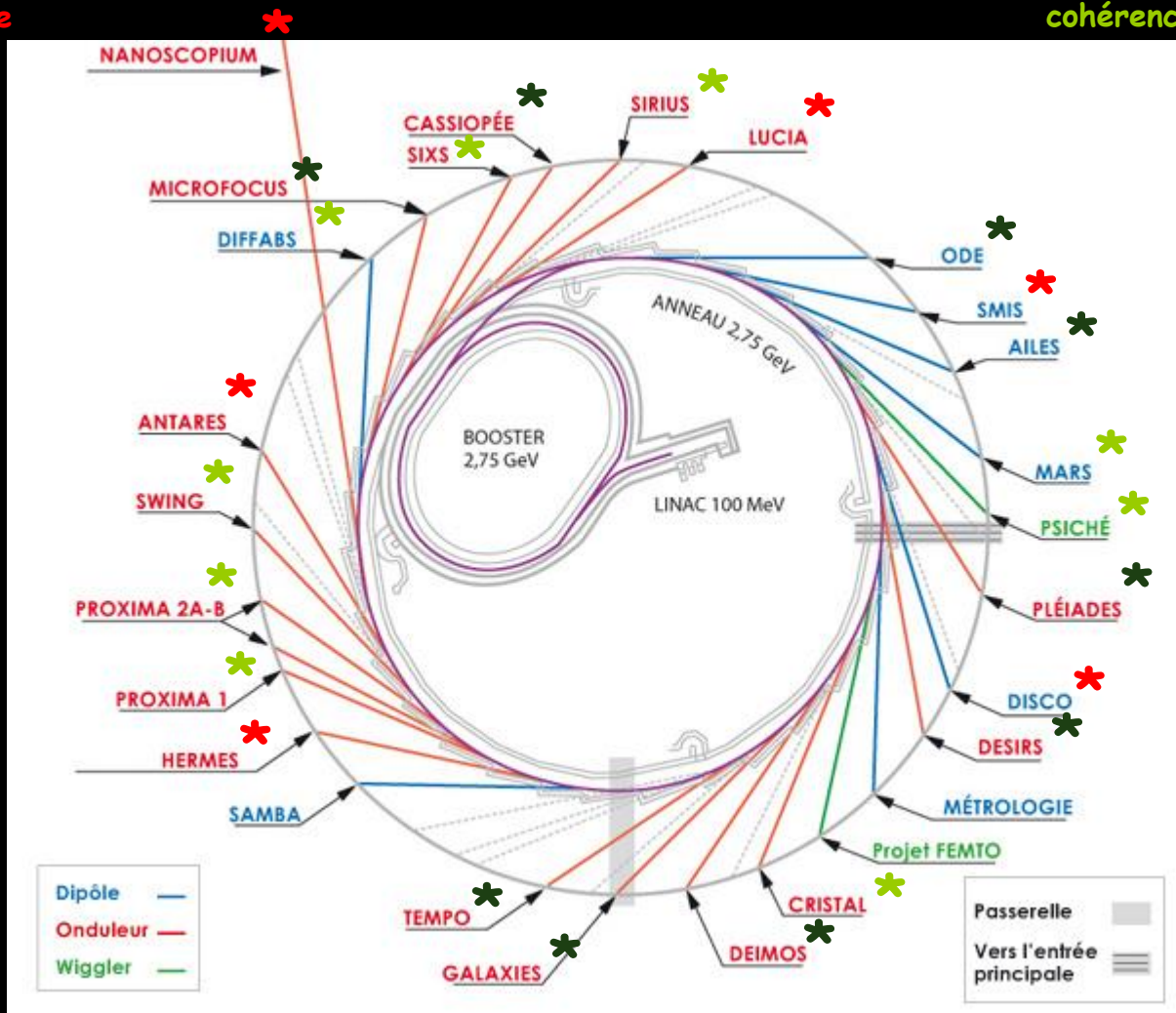
26 lignes de lumière

Imageries 2D/3D

Haute résolution
Contraste de phase
Multi-échelles
Multi-modales

Diffraction/Diffusion

Structures, cinétiques
cohérence



Spectroscopies

Absorption EXAFS
Photoémission
Temps résolu (fs, ms)
Très haute résolution

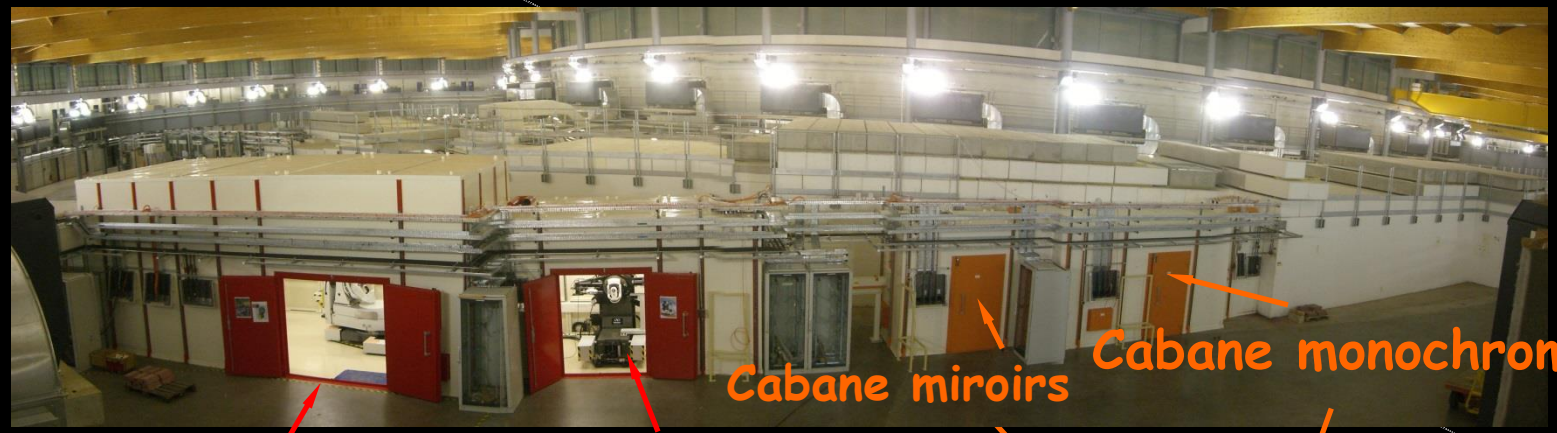
Le « machine status »

21/05/13 19:23:50	430.42 mA	ID			BM
Function Mode	TOP-UP	I02_C	PSICHE	PLEIADES	ODE
Filling Mode	Hybrid	DESIRS	PUMA	CRISTAL	SMIS
Lifetime	11.23 h	DEIMOS	GALAXIES	TEMPO	AILES
Integrated Dose	9354.7 A.h	I09_L	HERMES	PX1	MARS
Average Pressure	5.3e-10 mbar	PX2	SWING	ANTARES	DISCO
End Of Beam	May-27 07:00:00	NANO_SCO	SEXTANTS	SIXS	METRO
May-27 07:00:00	131:36:11	CASSIOPEE	SIRIUS	LUCIA	SAMBA
					DIFFABS
		Orbit (RMS)			Orbit (Peak)
		H	45.4 μm	293.4 μm	4.69 nm.rad
		V	64.1 μm	331.3 μm	49.2 pm.rad
		Emittance			Tune
		Delivery Since			0.1739
		Tue May 21 07:00:01			0.2319
		Shift Lignes			
Tue May 21 07:00:23		Faisceau disponible 425+5mA			

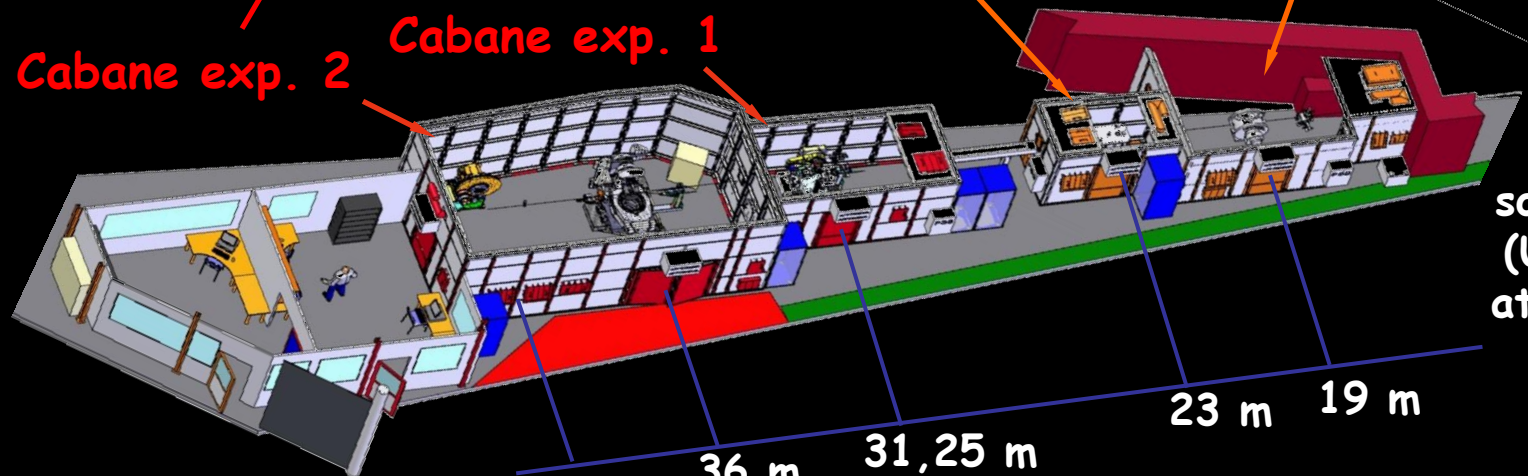
2. La ligne CRISTAL



CRISTAL est dédiée à la diffraction des rayons X de 4-30 keV



Cabane miroirs Cabane monochromateur



Cabane exp. 2 Cabane exp. 1

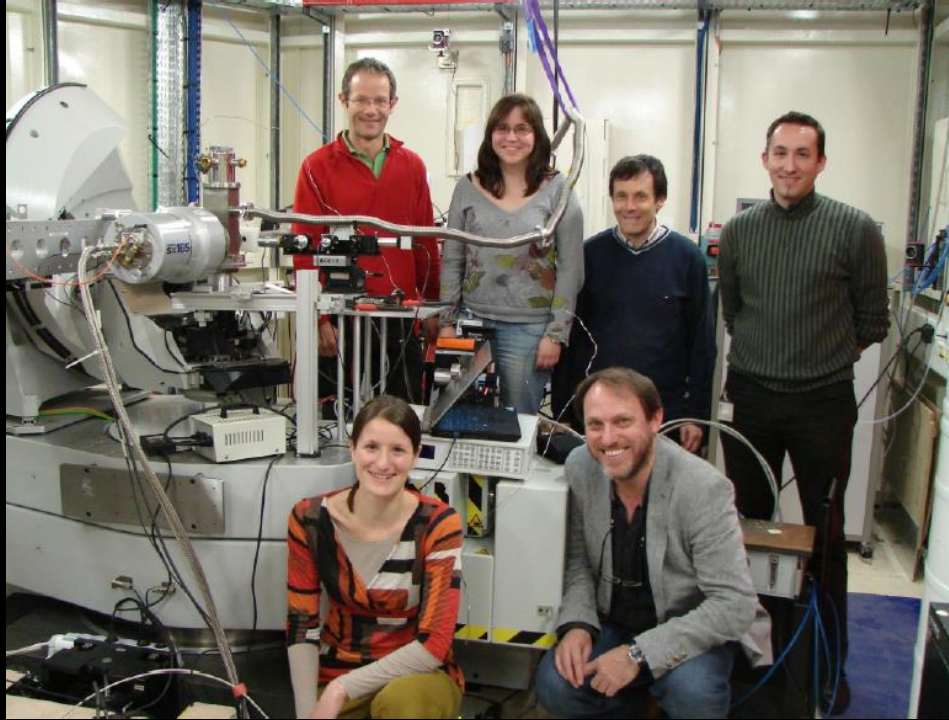
source (U20) at 0 m

Salles de contrôle

39,5 m 36 m 31,25 m 23 m 19 m



CRISTAL



Équipe de ligne :

