



PHYSIQUE ET EUROPE

Contexte européen de la Physique

Jean-Pierre Gaspard
Université de Liège
jp.gaspard@ulg.ac.be

Le rôle de la physique mathématique est de bien poser les questions,
ce n'est que l'expérience qui peut les résoudre.

*Henri Poincaré à Pierre Weiss,
ca. novembre 1911*



*Infrastructures européennes
de la recherche.*

Les Grands Yeux de la Science

*Image en lumière visible
de la nébuleuse du crabe
Telescope terrestre: Observatoire Palomar*

Pourquoi l'Europe?

1. Taille (coût) des instruments
2. Efficacité
3. Compétition

Réalisations

- CERN
- ESA, ESO
- ILL, ESRF
- EFDA
- EMBL



L'apport de l'Europe?

1. Recherche sur infrastructures
2. Réseaux de recherche (ex. )
3. Dissémination de la Science
4. Enseignement

Physics on stage

Science on stage

<http://www.ill.fr/scienceonstage2007/>

Science in school

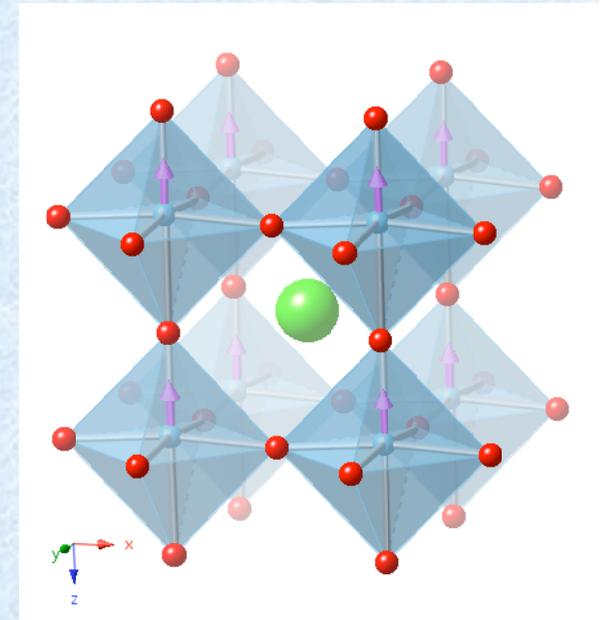
www.scienceinschool.org



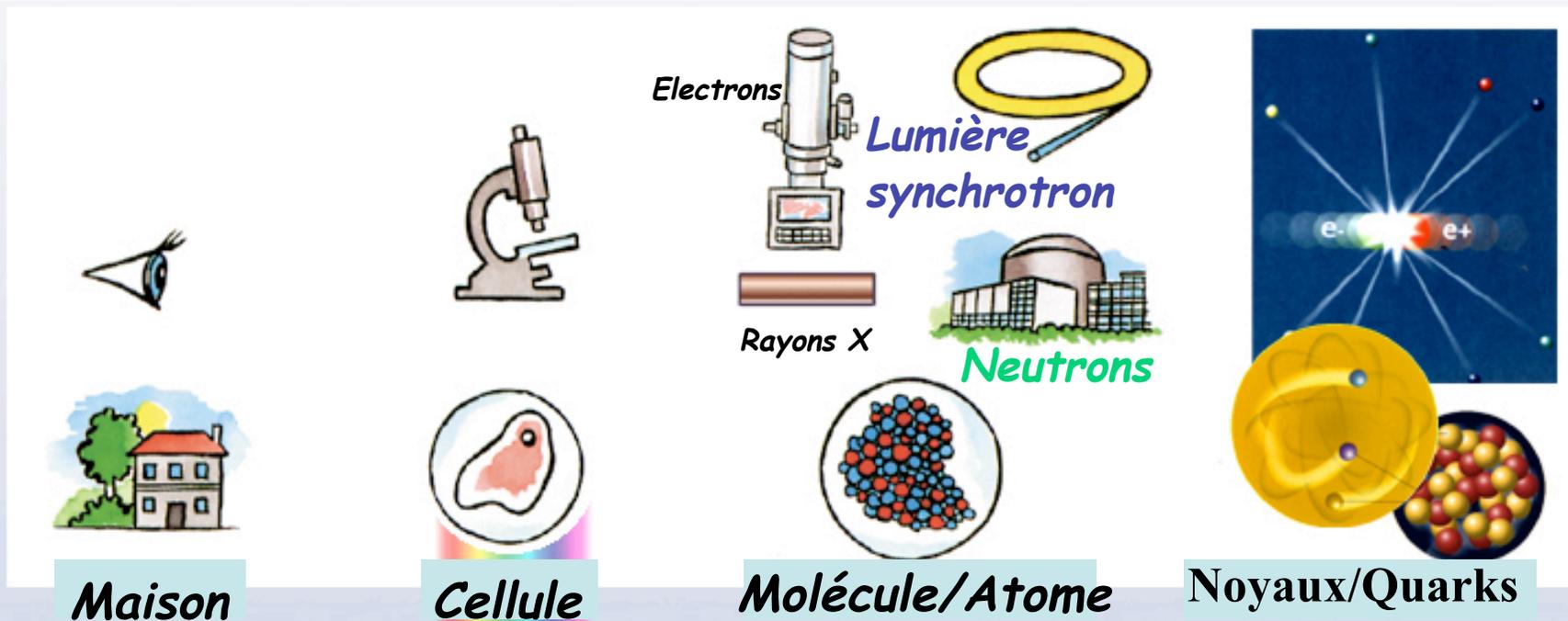
Etude de la matière

- Les deux questions
 - a) Où sont les atomes? ($\lambda \approx \text{\AA}$)
 - b) Que font-ils? ($\Delta E \approx \text{meV}$)
- Les réponses obtenues avec
 - a) Rayons X et neutrons ($\lambda \approx \text{\AA}$)
 - b) Neutrons ($E \approx 25 \text{ meV}$) (et Rayons X, $E \approx 10 \text{ keV}$)

Relations structures-propriétés
=> amélioration des matériaux



Visible et invisible: microscopie avec la lumière synchrotron et les neutrons



Ondes électromagnétiques



ondes radio

infra-
rouge

lumière
visible

ultra-
violet

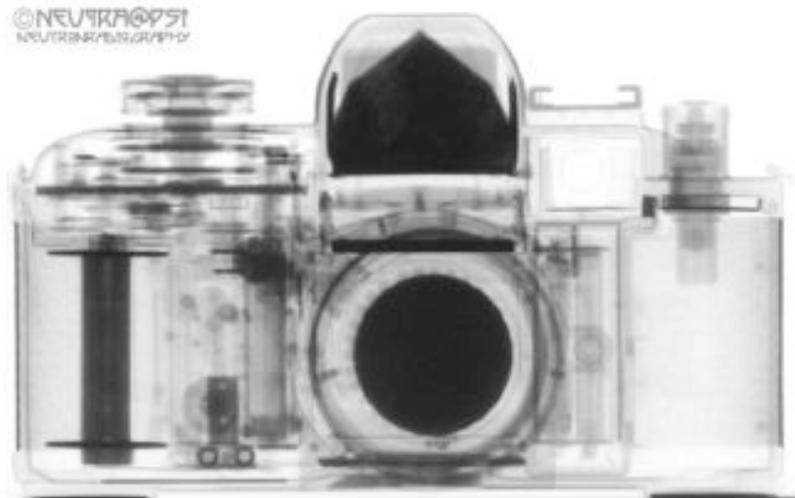
rayons X
mous

rayons X
durs

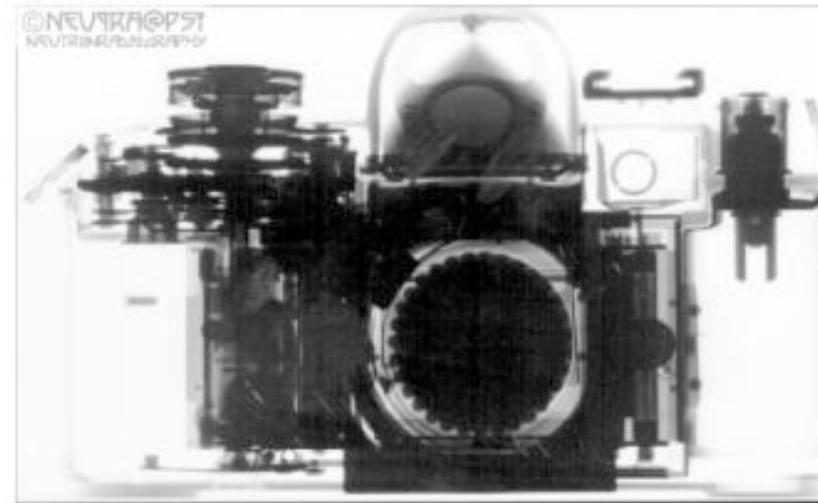
rayons gamma

Photographies aux rayons X et aux neutrons

aux neutrons



aux rayons X



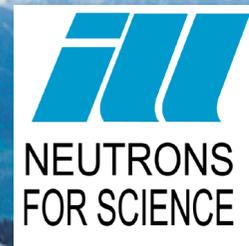
*« L'essentiel est
invisible à l'œil »*

Le petit Prince

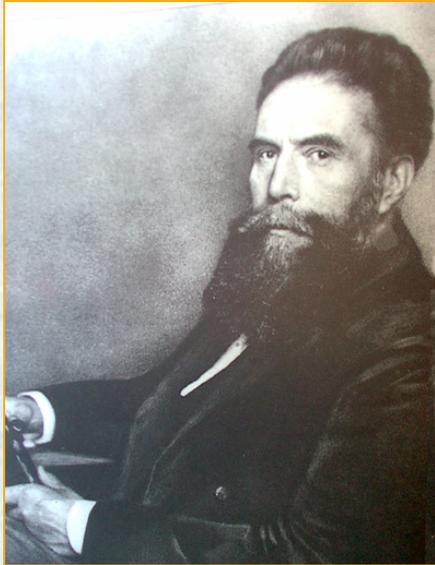
A. de Saint-Exupéry



Grenoble



A. Les rayons X



*C.W. Röntgen (1845-1923)
Strasbourg (1872-79)
Découverte des rayons X (1895)
Premier prix Nobel (1901)*

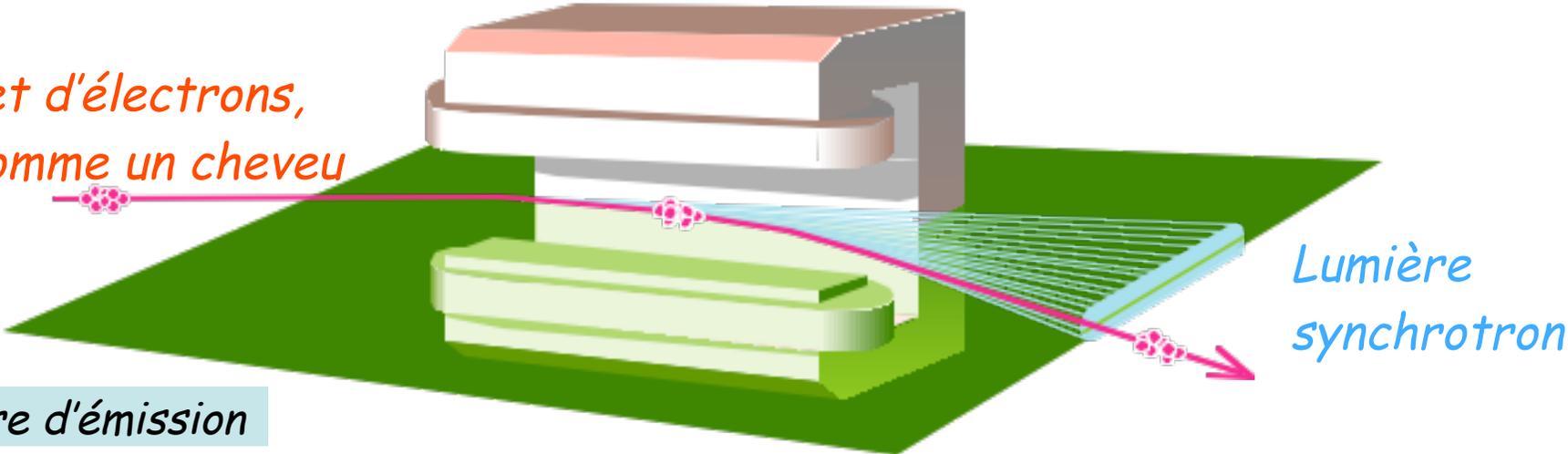


Utilisés en

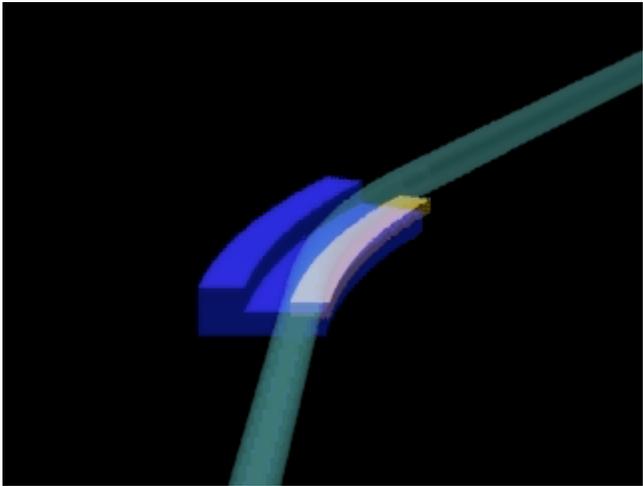
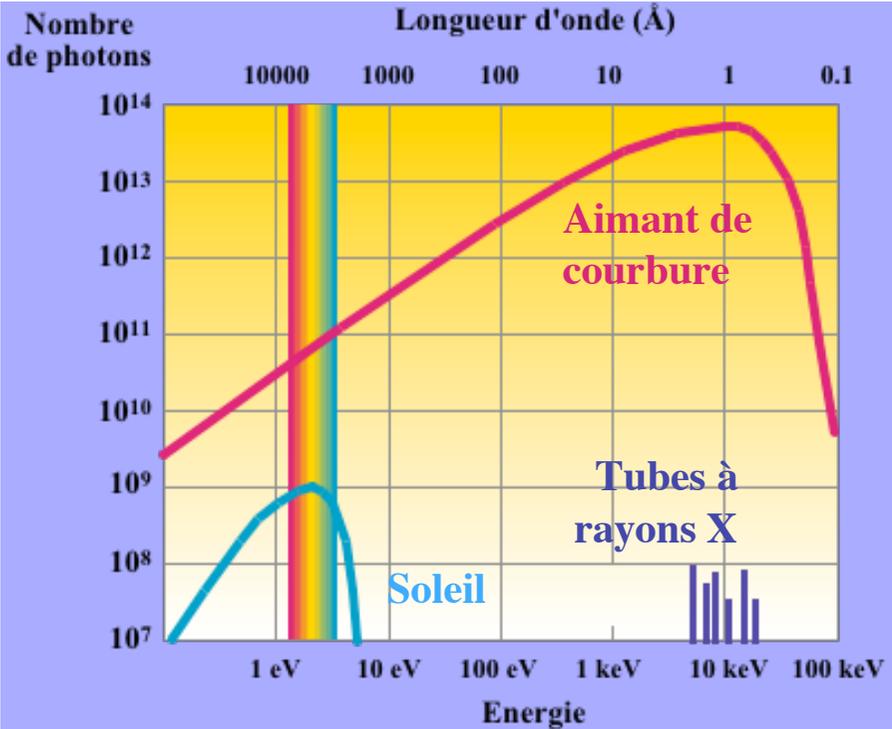
- Transmission (imagerie)
- Diffraction
- Absorption (EXAFS)

