

**Le Centre de rayonnement
synchrotron
SOLEIL, les sources de lumière et le
programme scientifique**

Roger Fourme,
Directeur scientifique pour les Sciences du Vivant

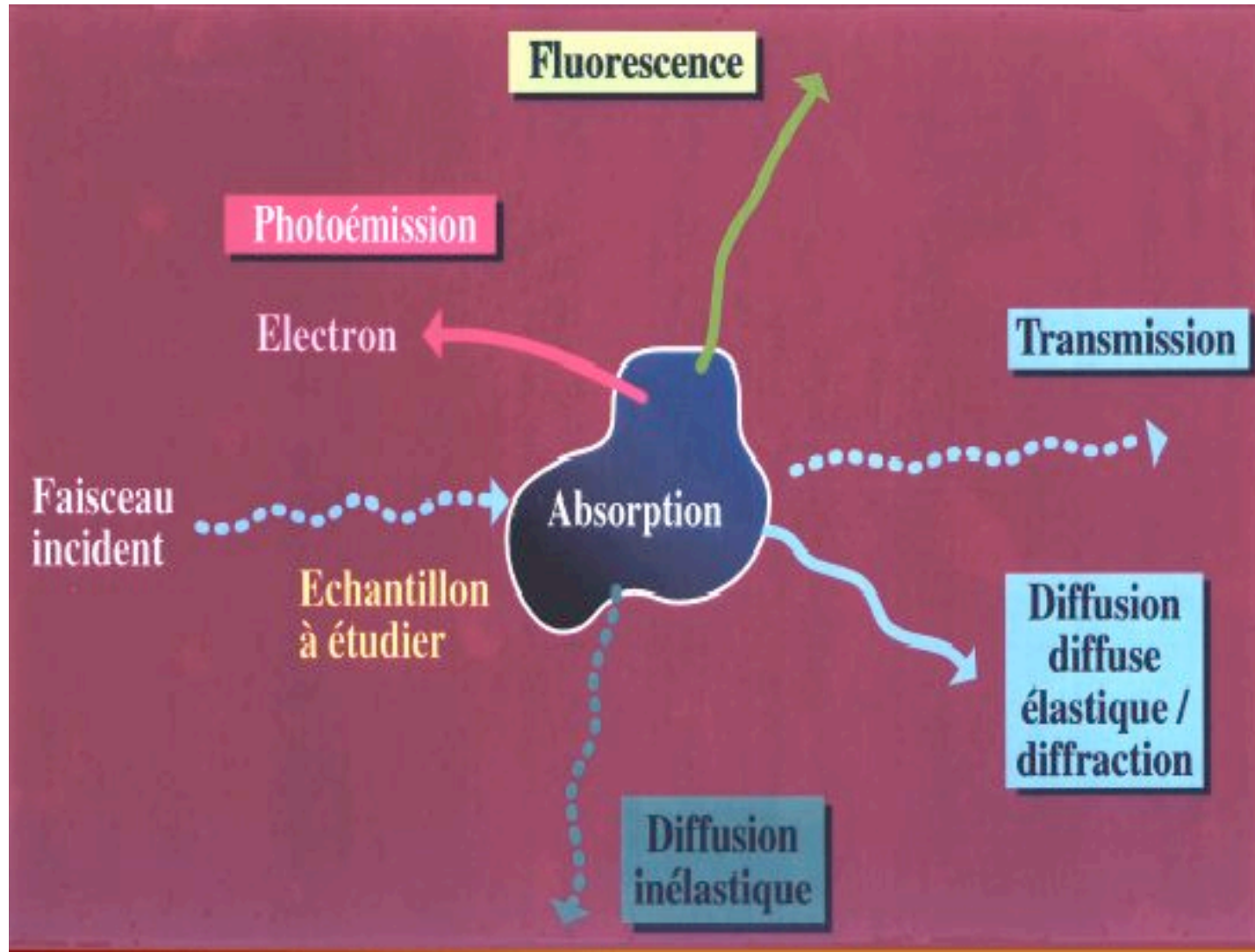
Light, a major tool to probe and transform matter

- Light is an electromagnetic (em) field which requires a dual description:
 - in terms of wave with frequency ν
 - in terms of particles (photons) with energy E travelling at 300,000 km/s.

$$\text{duality relation } E = h\nu \text{ (Einstein)}$$

- Depending on the photon energy: radiowaves, microwaves, infrared, visible, UV, X and gamma rays. SUN radiates mainly in IR, Visible and UV domains.
- Powerful, tunable and easy-to-focus light sources. Selecting E allows us to probe a specific phenomenon in matter.

Les interactions lumière/matière

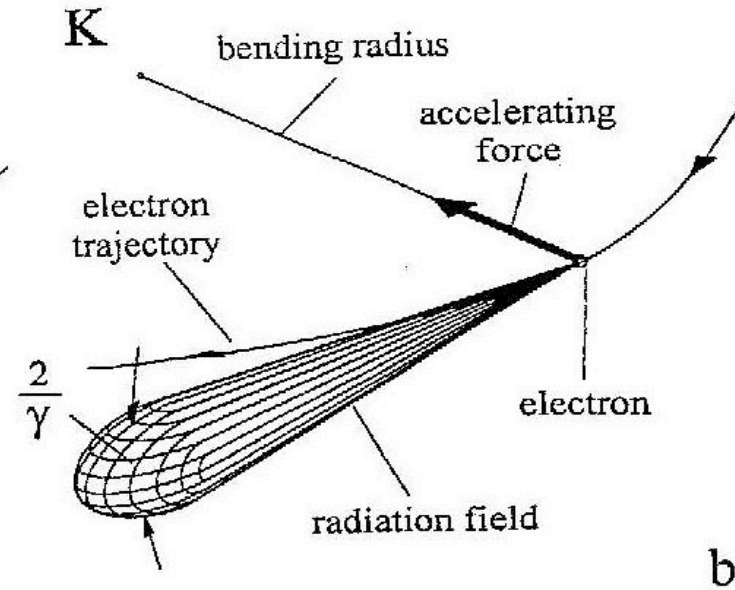
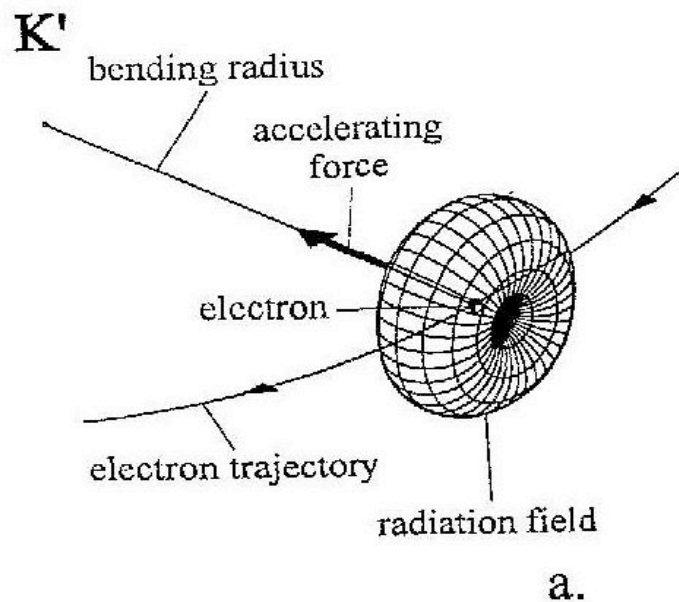


Quand la vitesse de l'électron accéléré est faible par rapport à c :

- émission de rayonnement e.m. dans toutes les directions
- photons mono-énergétiques

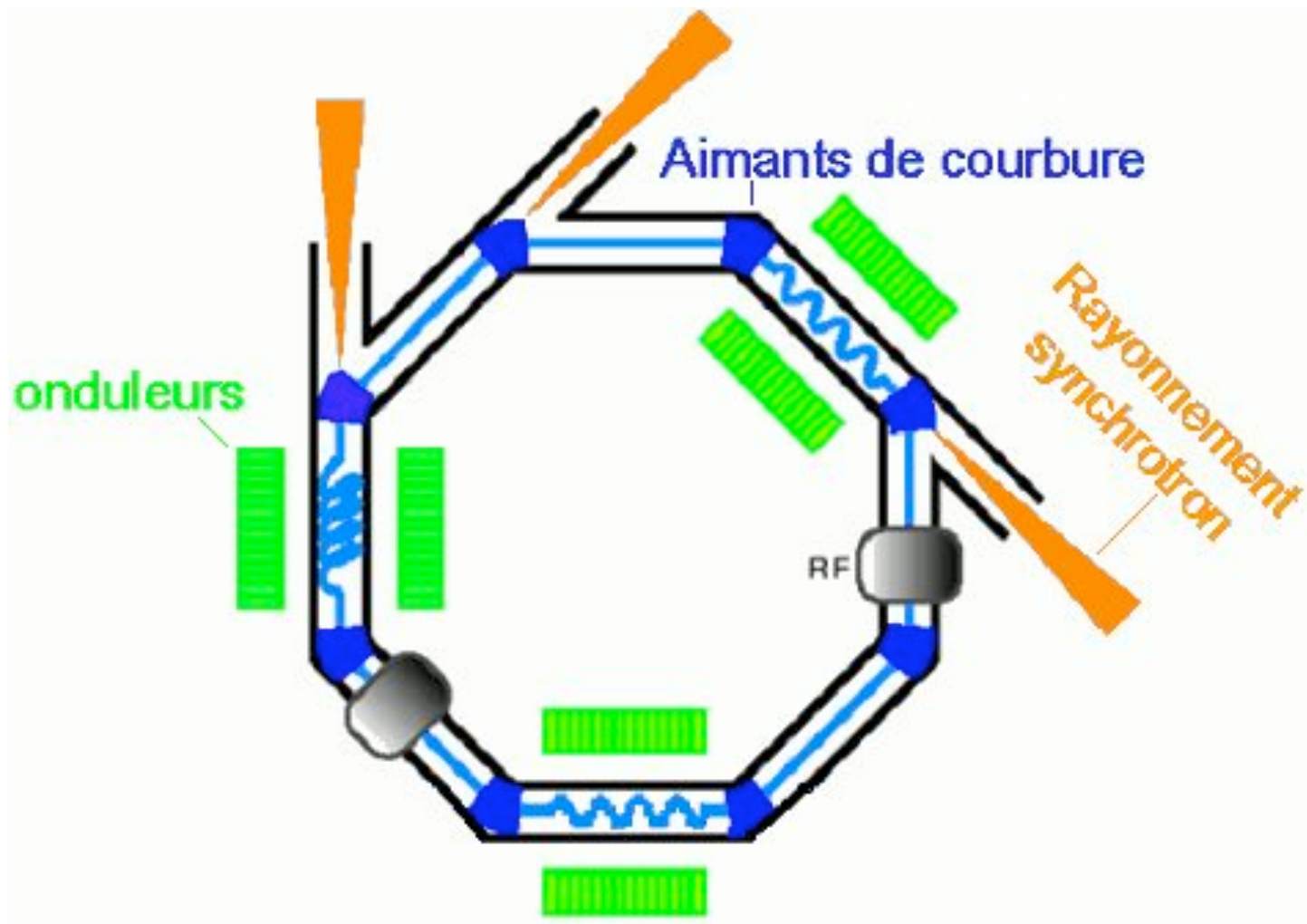
Quand la vitesse de l'électron accéléré est proche de c ,

- émission concentrée autour du vecteur vitesse dans un cône d'ouverture $2/\gamma$ rad.
- distribution continue en énergie



Pour $E = 2.75 \text{ GeV}$ (SOLEIL) $\gamma = mc^2/m_0c^2 = 5382$ $2/\gamma = 3,7 \cdot 10^{-4} \text{ rad}$

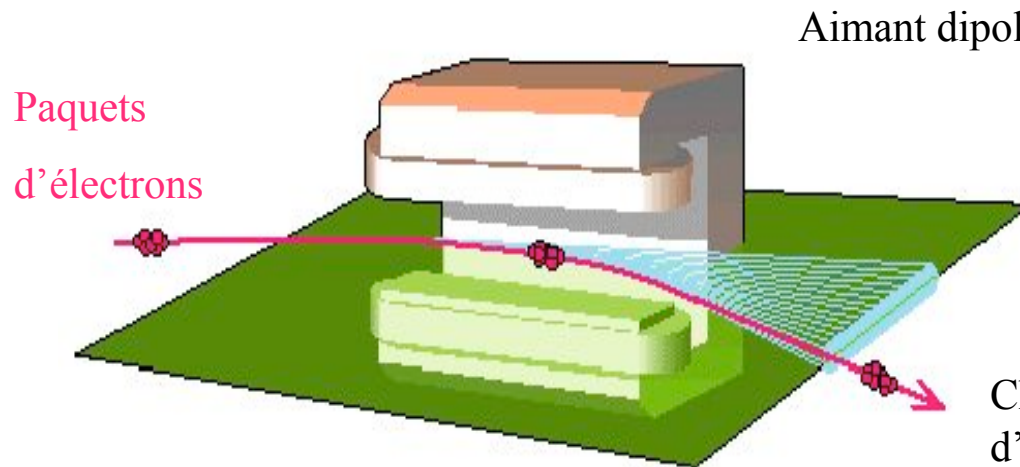
Schéma de principe d'un anneau de stockage à électrons



Le rayonnement est produit lors du passage du paquet d'électrons dans les aimants de courbure ou les onduleurs.

Source de lumière pulsée : à SOLEIL, flash de 50 ps toutes les 140 ns

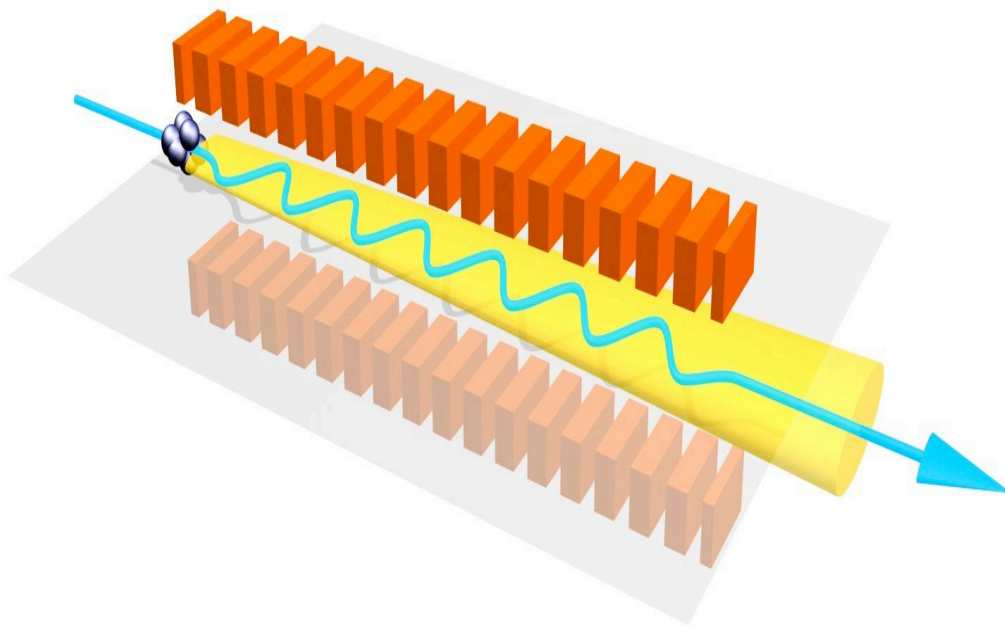
Les aimants de courbure de l'anneau de stockage



Chaque électron rayonne dans un cône d'ouverture 40 secondes d'arc, mais autour de directions étalées dans le plan horizontal.

Le spectre va de l'infrarouge lointain aux rayons X durs

Les onduleurs dans les sections droites



→ *Interférences du rayonnement émis par chaque électron le long des N périodes magnétiques*

- émission dans un cône d'ouverture en $1/(\gamma N^{1/2})$, donc brillance accrue.
à SOLEIL 4 s d'arc pour $N=100$
- raies discrètes de largeur spectrale en $1/N$ et d'intensité au pic en N^2
- longueur d'onde émise à l'harmonique n :

$$\lambda_n = \lambda_u / (2n \gamma^2) (1 + K^2/2)$$

$$\gamma = 5382$$

$$\lambda_u = \text{période magnétique de l'onduleur} ; K = B\lambda_u$$

→ *La longueur d'onde des raies dépend de l'énergie des électrons et des caractéristiques de l'onduleur*

Principaux synchrotrons de 3eme generation

EUROPE



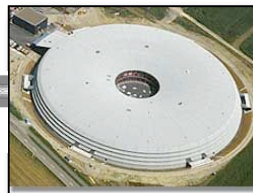
Berlin (Allemagne)



Trieste (Italie)



Grenoble (France)



Villigen (Suisse)

- DIAMOND (Didcot, GB)
- SOLEIL (France)



ALS



Berkeley

Advanced
Photon
Source

Chicago

USA



Canadian Light Source Inc.