Scientifiques de ligne : Sylvain Ravy, Erik Elkaim, Pierre Fertey,

Enseignante (MCF) : Claire Laulhé

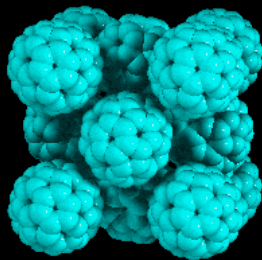
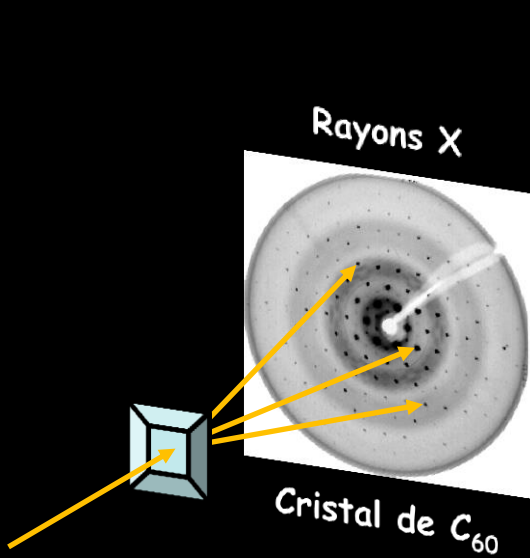
Assistant Ingénieur : Fabien Legrand

Post-Doc : Felisa Berenguer

Doctorant(e) : Sarah Boulfat

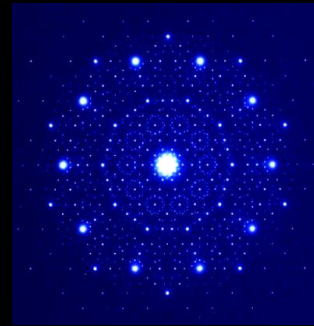
Objet d'étude : le cristal

Un cristal est un solide qui **diffracte** ! (IUCr 1991)

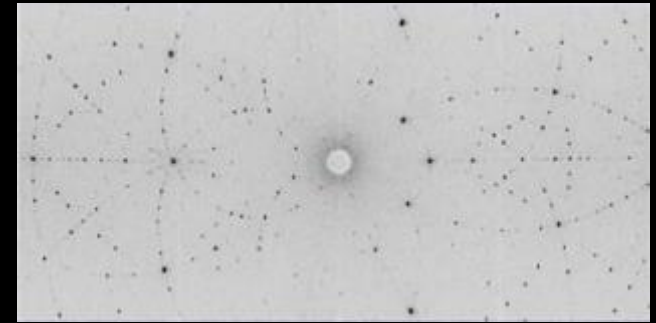


La connaissance des intensités des taches de Bragg permet de déterminer la structure atomique

Électrons

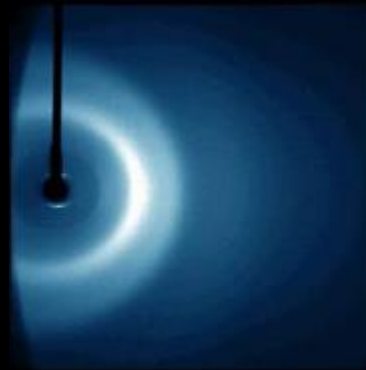


Neutrons

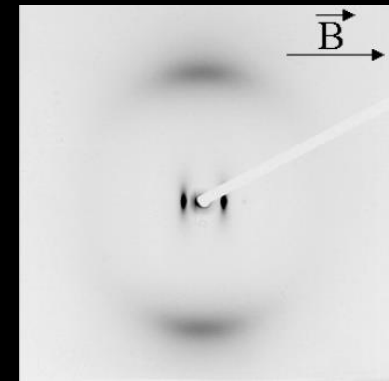


Existence de **taches de Bragg**, largeur limitée par la résolution

Sinon la diffusion est répartie continûment
Liquide
Cristal liquide



Eau

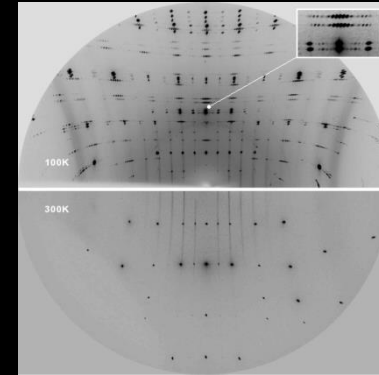
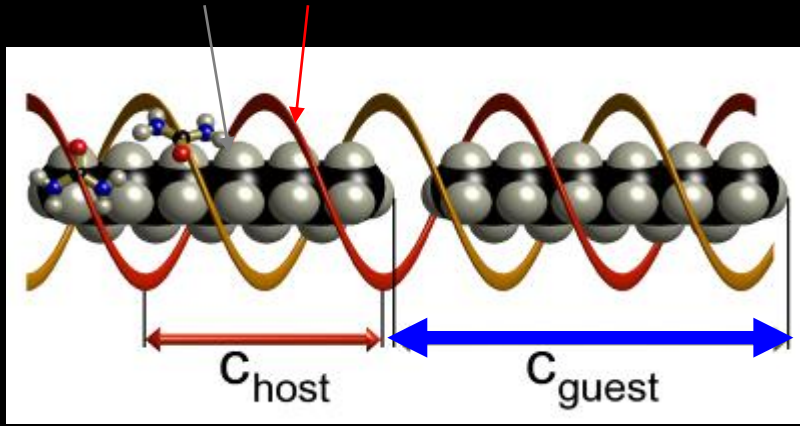


smectique



Tous les cristaux ne sont pas périodiques !

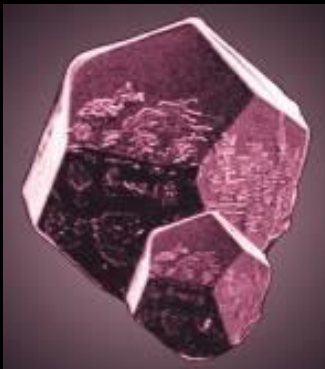
- Cristaux **incommensurables** (ou composites).
 - Alcane-urée : inclusion d'alcane dans des canaux d'urée (rapport des périodes irrationnelles)



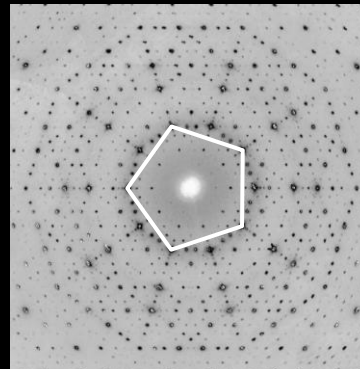
B.Toudic et al, *Science* 319, 69 (2008)

- **Quasi-Cristaux** (D. Schechtman 1982, Nobel Chimie 2011)

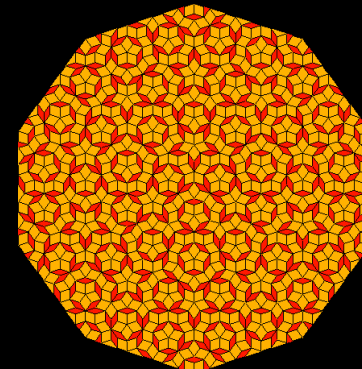
D. Schechtman, I. Blech, D. Gratias et J.W. Cahn, *Phys. Rev. Lett.* 53, 1951 (1984)



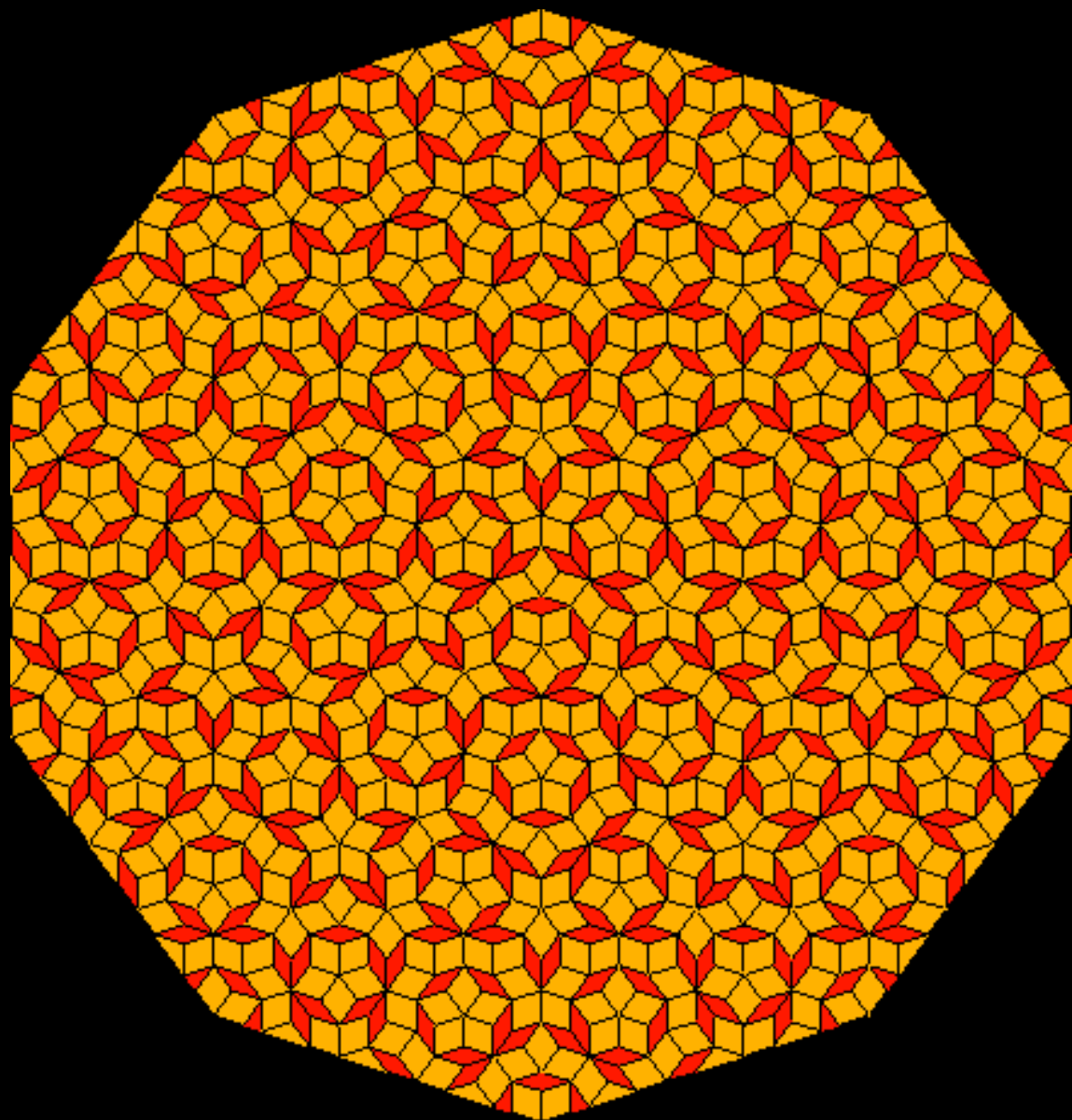
Forme dodécaédrique



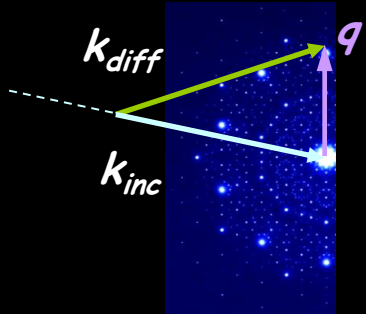
Tache de Bragg
Symétrie 5



Modèle
Pavage de Penrose



Diffraction



$$\int \rho(\mathbf{r}) e^{-i\mathbf{q}\cdot\mathbf{r}} d^3\mathbf{r}$$

Transformée de Fourier de la
densité électronique, au carré...