Production de la lumière synchrotron

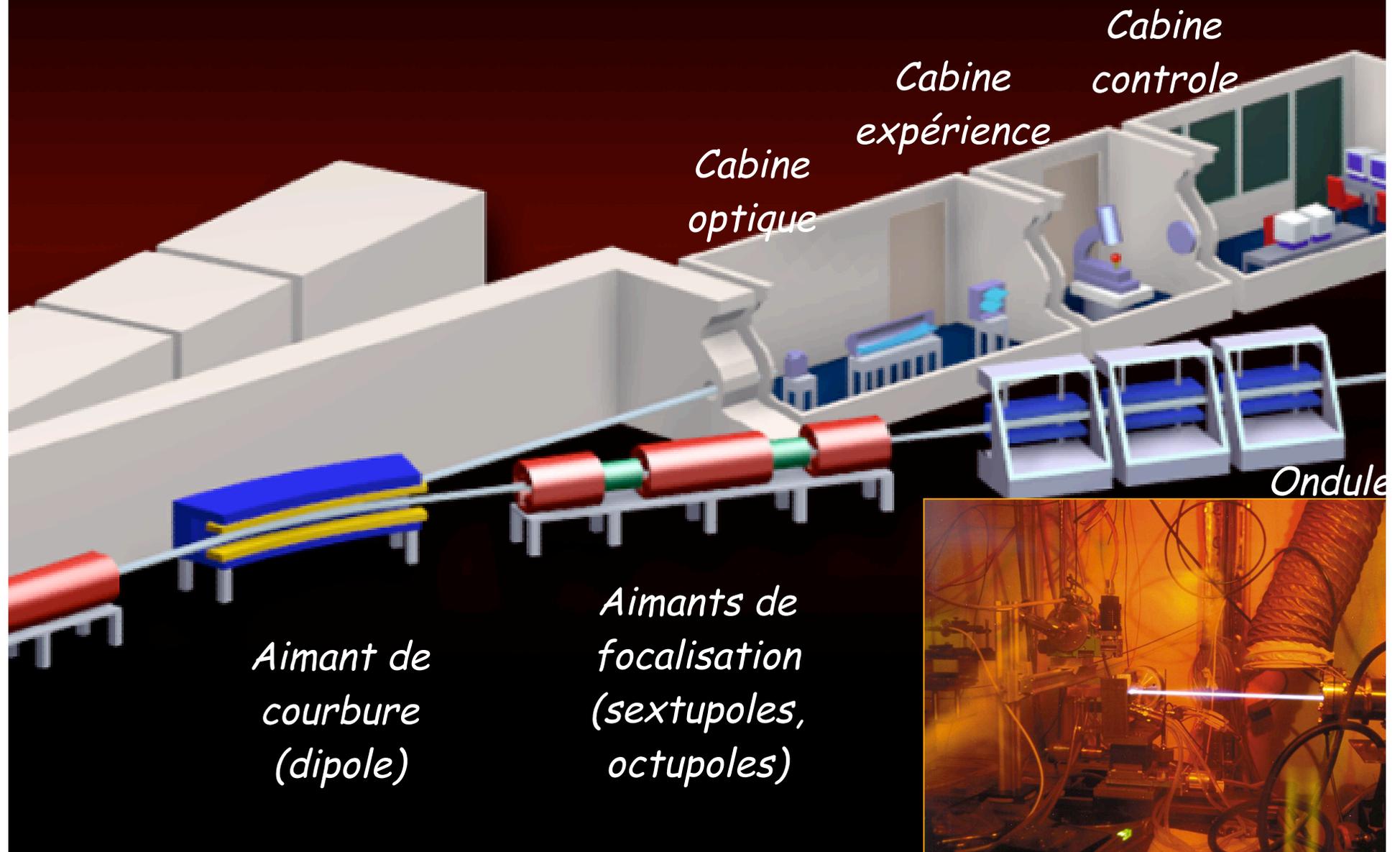
Paquet d'électrons,
fin comme un cheveu



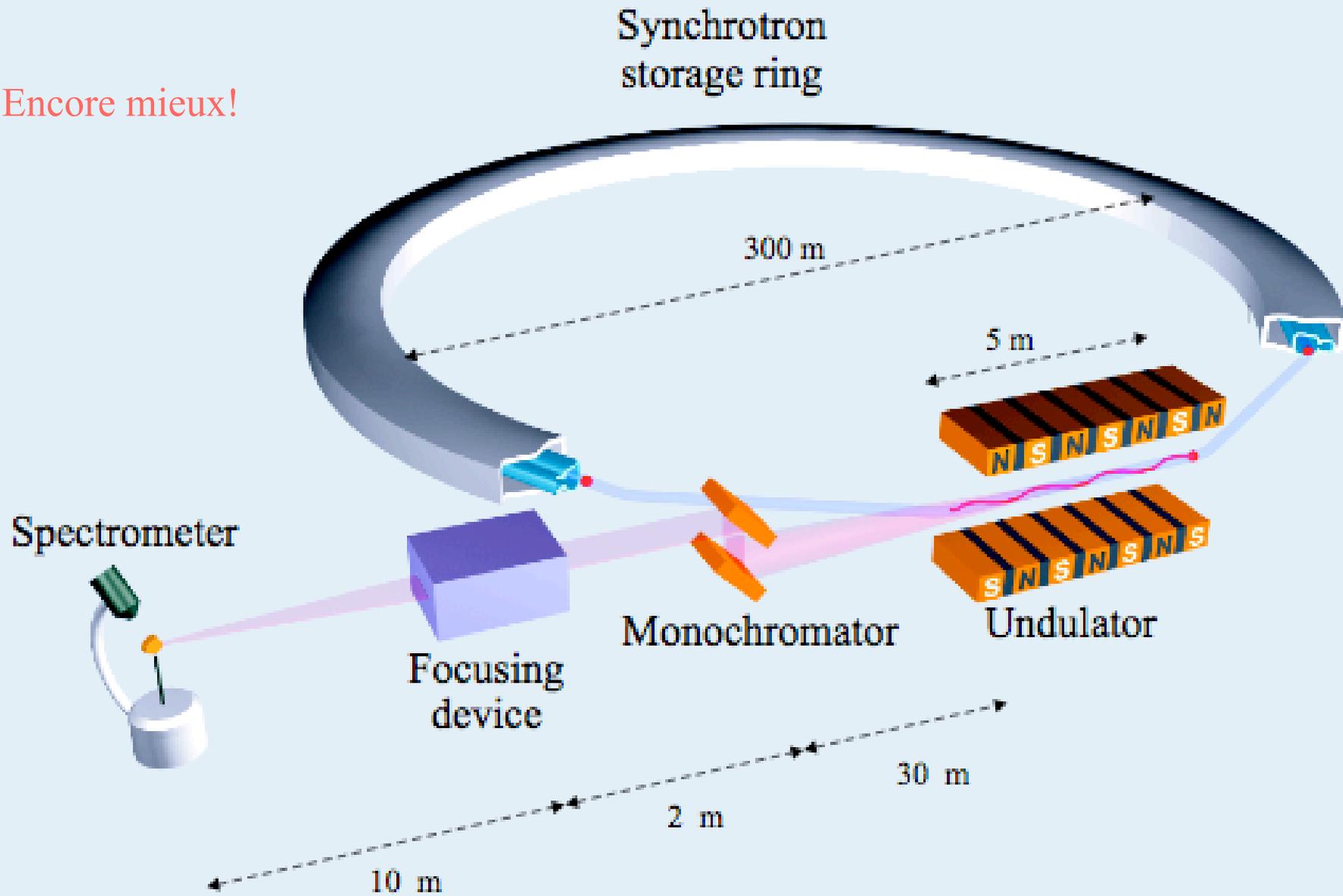
Spectre d'émission



40 lignes de lumière X synchrotron spécialisées



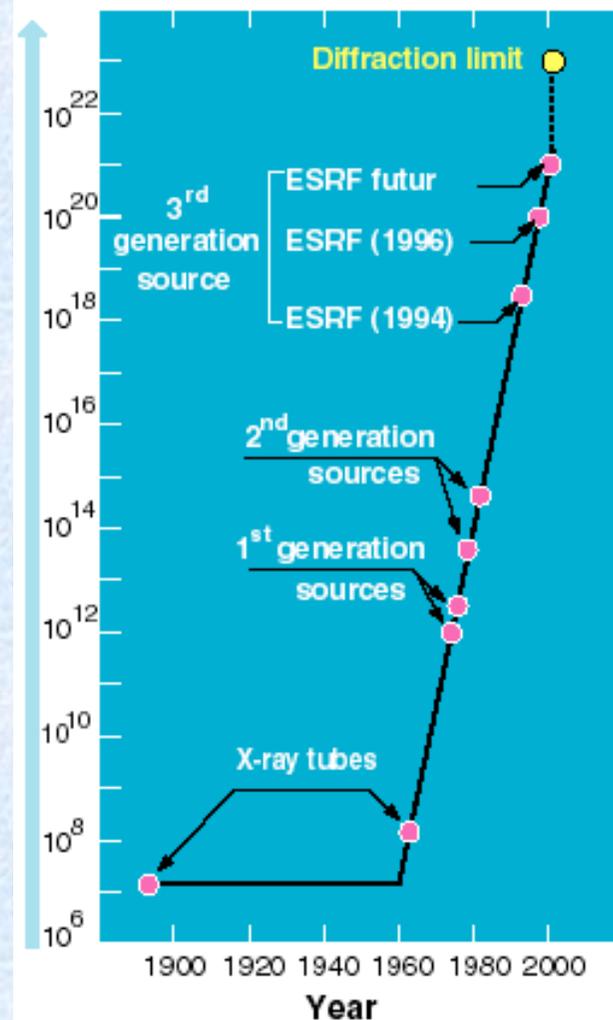
Encore mieux!



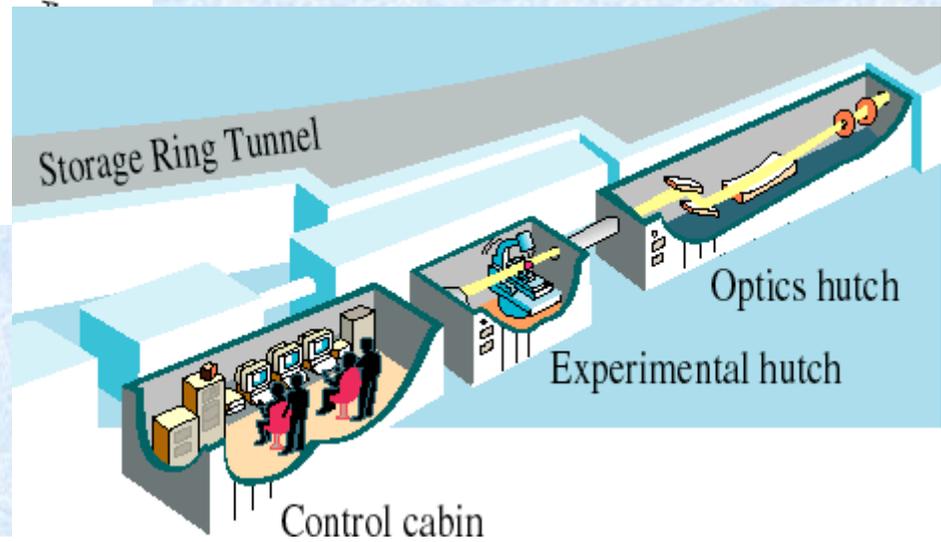
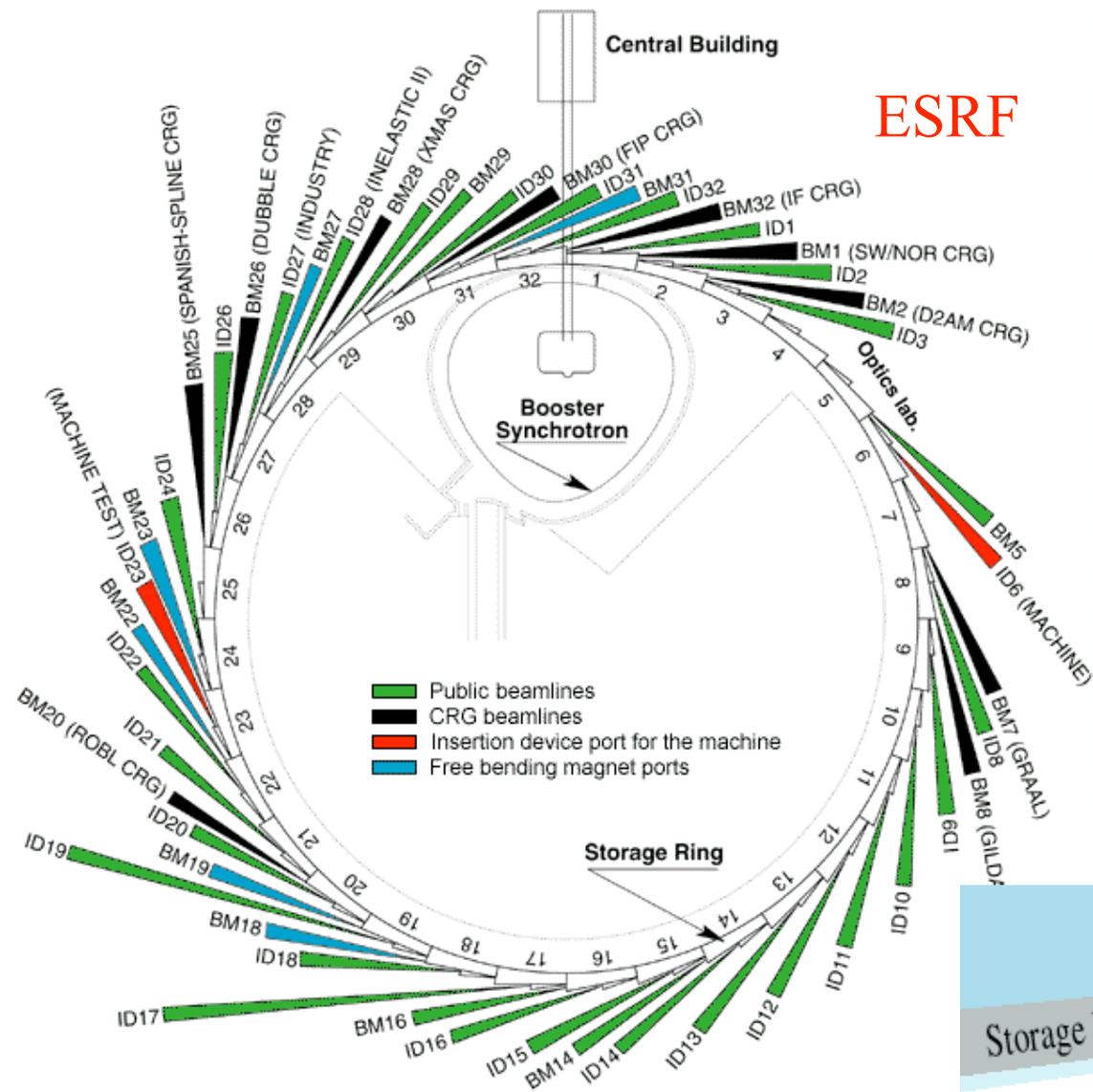
L'ESRF: un anneau de lumière, 40 lignes, 600 personnes: un microscope géant, au service de 5000 chercheurs/an.