CANADA

AUSTRALIE



JAPON





**DIAMOND,
Chilton campus, near Oxford,
UK**

The Great Silver Doughnut



**SOLEIL
Saint-Aubin, near Paris
France**

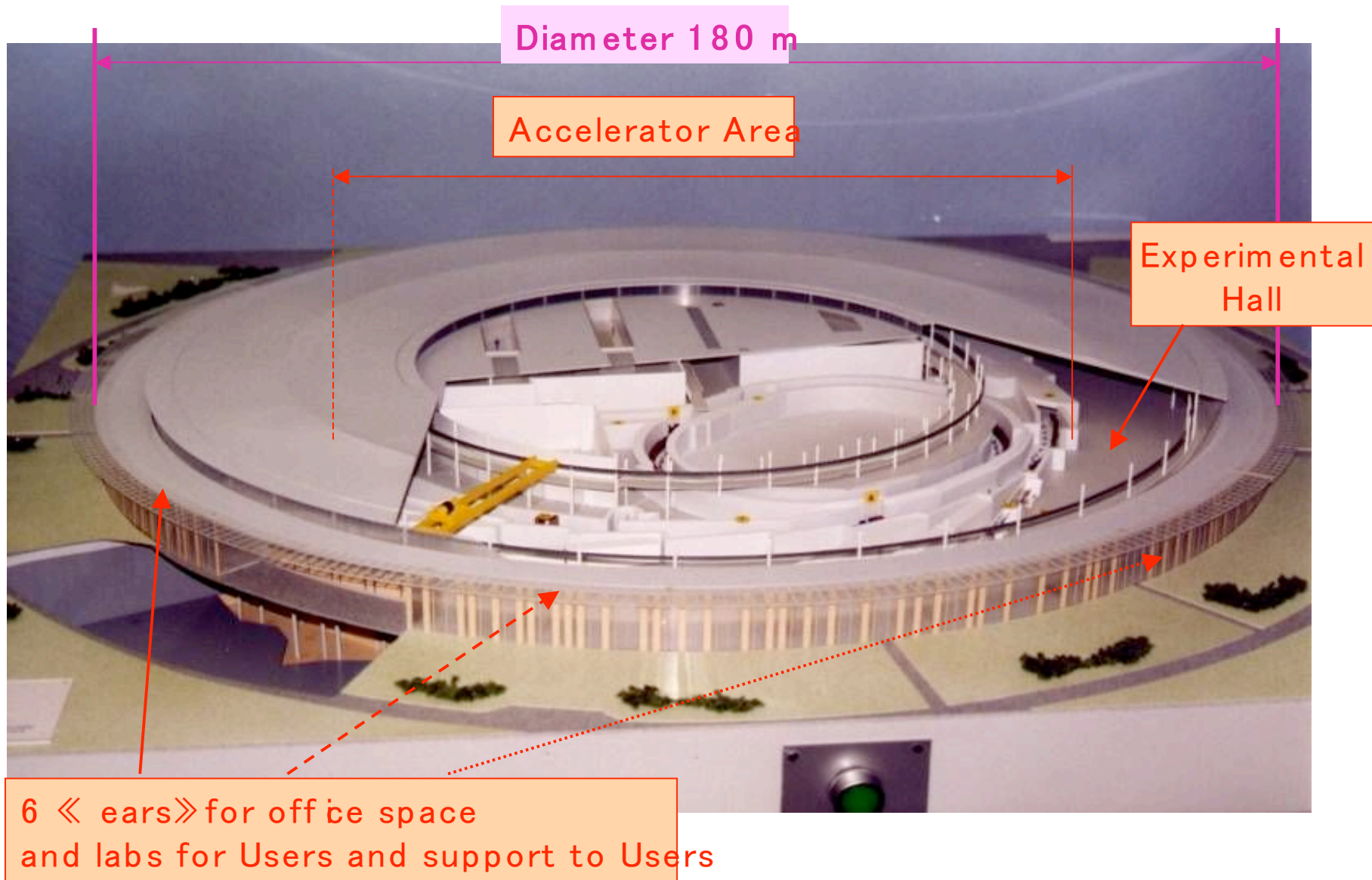
Buildings and infrastructure



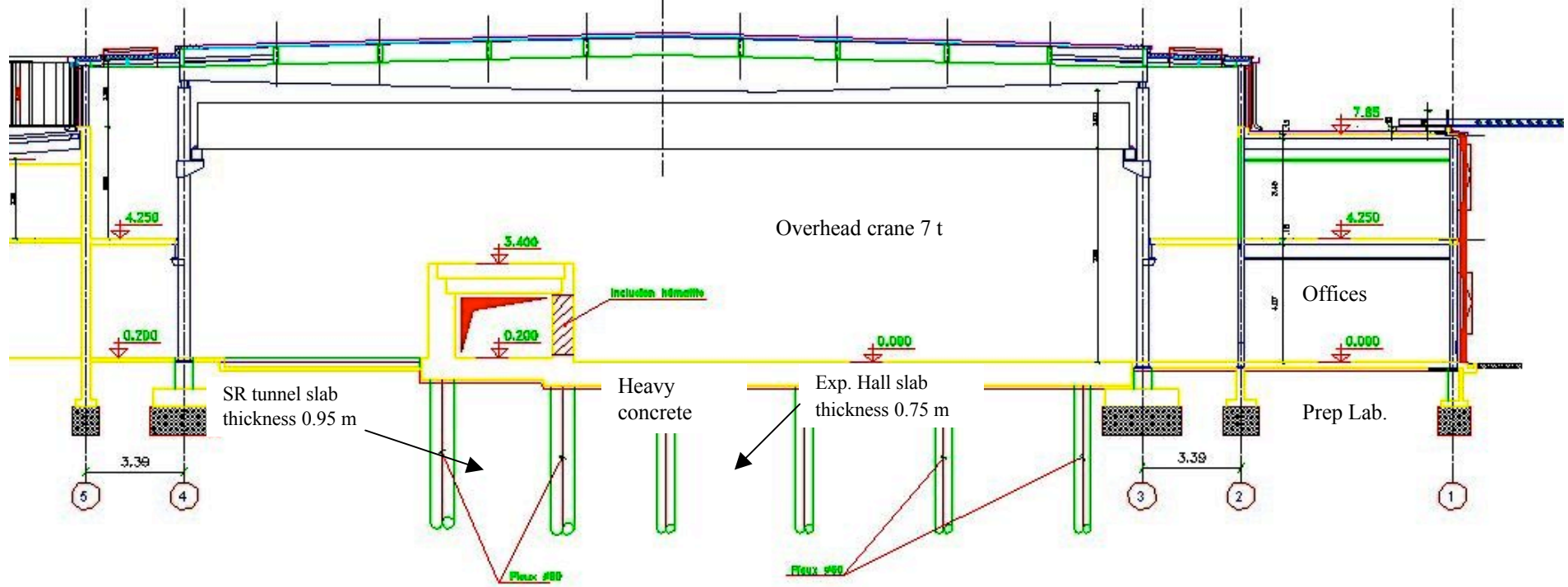
Central building with conference hall Restaurant



Synchrotron building



Conception du bâtiment synchrotron

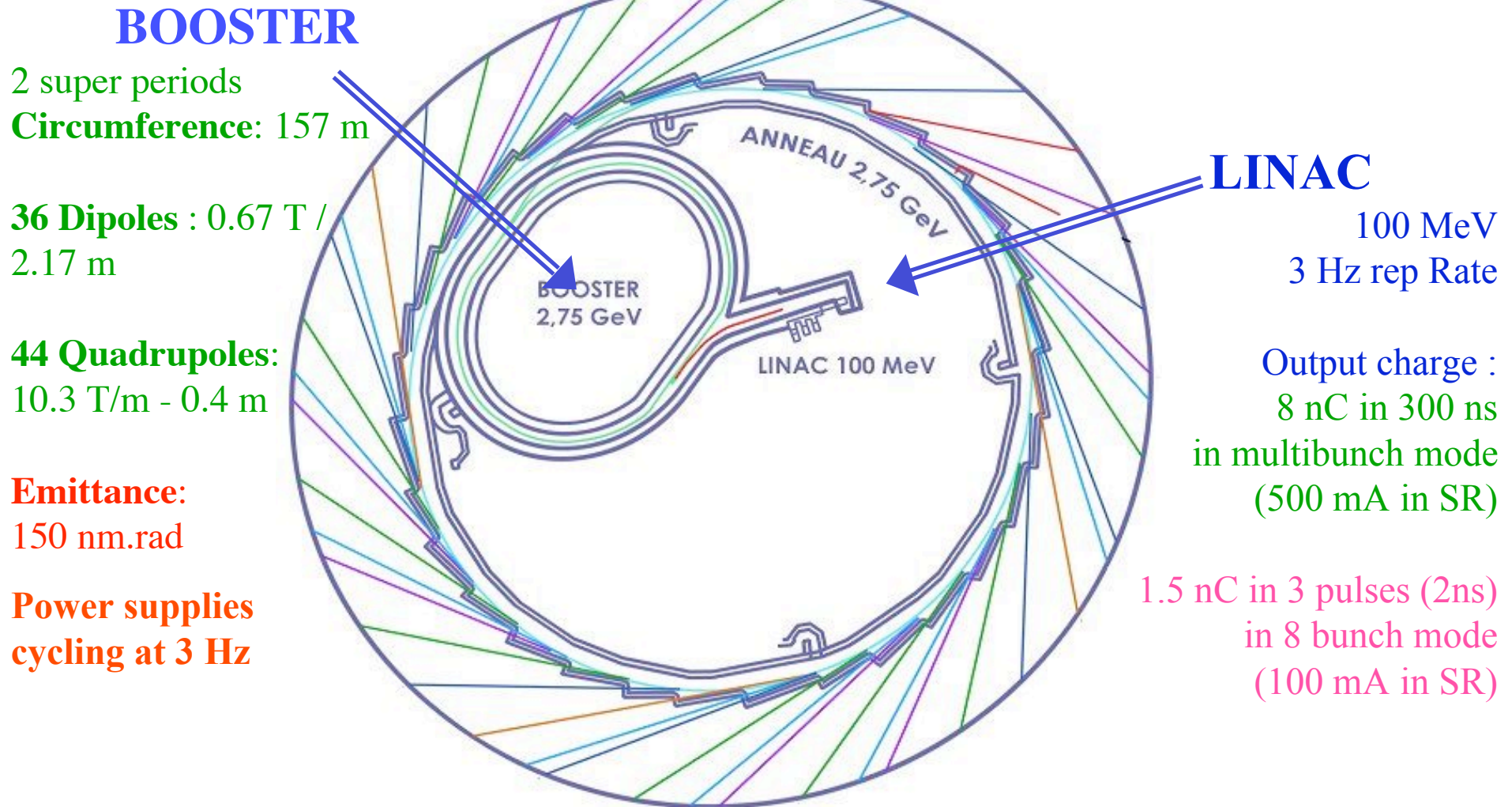


140 Piles Φ 80

416 Piles Φ 60

Dalles épaisses posées sur 556 pieux de 15m ancrés dans le sable de Fontainebleau

Linac and booster with topping-up operation



LINAC

Installation completed by THALES end January 05



1st beam test on Saturday July 2nd

Extensive commissioning for the benefit of THALES and SOLEIL.

Excellent performances

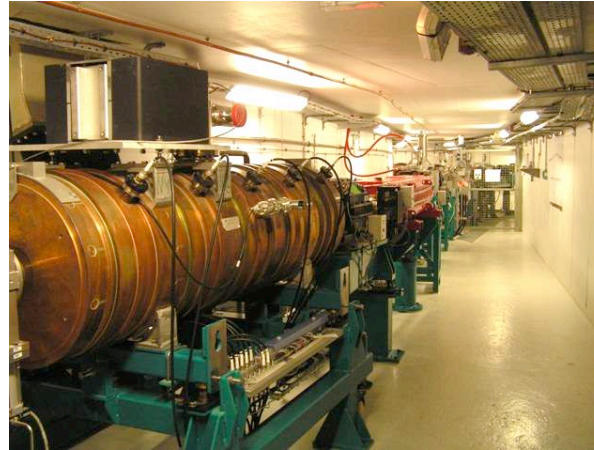
Acceptance on November 15th

Booster tunnel

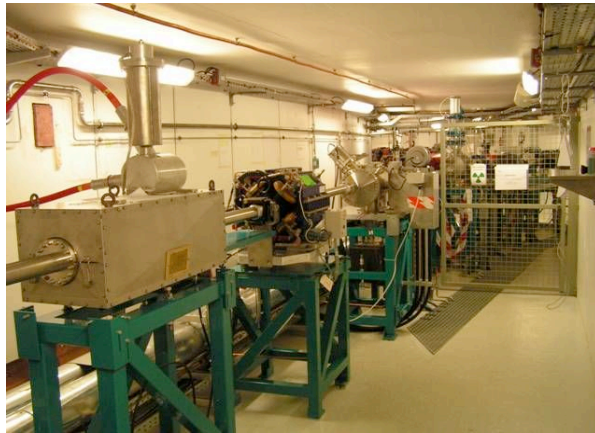
Arcs



RF Cavity



Injection

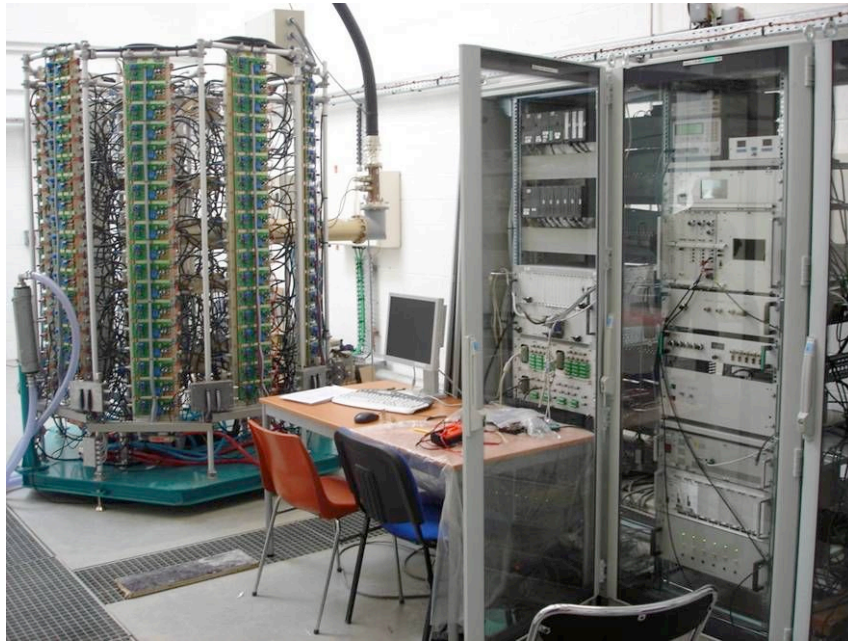


Extraction



Installation completed in July 2005

Booster : RF and power supplies



Solid state RF amplifier
(40 kW)

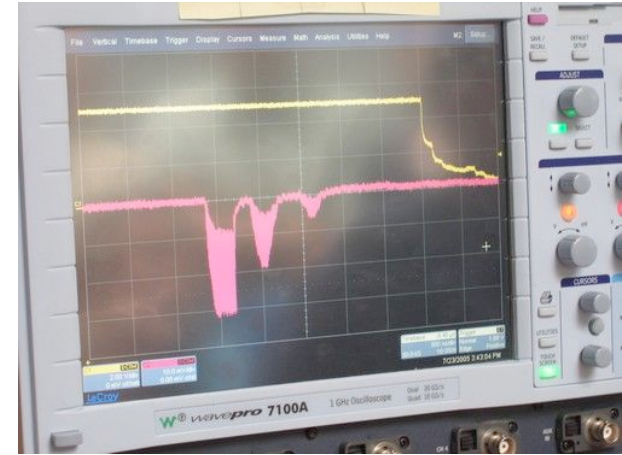


Dipole power supplies
(Bruker, 3Hz)
(2 x 560 A / 1000 V)