Perte de la phase

(de l'onde diffractée / onde incidente)

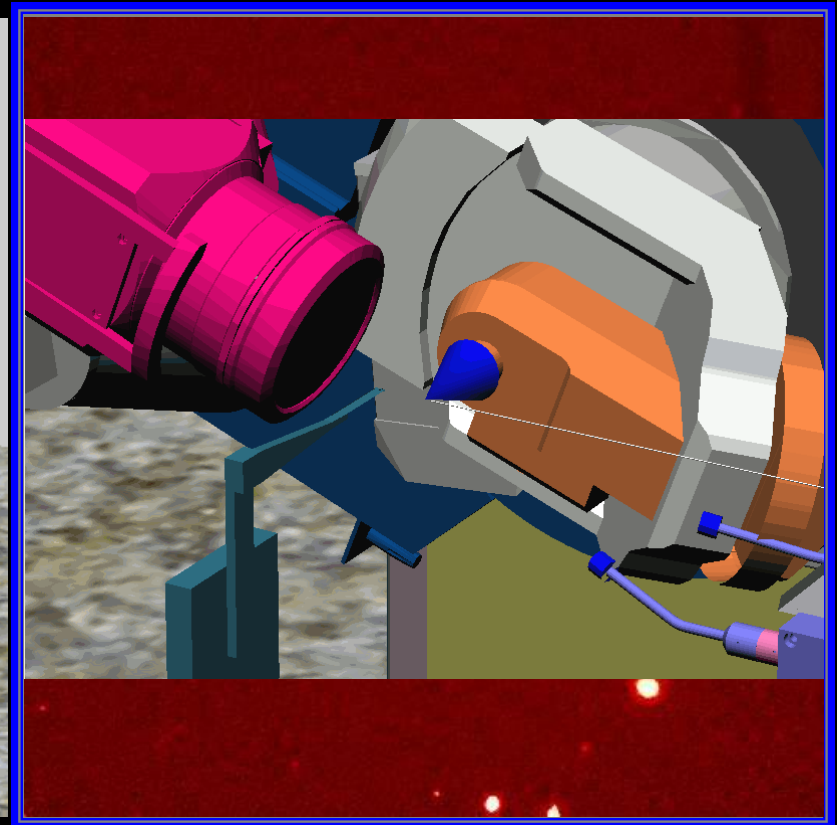
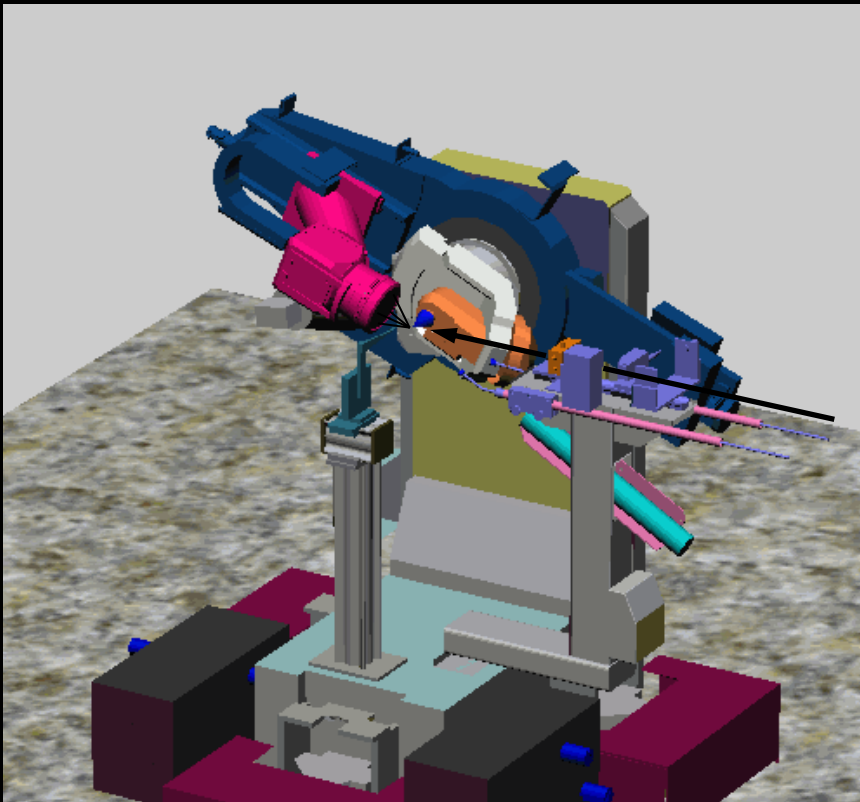
Impossibile d'inverser l'équation

(pb de phases)

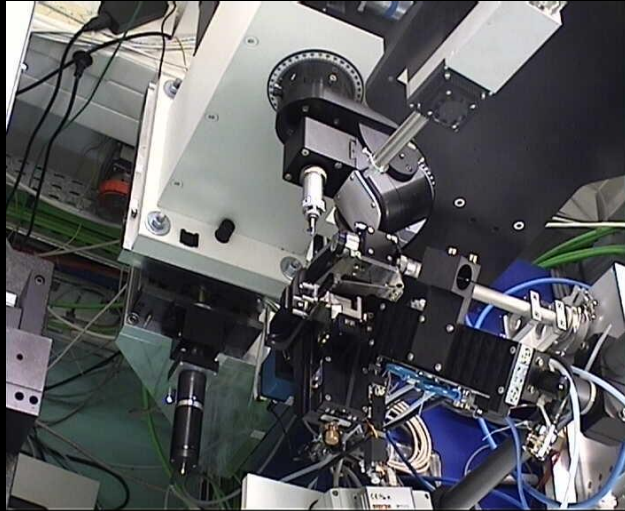
Algorithmes pour retrouver la phase

Comment mesurer la diffraction : le diffractomètre

Orienter le cristal dans une direction quelconque
Mesurer l'intensité et/ou la forme des taches de Bragg



Structure 3D des protéines de surface du virus du chikungunya

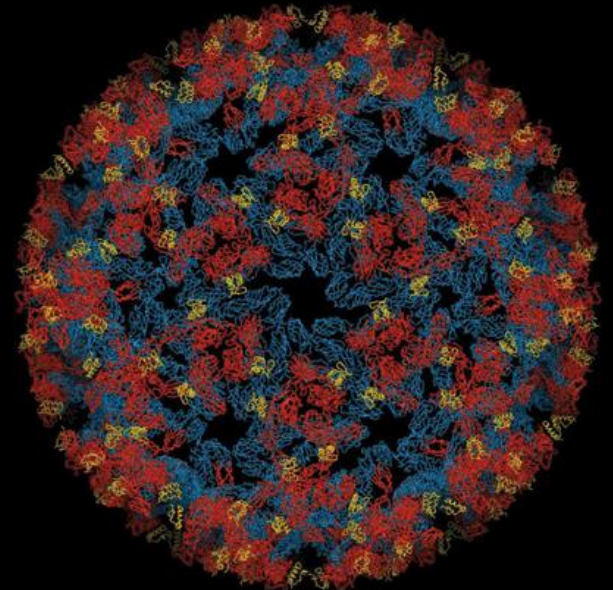


*Structure 3D des glycoprotéines de l'enveloppe
du virus du chikungunya : « la maladie de
l'homme courbé ».*

Ligne PROXIMA 1

Institut Pasteur, CNRS, Global Phasing

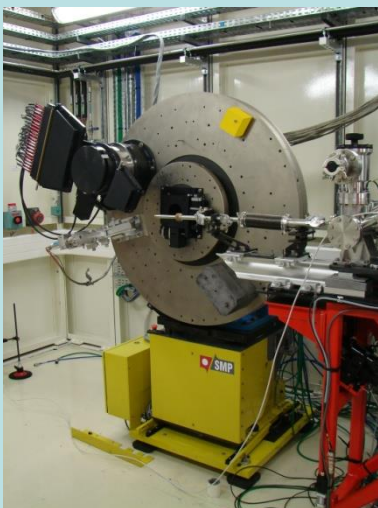
Comprendre comment ce complexe de protéines est activé pour envahir ses cellules-cibles. Développer des stratégies antivirales préventives et thérapeutiques (Nature, du 2 décembre 2010)



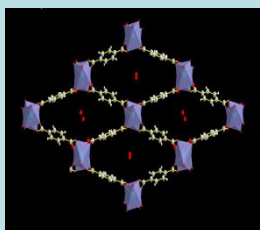
Trois instruments (diffractomètres) :

2-cercles

Powder diffraction



Diffractomètre SMP
2" résolution
21 analysers/detectors



High-résolution
Ab initio struct.