Brilliance of the X-ray beams
(photons / s / mm² / mrad² / 0.1% BW)



ESRF



L'ESRF, une coopération de 18 pays



*L'ESRF est une société
civile de droit français dont
le financement est assuré par 18 pays*

Budget annuel : 75 MEuros

Répartition du budget

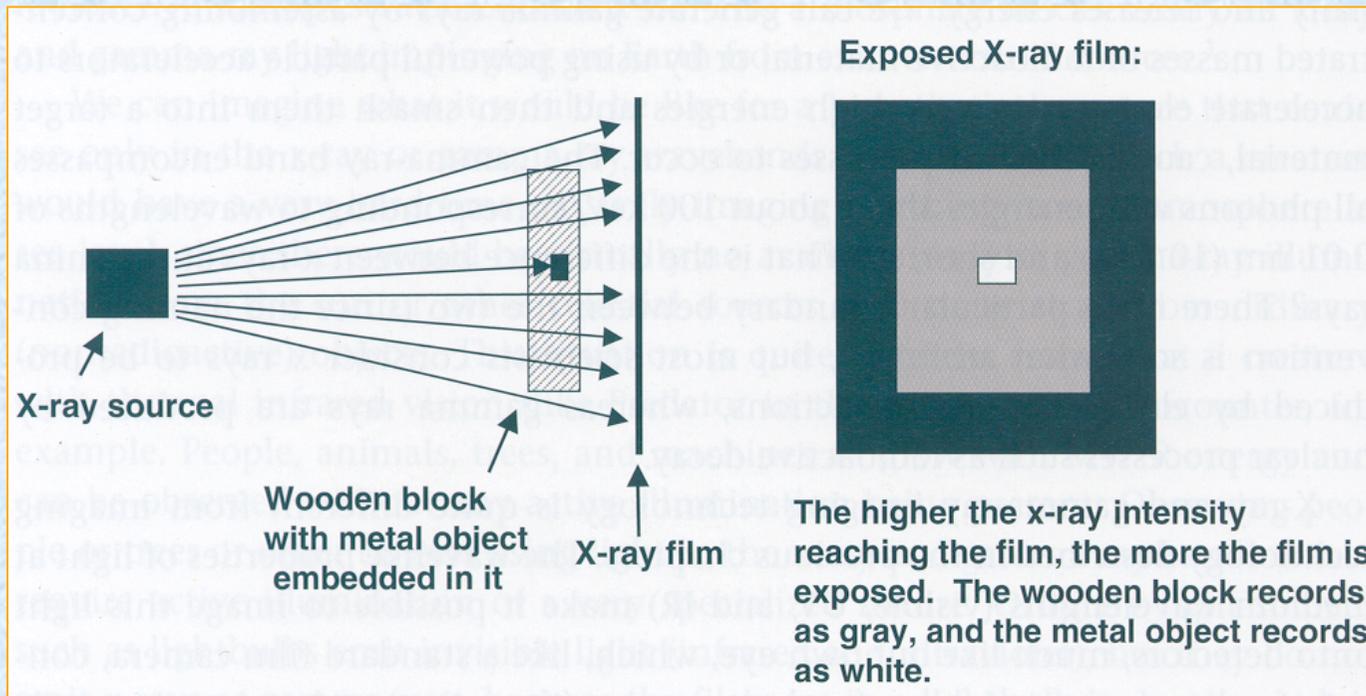
France	27,5 %
Allemagne	25,5 %
Italie	15 %
Royaume-Uni	14 %
Espagne	4 %
Suisse	4 %
Benesync=	6 %
(Belgique 3 %, Pays-Bas 3 %)	
Nordsync	4 %
(Danemark, Finlande, Norvège, Suède)	

Partenaires scientifiques :

Portugal	1 %
Israël	1 %
Autriche	1 %
République tchèque	0,44 %
Hongrie	0,20 %
Pologne	0,60 %

Imagerie directe: par projection (transmission)

Contraste par absorption



Main de Madame Röntgen

Synchrotrons:

Brillance

Finesse du foyer => résolution

Cohérence => *contraste de phase*

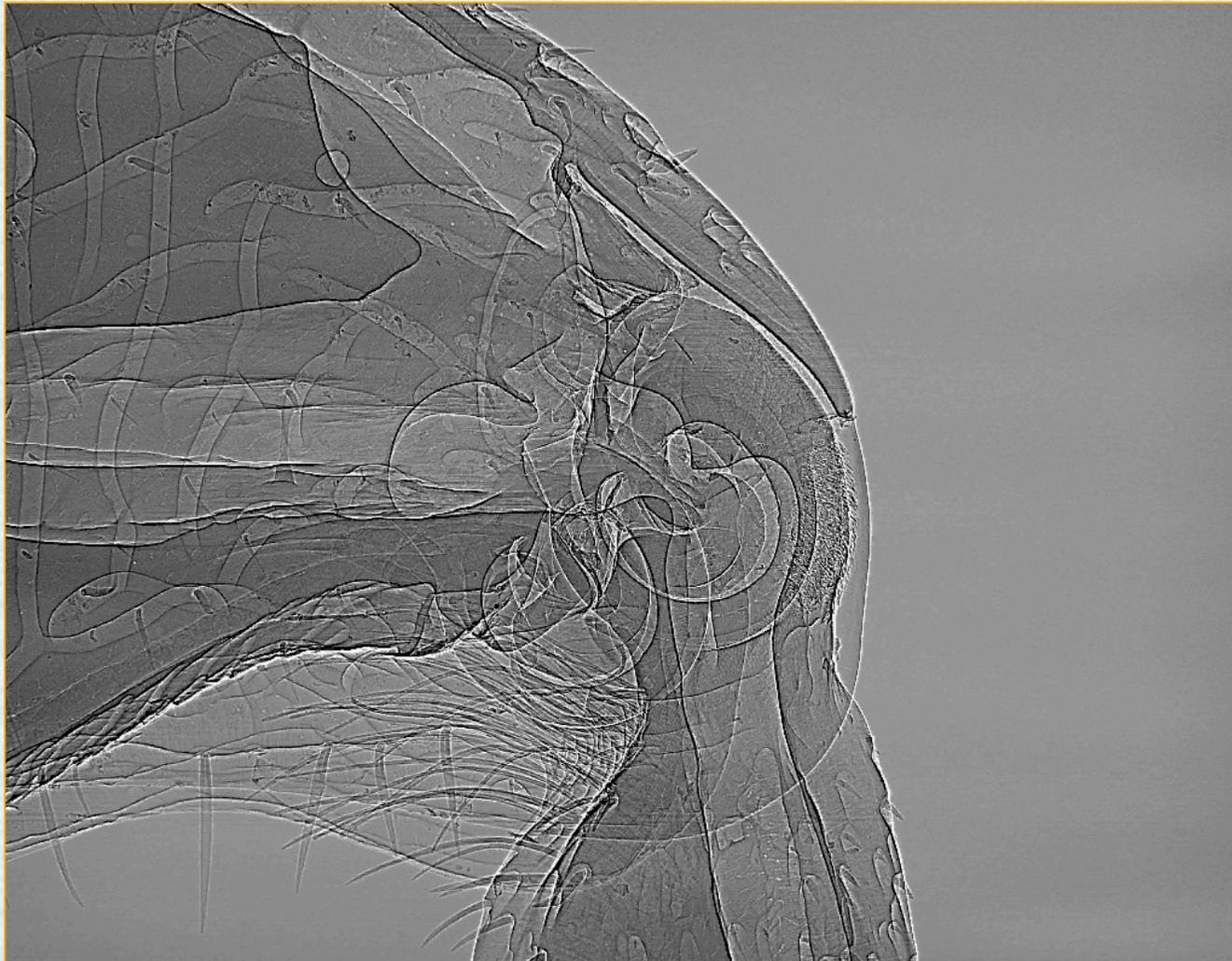


Radiographies haute résolution



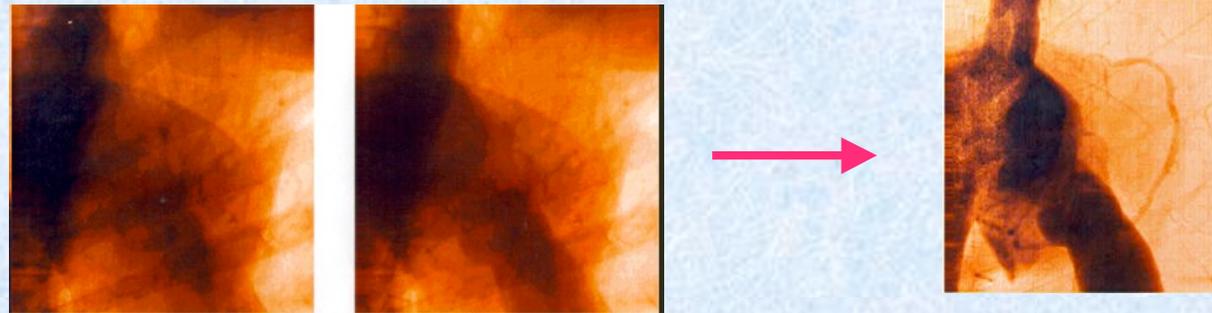
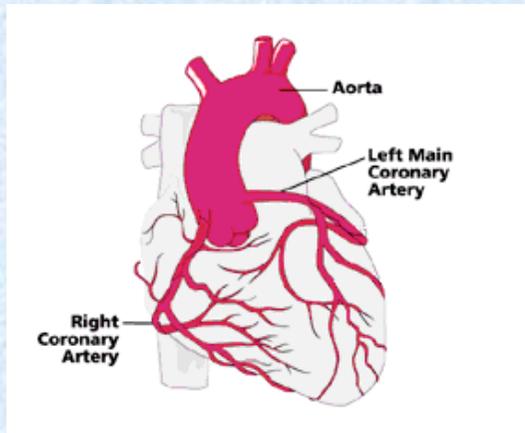
Imagerie directe par projection

Contraste de phase (animation)



Imagerie médicale

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.



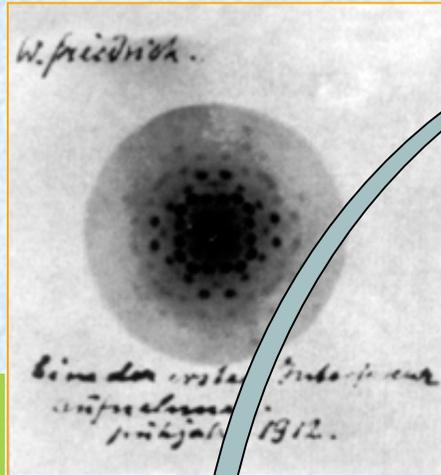
Autres applications médicales

- *Tomographie*
- *Mammographie*
- *Thérapie par microfaisceaux*

Imagerie indirecte: la diffraction

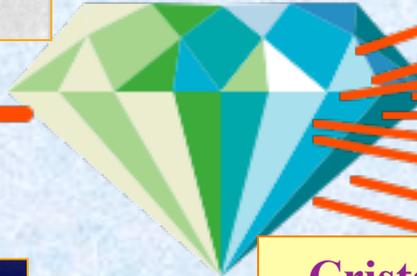


M. Von Laue
(1912)

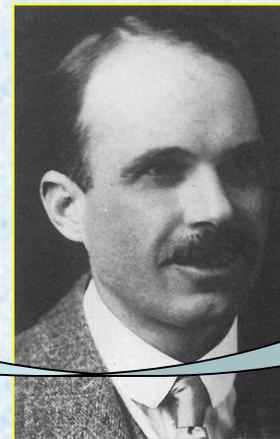


Premier diagramme de
diffraction (Max von Laue
et collaborateurs, 1912)

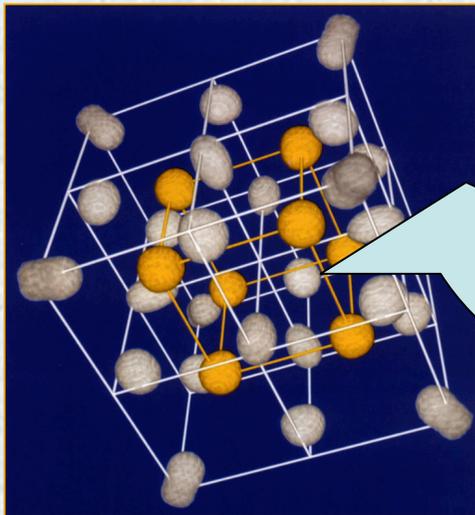
Faisceau dit « blanc »



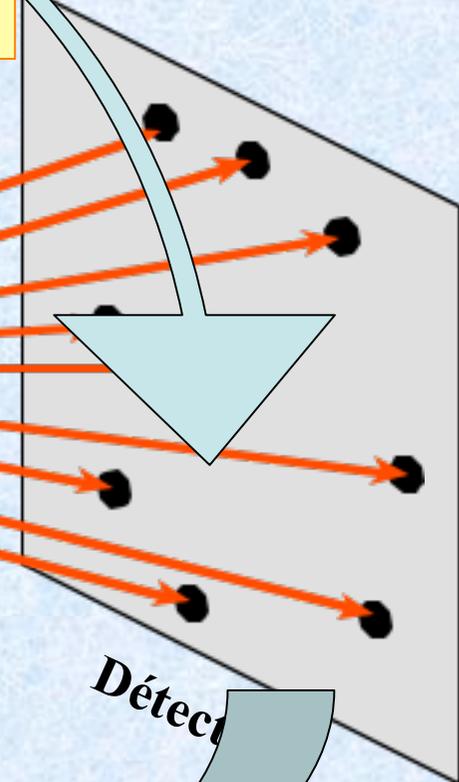
Cristal



W. L. Bragg (1913)



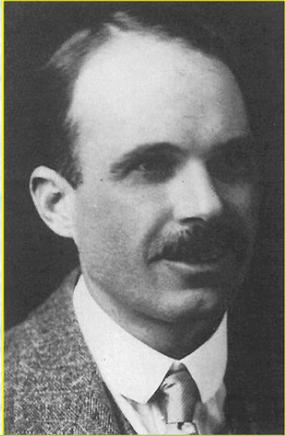
Détection



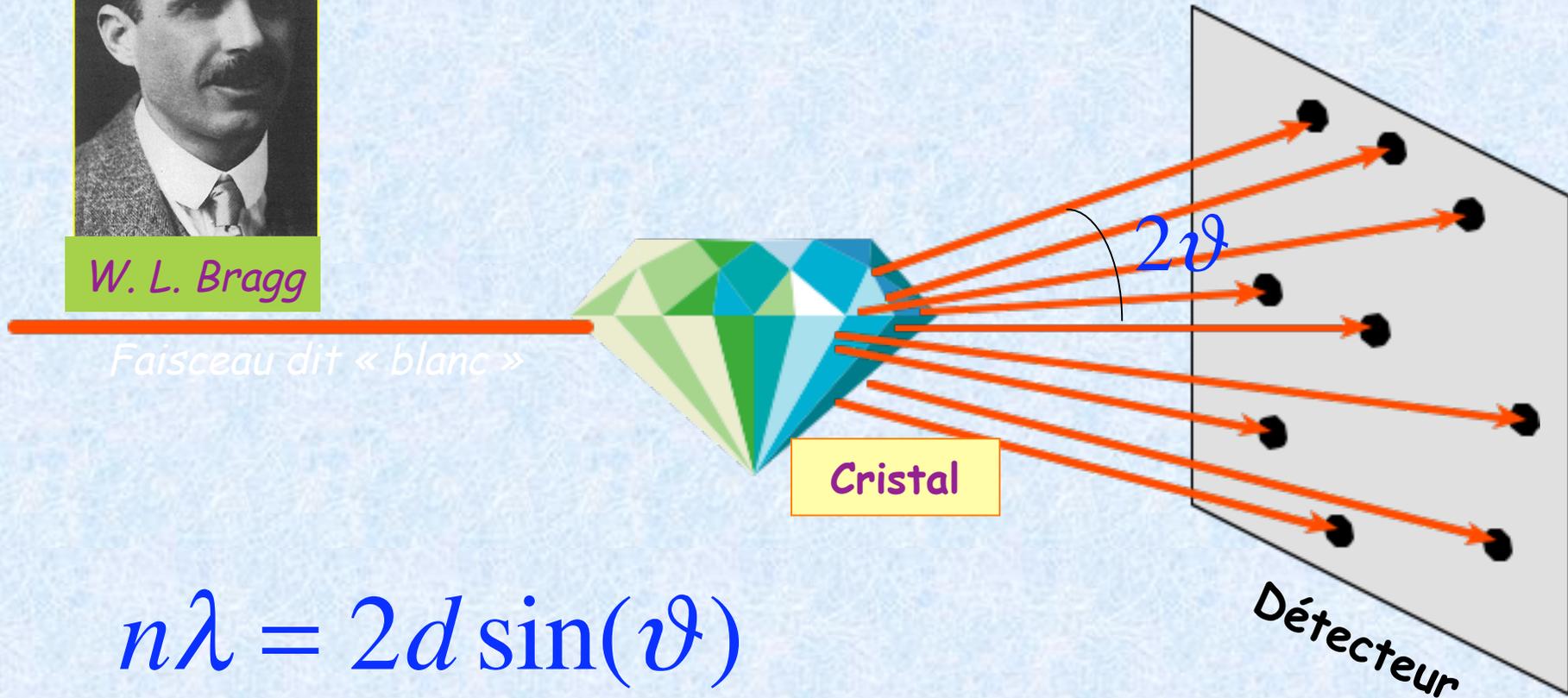
Les prix Nobel...le gang des Rayons X

Physique	1901	W. C. RÖNTGEN	Découverte des Rayons X
Physique	1914	Max von LAUE	Diffraction des R. X. par les cristaux
Physique	1915	W.H. et W. L. BRAGG	Analyse des cristaux par diffraction des R. X.
Physique	1917	C.G. BARKLA	Spectres X caractéristiques des éléments
Physique	1924	M. SIEGBAHN	Spectroscopie des R. X.
Physique	1927	A.H. COMPTON	Diffusion inélastique des R. X.
Chimie	1936	P. DEBYE	Diffraction des R. X. par les liquides et les gaz
Chimie	1954	L.C. PAULING	Nature de la liaison chimique
Chimie	1962	J.C. KENDREW M.F. PERUTZ	Structures de la myoglobine et de l'hémoglobine
Médecine	1962	F.H.C. CRICK J.D. WATSON M.H.F. WILKINS	Structure de l'ADN
Chimie	1963	G. NATTA	Chimie structurale des polymères
Chimie	1964	D.C. HODGKIN	Structure de la pénicilline et de la vitamine B ₁₂
Chimie	1969	O. HASSEL	Analyse conformationnelle
Chimie	1976	W.H. LIPSCOMB	Structure et liaison des borures d'hydrogène
Physique	1981	K.M. SIEGBAHN	ESCA
Chimie	1982	A. KLUG	Images 3D des virus, membranes, etc.
Chimie	1985	H. HAUPTMAN J. KARLE	Solution du problème de la phase
Chimie	1987	D.J. CRAM J.-M. LEHN C.J. PEDERSEN	Interactions dépendant de la structure
Chimie	1988	R. HUBER J. DEISENHOFER H. MICHEL	Isolement et détermination par R.X. des protéines de la photosynthèse.
Médecine	1997	J. WALKER	Synthèse ATP
Physique	2002	R. GIACCONI	Sources de RX cosmiques
Médecine	2003	R. MCKINNON	Canaux ioniques 3D
Médecine	2006	R. KORNBERG	Transcription ARN messenger