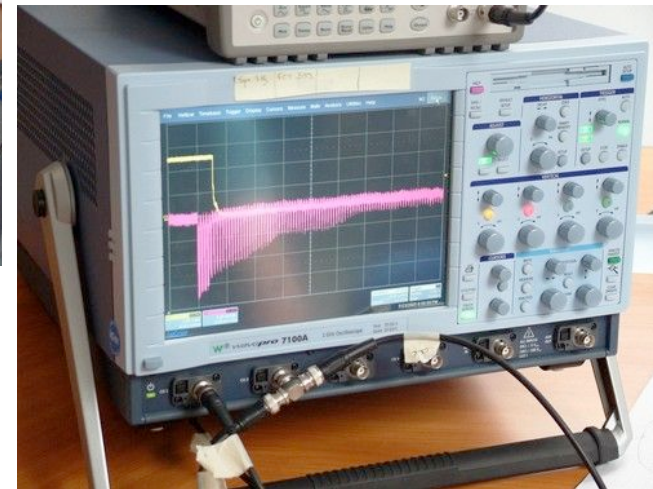
First beam in the booster at 110 MeV: July 23rd 2005



Very stable and reliable operation of
Linac and all equipment

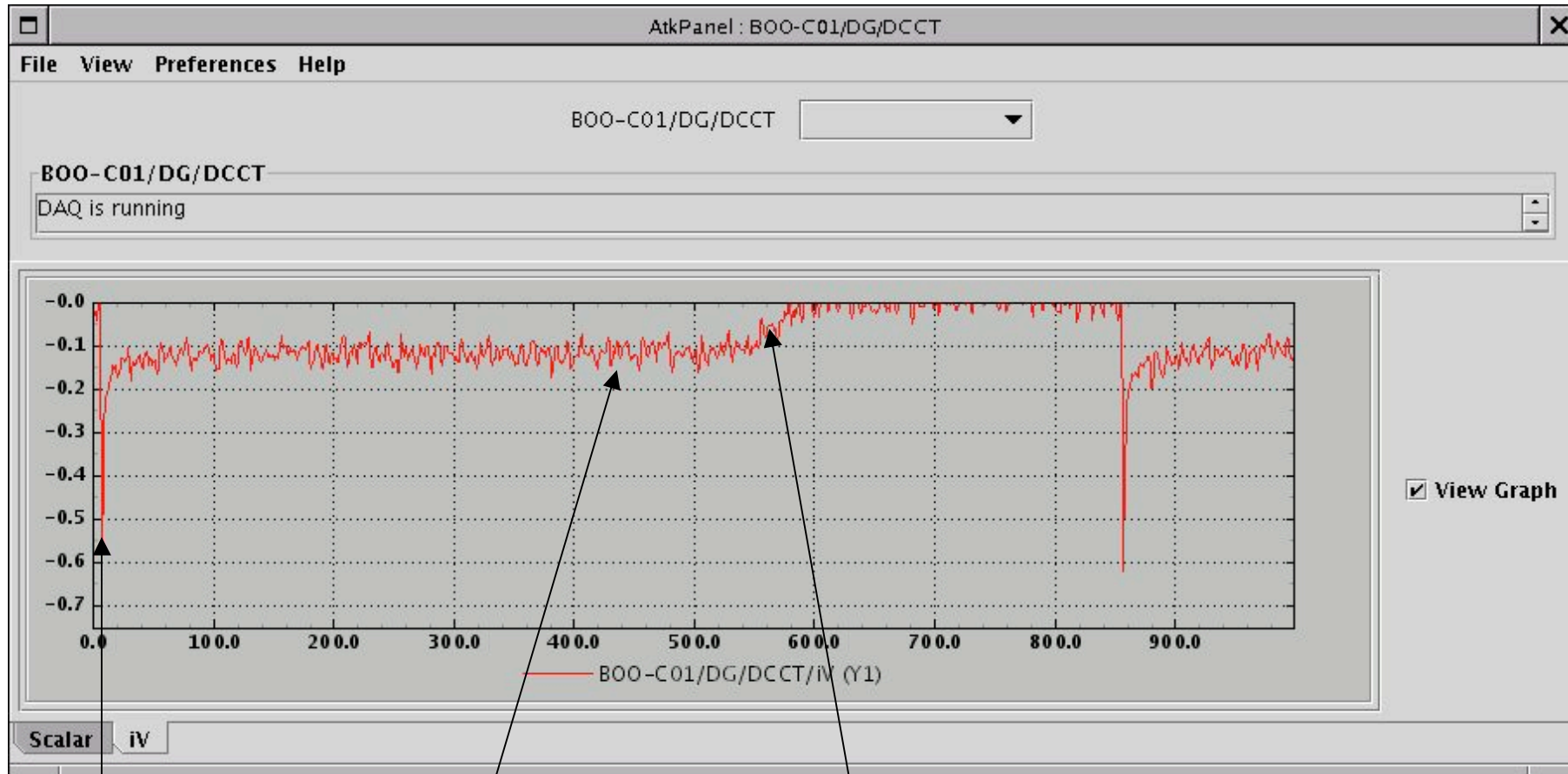


2 turns !



Beam stored !

1st beam in booster accelerated up to the nominal energy (2.75 GeV) October 13th 2005

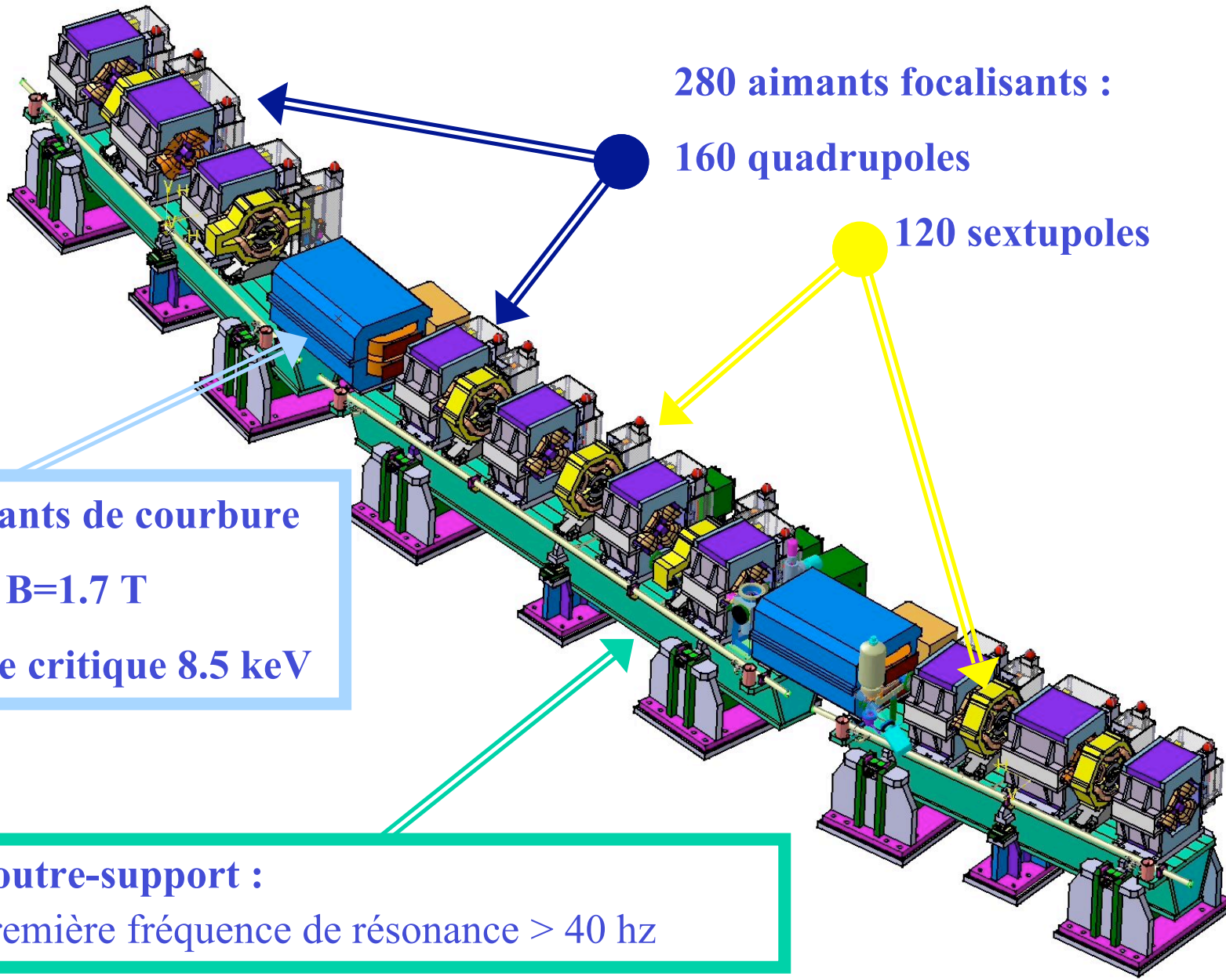


Injection à
110 MeV

2.75 GeV

Pertes sur
résonances

Efficacité 2.5%



280 aimants focalisants :

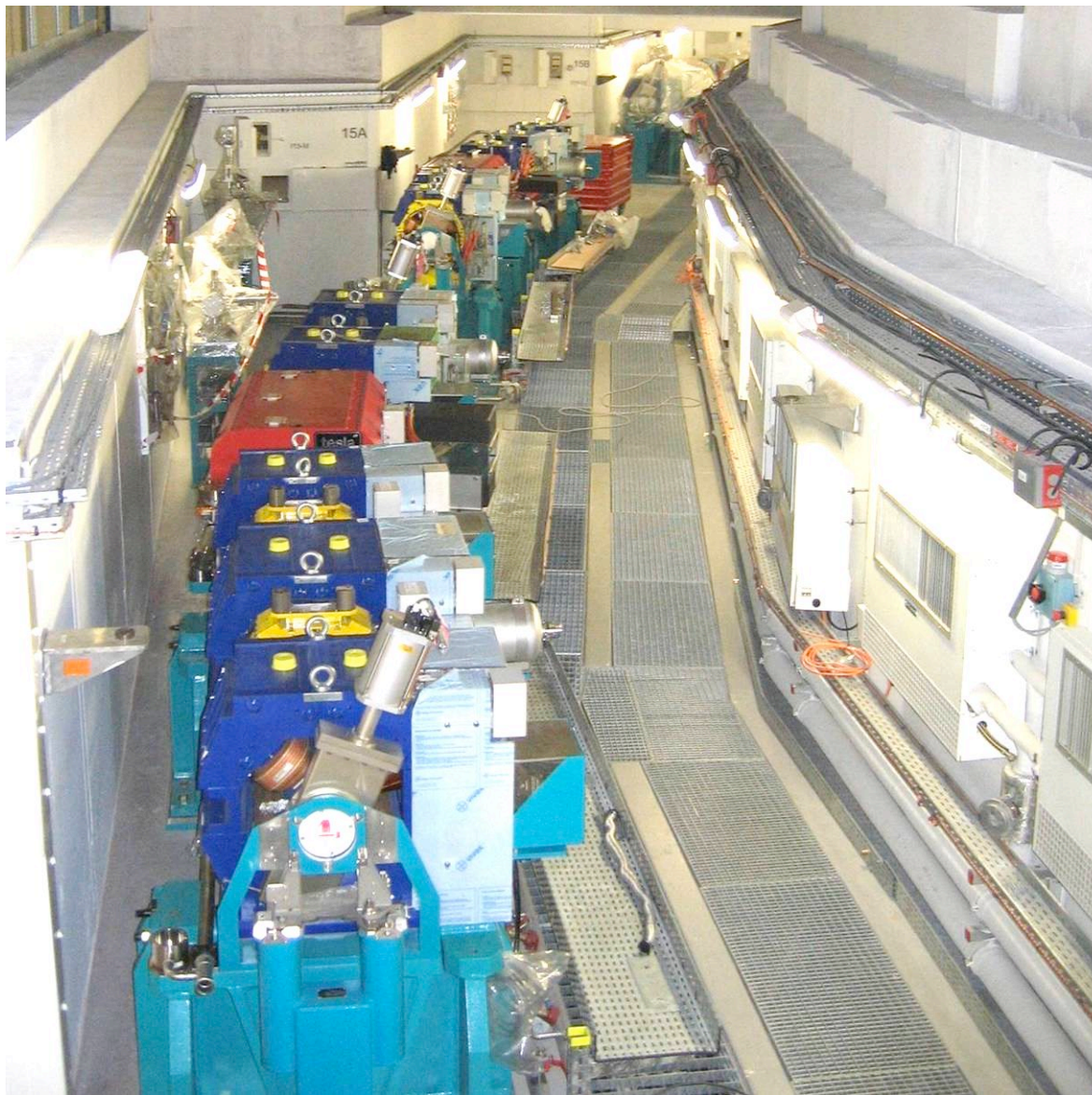
160 quadripoles

120 sextupoles

32 aimants de courbure
L=1m, B=1.7 T
Energie critique 8.5 keV

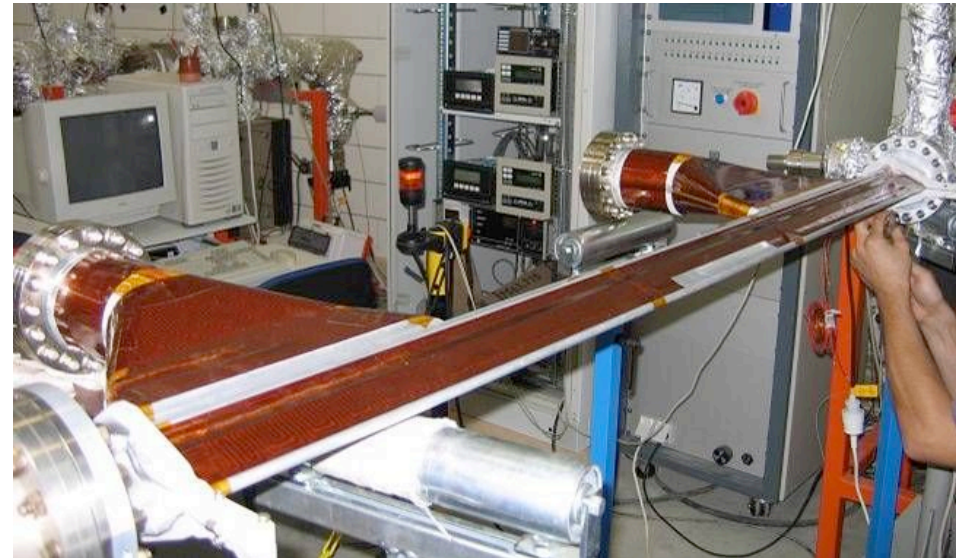
Poutre-support :
Première fréquence de résonance > 40 hz

Storage Ring



Vacuum bakeout

- Goals :
 - Outgassing all vacuum parts
 - Activation of NEG coating deposited on the quadrupole chambers
- Method :
 - Heating of the vacuum chambers up to 180°C