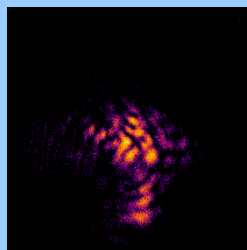
6-cercles



Newport-6-circle diffractometer
Kappa, SOC 60 μm

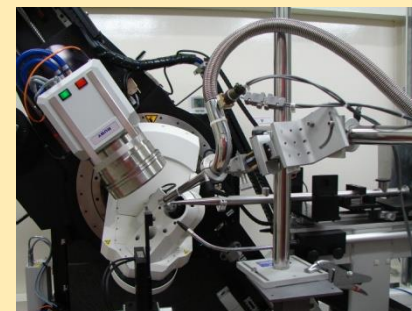
15 kg samples env.
Versatile instrument

Cryostat 4 K



Out-of-Bragg
and
Coherent
Diffraction

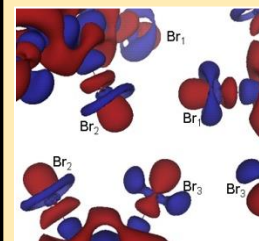
4-cercles



Newport-Oxford Diffraction
4-circle diffractometer
Kappa, SOC 8 μm

Oxford CCD ATLAS detector

N₂/He Blower

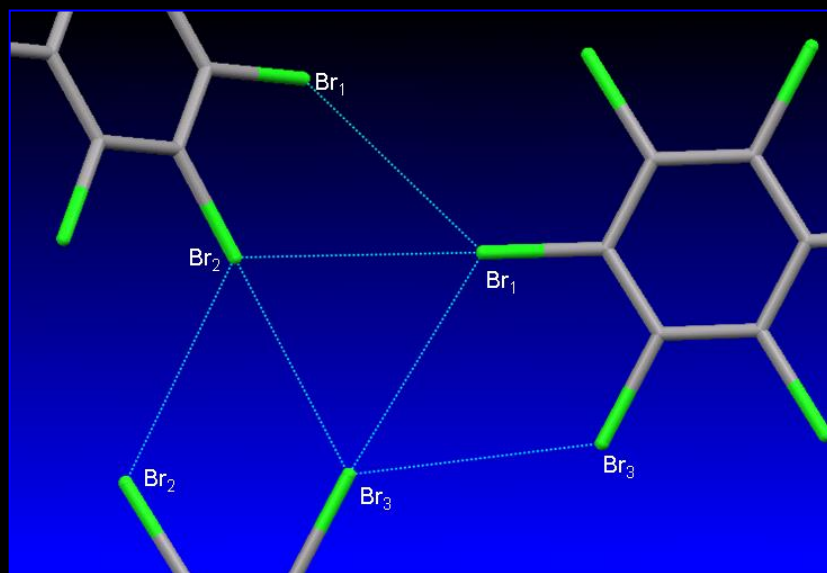


Crystallography
Electron density

3. Exemples d'Applications

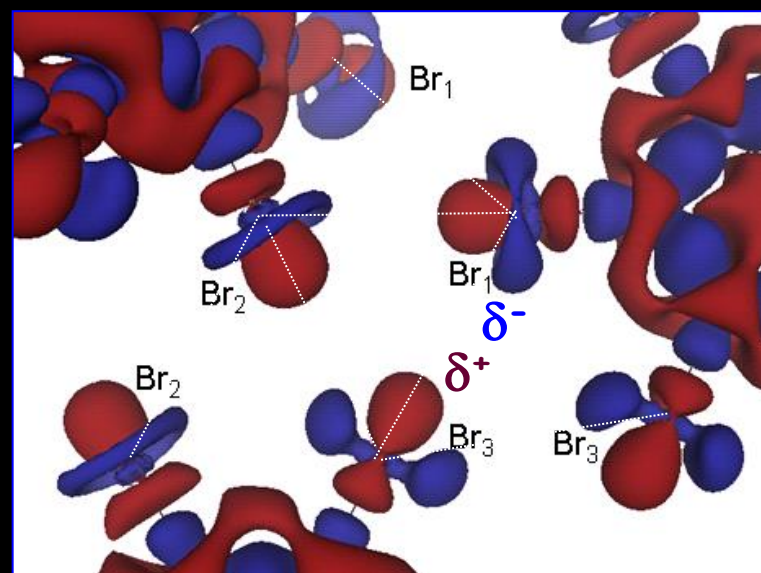
Etude de la densité électronique

Hexabromobenzène C_6Br_6



D'après S. Dahaoui *et al.*,
Angew. Chem. Int. Ed., 2009, 48, 3838

Carte de déformation statique

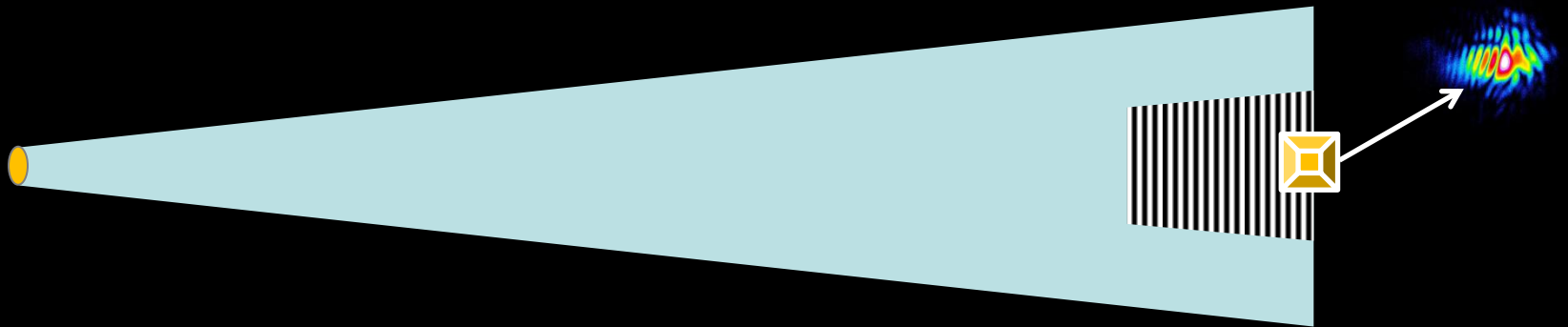


$$\Delta\rho_{\text{stat}}(r) = \rho_{\text{multipole}}(r) - \rho_{\text{spherical}}(r)$$

La distribution **anisotrope de la densité électronique** autour de l'halogène est à l'origine de l'interaction halogène-halogène

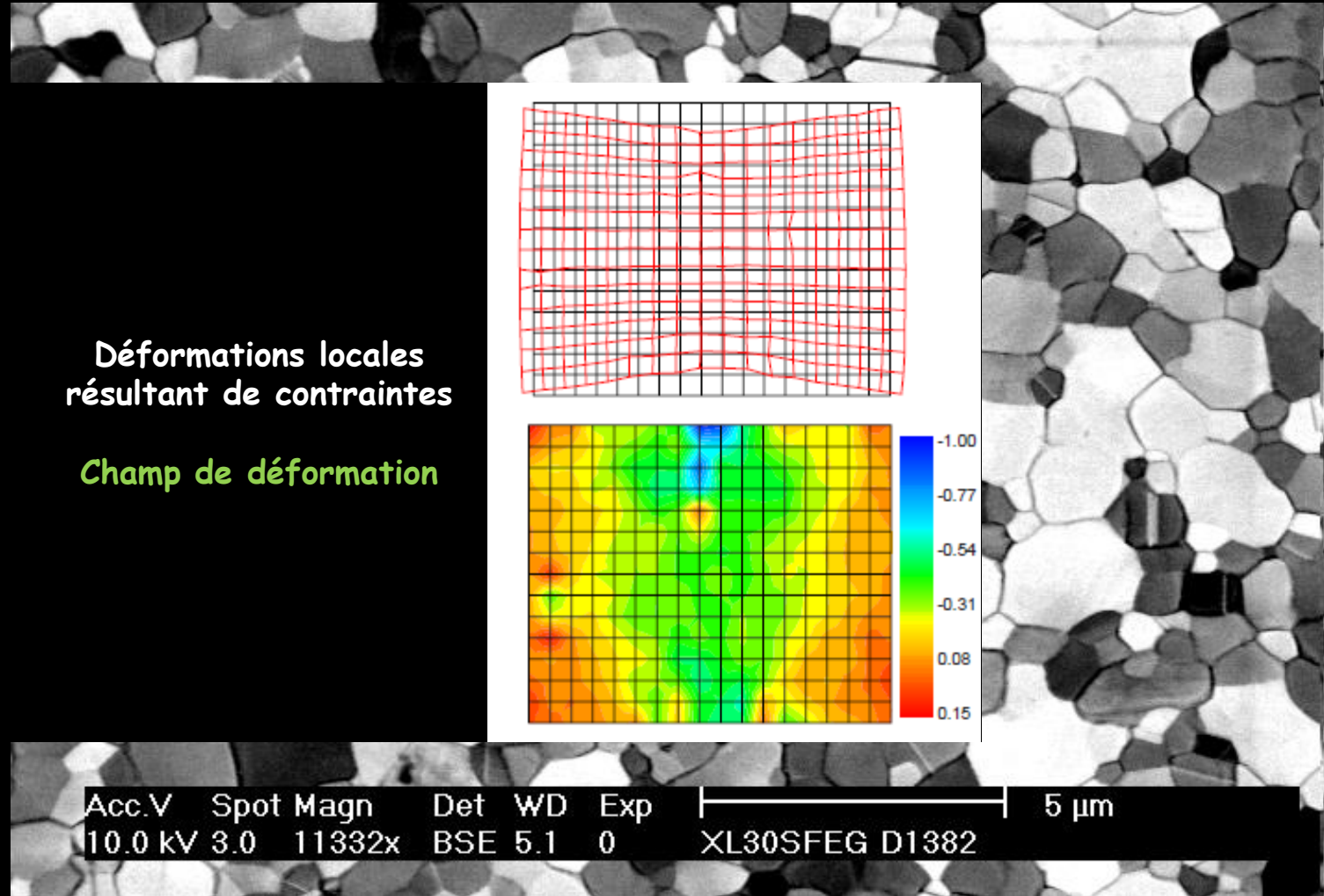
Un exemples d'application typique : L'utilisation de la cohérence

Un faisceau brillant et monochromatique est une onde plane sur un volume de cohérence



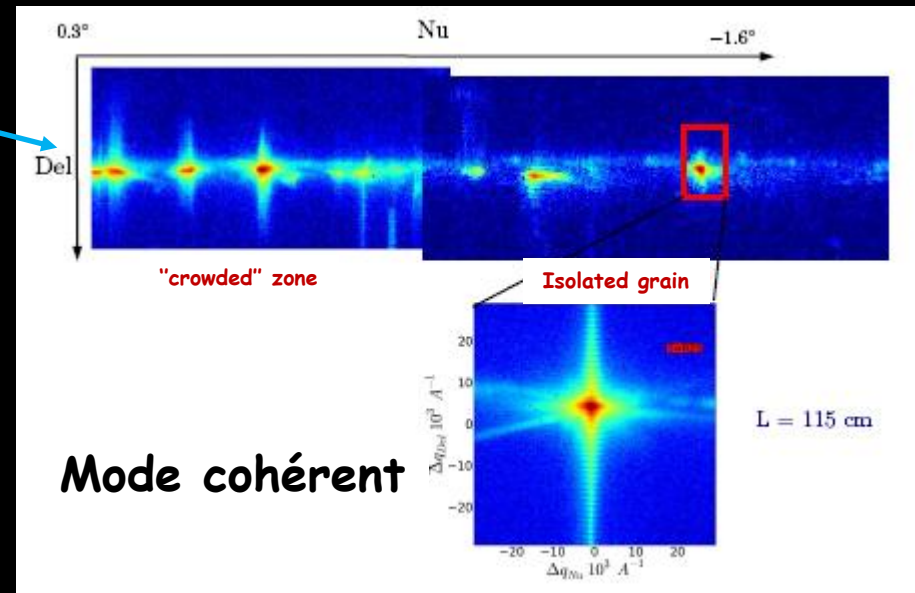
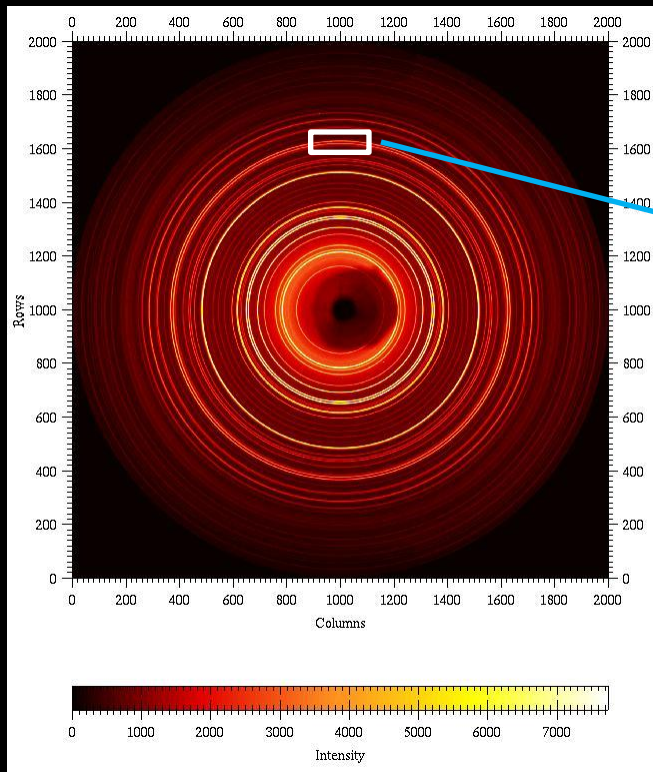
Un cristal plus petit que ce volume
diffractera de manière cohérente (franges)
Pour apporter de nouvelles informations.
... et résoudre le problème des phases.

Diffraction par un **grain individuel sub-micronique** (ID01, CRISTAL)
(Nicolas Vaxelaire, Stéphane Labat et Olivier Thomas, IM2NP) :
Imager les déformations dans un grain d'un **film d'or polycristallin de 375 nm**.



Diffraction par un polycrystal

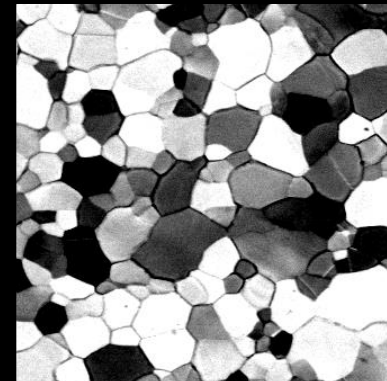
Anneaux Debye-Sherrer, correspondant aux plans réticulaires



Asymétrie des franges
due aux **déformations**

Principale difficulté :
N'illuminer qu'un seul grain !