Imagerie indirecte: la diffraction



W. L. Bragg



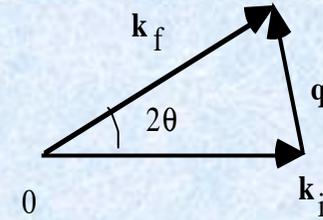
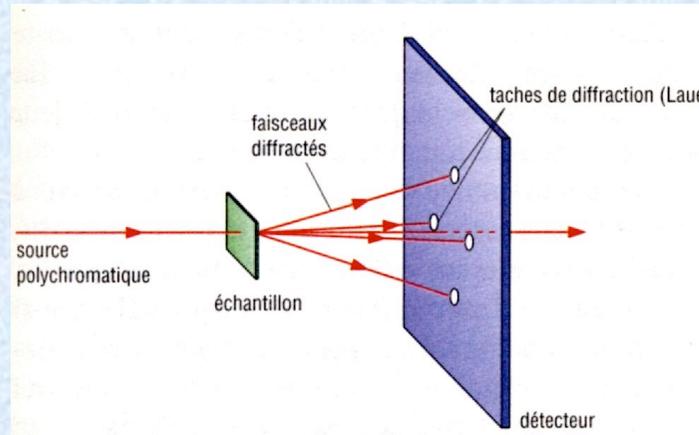
$$n\lambda = 2d \sin(\vartheta)$$

Radiocristallographie

La diffraction : aspects mathématiques



J. Fourier 1768-1830



$$A(\vec{q}) = \iiint \rho(\vec{r}) e^{-i\vec{q} \cdot \vec{r}} d\vec{r}$$

Transformée de Fourier

$$\text{Diffraction mesure } I(\vec{q}) = |A(\vec{q})|^2$$

$$q = \frac{2\pi}{d}$$

Pourquoi des infrastructures (synchrotron)?

Rayons X:

• Haute brillance (cinétique,...)

Focalisation : μm

Environnements complexes

hautes pressions

hautes températures

hauts champs magnétiques

Techniques spéciales :

petits angles (= grandes structures)

surfaces

diffusion inélastique (mouvements)

L'ESRF et l'ILL au service de la recherche et de l'industrie européenne

○ Science des matériaux



○ Biologie



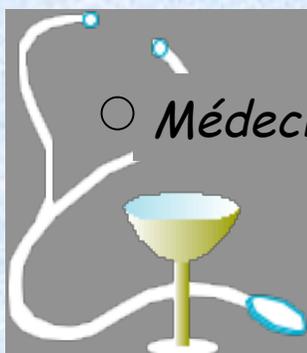
○ Science de l'environnement



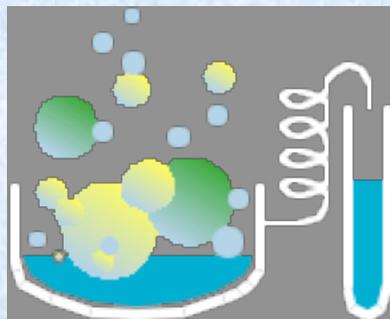
○ Physique



○ Médecine



○ Chimie



5000 chercheurs par an

Exemple 1: cristallographie des protéines

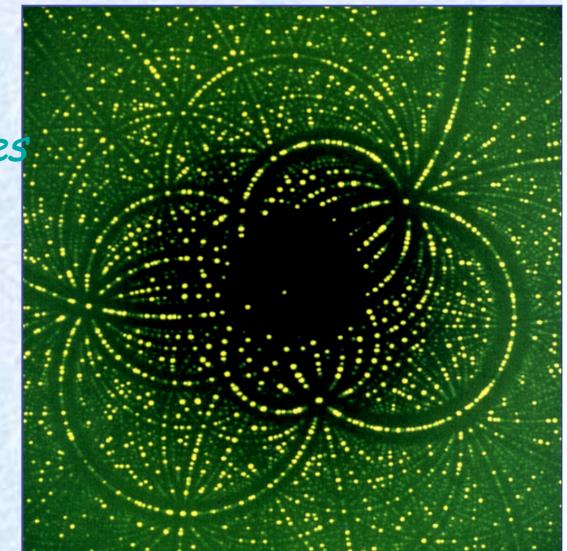
1. Cristallisation d'une protéine



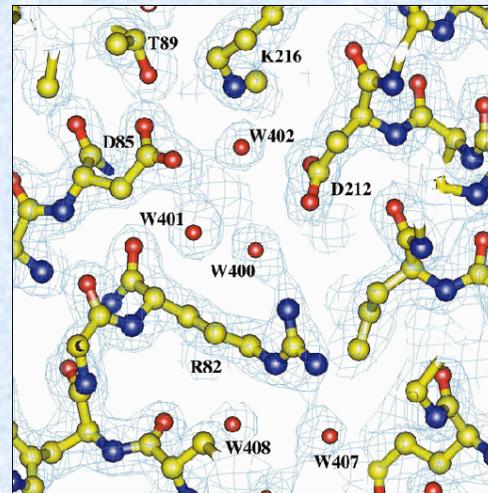
Difficile, pas si gros!



2. Diagramme de diffraction

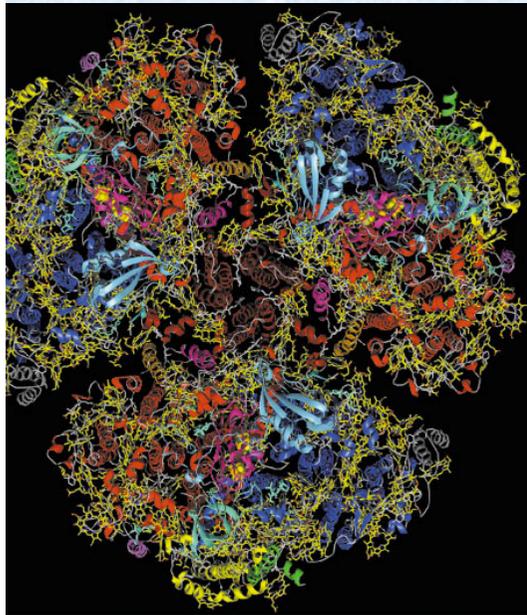


3. Traitement des données sur ordinateur

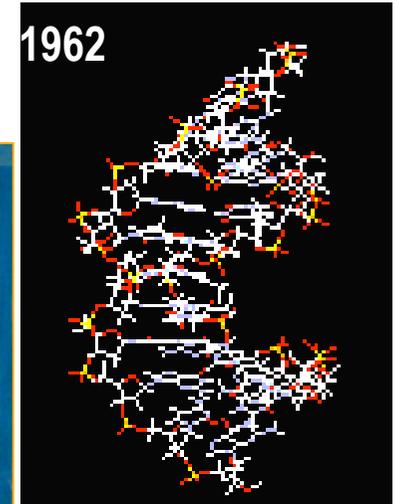
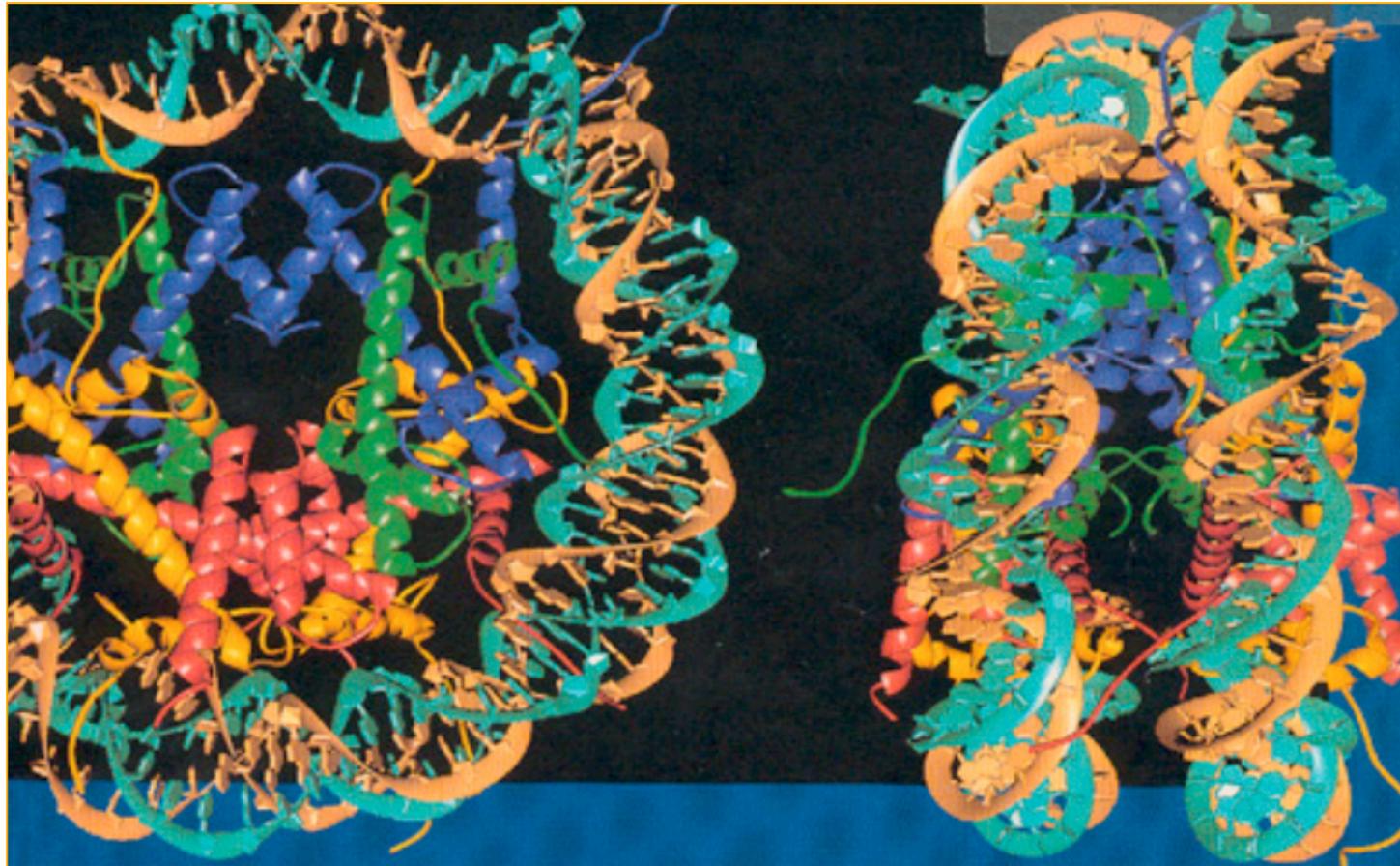


4. Nuage de densité électronique

5. Structure 3D



Une molécule vue par la lumière X...



100 nm

Exemple 2: : sciences de la terre

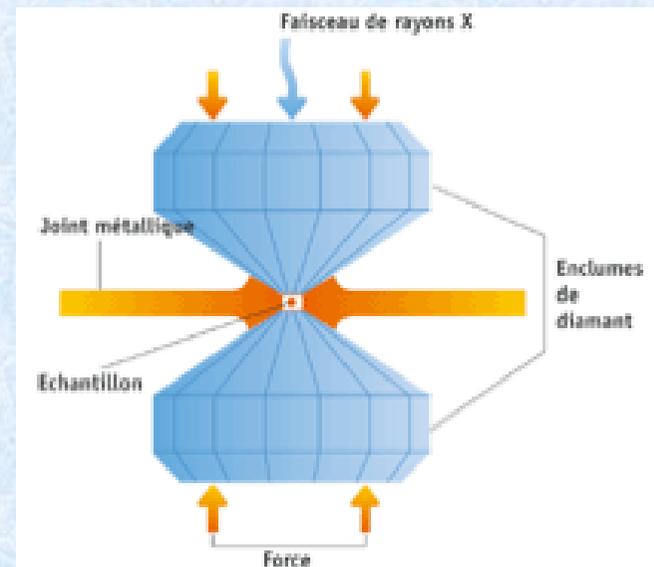
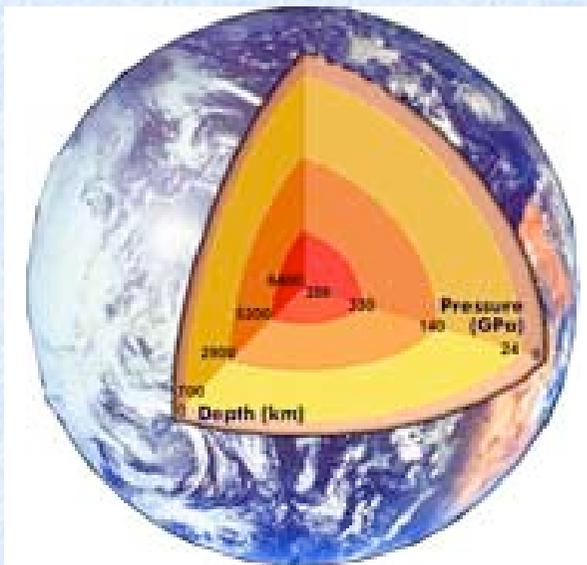
Rayons X synchrotron:

• Hautes pressions $P = F/S$

Haute brillance => Focalisation : 100-10 μm

Hautes températures (chauffage laser)