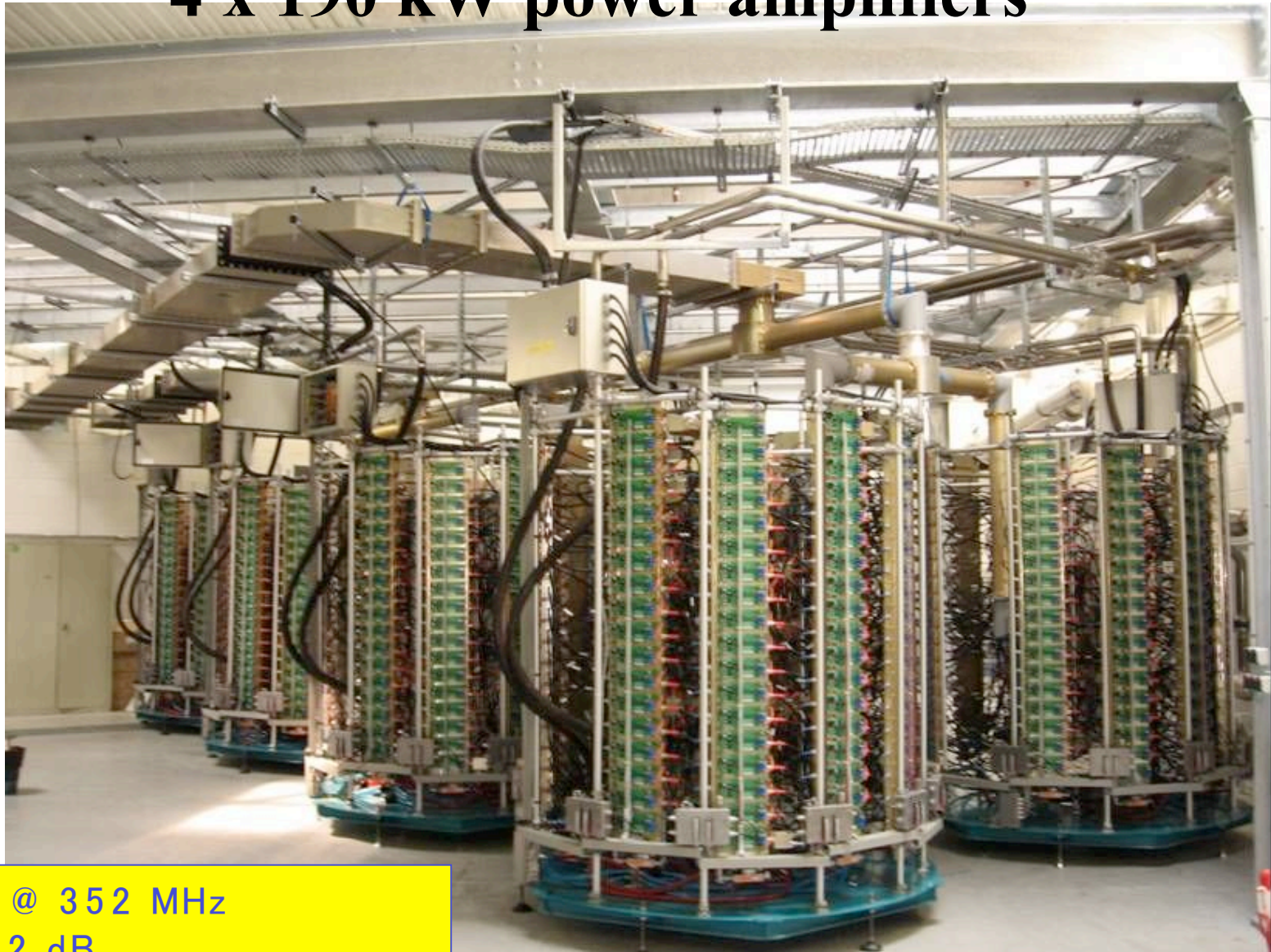


Storage ring power supplies



Storage ring RF plant

4 x 190 kW power amplifiers



190 kW @ 352 MHz
Gain = 52 dB
Overall Efficiency (PS,..) ~ 50%

Superconducting RF cavities



1st cryomodule enables alone operation up to 300 mA.

A 2nd cryomodule is being built by ACCEL for operation at 500 mA (2nd half of 2007)

Cyogenics in radiofrequency zone



Cooling circuits



Paramètres de l'anneau de stockage

- Nombre d'onde horizontal Q_x 18.28
- Nombre d'onde vertical Q_z : 10.26
- Chromaticités naturelles ξ_x/ξ_z : - 2.84/-2.23
- Momentum compaction α : 4.38×10^{-4}

- Radio Fréquence: 352 MHz
- Nombre Harmonique (nb. max de paquets): 416
- Tension RF maximum: 4.8 MV
- Perte d'énergie par tour (avec insertions): 1200 keV
- Puissance RF max (à 500 mA): 600 kW

Storage ring

Installation completed by May 2006

Commissioning :

Started in May 2006 (without RF)

Then : 3 weeks in June

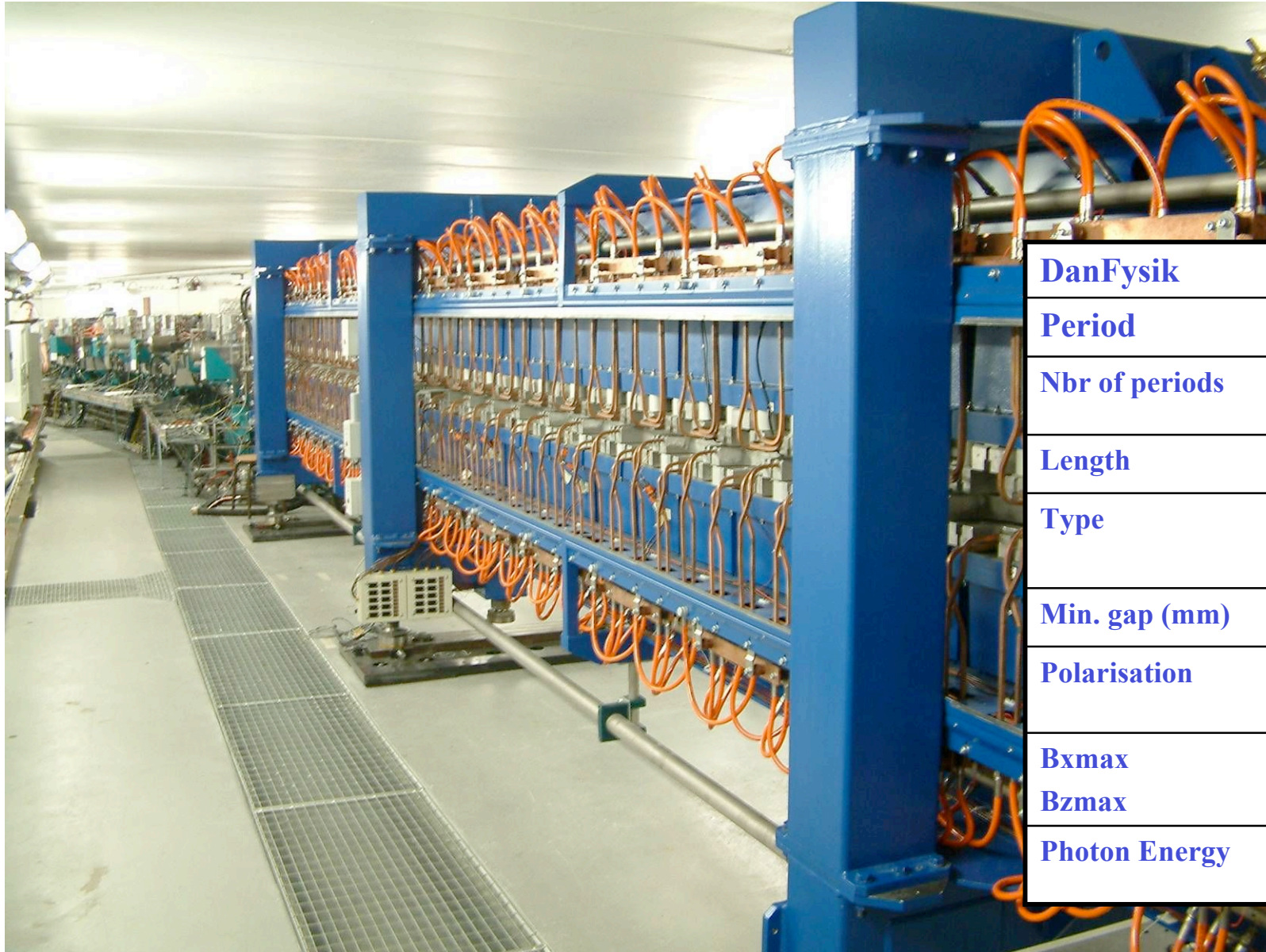
1 week in July

6 weeks in September/October

Excellent results and fast progress: nominal performances reached (2.75 GeV, 300 mA with the first RF cryomodule)

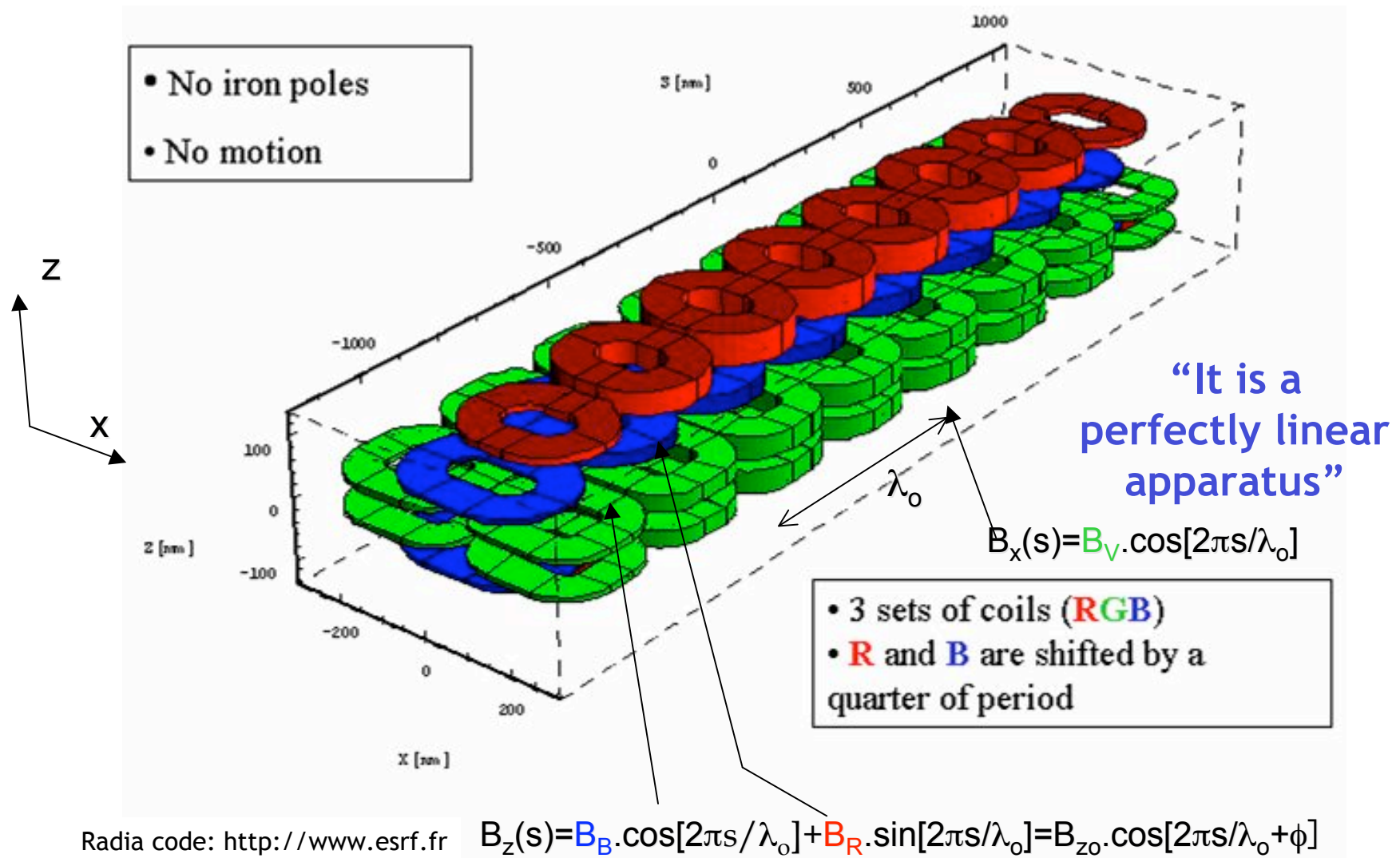
Storage Ring Commissioning will restart in December and will continue over 2007.

Electromagnet helical undulator HU640

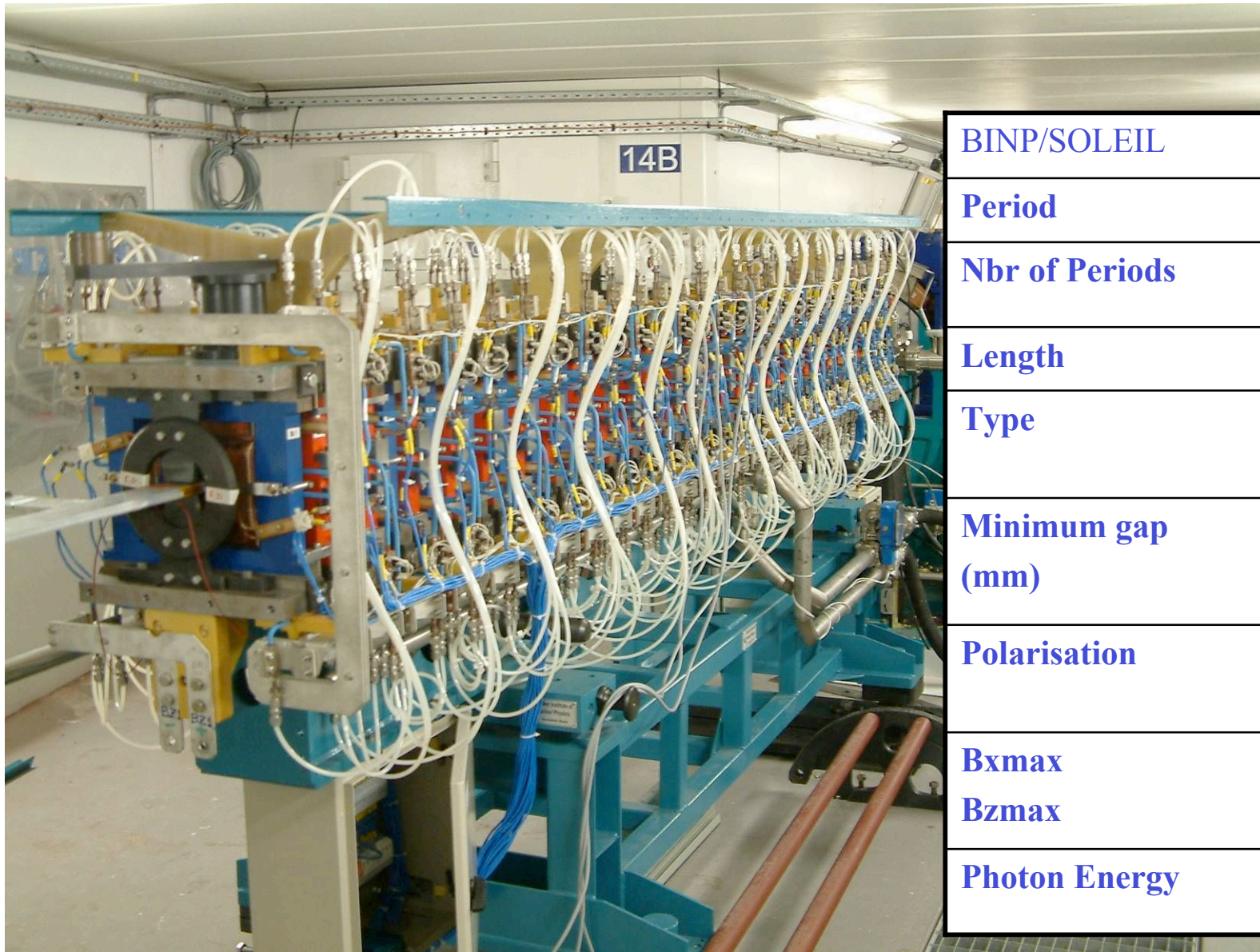


DanFysik	HU640
Period	640 mm
Nbr of periods	14
Length	10.0 m
Type	Electro-magnetic
Min. gap (mm)	19
Polarisation	Circ./Lin. adjustable
Bxmax	0.09 T
Bzmax	0.11 T
Photon Energy	5 – 40 eV