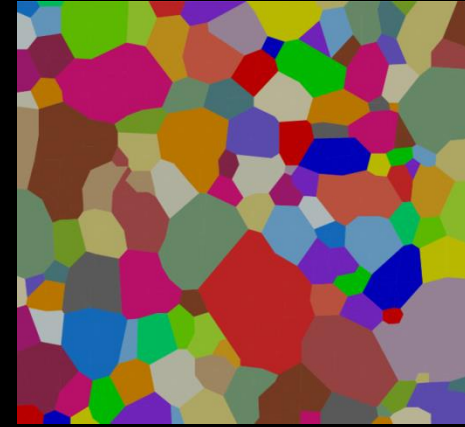
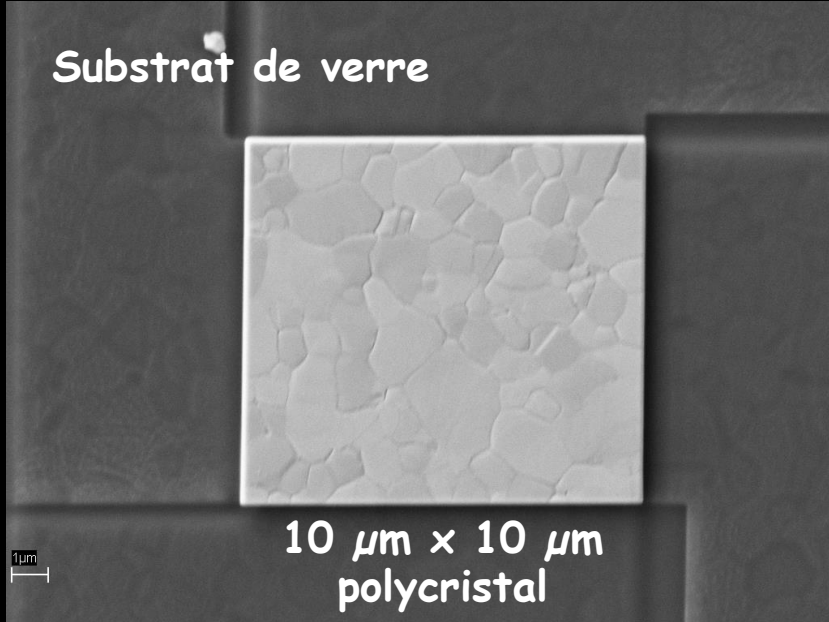
Focaliser ou découper un petit échantillon



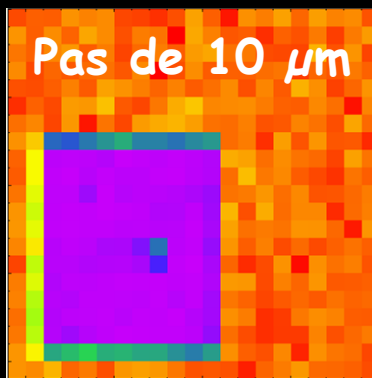
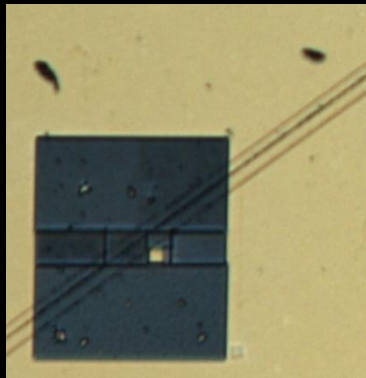
10 μm

Diffraction par un grain d'or individuel

(N. Vaxelaire (PhD), S. Labat et O. Thomas, IM2NP, Marseille) :



Le bloc d' Au consiste en 133 grains,
principalement (111) et quelques (100)
(vérifié par μ -diffraction à l'ESRF-BM32)



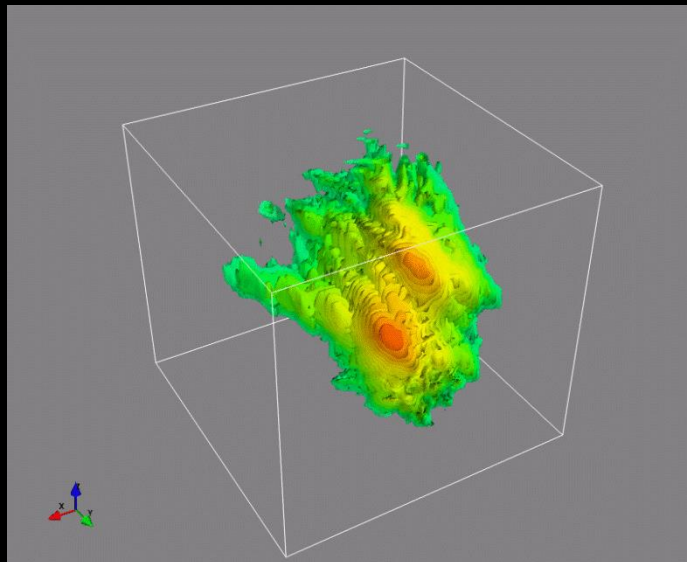
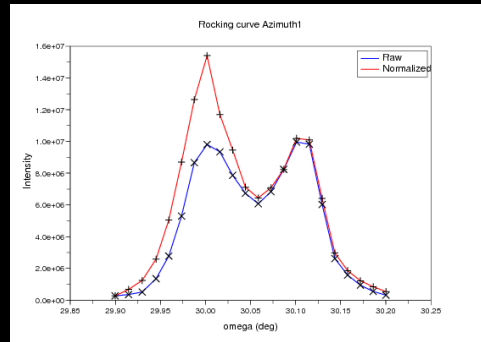
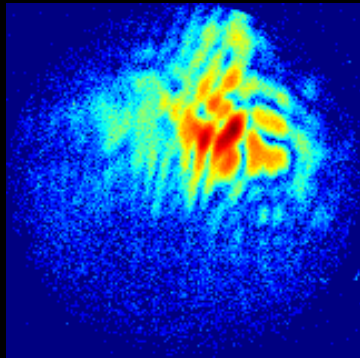
On repère le bloc par fluorescence

On sélectionne le grain...

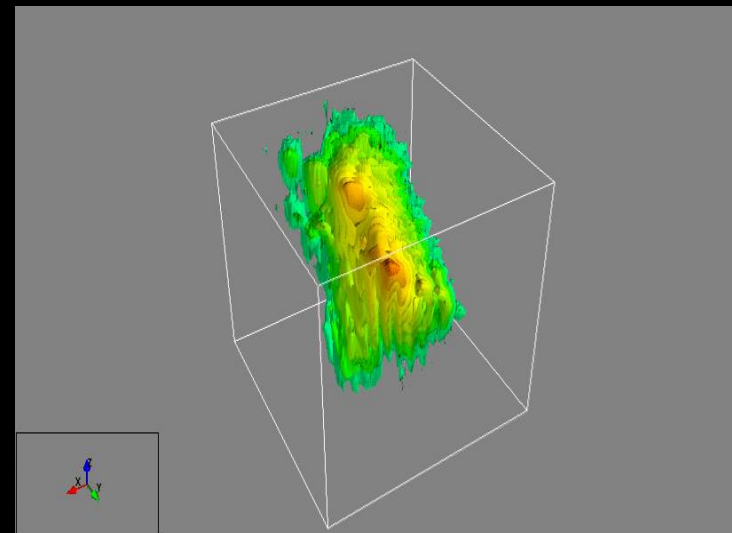
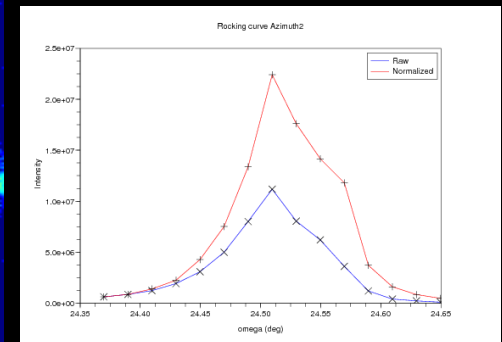
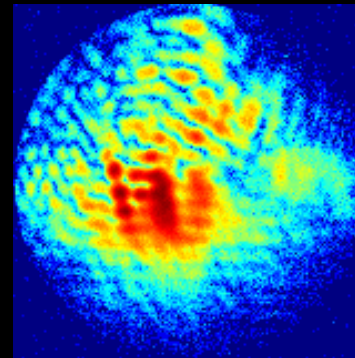
Cartes de diffraction 3D

Rocking Curves d'une tache de Bragg (111) pour différents azimuths

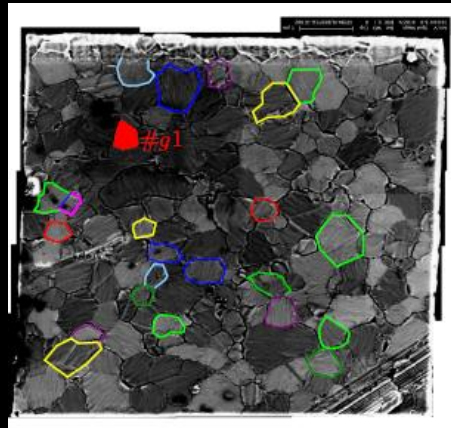
Azimuth $\phi=90^\circ$



Azimuth $\phi=0^\circ$

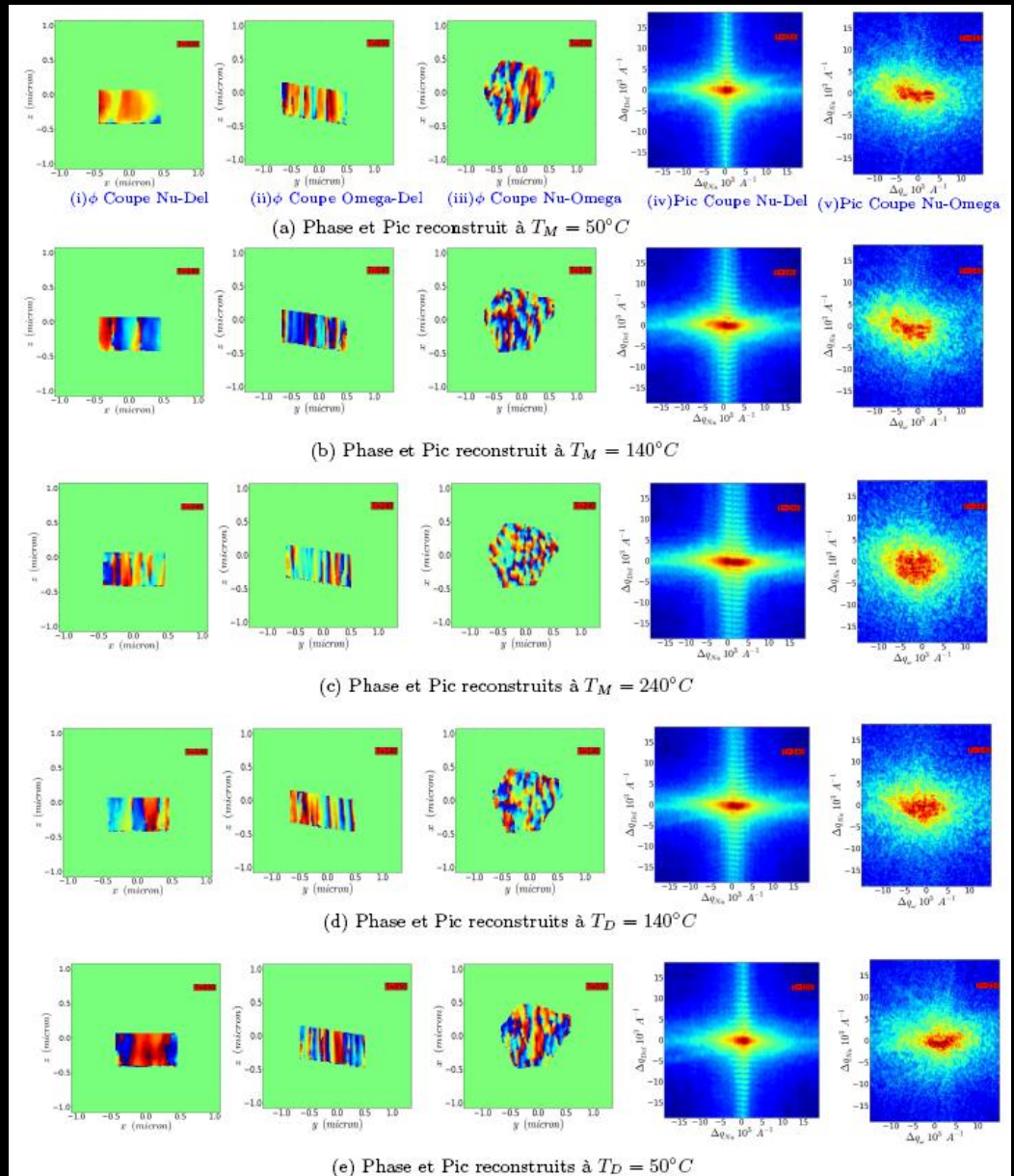


Mesures sur un grain en fonction de la température



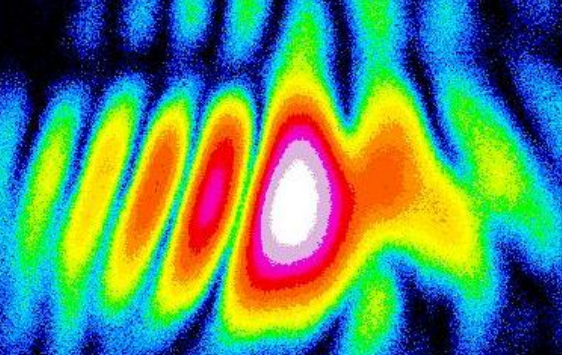
Reconstruction du champ de déformation
60 nm res.