Ex. Simulation des conditions (P, T) au centre de la terre
Enclumes à diamants



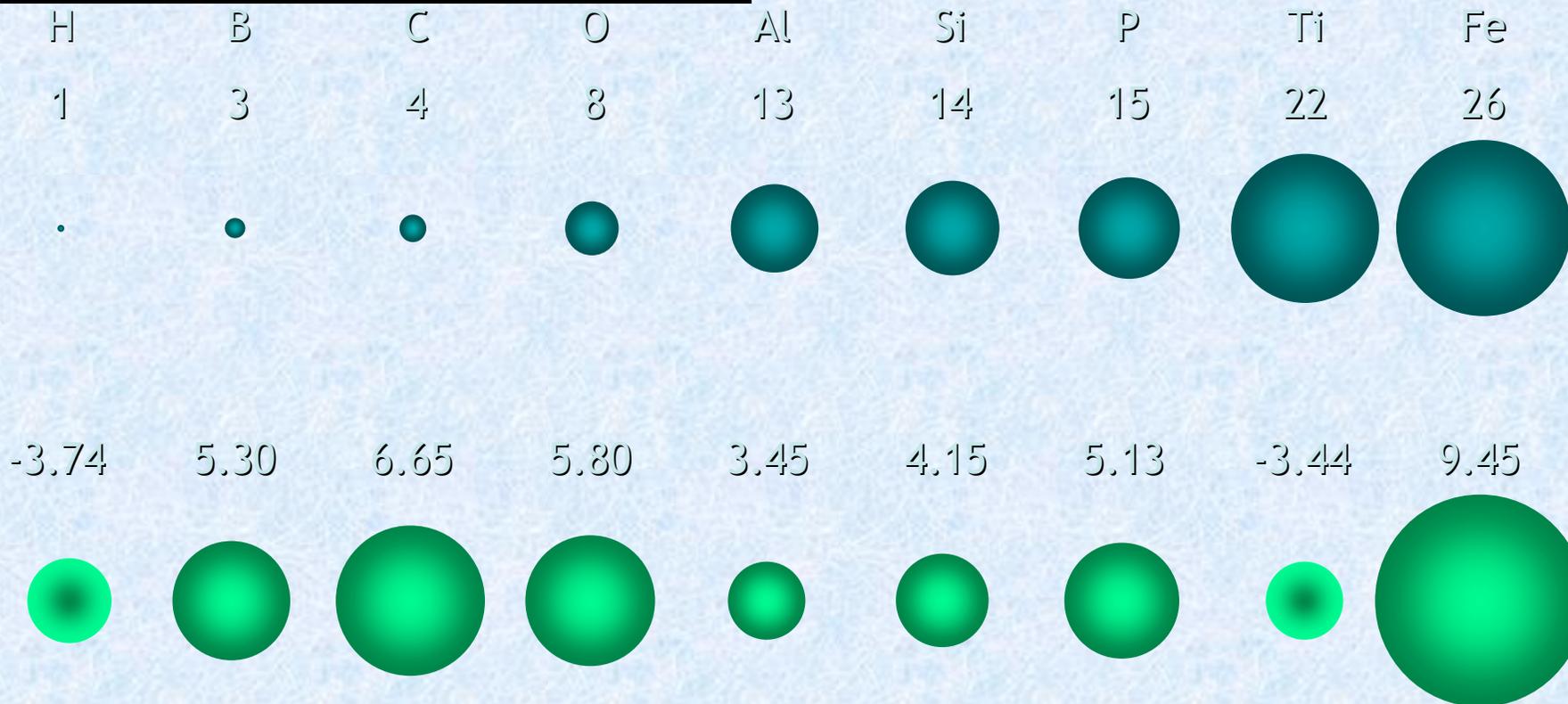
Visibilité des atomes par rayons X et neutrons

Rayons X:

Visibilité proportionnelle au nombre d'électrons

Neutrons:

Visibilité dépendant du noyau

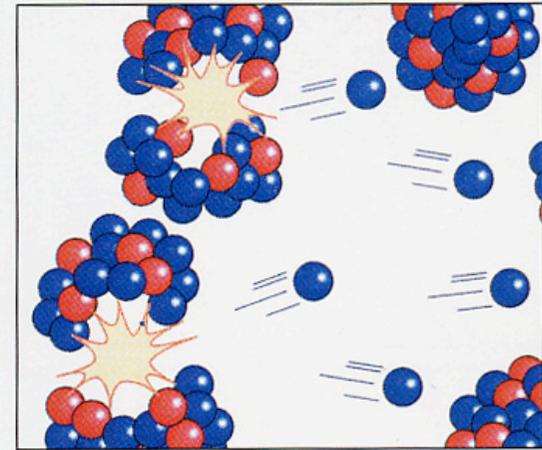
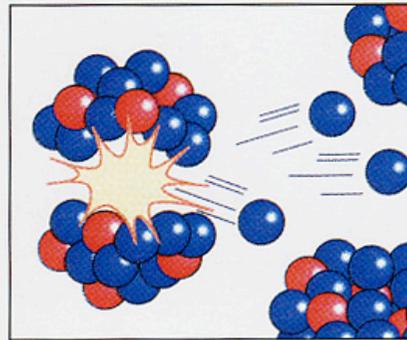
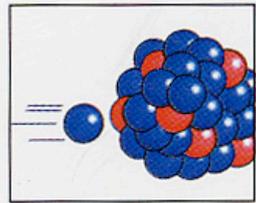


B. Les neutrons

Etude des structures,
du magnétisme
et de la dynamique

Fission de l'U²³⁵

Réacteur

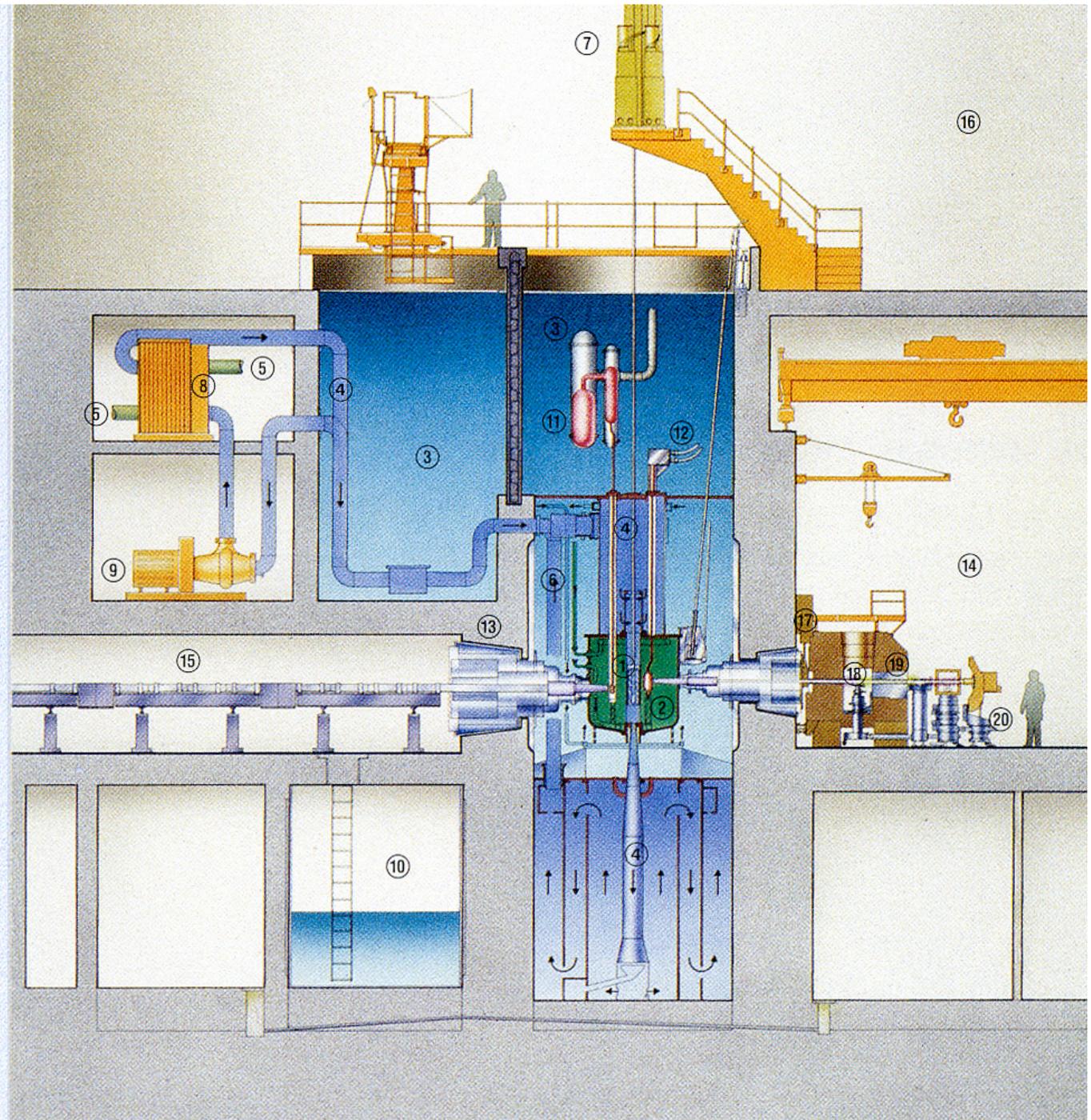


Fission et réaction en chaîne

<http://www.ill.fr>

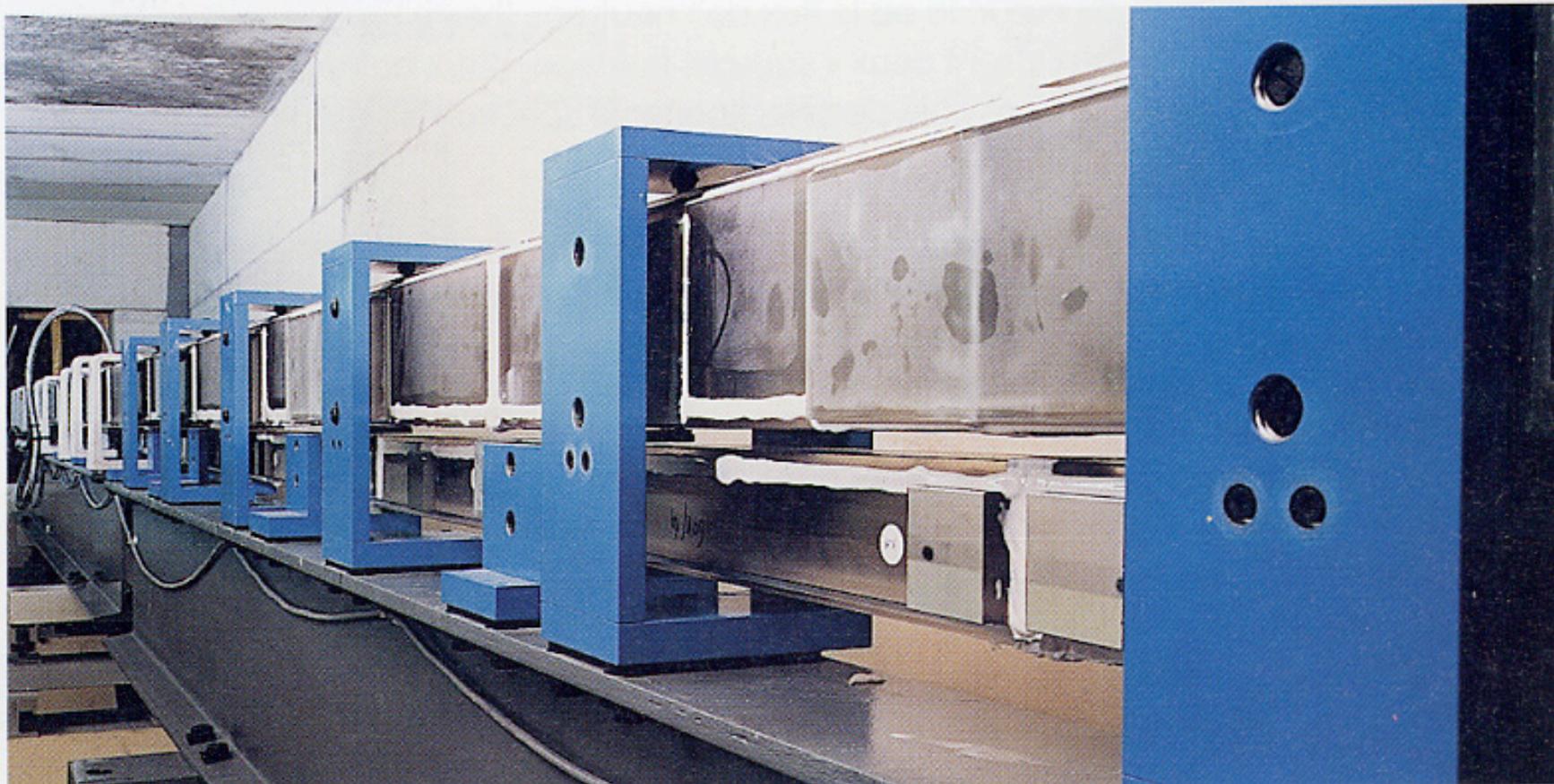
<http://www-llb.cea.fr>

1. Cœur
2. Réflecteur d'eau lourde
3. Piscine et canal de transfert
4. Circuit primaire
5. Circuit secondaire
6. Circuit d'eau lourde
7. Mécanisme de commande des barres de contrôle
8. Echangeur
9. Pompe
10. Bâche de vidange de la piscine
11. Source froide
12. Source chaude
13. Canal tangentiel
14. Hall des expérimentateurs
15. Guide à neutrons
16. Hall-pile
17. Protection primaire fixe
18. Monochromateur
19. Protection du monochromateur
20. Spectromètre



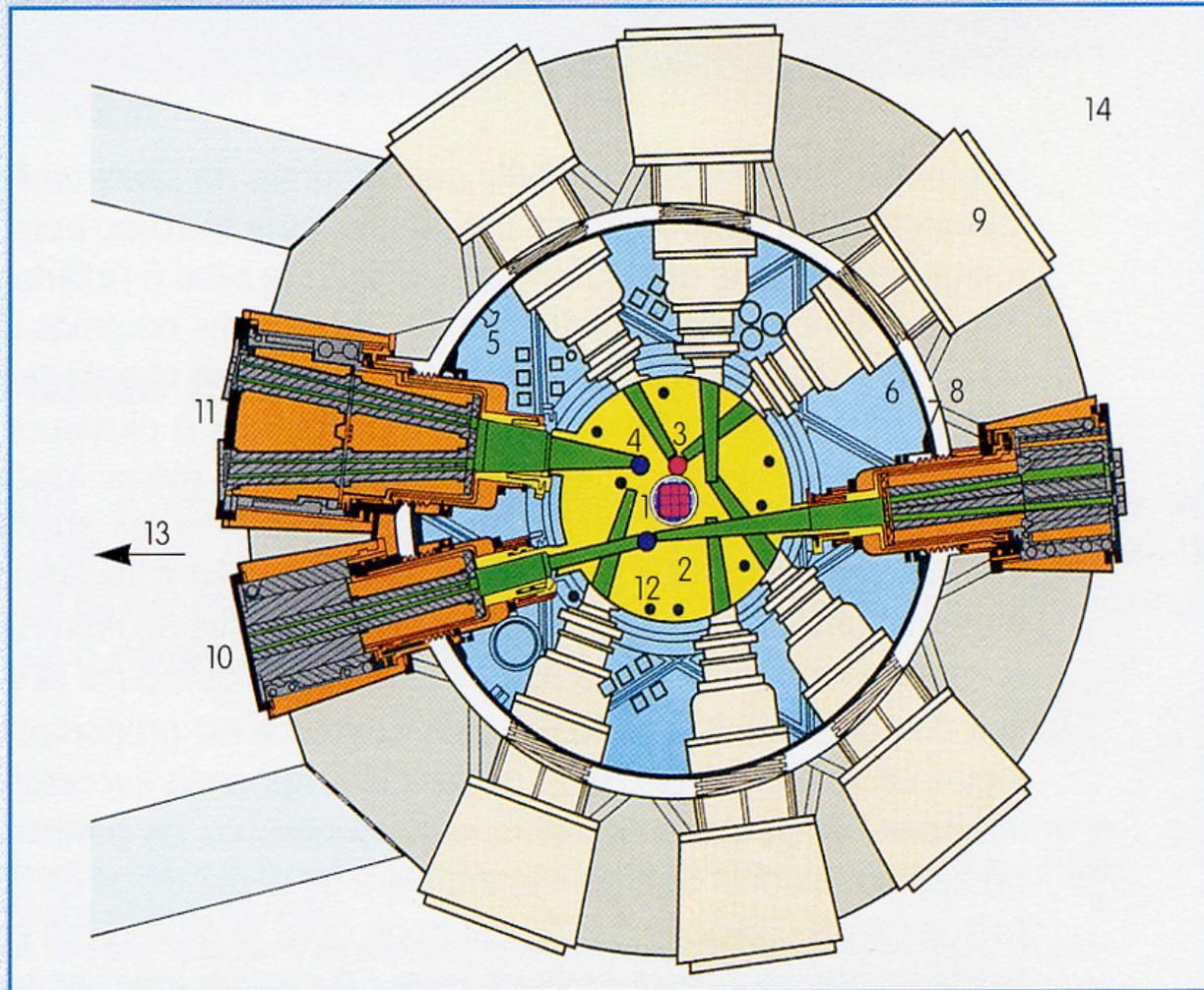
Bloc réacteur, coupe verticale

❑ Le guide de neutrons



Réacteur Orphée, coupe horizontale

1. Cœur
2. Réflecteur d'eau lourde
3. Source chaude
4. Source froide
5. Piscine
6. Cuvelage de la piscine
7. Vide annulaire
8. Doublante piscine
9. Canal simple
10. Canal simple
11. Canal double
12. Canal vertical
13. Hall des guides à neutrons
14. Hall des expérimentateurs