HU640 undulator: principle of operation



Electromagnet helical undulator HU256



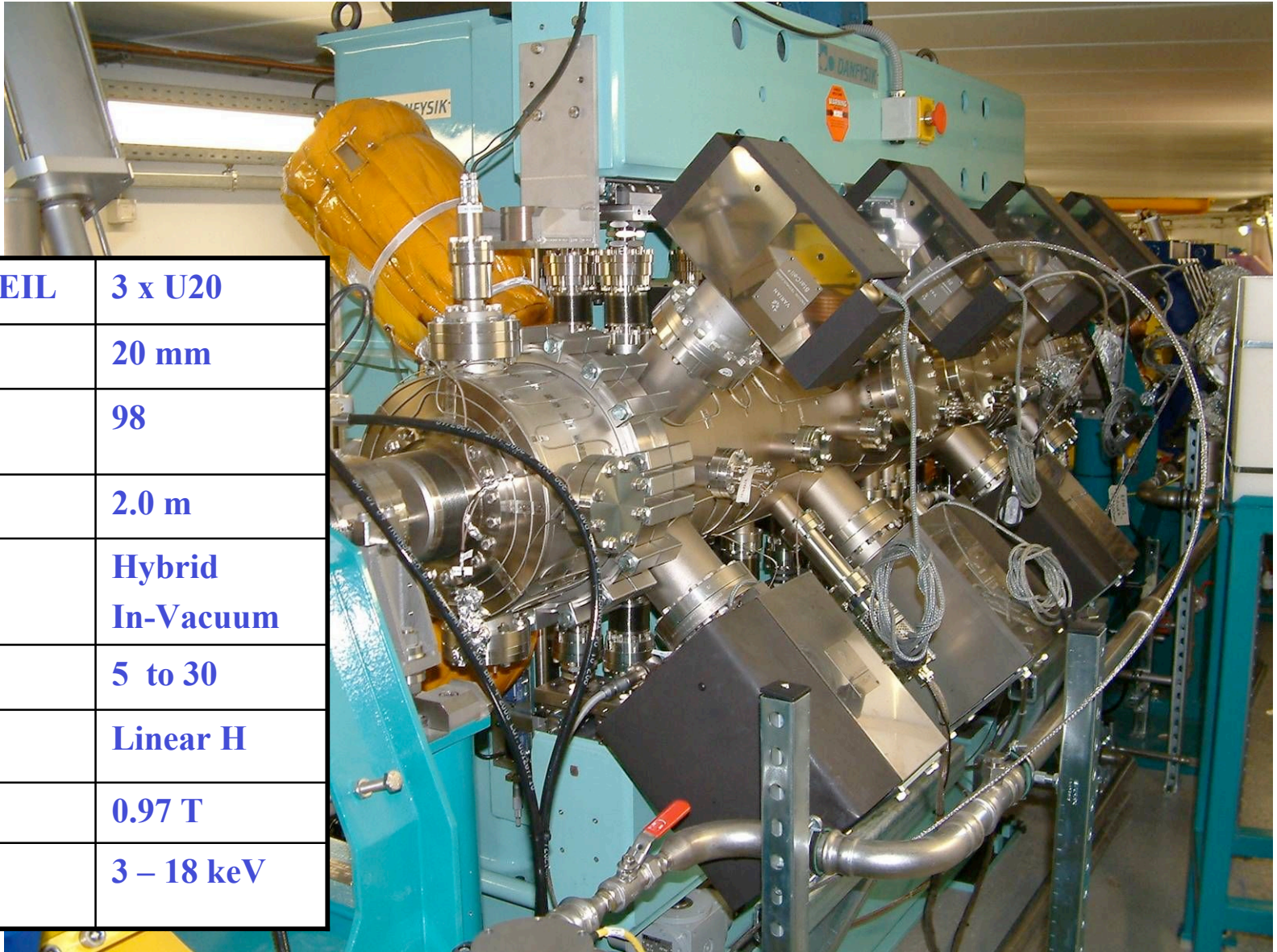
BINP/SOLEIL	3 x HU256
Period	256 mm
Nbr of Periods	12
Length	3.6 m
Type	Electro-magnetic
Minimum gap (mm)	15 (V) 50 (H)
Polarisation	Circ./Lin. H et V
Bxmax	0.275 T
Bzmax	0.400 T
Photon Energy	10 – 1000 eV

Apple-II type helical undulator HU80

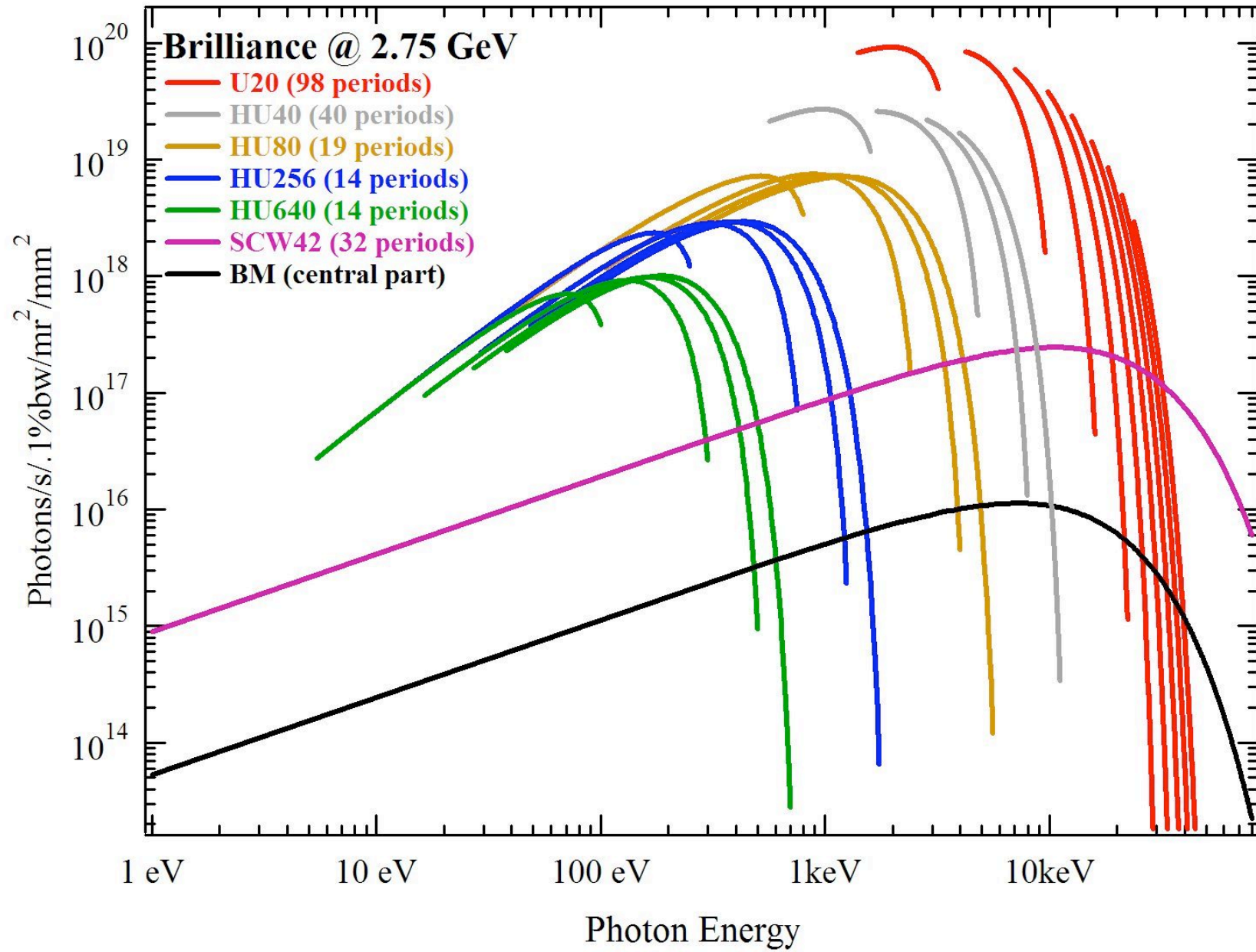
ELETTRA/SOLEIL	3 x HU80
Period	80 mm
Number of Periods	19
Length	1.65 m
Type	Apple-II
Minimum gap (mm)	15 to 250
Polarisation	Circ./Lin.
Bxmax	0.76 T
Bzmax	0.85 [1.0] T
Photon Energy	80 [35] – 1500 eV



In-Vacuum undulator U20



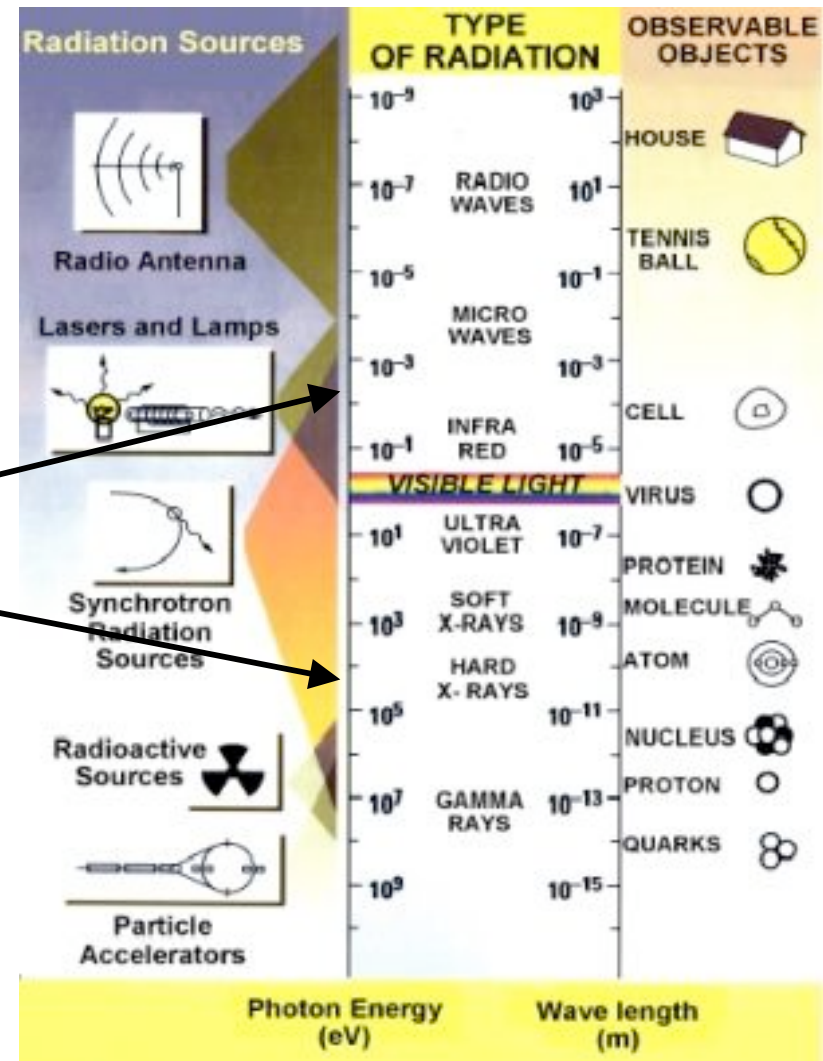
DANFYSIK/SOLEIL	3 x U20
Period	20 mm
Nbr of periods	98
Length	2.0 m
Type	Hybrid In-Vacuum
Min. gap (mm)	5 to 30
Polarisation	Linear H
Bzmax	0.97 T
Photon Energy	3 – 18 keV



La gamme accessible du spectre electromagnetique

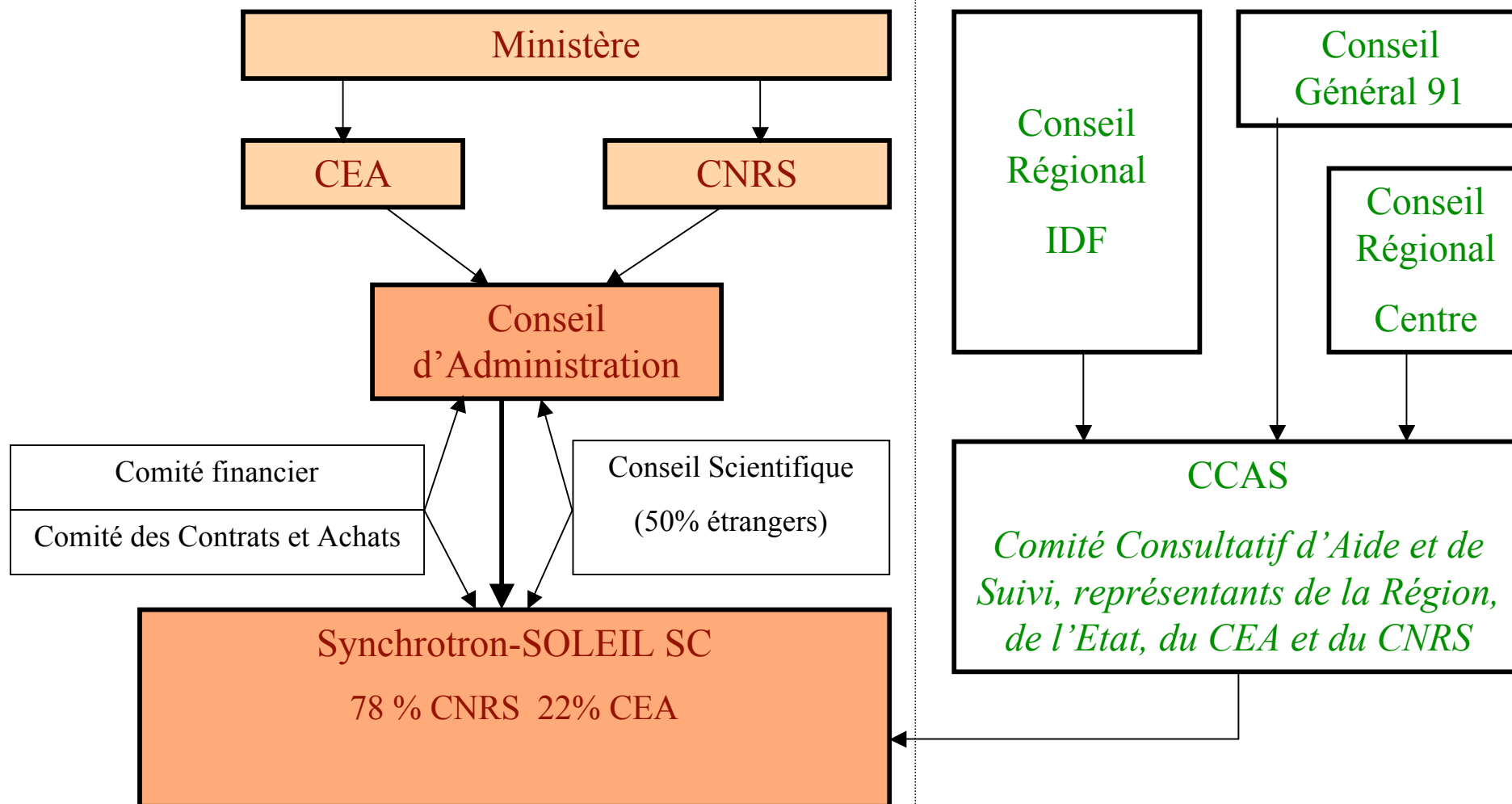
SOLEIL:

De l'infrarouge lointain ($\lambda = 300$ microns)
aux rayons X durs (0,03 nm),
soit 7 ordres de grandeur d'énergie de
photons.



SOLEIL: partenaires et statuts

Partenaires financiers



Budget construction	281.1	<i>MEuros, valeur 2000, hors TV</i>
dépenses		
salaires	68.9	
machines	58.6	
experiences	60.6	
bâtiments et s.t.	77.0	
consommables	16.0	
recettes (part collectivités locales: 2/3)		
<u>CR région Ile de France</u>	148.6	
<u>CG Essonne</u>	34.1	
<u>CR région Centre</u>	3.2	
CNRS	63.6	
CEA	24.7	
Ministère	3.1	
Budget fonctionnement 2002-2009	112.0	
CNRS (72%) et CEA (28%)		
Budget consolidé → 2009	393.1	

Personnel

Sur budget SOLEIL

- 350 CDI en 2009 (plus 48 PhD et post-docs)
 - 3 chercheurs + 1 assistant-ingénieur + 1 doctorant + 1 post-doc + ¼ ingénieur/ligne
 - SOLEIL héberge une UR CNRS dérogatoire, pour *agents CNRS affectés* (mais salaires reversés au CNRS) → Grille, évaluation et évolution de carrière CNRS.
 - Personnels *détachés* des organismes pour 5 ans renouvelables ou *recrutements directs sur CDI*
- *Dans tous les cas (affectation, détachement ou CDI):* poste ouvert 3 mois sur le WEB avec fiche de poste détaillée, puis sélection et concours.

Hors budget SOLEIL

- Possibilité d'affectation recherche d'enseignants-chercheurs. → conventions signées (Paris 6, Orléans, Paris 11, Versailles-Saint Quentin, Cergy, Montpellier II) ou en formalisation avec plusieurs universités: Nancy, Rennes, Strasbourg, ...).
- Procédure d'association de scientifiques d'équipes extérieures avec contrat individuel. Procédure d'association inverse (chercheur SOLEIL → équipe externe) encouragée.