Révèle une anisotropie des déformations à basse température liée aux propriétés mécaniques du film

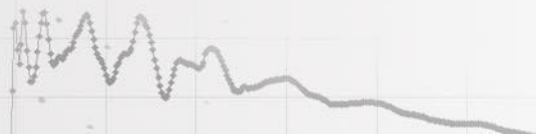
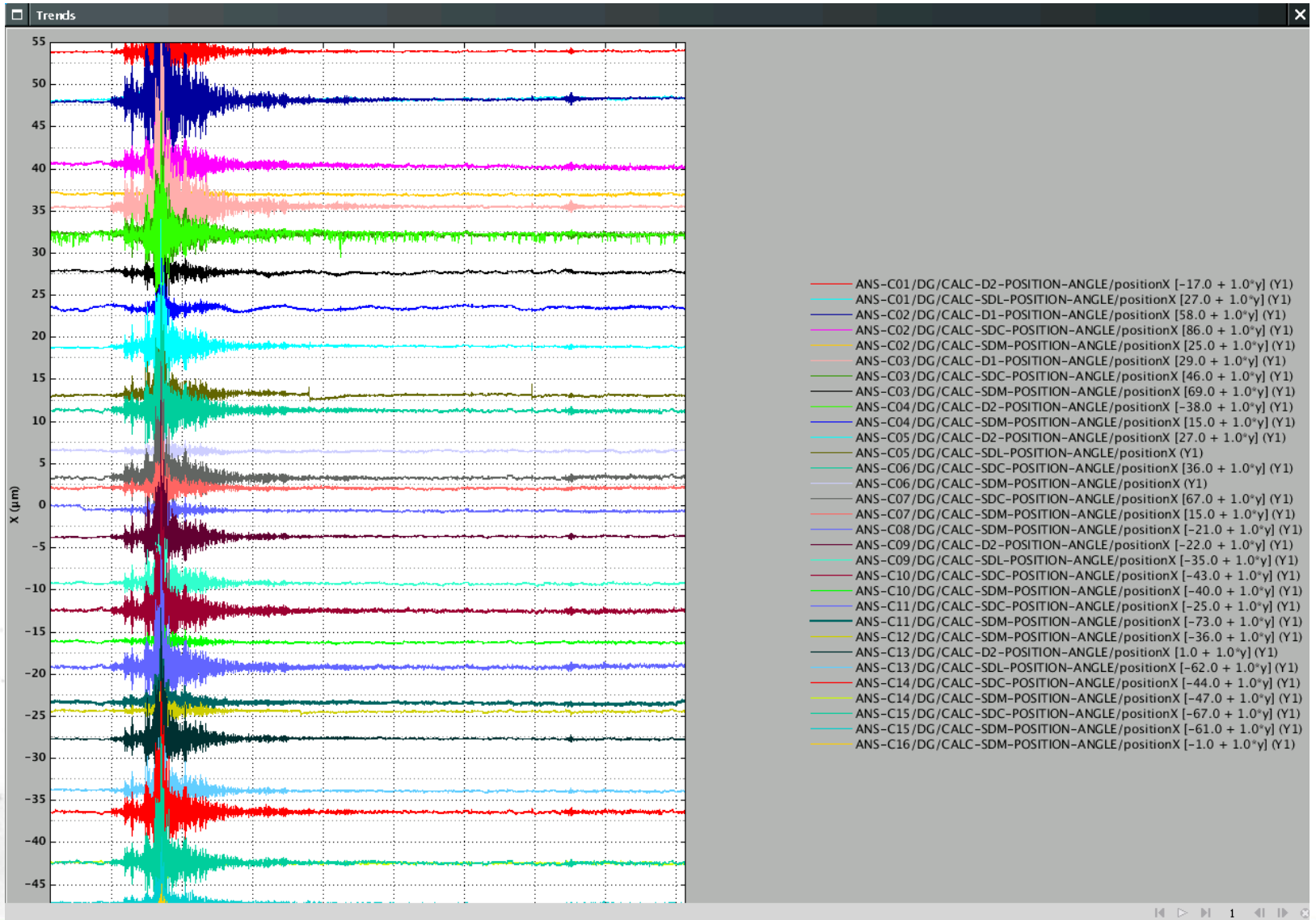


Merci !

www.synchrotron-soleil.fr



Séisme au japon, mars 2011



CRISTAL 2011

janv 2011	févr 2011	mars 2011	avr 2011	mai 2011	juin 2011	juil 2011	août 2011	sept 2011	oct 2011	nov 2011	déc 2011	janv 2012
sam 01	mar 01	mar 01	ven 01	dim 01	mer 01	ven 01	lun 01	jeu 01	sam 01	mar 01	jeu 01	dim 01
dim 02	mer 02	mer 02	sam 02	lun 02	jeu 02	sam 02	mar 02	ven 02	dim 02	mer 02	ven 02	lun 02
lun 03	jeu 03	jeu 03	dim 03	mar 03	ven 03	dim 03	mer 03	sam 03	lun 03	jeu 03	sam 03	mar 03
mar 04	ven 04	ven 04	lun 04	mer 04	sam 04	lun 04	jeu 04	dim 04	mar 04	ven 04	dim 04	mer 04
mer 05	sam 05	sam 05	mar 05	jeu 05	dim 05	mar 05	ven 05	lun 05	mer 05	sam 05	lun 05	jeu 05
jeu 06	dim 06	dim 06	mer 06	ven 06	lun 06	mer 06	sam 06	mar 06	jeu 06	dim 06	mar 06	ven 06
ven 07	lun 07	lun 07	jeu 07	sam 07	mar 07	jeu 07	dim 07	mer 07	ven 07	lun 07	mer 07	sam 07
sam 08	mar 08	mar 08	ven 08	dim 08	mer 08	ven 08	lun 08	jeu 08	sam 08	mar 08	jeu 08	dim 08
dim 09	mer 09	mer 09	sam 09	lun 09	jeu 09	sam 09	mar 09	ven 09	dim 09	mer 09	ven 09	lun 09
lun 10	jeu 10	jeu 10	dim 10	mar 10	ven 10	dim 10	mer 10	sam 10	lun 10	jeu 10	sam 10	mar 10
mar 11	ven 11	ven 11	lun 11	mer 11	sam 11	lun 11	jeu 11	dim 11	mar 11	ven 11	dim 11	mer 11
mer 12	sam 12	sam 12	mar 12	jeu 12	dim 12	mar 12	ven 12	lun 12	mer 12	sam 12	lun 12	jeu 12
jeu 13	dim 13	dim 13	mer 13	ven 13	lun 13	mer 13	sam 13	mar 13	jeu 13	dim 13	mar 13	ven 13
ven 14	lun 14	lun 14	jeu 14	sam 14	mar 14	jeu 14	dim 14	mer 14	jeu 14	lun 14	mer 14	sam 14
sam 15	mar 15	mar 15	ven 15	dim 15	mer 15	ven 15	lun 15	jeu 15	sam 15	mar 15	jeu 15	dim 15
dim 16	mer 16	mer 16	sam 16	lun 16	jeu 16	sam 16	mar 16	ven 16	dim 16	mer 16	ven 16	lun 16
lun 17	jeu 17	jeu 17	dim 17	mar 17	ven 17	dim 17	mer 17	sam 17	lun 17	jeu 17	sam 17	mar 17
mar 18	ven 18	ven 18	lun 18	mer 18	sam 18	lun 18	jeu 18	dim 18	mar 18	ven 18	dim 18	mer 18
mer 19	sam 19	sam 19	mar 19	jeu 19	dim 19	mar 19	ven 19	lun 19	mer 19	sam 19	lun 19	jeu 19
jeu 20	dim 20	dim 20	mer 20	ven 20	lun 20	mer 20	sam 20	mar 20	jeu 20	dim 20	mar 20	ven 20
ven 21	A A A	lun 21	A A A	jeu 21	sam 21	jeu 21	dim 21	mer 21	ven 21	lun 21	mer 21	sam 21
sam 22	A A A	mar 22	ven 22	dim 22	mer 22	ven 22	lun 22	jeu 22	sam 22	mar 22	jeu 22	dim 22
dim 23	A A A	mer 23	sam 23	lun 23	jeu 23	sam 23	mar 23	ven 23	dim 23	mer 23	ven 23	lun 23
lun 24	A A A	jeu 24	dim 24	mar 24	ven 24	dim 24	mer 24	sam 24	lun 24	jeu 24	sam 24	mar 24
mar 25	T T T	ven 25	lun 25	mer 25	sam 25	lun 25	jeu 25	dim 25	mar 25	ven 25	dim 25	mer 25
mer 26	M M M	sam 26	mar 26	jeu 26	dim 26	mar 26	ven 26	lun 26	mer 26	sam 26	lun 26	jeu 26
jeu 27	4C	dim 27	mer 27	ven 27	lun 27	mer 27	sam 27	mar 27	jeu 27	dim 27	mar 27	ven 27
ven 28	Calib	lun 28	jeu 28	sam 28	mar 28	jeu 28	dim 28	mer 28	ven 28	lun 28	mer 28	sam 28
sam 29	2C	mar 29	ven 29	dim 29	mer 29	ven 29	lun 29	jeu 29	sam 29	mar 29	jeu 29	dim 29
dim 30	A A A	mer 30	sam 30	lun 30	jeu 30	sam 30	mar 30	ven 30	dim 30	mer 30	lun 30	A A A
lun 31	A A A	jeu 31	mar 31	dim 31	mer 31	dim 31	mer 31	lun 31	dim 31	mer 31	dim 31	mer 31

CRISTAL 24/06/2011

A	5328 heures	Faisceau Lignes	
A	1176 heures	Temps Accélérateurs	
.	2280 heures	Arrêt Machine	
.	366,0 j	Verif	
I	222 Jours	Faisceau Lignes	38,7 semaines
A	49 Jours	Temps Machine	
.	95 Jours	Arrêt Machine	13,6 semaines

Fonctionnement	38,7	Semaines	Lignes
Run 1	39 j	5,6 sem	32 j
Run 2	40 j	5,7 sem	32 j
Run 3	21 j	3,0 sem	19 j
Run 4	66 j	9,4 sem	55 j
Run 5	55 j	7,9 sem	45 j
Run 6	50 j	7,1 sem	41 j
Total	271 j		224 j

Objectif

5 500 heures Faisceau Lignes + RP
1 200 heures Temps Machine

8h x 365 = 2920 !!!