Bloc pile, coupe horizontale

Théorie cinétique des gaz

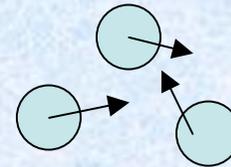
Gaz de particules sans interaction, sans dimension, en équilibre thermique

$$E = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{3}{2} k_B T$$

$$\lambda_{de\ Broglie} = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

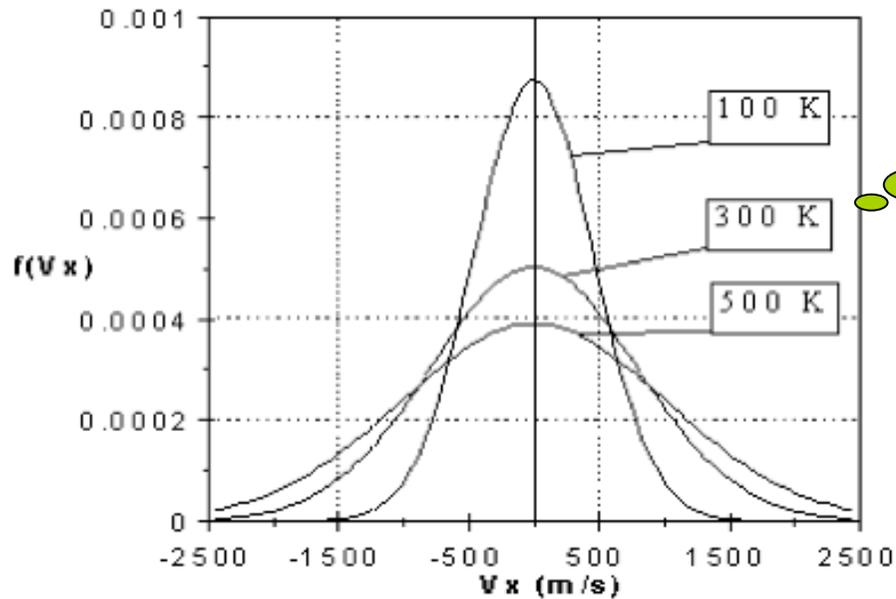
$$\lambda^* (\text{\AA}) = \frac{30.8}{\sqrt{T(K)}}$$

pour neutrons



Théorie cinétique des gaz

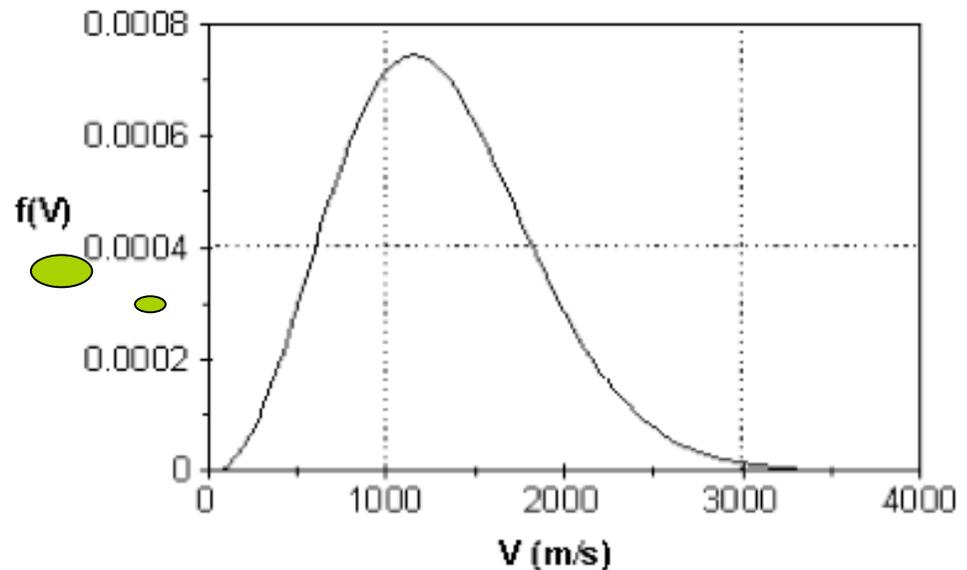
Distribution des composantes des vitesses



$$f(v_x) = C e^{-\frac{\frac{1}{2}mv_x^2}{k_B T}}$$

Distribution des vitesses en module

$$f(v) = C' v^2 e^{-\frac{\frac{1}{2}mv^2}{k_B T}}$$



Longueurs d'ondes des neutrons

$$\lambda^* (\text{\AA}) = \frac{30.8}{\sqrt{T(K)}}$$

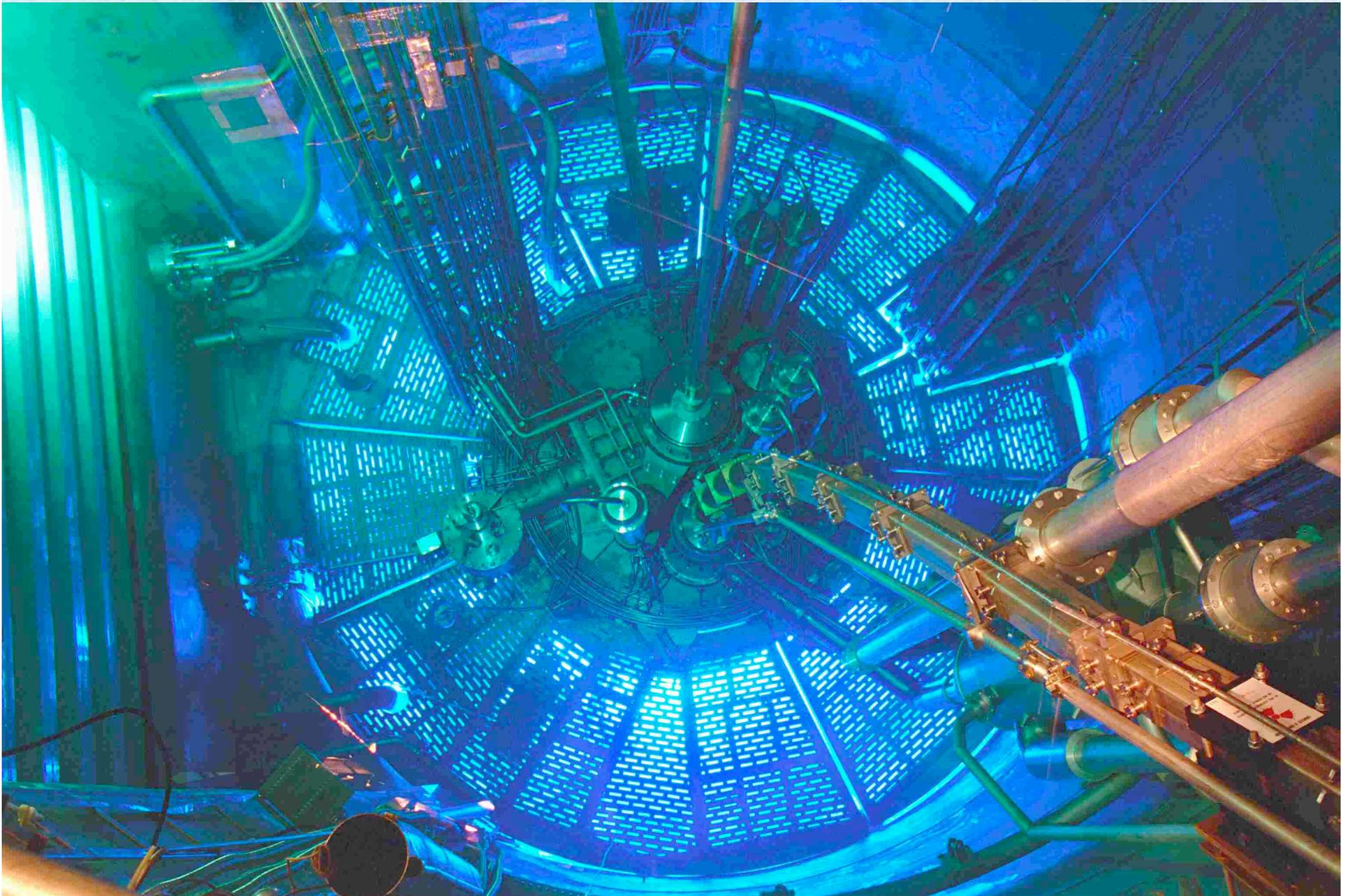
Thermiques : $\lambda = 1.7 \text{ \AA}$ $T = 300\text{K}$

Chauds : $\lambda = .7 \text{ \AA}$ $T = 2000\text{K}$

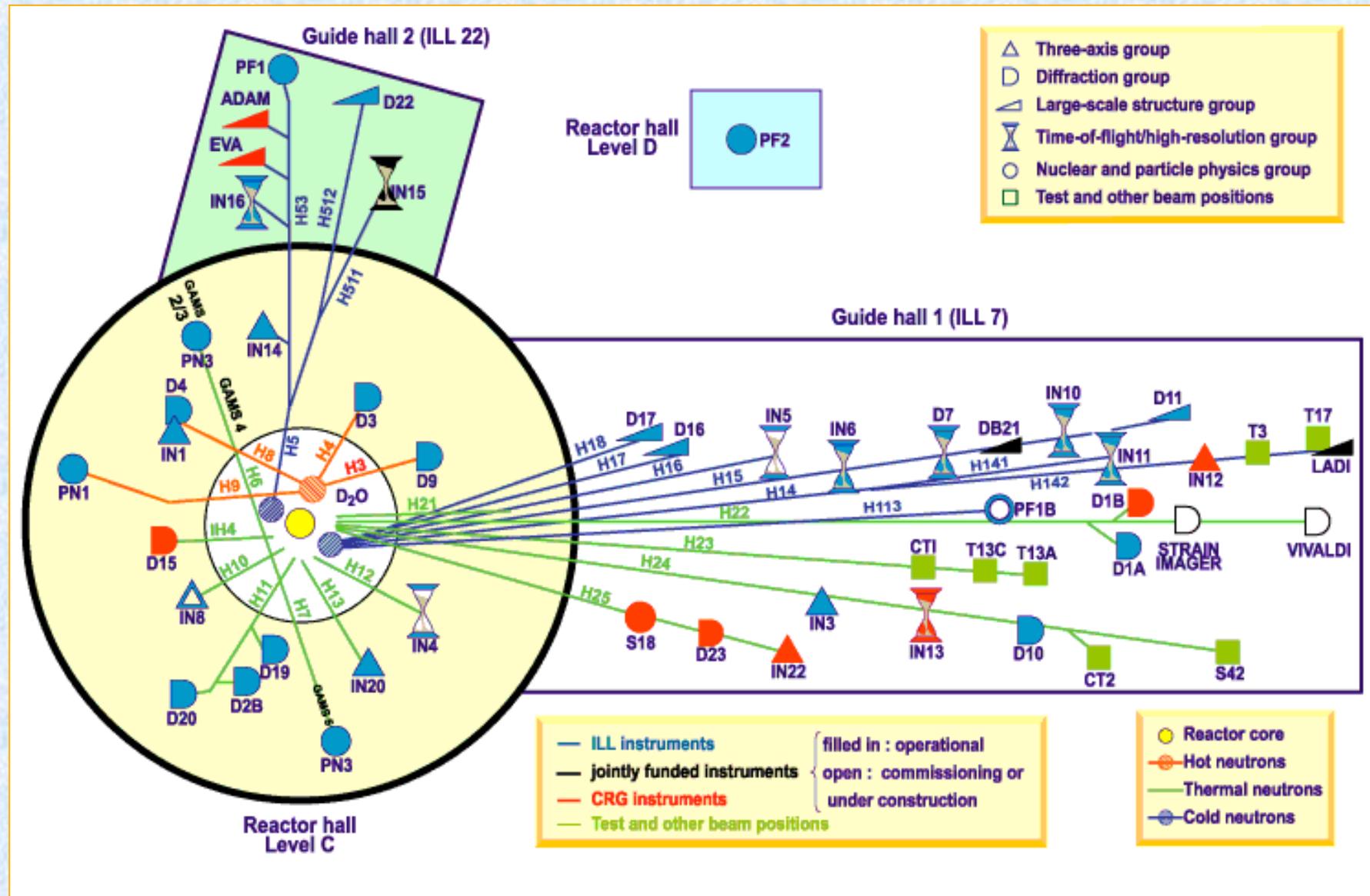
Froids : $\lambda = 7 \text{ \AA}$ $T = 20\text{K}$

$$E_{300\text{K}} = k_B T = \frac{1}{40} \text{ eV} = 25 \text{ meV}$$

La piscine vue du haut



Les instruments (lignes à neutrons) de l'ILL



L'Institut Laue - Langevin: La source la plus intense de neutrons au monde

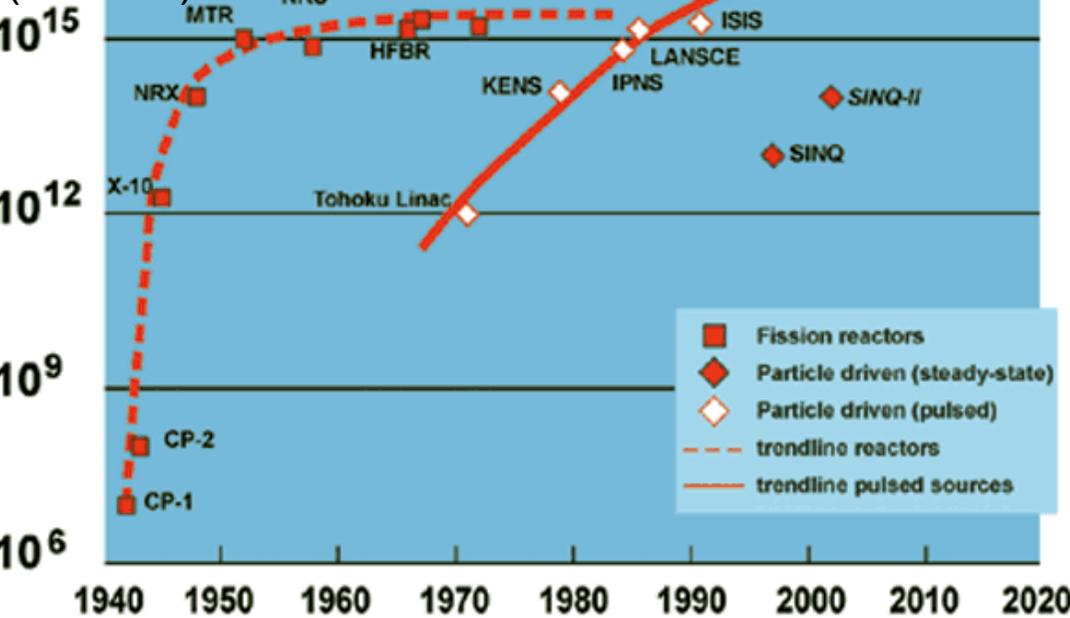


Associés:
 France 29%
 Allemagne 28%
 UK 28%

Partenaires scientifiques:

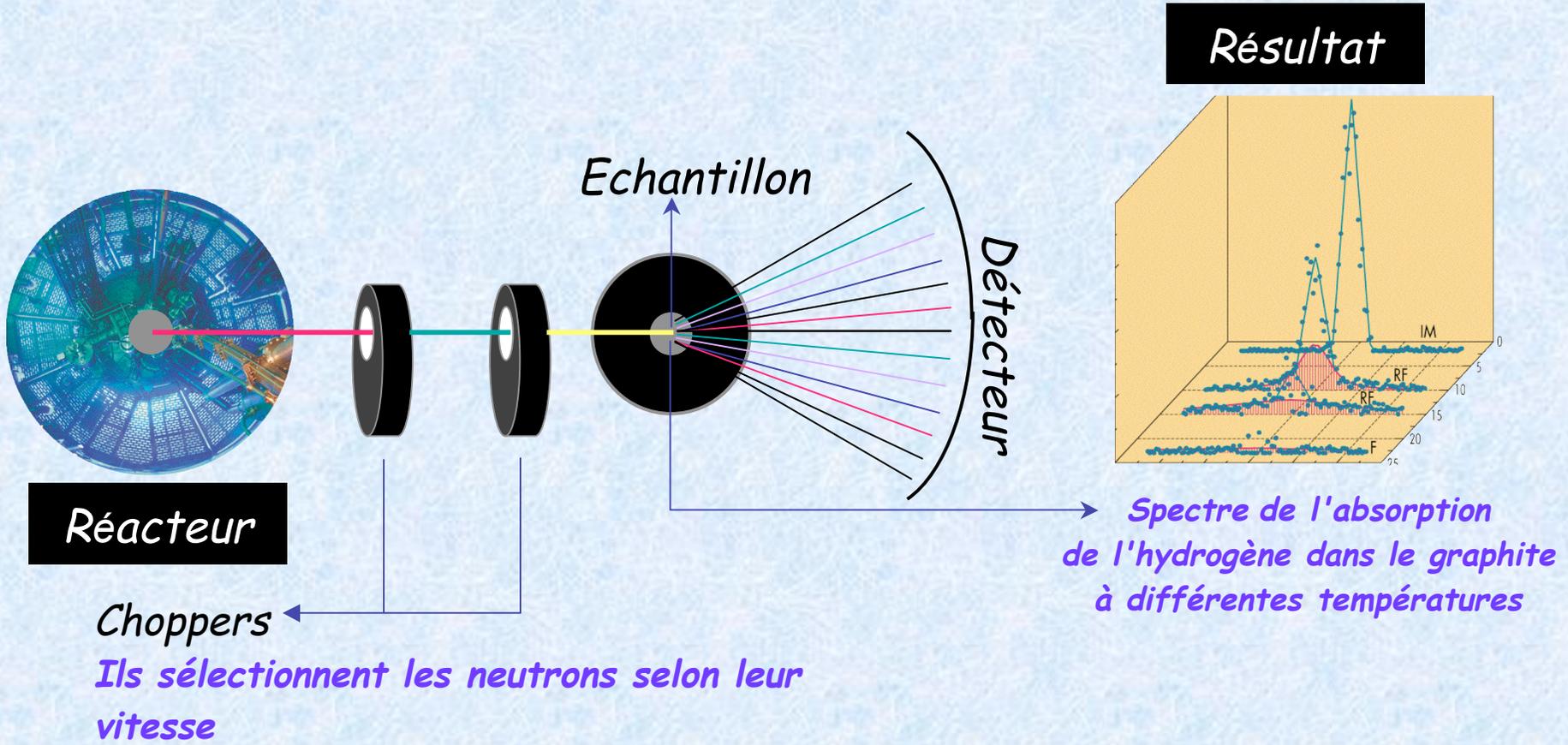
Autriche+Rép. Tchèque. 2%
 Italie 3.5% Suède
 Russie 2% Hongrie
 Espagne 4% Belgique .5%
 Suisse 3.5% Pologne

Flux thermique
(n/cm²/s)



Budget 2004: 70 MEuro □

La spectrométrie temps de vol neutronique



Visite virtuelle de l'ILL

http://www.ill.fr/pages/Virtual_visit/2007/ILL_2007.html



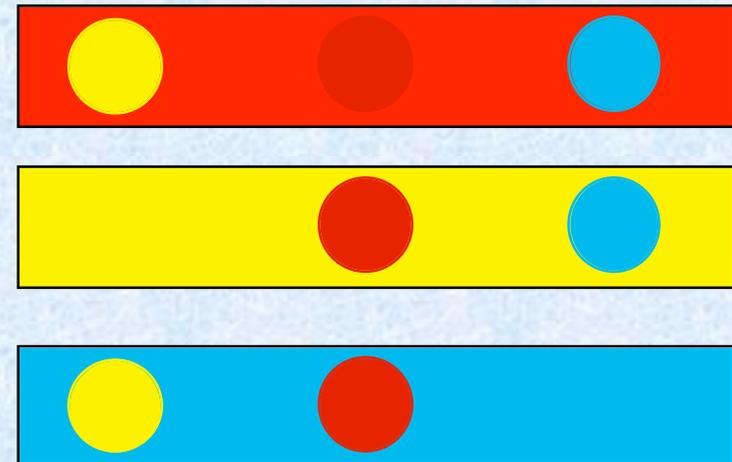
Application des neutrons

- Magnétisme
- Inélastique (vibrations, diffusion, reptation)
- Techniques de contraste
- Biologie structurale
- Polymères
- Physique fondamentale

Techniques de contraste

Longueurs de diffusion

élément (isotope)	λ_i (10^{-12} cm) RX ($q=0$)	b_i (10^{-12} cm) neutrons
H	.28	-.374
D	.28	.667
C ¹²	1.68	.665
N ¹⁴	1.96	.937
Cl ³⁵	4.76	1.17
Ni ⁵⁸	7.84	1.44
Ni ⁶²	7.84	-.87



marquage possible
par contraste H/D

Visibilité des atomes par rayons X et neutrons

Rayons X:

Visibilité proportionnelle au nombre d'électrons

Neutrons:

Visibilité dépendant du noyau

H	B	C	O	Al	Si	P	Ti	Fe
1	3	4	8	13	14	15	22	26

.

•

•



-3.74

5.30

6.65

5.80

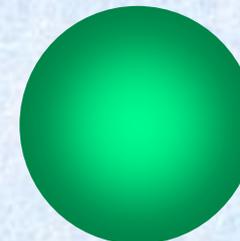
3.45

4.15

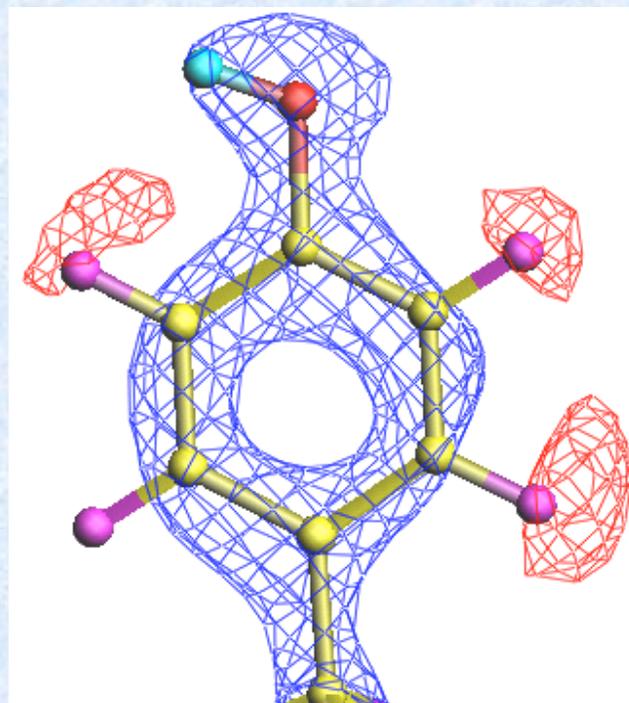
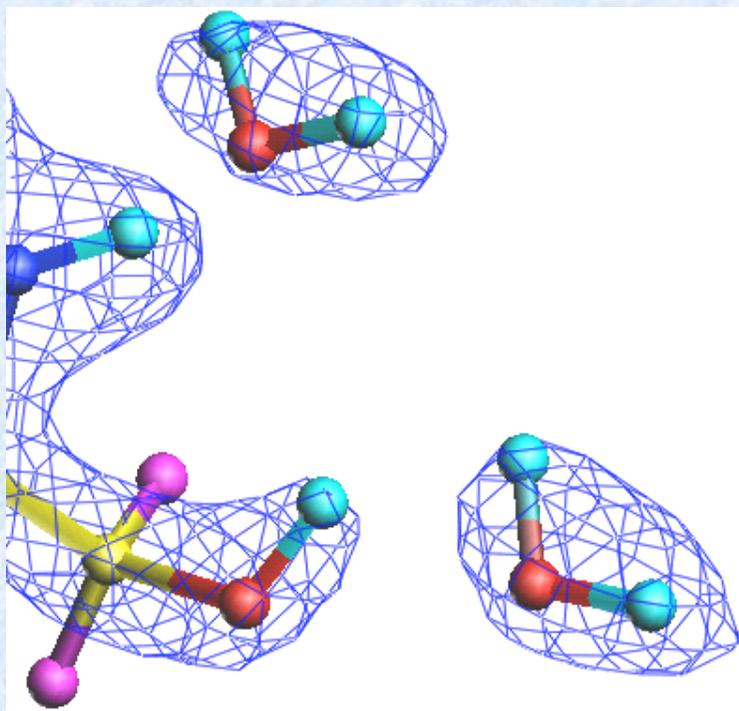
5.13

-3.44

9.45



... les détails dévoilés par les neutrons



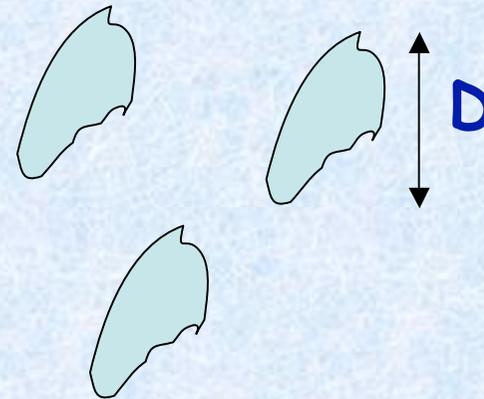
Hydrogène visible

Nanosciences

Question : comment mesurer 100 Å

Objets de $D = 20 - 1000 \text{ \AA}$ $\lambda \ll D$

- Taille
- Forme
- Organisation spatiale



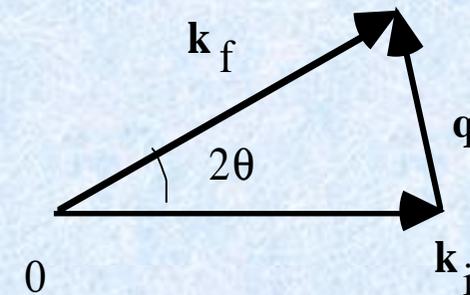
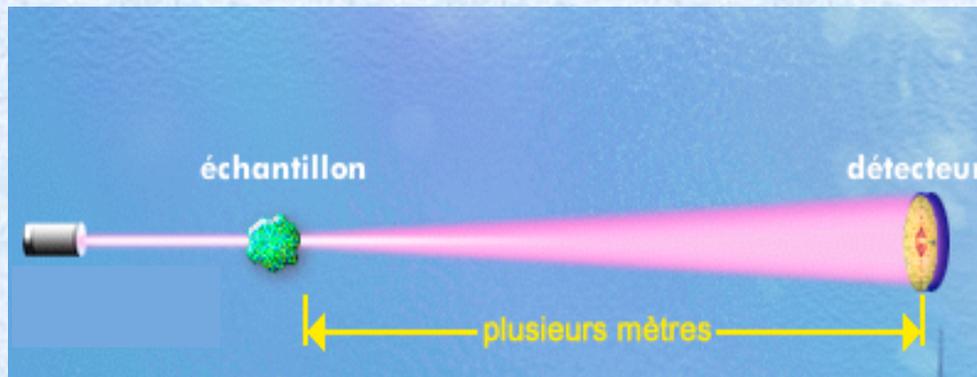
Domaines couverts

- science des **polymères**
- **milieux colloïdaux** (micelles,...)
- **matière molle** en général
- **métallurgie** (étude de défauts étendus, de précipités,...)
- **biologie** (solutions de macromolécules biologiques, liposomes,...)
- **sciences de la terre** (porosité, structure fractale des roches,...)

La mesure de 100 Å : une solution : SAS

Small Angle scattering

Diffusion aux petits angles ou diffusion centrale



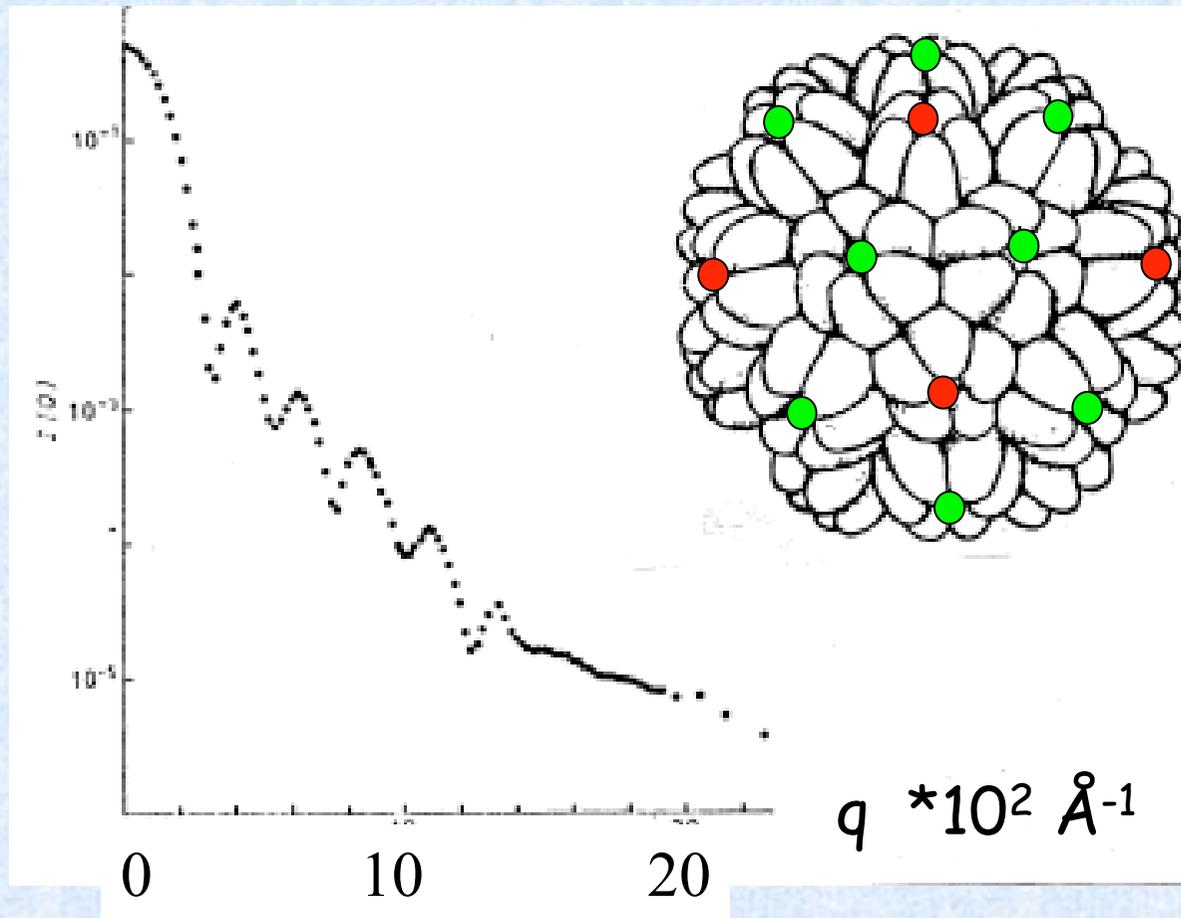
Où est l'info intéressante?

Analyse dimensionnelle

$$\theta \approx \frac{\lambda}{D} \ll 1$$

Guinier (1939), précipités durcissants (Cu, Zn) dans alliages Al (zones de Guinier-Preston).