Les utilisateurs

- Cellule Utilisateurs (3 personnes + bibliothécaire)

- Attribution du temps de faisceau:

- Faisceau payant (plafonné à 10%)

- Faisceau gratuit : le reste

Attribution par comités de programme (deux fois /an) : 70%

Maintenance, améliorations et recherche propre de la ligne 20- 25%

Accès rapide (décision de la Direction) 5-10%

Modalités particulières: projets à long terme (2 ans), allocations groupées

- Maison d'hôte: phase I avec 40 chambres (automne 2007)

- Financement européen pour chercheurs CE

Le TGE SOLEIL, c'est :

- **Une source synchrotron de troisième génération**

Une source de lumière extrêmement brillante, polyvalente (de l'infrarouge lointain aux rayons X, soit 7 ordres de grandeur en énergie de photons), avec des faisceaux micrométriques très stables en position, orientation et intensité.

- **Une coopérative scientifique : 2500 utilisateurs par an, dont au moins un quart d'étrangers**

- **Pour les sciences de la matière et du vivant:** Un outil de recherche interdisciplinaire aux multiples utilisations en recherches fondamentales et appliquées (physique, chimie, nouveaux matériaux, nanotechnologies, biologie, médecine, environnement, sciences de la terre).

- **Ouvert aux applications industrielles ou sociétales** (santé, environnement, patrimoine).

- **Un centre national de statut particulier** (Société Civile à partenaires publics: CNRS, CEA).

- **Envergure internationale. Insertion forte dans l'environnement scientifique et social régional.**

SOLEIL, une nouvelle référence dans les sources de RS d'énergie intermédiaire?

■ Des sources de très haute brillance

- Petites dimensions transverses des paquets d'électrons: **15 μm en hauteur et 150 μm en largeur** dans les aimants de courbure.
- Faible divergence du faisceau RS, notamment dans les onduleurs.
- Haute intensité du courant circulant (500 mA)
- Des onduleurs optimisés pour chaque domaine spectral

Une stabilité exceptionnelle des faisceaux à court et long terme

■ Faisceau d'électrons

- stabilité du sol: 1 μm /10 m sur une heure
- moniteurs de position du faisceau d'électrons
- stabilité des supports d'éléments magnétiques, adaptation des régimes de vibration

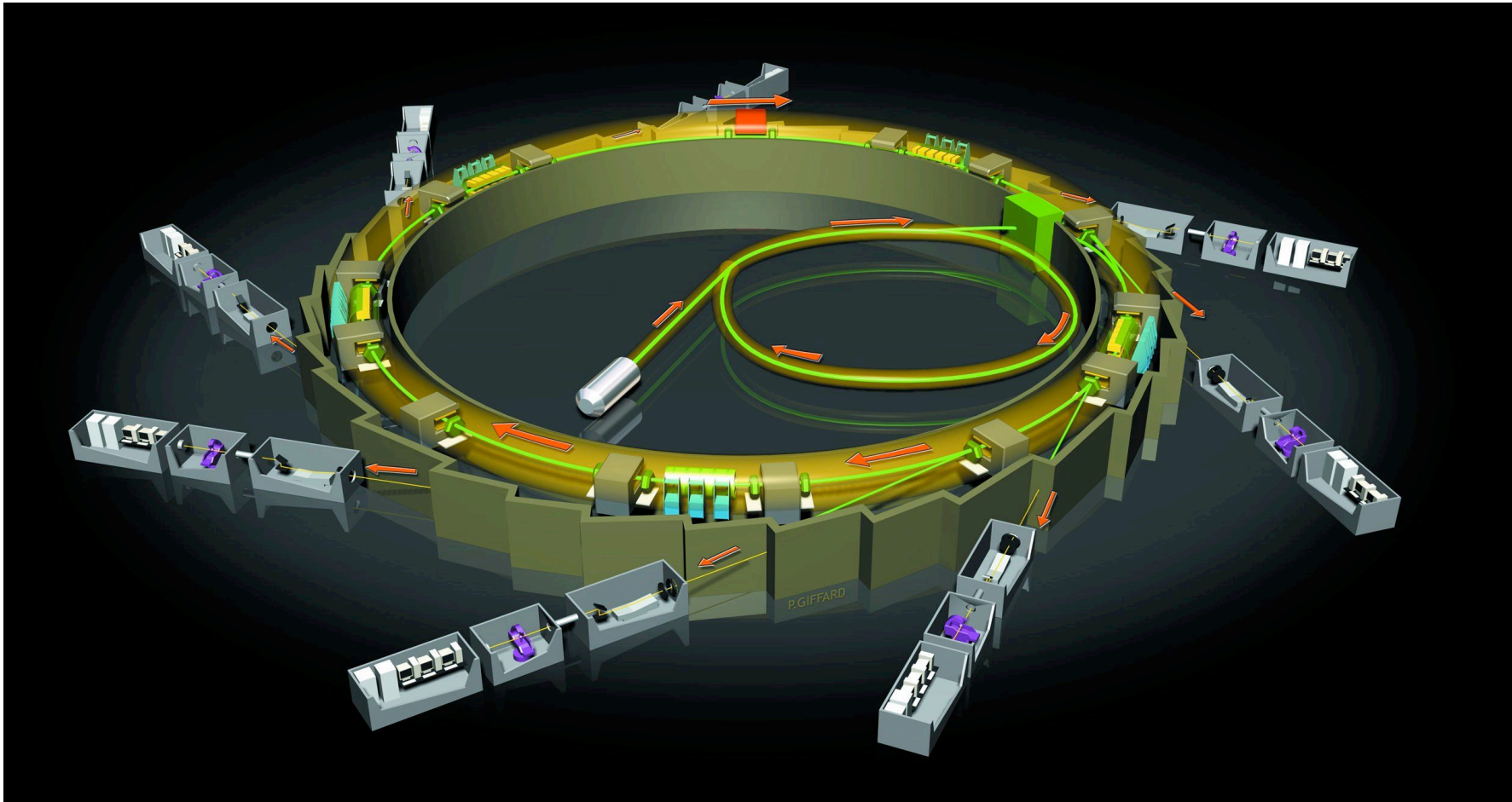
→ *Stabilité au μm du faisceau d'électrons en chaque point de la circonférence*

■ Faisceaux de photons

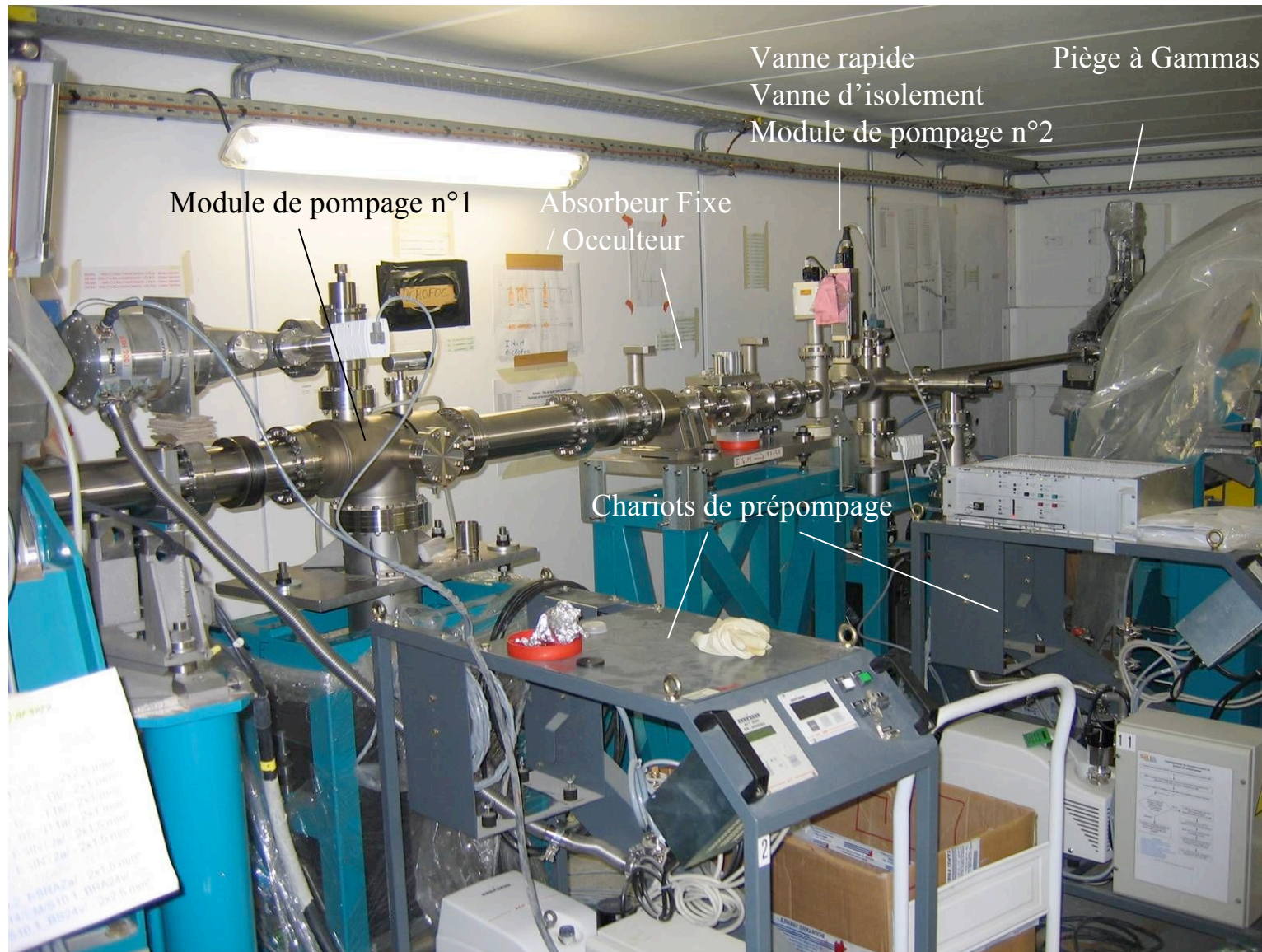
- charge thermique constante sur les optiques (injection quasi-continue)
- lignes de lumière conçues pour une grande stabilité du faisceau RS
 - compacité
 - adaptation des modes de vibration
 - alignement :
 - moniteurs de faisceau
 - intelligence artificielle pour diagnostic et auto-contrôle
(en développement)

→ *Stabilité au μm du faisceau synchrotron au niveau de l'échantillon*

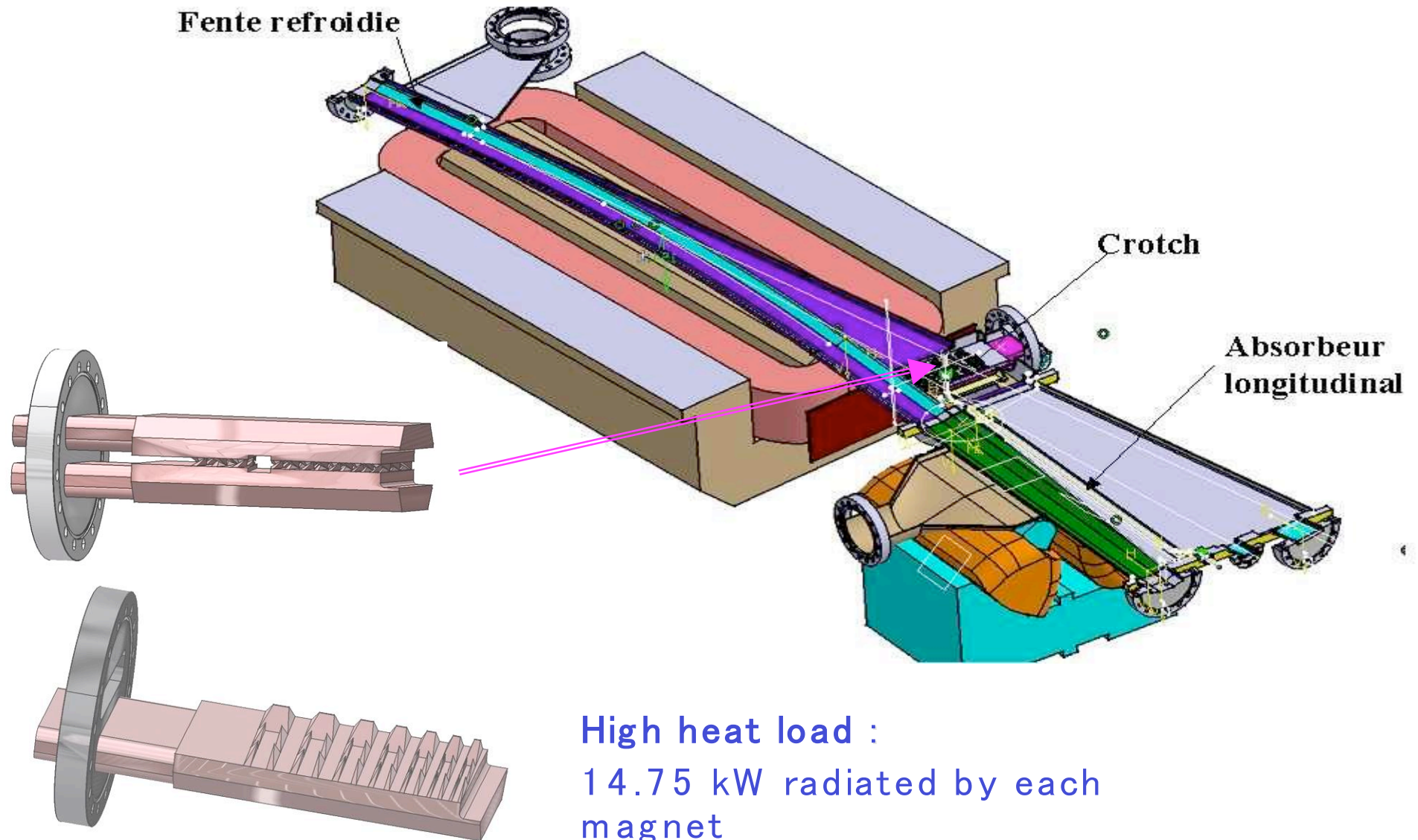
Extraction du rayonnement synchrotron: les lignes de lumière