Arrêt	13,6	Semaines	Ouvrés
Arrêt 1	18 j		12 j
Arrêt 2	11 j		9 j
Arrêt 3	5 j		3 j
Arrêt 4	11 j		8 j
Arrêt 5	29 j		20 j
Arrêt 6	10 j		8 j
Arrêt 7	11 j		6 j
Total	95 j		66 j

Optique

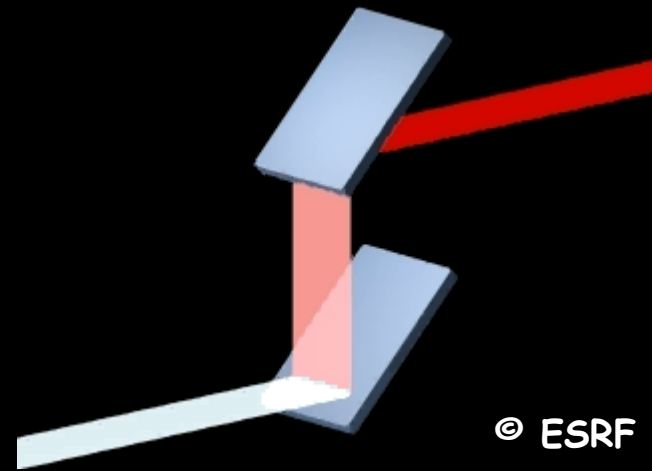
Mise en forme du faisceau :

Monochromatisation (choix de l'énergie, domaine, résolution)

Focalisation (taille, où)

Monochromateur
2 cristaux parfaits

$$2d \sin \theta = \lambda$$



© ESRF

Focalisation
Horizontale (450 μm)
Verticale (miroirs : 20 μm)

Principe des expériences pompe-sonde

1 fs \rightarrow 0,3 μ m

1.8 fs obtenues
au LCLS en 2010

Dynamique lente

Rapide Ultra-rapide

1 s

10^{-3} s

10^{-6} s

10^{-9} s

Transitions induites

Phonons acoustiques

Int e-ph

Vibrations molécules
Réactions chimiques

Int e-e

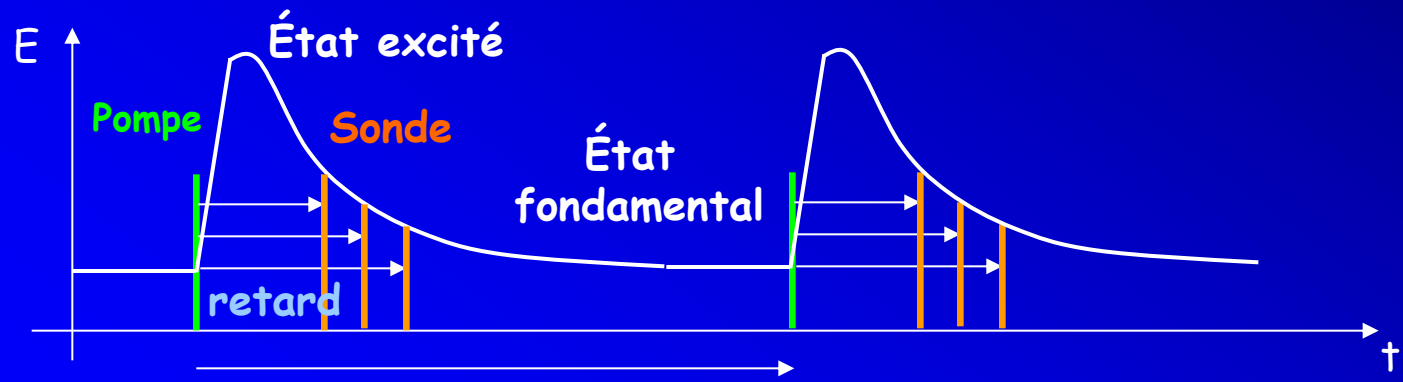
Fréquences e^-
13.6 eV \leftrightarrow 3.2 as

Femtochimie Ahmed H. Zewail
Nobel chimie (1999)

Mesures stroboscopiques

- Étude d'états métastables (réactions chimiques, désexcitations e^- , transitions de phases)
- Temps de vie très court (ms à la fs)
- Une pompe excite le système, une sonde l'étudie après un retard variable.

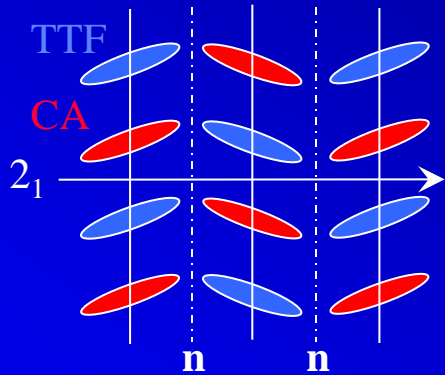
$$T_{\text{sonde}} \sim T_{\text{pompe}} \ll T_{\text{retard}} \ll T_{\text{rép.}}$$



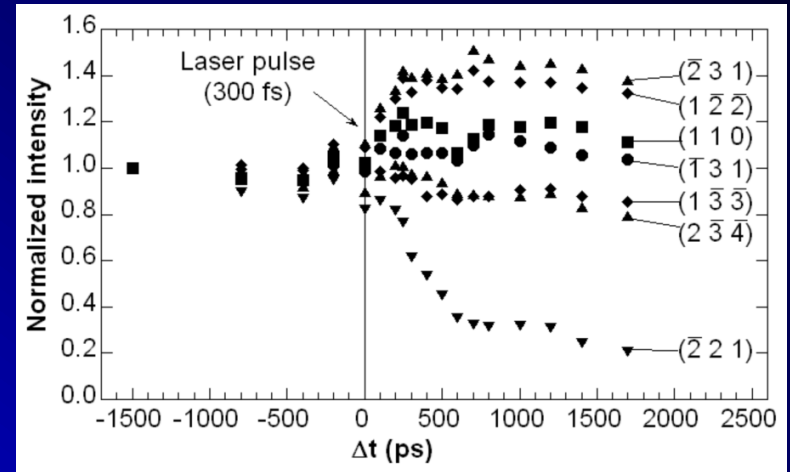
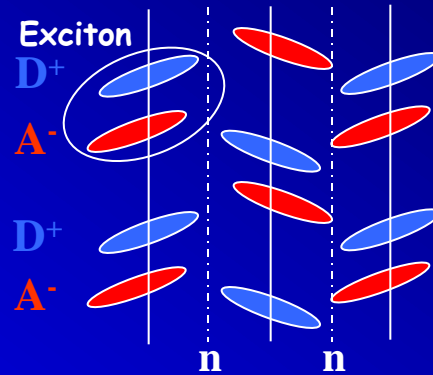
Taux de répétition

Transition de phases photo-induite : ~ 500 ps

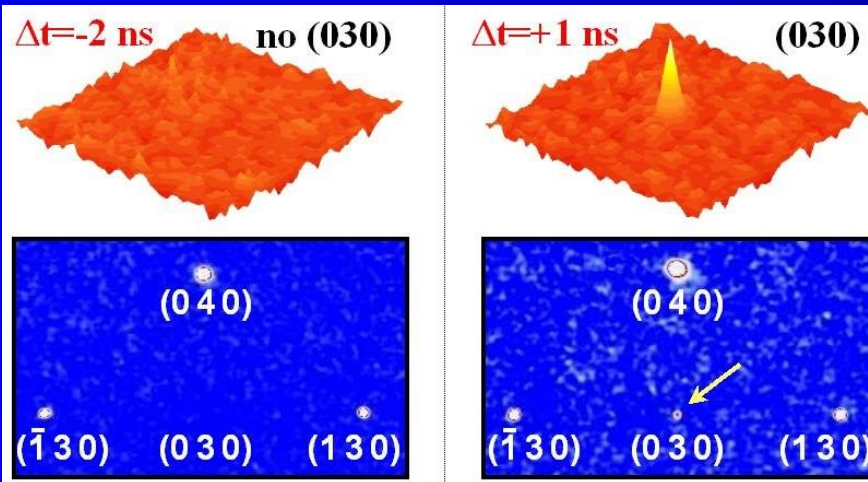
Neutre ($P2_1/n$)



Ionique/ferroélectrique (Pn)



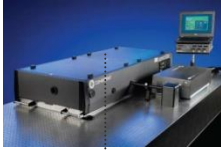
Ordre ferroélectrique
à longue distance
photo-induit en ~ 500 ps
(Laser 800 nm)



ESRF ID9: E.Collet et al., *Science* 300, 612 (2003)

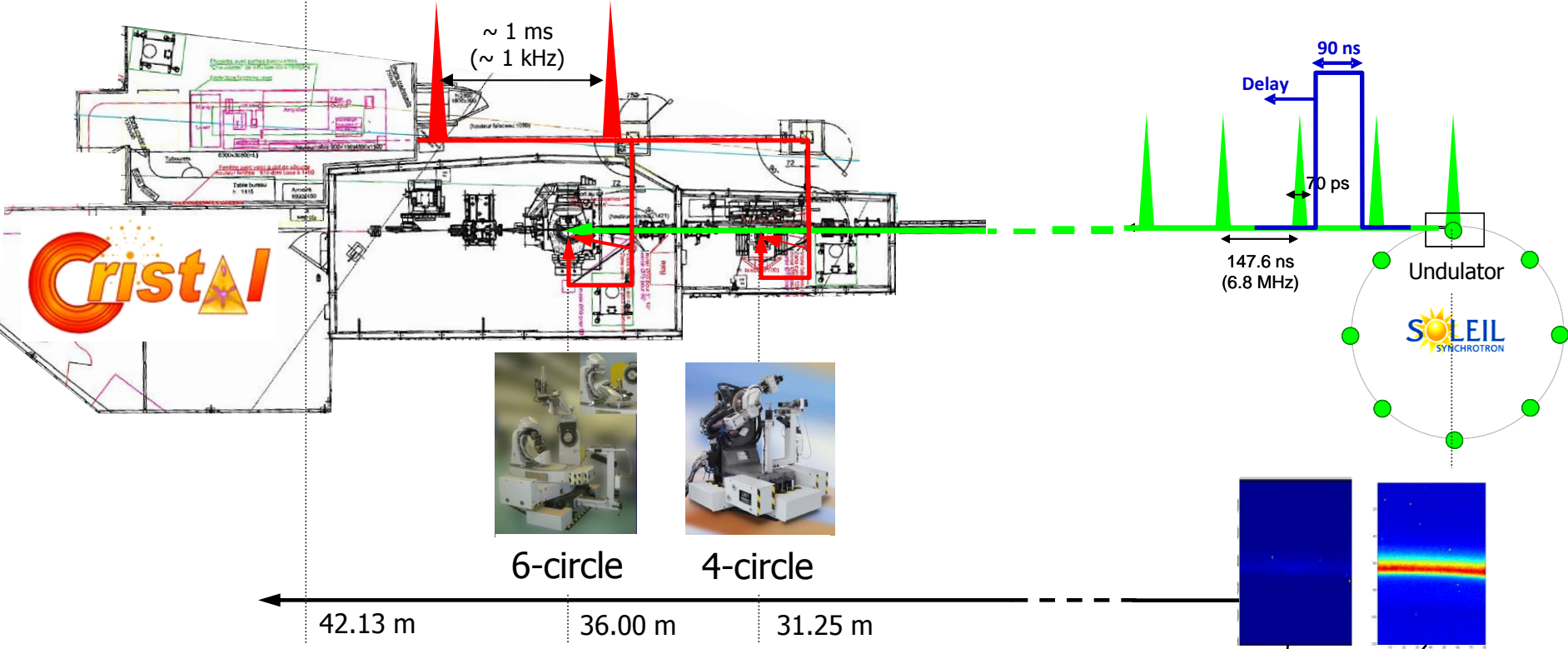
• Etude des mécanismes
des transitions de phase en temps
et non en température...