Virus icosaédrique du haricot



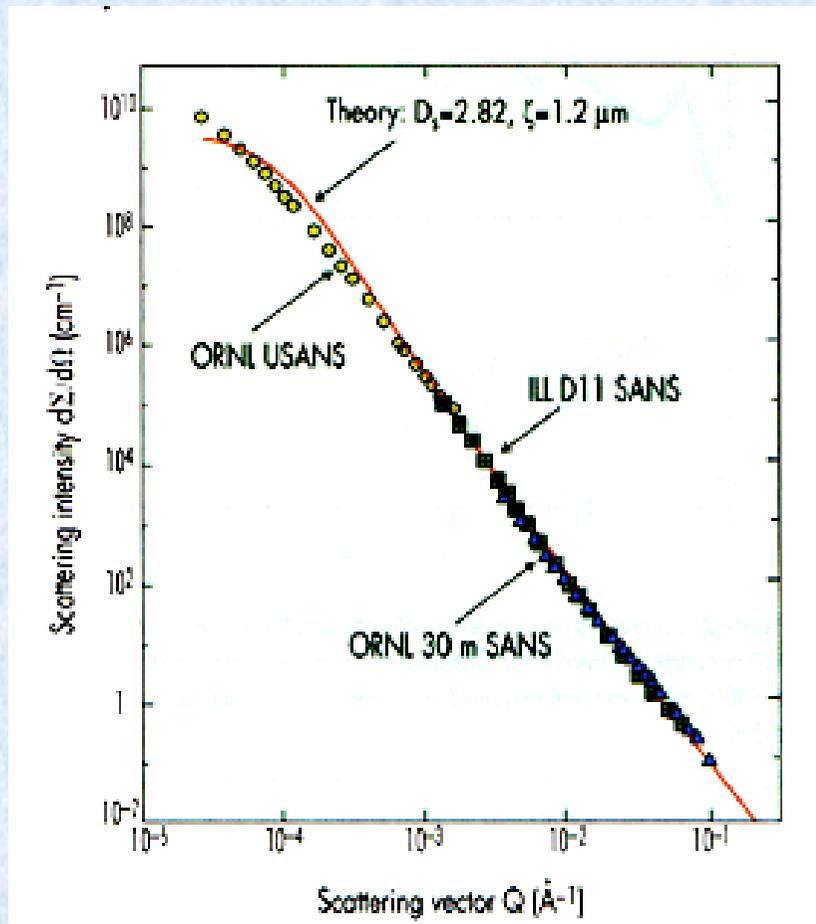
Oscillations nombreuses $R = 141 \text{ \AA}$

Systemes fractals: roches



CAULIFLOWER

A Fractal in Your Refrigerator



$$I(q) \approx \frac{C}{q^{6-D_f}}$$

D_s : dimension fractale de surface

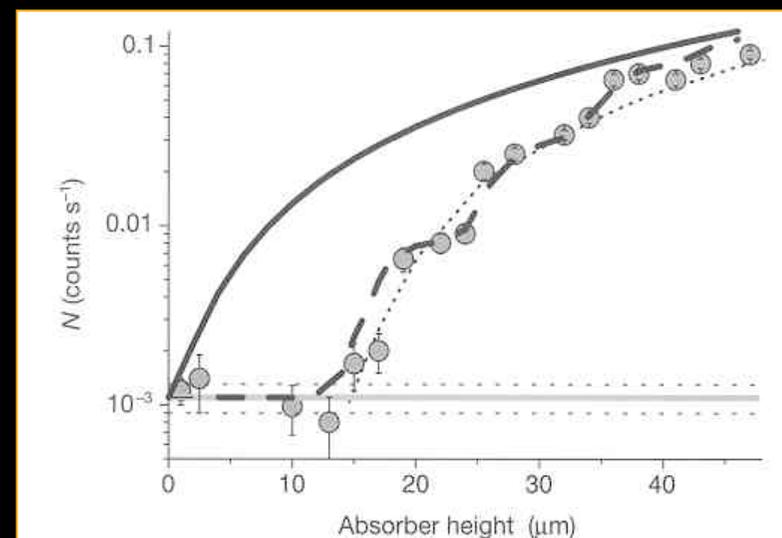
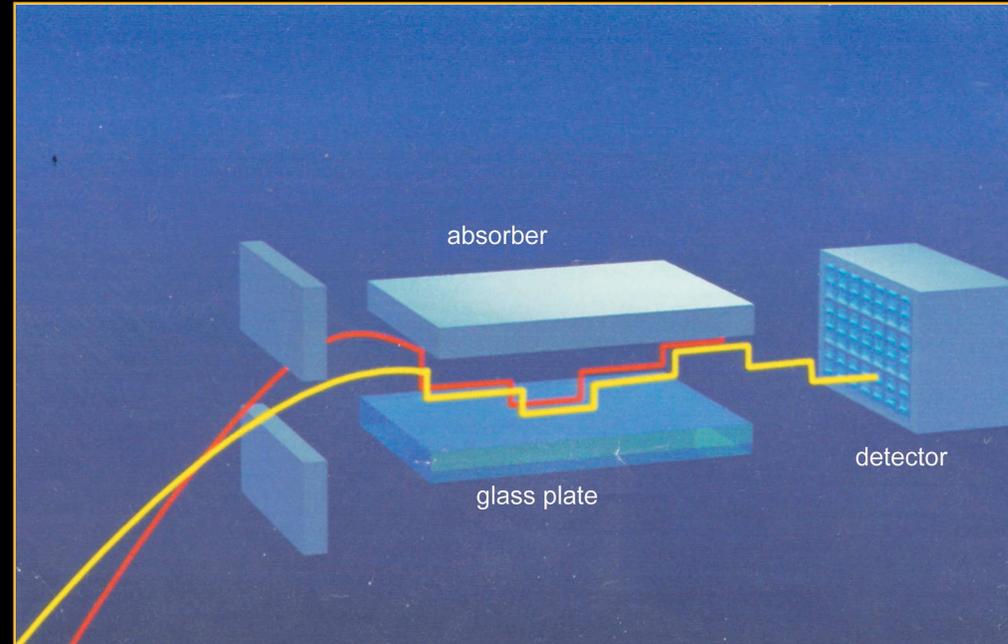
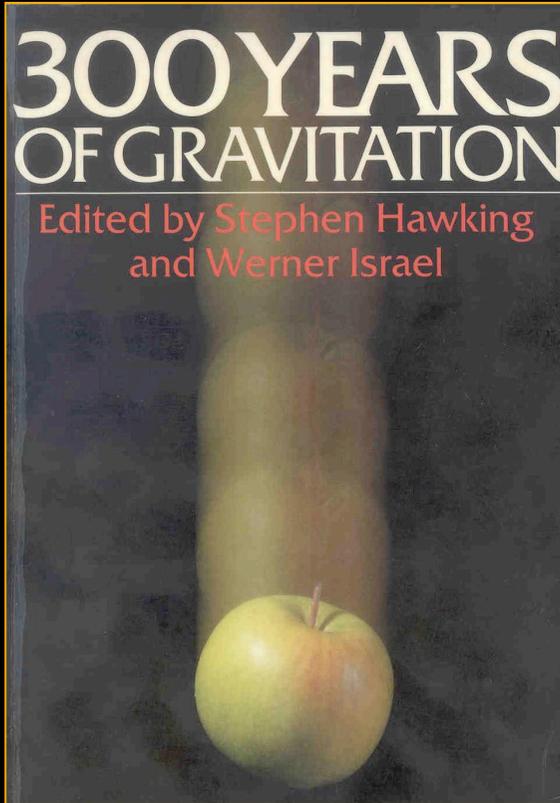
$$2 \leq D_s \leq 3$$

$D_s = 2$: Porod (classique)

Le quantisation de la gravitation

300 YEARS OF GRAVITATION

Edited by Stephen Hawking
and Werner Israel



Comment obtenir du temps de faisceau?

(10 000 €/jour)

➤ Procédure

- Proposition => comités => décision => expérience
- Fréquence : 6 mois; taux de succès 30%... 70%
- Voyage et frais de séjour payés

➤ Programmes d'accès de l' UE (TMR/LSF)

- Idem mais pour sources nationales

➤ Recherche industrielle (non publiée)

- Au coût réel

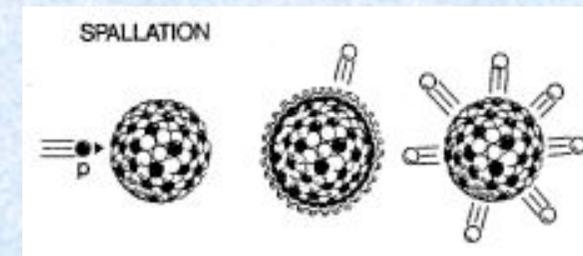
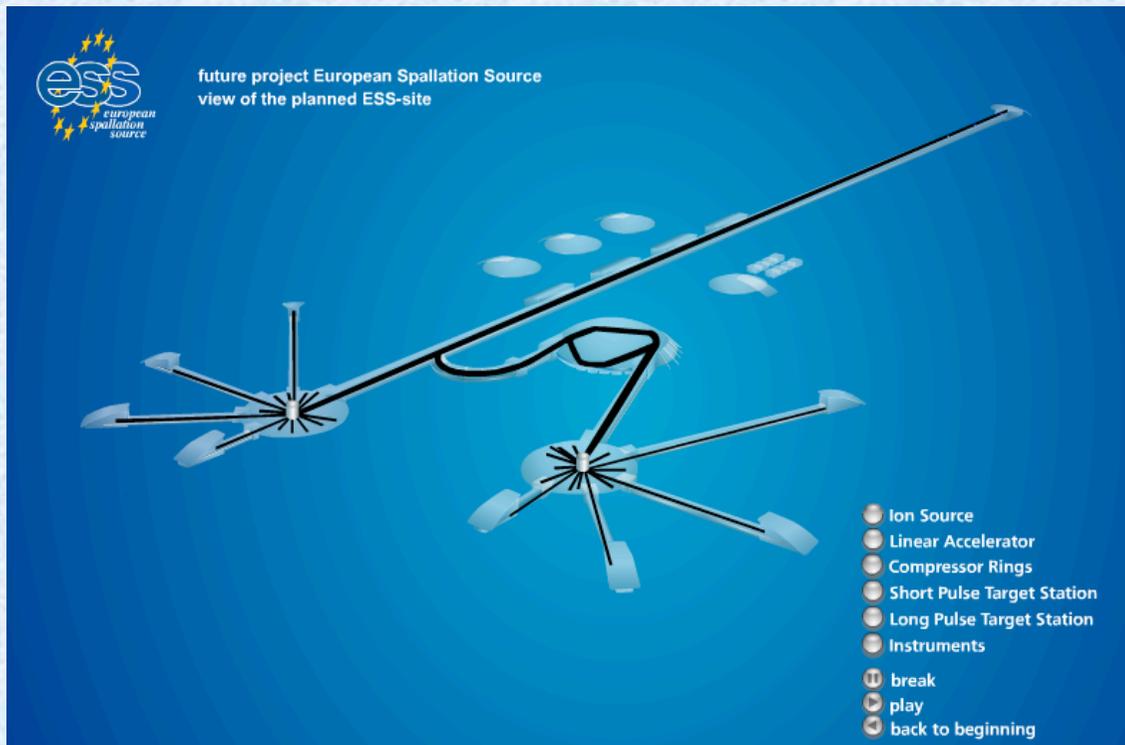
➤ Publication

- 50 k€ (labo classique = GI)

Le futur

➤ ESS (European spallation source)

➤ http://neutron.neutron-eu.net/n_ess



➤ Upgrade ESRF

Accès à l'information sur les infrastructures

➤ 1. Visites possibles

- Journées portes-ouvertes (<annuellement)
- Demandes particulières (groupements)

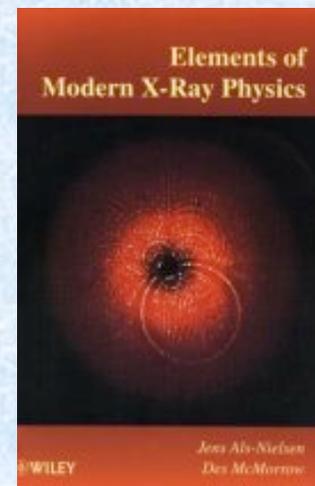
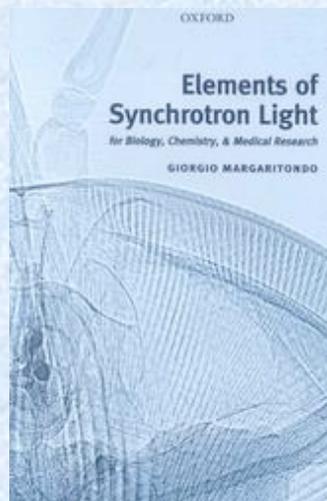
➤ 2. Références web nombreuses

- www.ill.eu
 - Virtual visit
- <http://www-llb.cea.fr>
- www.esrf.eu
- www.llb-cea.fr



➤ 3. Bibliographie

- Margaritondo
- Als-Nielsen et al.



➤ 4. CD-Roms

- <http://www.nanopolis.net>



➤ 5. Publications (de l'Union Européenne)

- http://ec.europa.eu/research/research-eu/index_fr.html
- N° spécial Février 2007 : L'aventure de la matière et du vivant
- N° spécial Juin 2007 : Apprivoiser la Science

6. Malettes pédagogiques du Synchrotron Soleil



Plaquette "Au cœur de la matière"

12 pages pour mieux comprendre l'atome, le spectre électromagnétique, le visible et l'invisible...



Le film "1, 2, 3 SOLEIL"

Disponible en VHS ou CD, vous trouverez sur le même support la version française et la version anglaise.



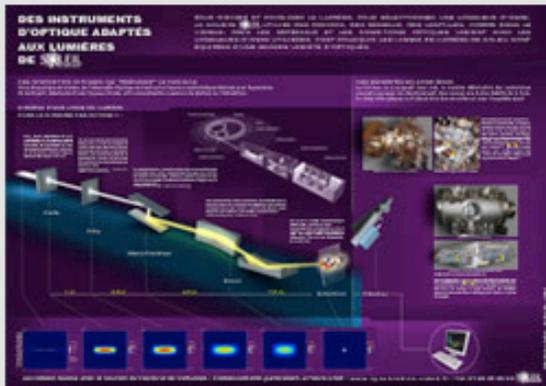
Mallette pédagogique "Lumière Synchrotron"

la mallette pédagogique SOLEIL, un poster AO, un document-support pour l'enseignant et une fiche élève avec quelques propositions pour aller plus loin.



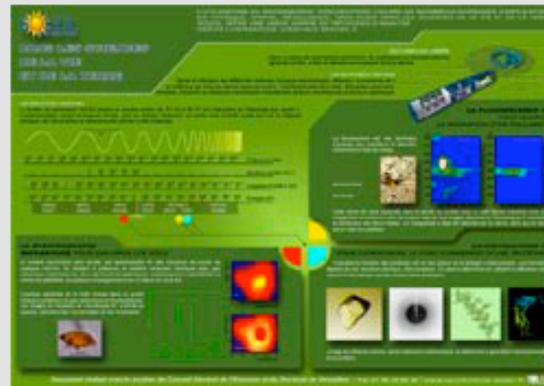
Mallette pédagogique "Territoires et technologies"

la mallette pédagogique SOLEIL, un poster AO, un document-support pour l'enseignant et une fiche élève avec quelques propositions pour aller plus loin.



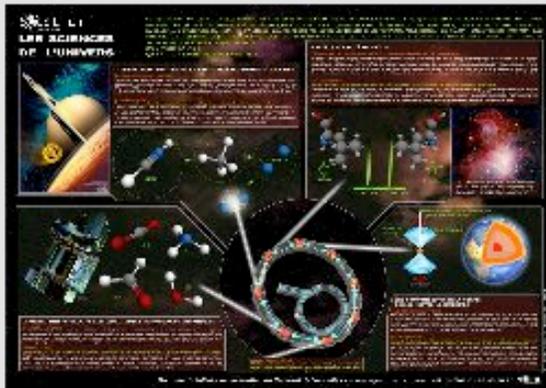
Mallette pédagogique "Optique"

la mallette pédagogique SOLEIL, un poster AO, un document-support pour l'enseignant et une fiche élève avec quelques propositions pour aller plus loin.



Mallette pédagogique "Sciences de la Vie et de la Terre"

la mallette pédagogique SOLEIL, un poster AO, un document-support pour l'enseignant et une fiche élève avec quelques propositions pour aller plus loin.



Mallette pédagogique "Sciences de l'Univers"

la mallette pédagogique SOLEIL, un poster AO, un document-support pour l'enseignant et une fiche élève avec quelques propositions pour aller plus loin.



CD "La lumière, une longue histoire"

Pour lecteurs CD ou ordinateur PC/Mac. Contient 2 films : "L'onde et le photon" (7min) et "Le spectre électromagnétique" (9min).

Conclusions



Importance des infrastructures

- 1. Progrès de la science
- 2. Visibilité de l'Europe
- 3. Dissémination de la science
- 4. Aide à l'enseignement