Front-ends



Bending magnet vacuum chamber

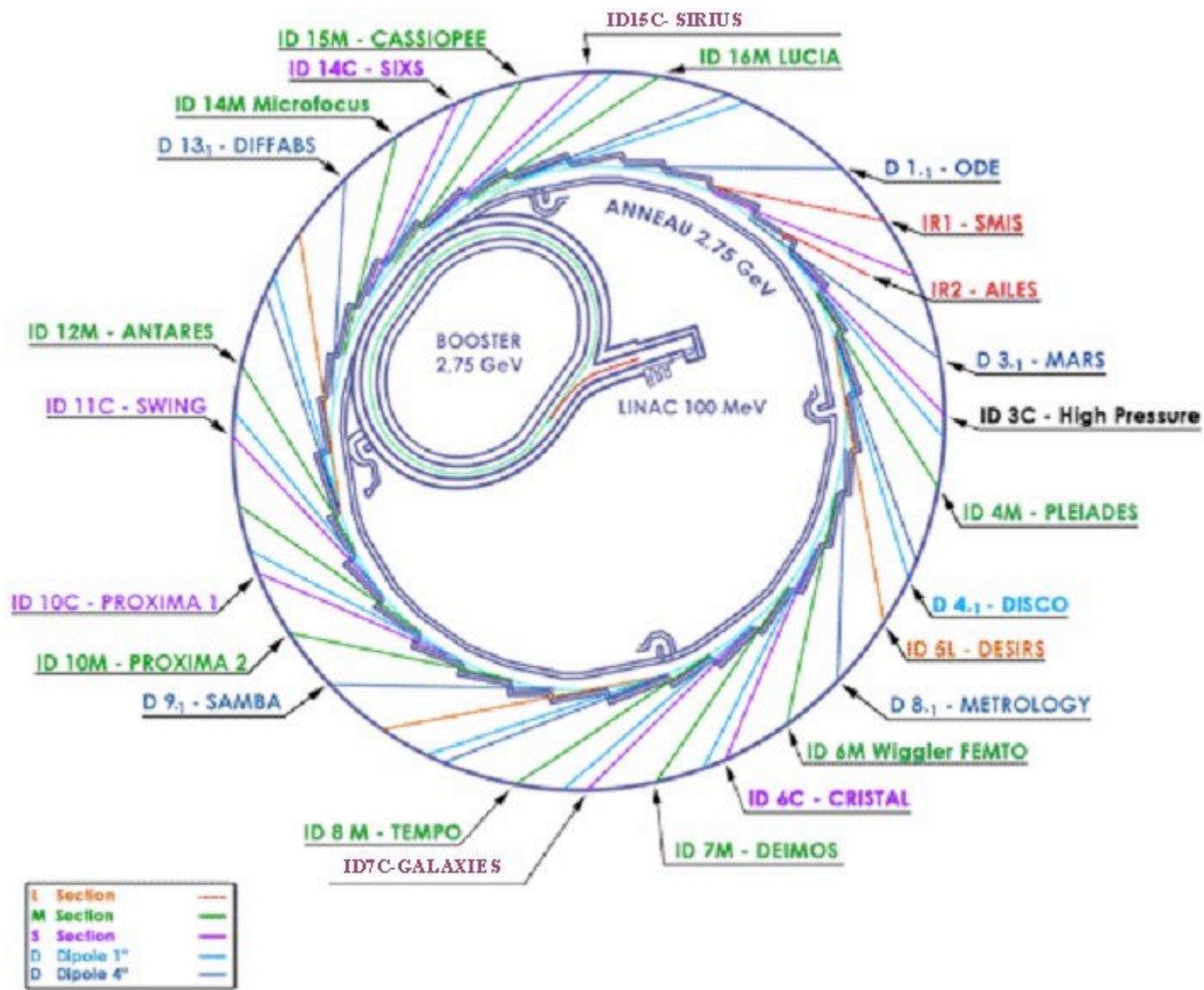


High heat load :
14.75 kW radiated by each
magnet

Only 50% on the crotch

Les lignes de lumière

- **La première opérationnelle: LUCIA hébergée au SLS (Suisse)**
- **12 lignes ouvertes en 2006-2007 :**
 - 6 sur onduleur**
 - 6 sur aimant de courbure dont 2 lignes infrarouge et 1 ligne de métrologie**
- **8 lignes ouvertes en 2007-2008**
 - 5 sur onduleur**
 - 2 sur aimant de courbure**
 - LUCIA rapatriée en 2008 sur onduleur**
- **4 lignes ouvertes en 2008-2009**
- **2 lignes de microscopie X (2009-2010)**
- **...Et un potentiel de quelques sections droites et plusieurs dizaines d'aimants de courbure**



Free straight sections :

1S 1M 1+2/3 L



Les «cabanes» de la ligne Diffabs

Séminaire DAPNIA, 06/11/2006

Le programme scientifique

Parmi les 19 premières lignes

9 lignes dans le visible et l'ultra-violet (<1.3 keV) pour l'étude des propriétés électroniques

(Supra) conduction; magnétisme

Surfaces et interfaces; adsorbats; nanostructures; chimie des surfaces

Physique et chimie des ions et molécules; astrophysique; plasmas; biophysique

Chimie de l'état solide; verres

Géochimie

10 lignes dans les rayons X pour les études structurales

Cristallographie

Matière molle, polymères

Matière condensée dure; interfaces; nanostructures, magnétisme

Chimie de l'état solide ; réactivité; catalyse

Biophysique

Sciences de la Terre

Environnement

LUCIA 0.7-7 keV

2006/2007

METROLOGY

DESIRS 5-40 eV

SMIS

AILES

CASSIOPEE 10-1000 eV

TEMPO 100-1500 eV

PROXIMA I 4-18 keV

CRISTAL 4.5-30 keV

SWING 3-17 keV

DIFFABS 3-25 keV

SAMBA 4-40 keV

ODE 3.5-23 keV

2007/2008

DISCO 5-20 eV

PLEIADES 10-1000 eV

MICROFOCUS 50-1500eV

ANTARES 10-900 eV

DEIMOS 350-2000 eV

PROXIMA II 4-17 keV

MARS 5-30 keV

2008/2009

GALAXIES 4-12 keV

SIXS 4-20 keV

SIRIUS 2-10 keV

HIGH PRESSURE 10-70 keV

2009-2010

SOFT X-RAY MICROSCOPY

MICROSCOPIUM

Micro X-ray absorption spectroscopy and imaging

→ *Operational at SLS*

3 branches: UV-VUV; soft X-rays ; hard X-rays

Spectroscopy and photochemistry in dilute matter

Mid IR microscopy and microspectroscopy. 2 branches

Far IR FT spectroscopy. High and medium resolution

Photoelectron spectroscopy. High energy & spin resol.

Photoelectron spectroscopy. Focus on time-resolved

Macromolecular crystallography # 1

Condensed matter crystallography

SAXS, WAXS and GISAXS

Coupled absorption and diffraction, high T

Absorption spectroscopy: energy scan

Absorption spectroscopy: energy dispersive

Circular dichroism. Mass spectrometry. Confocal imaging

Inner shell excitations in dilute matter

XRMS, RIXS. XPEEM

Photoelectron spectroscopy

X-ray circular and linear magnetic dichroism

Macromolecular crystallography #2

Diffraction and absorption on radioactive samples

HR inelastic X-ray scattering. High energy photoemission

Diffraction on hard and soft condensed matter

Resonant diffraction on soft and magnetic interfaces

Diffraction at high P (and T). X-ray tomography

Soft X-ray microscopy: full field and scanning

X-ray imaging and microanalysis

Bending magnet

undulator

wiggler

Séminaire DAPNIA, 06/11/2006

Repartition entre disciplines

Physique incluant les nanosciences 25 %

Science des matériaux 15.5 %

Chimie 15.5 % **56 %**

Sciences de la vie **20.5 %**

Géosciences et astrophysique **11 %**

Environnement **10 %**

Métrologie **2.5 %**

Un programme pour les applications et les utilisations industrielles et sociétales

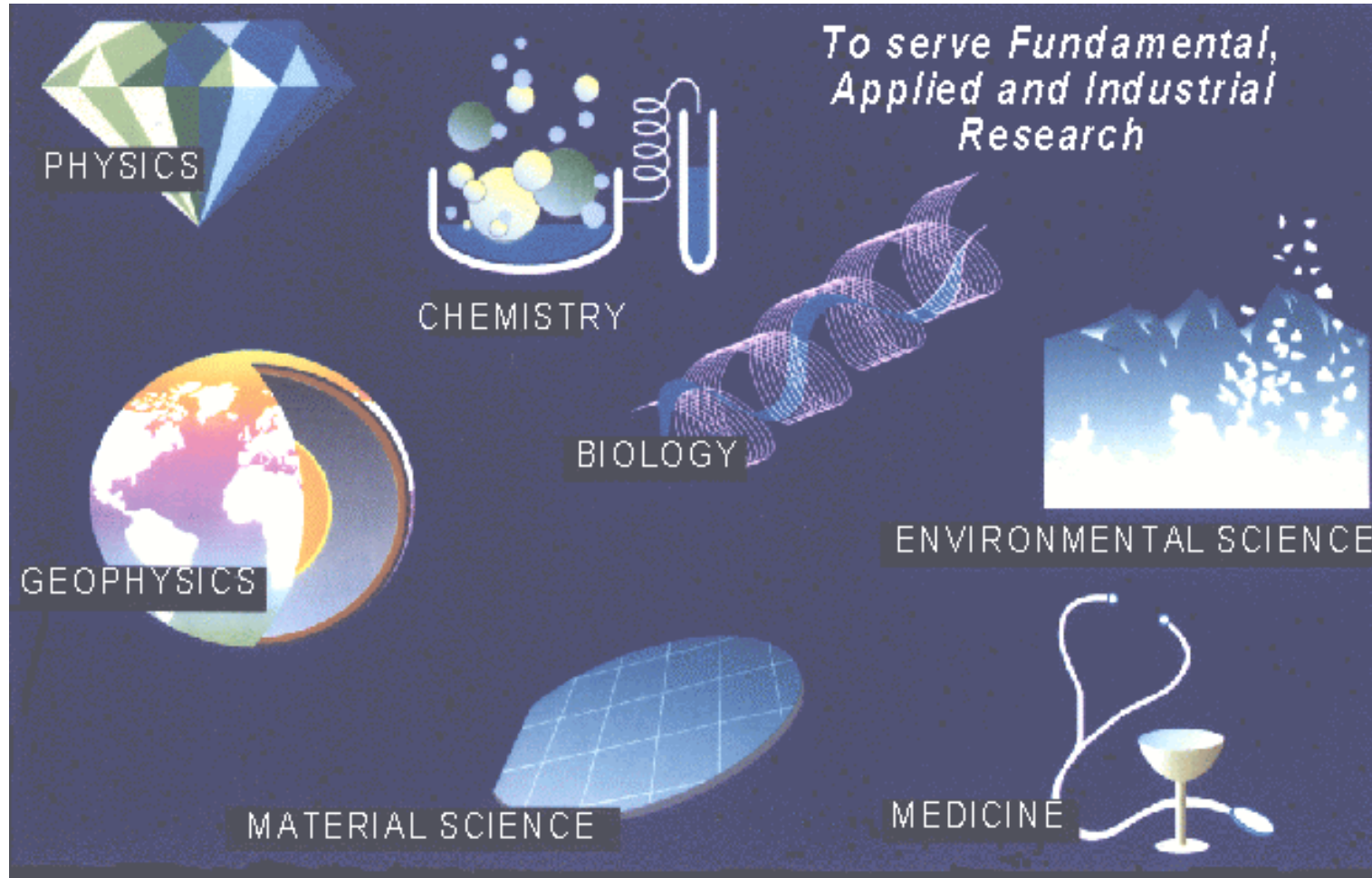
■ Des lignes dédiées aux applications industrielles:

- Station de microscopie IR (2007)
- Ligne MARS pour matériaux radioactifs 2007
- Ligne LIGA (coll. Thalès/CNRS)*
- Station de micro-diffraction pour nanostructures (étude des contraintes) et l'environnement*
- Ligne dédiée aux industries alimentaire, pharmaceutique et des cosmétiques*
(* recherche de financement)

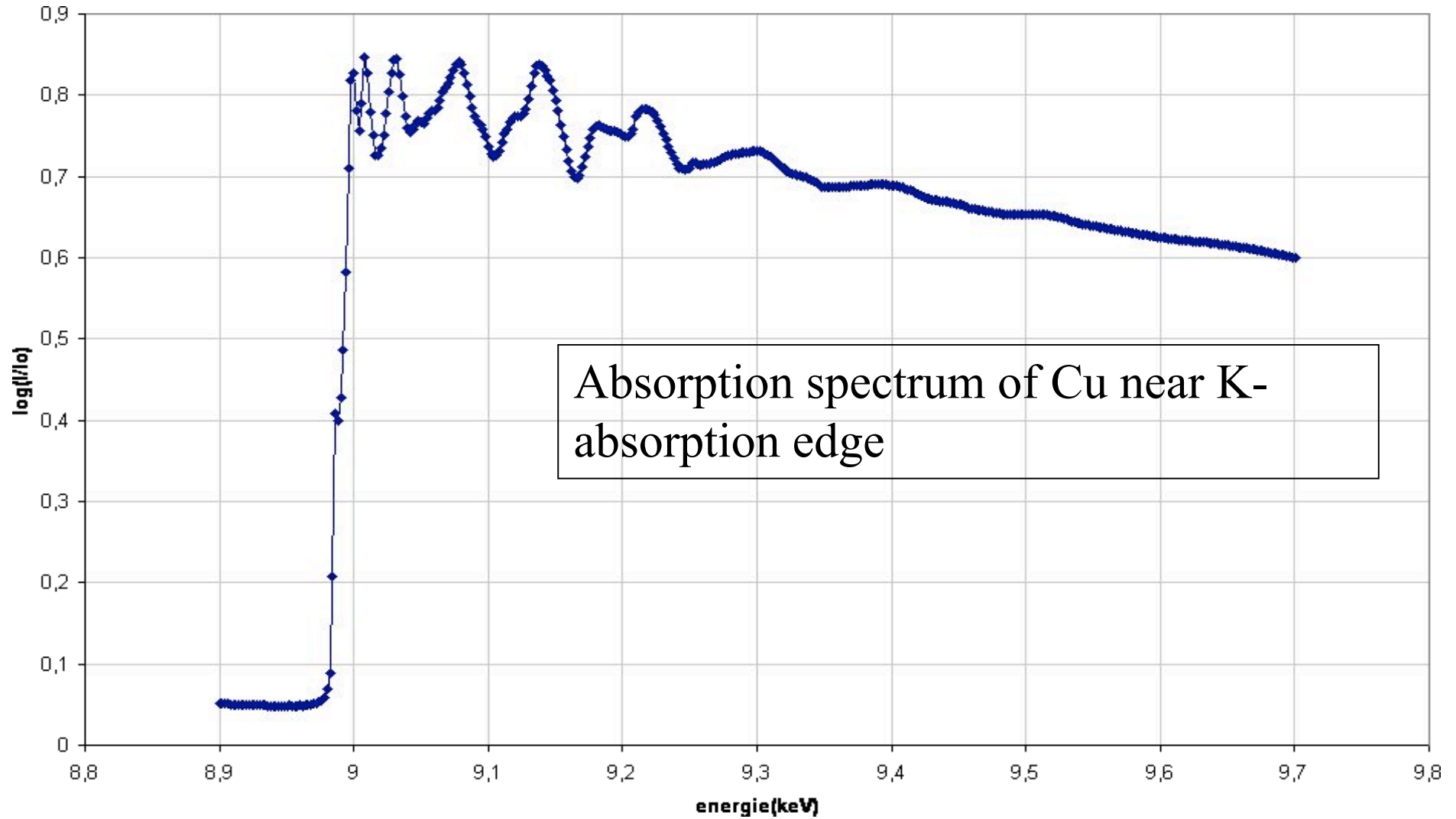
■ Des modes d'accès particuliers aux lignes standard de SOLEIL

- Biocristallographie
- Alimentation et cosmétiques
- Science des matériaux et nano-sciences
- Patrimoine : archéologie, oeuvres d'art (musée du Louvre, musées de France)
- Environnement

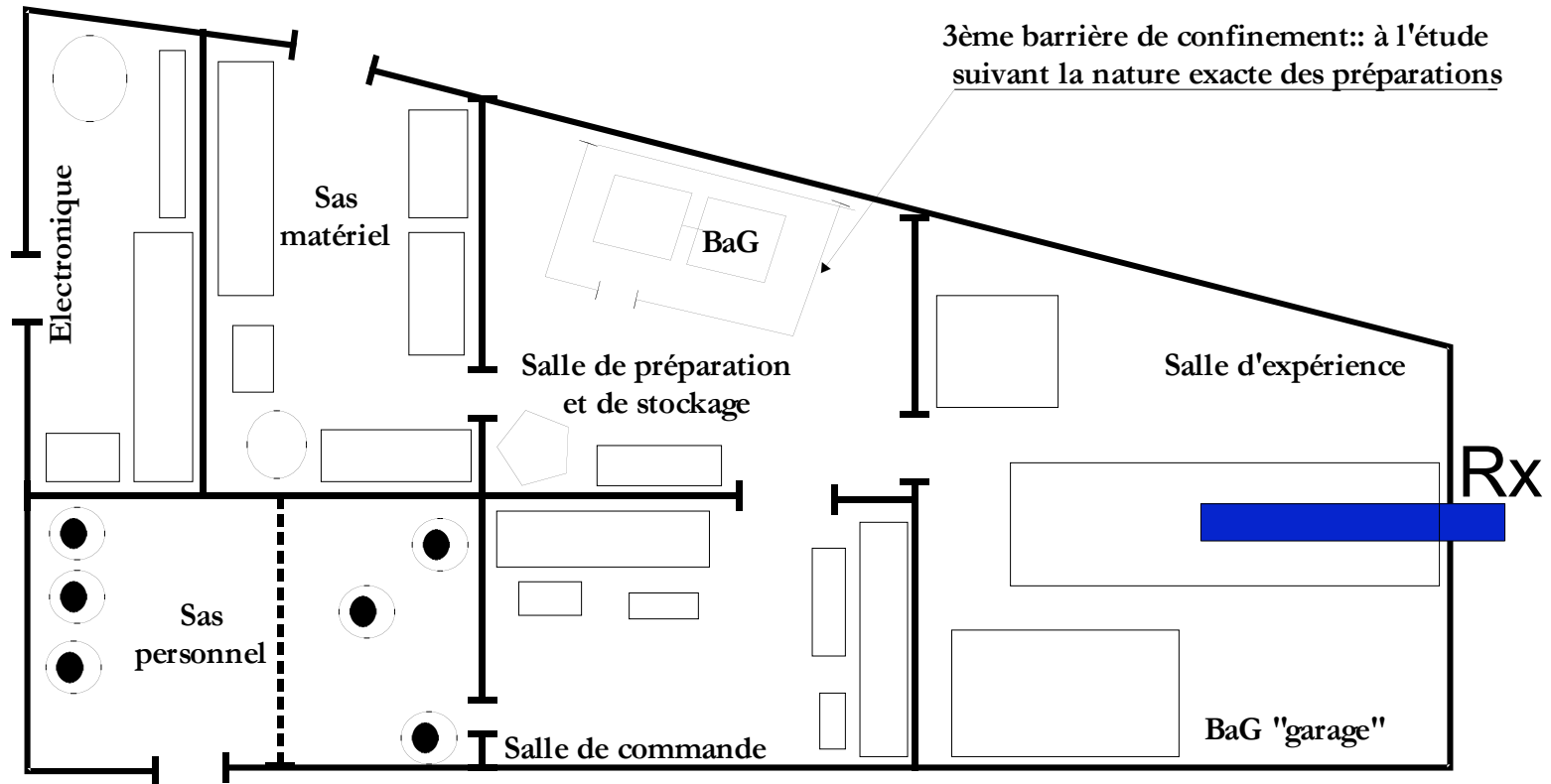
Applications du RS



First data collected at SOLEIL (on DIFFABS)