CRISTAL: future installation for pump-probe experiments



Ti:Sa oscillator + regenerative Ti:Sa amplifier

- $\lambda = 800 \text{ nm}$, 25 fs FWHM
- 500 $\mu\text{J}/\text{pulse}$ @ 10 kHz, 6 mJ/pulse @ 1 kHz



Cristal

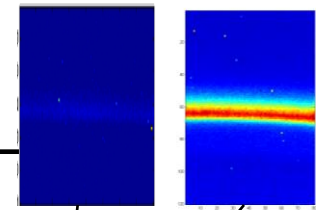


6-circle



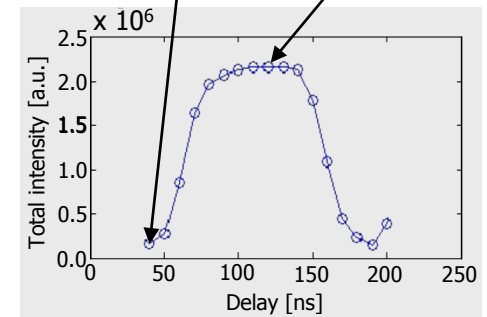
4-circle

42.13 m 36.00 m 31.25 m



XPAD detector

- Photon counting enabled on level high of a logic gate
- Up to **847 kHz frequency**



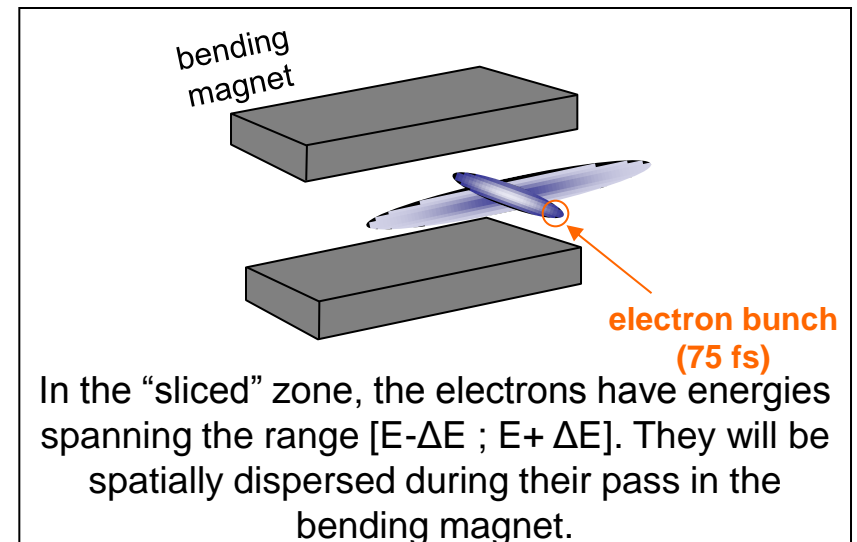
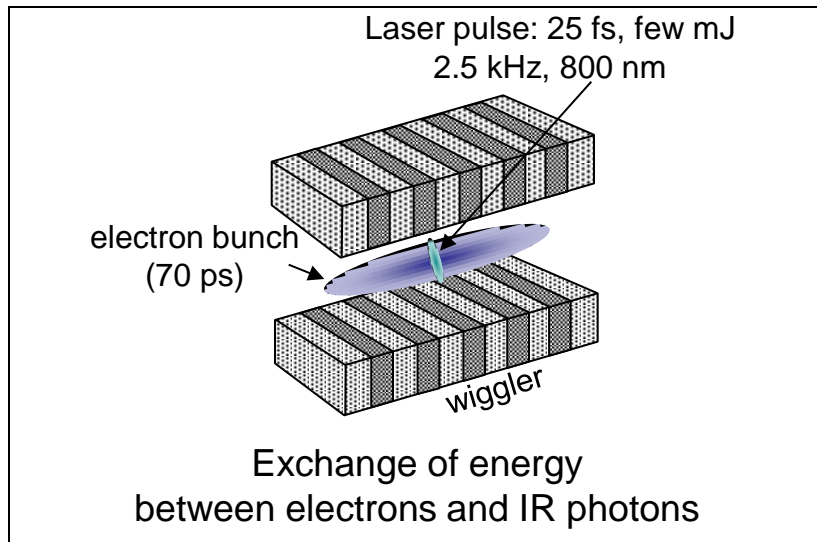
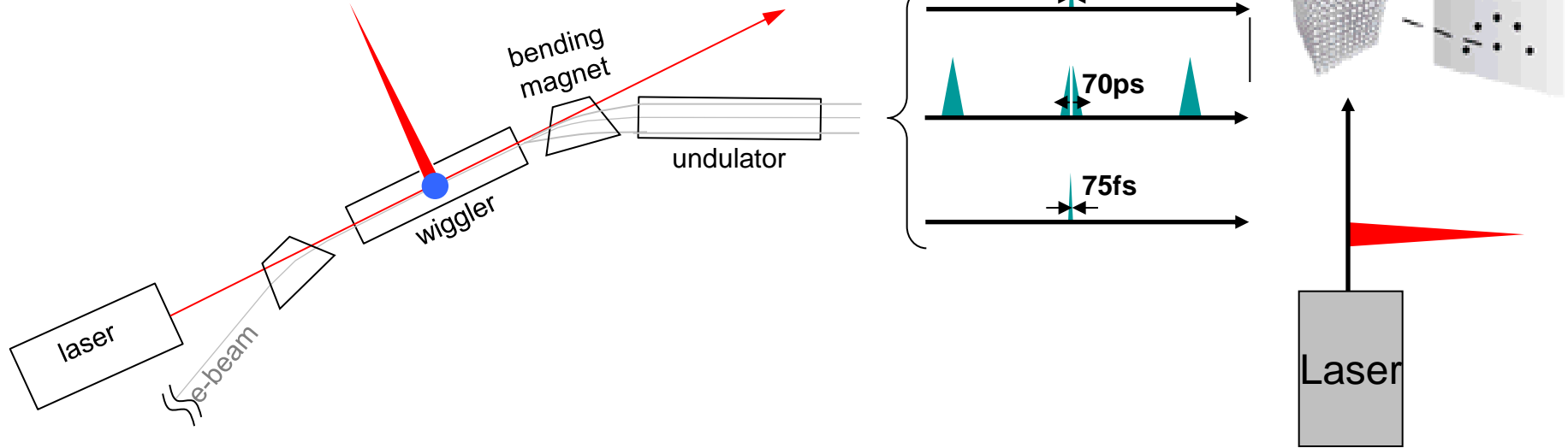
Sub-ps resolution: slicing

- Time resolution ~ 100 fs

Seminal paper :

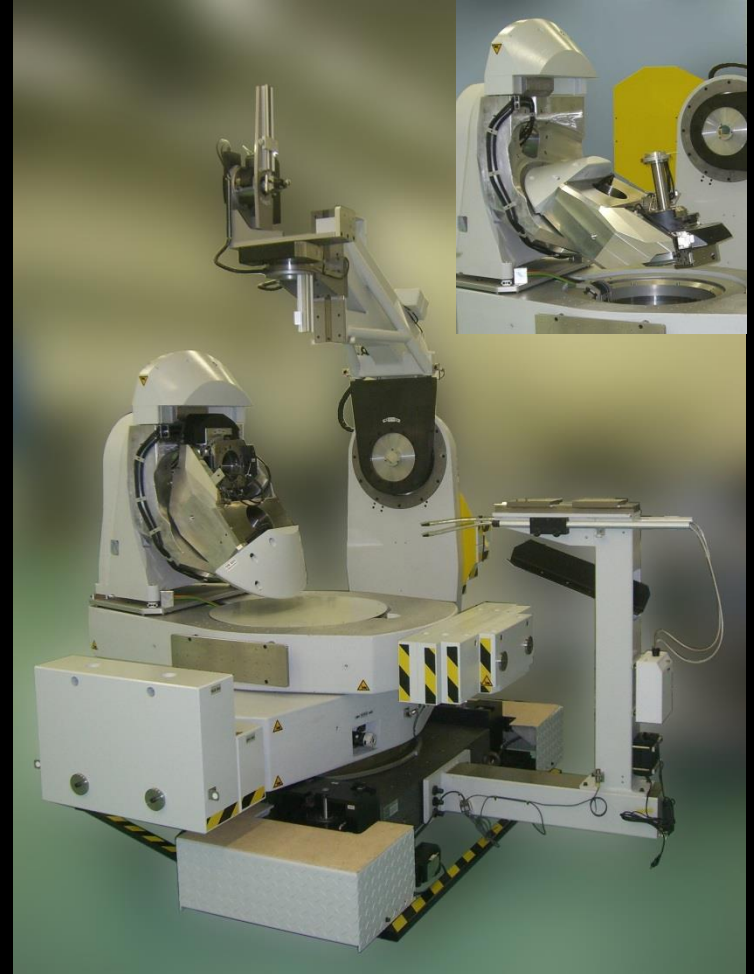
Zholents and Zolotarev, PRL **76** 912 (1996)

Available at Bessy, SLS, ALS



6-C Diffractometer

- 6-circles Kappa : 4-circles sample + 2 circles detector (+ 3 analyzer)
- Bulky environments
- Detectors :
 - CCD 4-C
 - Direct illuminated CCD
 - Point detectors
- General characteristics :
 - Weight : ~ 4.5 T
 - Volume available (R=296 mm)
 - Load on phi circle : 20 kg (35 kg max)
 - SOC sample = 60 μm
 - SOC detector = 44 μm (70 kg @ 400 mm)
 - COC μ and gamma < 10 μm
 - Velocity : 4 et 8° .s⁻¹
 - Resolution (encoders) : 0.0001°
 - Accuracy : 0.001°
- Control system software : SOLEIL



Resonant, Coherent Diffraction, Diffuse scattering

Le site et son budget

(€ courants)

Le budget total pour la période de 2002 à 2012 : **634 M€**

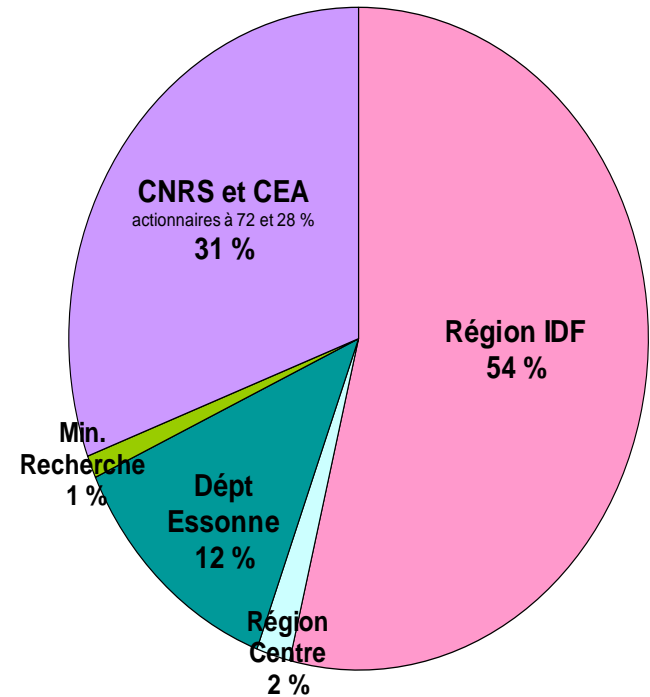


Répartition du budget pour 2002-2012

- Investissement **276,1 M€**
bâtiments 86,7 M€, sources 79 M€, lignes 87,7 M€, supports 22,7 M€
- Fonctionnement **100,6 M€**
- Salaires (2002-2009) **257,3 M€**

Budget de fonctionnement à régime constant (CE2009) : **57,0 M€/an**

dont 60% personnel (357 permanents+ 50 thésards/postdoc)



Contributions à l'investissement

Pourquoi les ciels des toiles de Murillo ont-ils viré au gris ?

Comprendre l'origine de la détérioration du smalt, pigment bleu, très utilisé entre le XVIe et le XVIIIe siècle par de grands peintres tels que Véronèse ou Murillo.

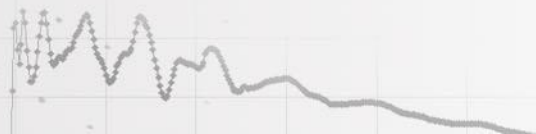
Cette altération qui rend grisâtre les ciels bleus des toiles de Murillo, est décrite dès le XVIIe siècle mais le phénomène restait encore inexpliqué.

Les analyses réalisées montrent qu'il existe un lien entre la migration des ions potassium hors des grains de pigment (processus par ailleurs connu d'altération des verres), et le changement de coordination de l'ion cobalt, Ce *changement d'environnement de l'ion cobalt* implique la perte de la couleur bleue.



*Ligne LUCIA
Absorption X
Rayons X tendres*

The Heavenly and Earthly Trinities ('The Pedroso Murillo') oeuvre de Bartolomé Estaban Murillo. Les prélèvements ont été réalisés dans la zone située à droite de la tête de l'enfant, au centre du tableau. © National Gallery, London.



Une ligne : 3 cabanes... au moins

Anneau de
stockage

Ligne de
lumière

Cabine optique



Station