Ligne « chaude » MARS

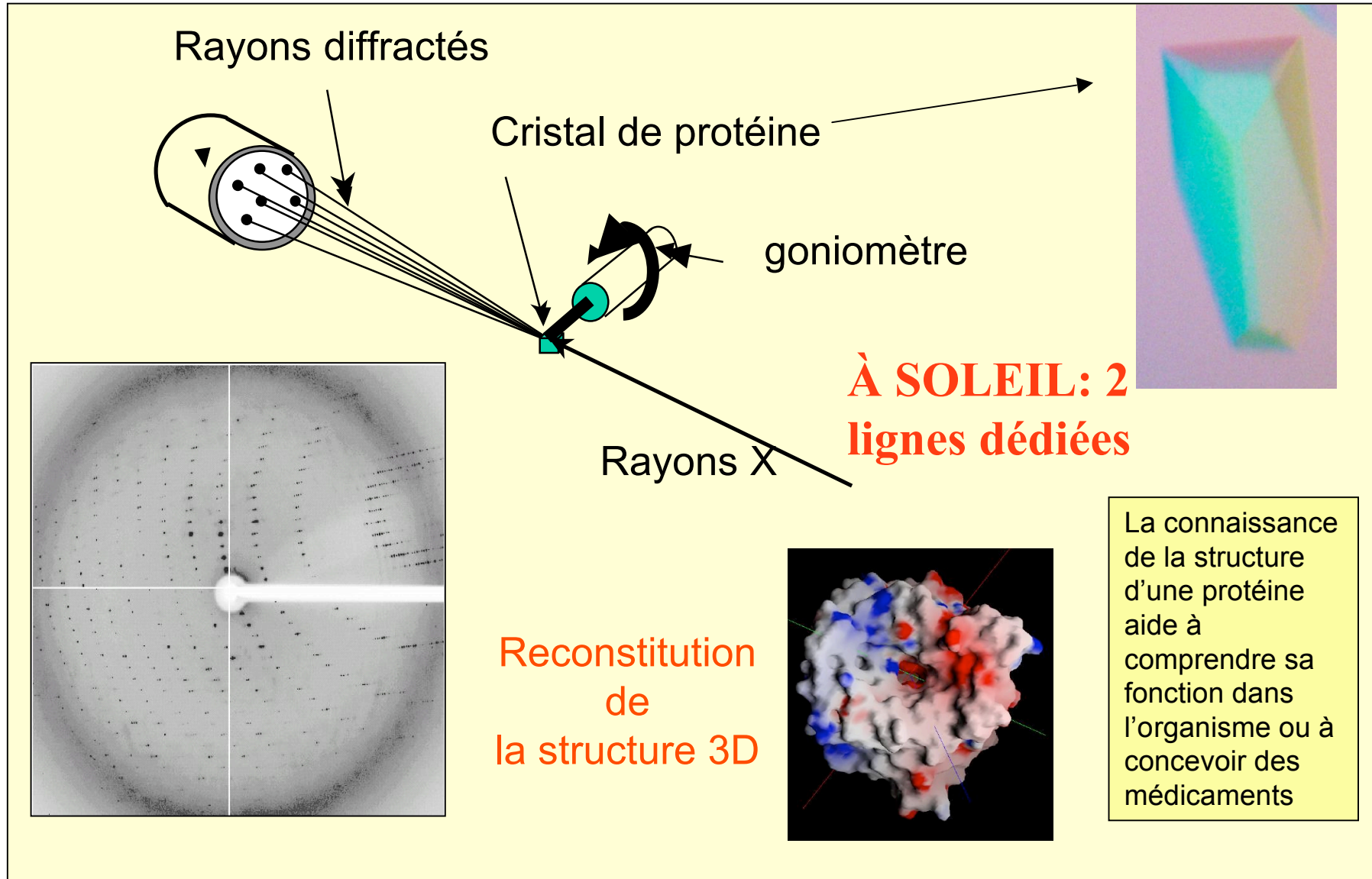


Micro-diffraction, -absorption, -fluorescence sur échantillons radioactifs
(3,5 keV – 35 keV)
ICPE à autorisation

Cristallographie des macromolécules

PROXIMA I & II

Structure cristallographique d'une protéine par diffraction X

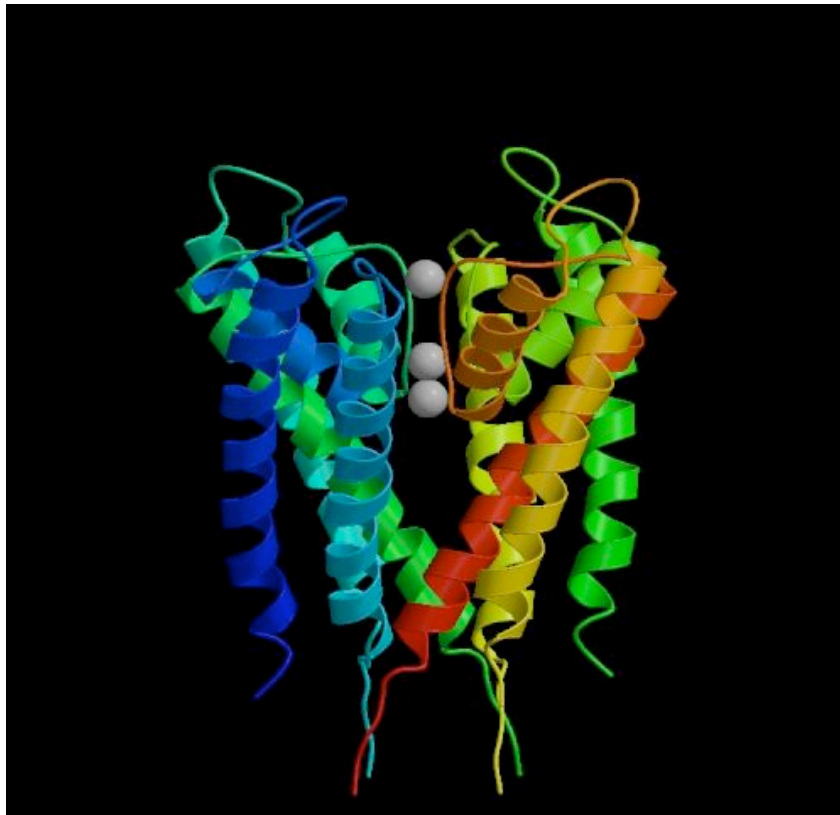


**À SOLEIL: 2
lignes dédiées**

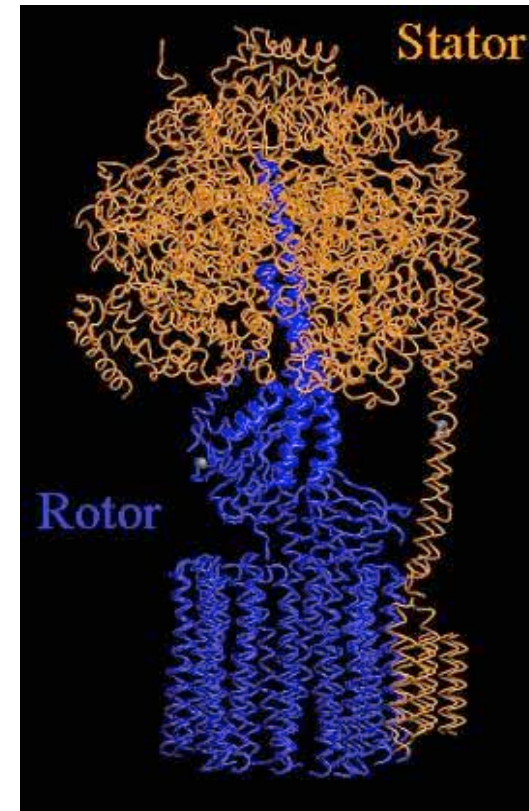
**Reconstitution
de
la structure 3D**

La connaissance de la structure d'une protéine aide à comprendre sa fonction dans l'organisme ou à concevoir des médicaments

SR et lauréats Nobel



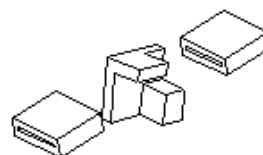
Roderick McKinnon, Rockefeller University, USA.
Chimie 2003



John E. Walker, LMB Cambridge, UK
Chimie 1997

Les composants essentiels de PROXIMA I

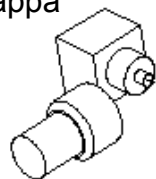
Onduleur U20
sous vide



Monochromateur monolithique Si (111), à double réflexion. Longueur d'onde ajustable de 0.25 à 0.07 nm pour exploitation de la diffusion anormale.

Miroirs du KB

Goniomètre à
géométrie Kappa



Détecteur 2D
« flat panel »

Robot pour mise en
place et retrait du
cristal stocké en
réceptacle cryogénique

Conteneur
cryogénique



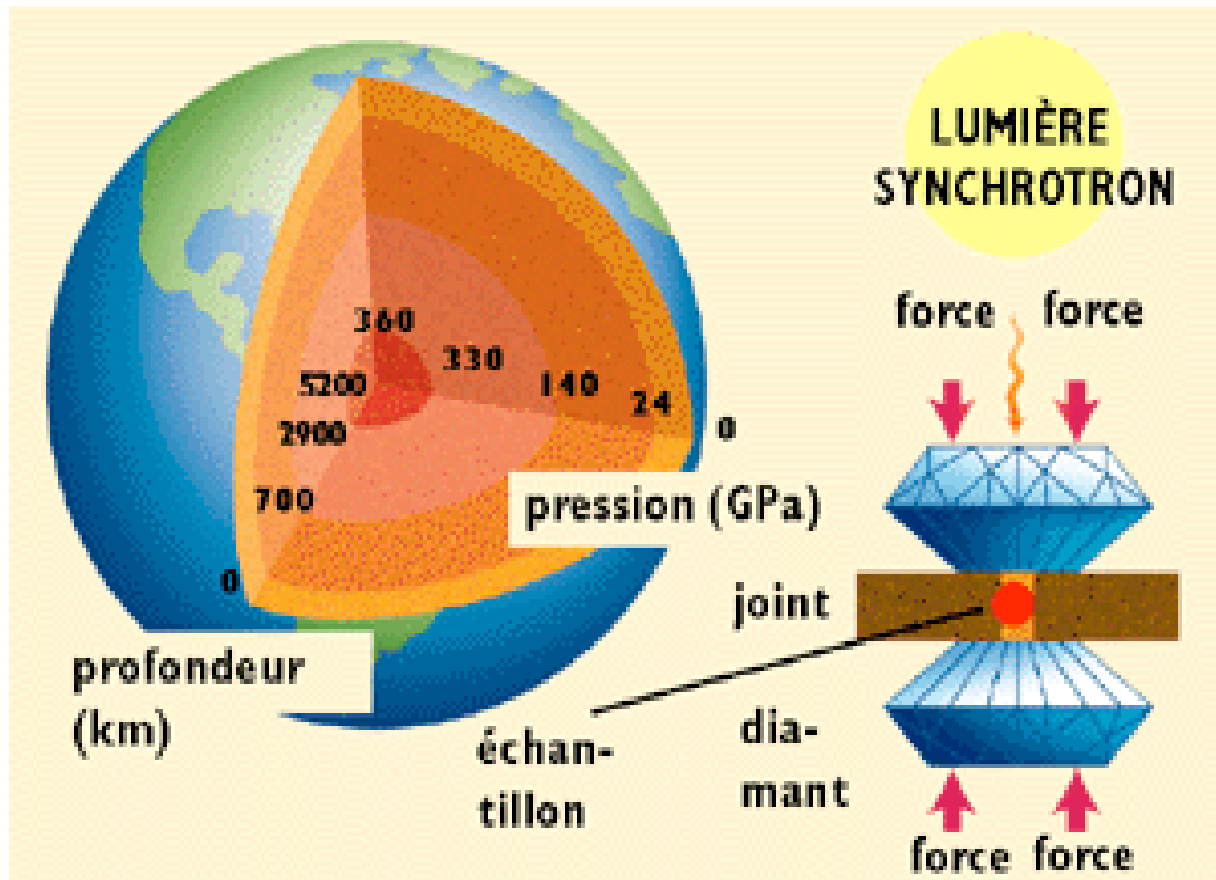
Le montage comporte une grande table à réglage Z-Y de très haute précision asservie au faisceau X issu du monochromateur.

Cette table porte l'optique KB, les fentes, les atténuateurs, les moniteurs, le goniomètre, le robot, le détecteur 2D et le détecteur de fluorescence

Expérience robotisée et automatisée pour haut débit

→ vers un système expert pour la résolution rapide de structures.

Matériaux sous conditions extrêmes



HP et HT sont obtenues sur de très petits volumes:

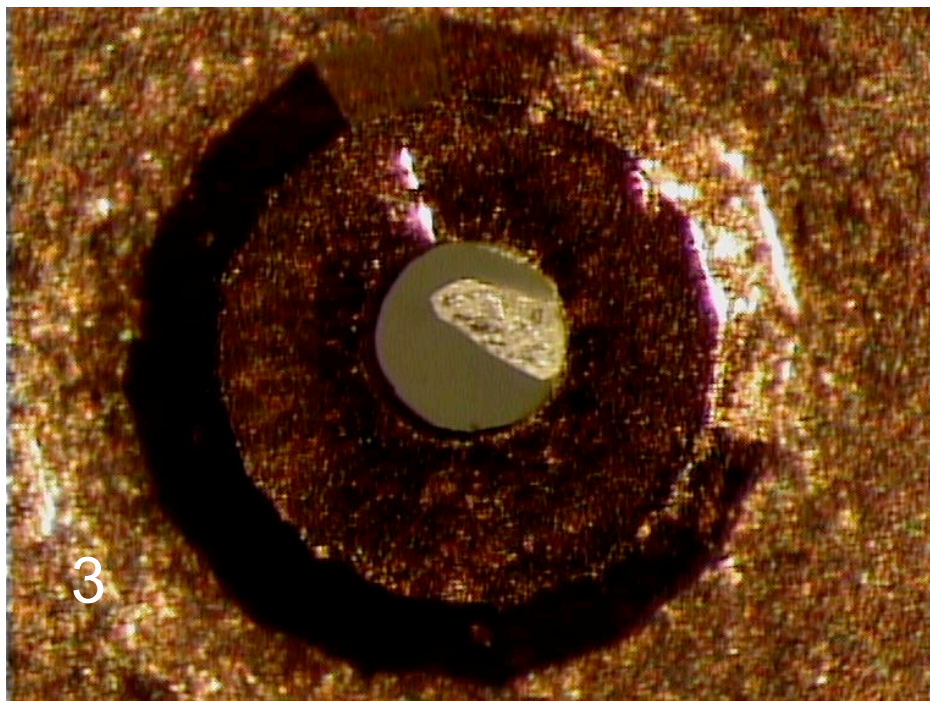
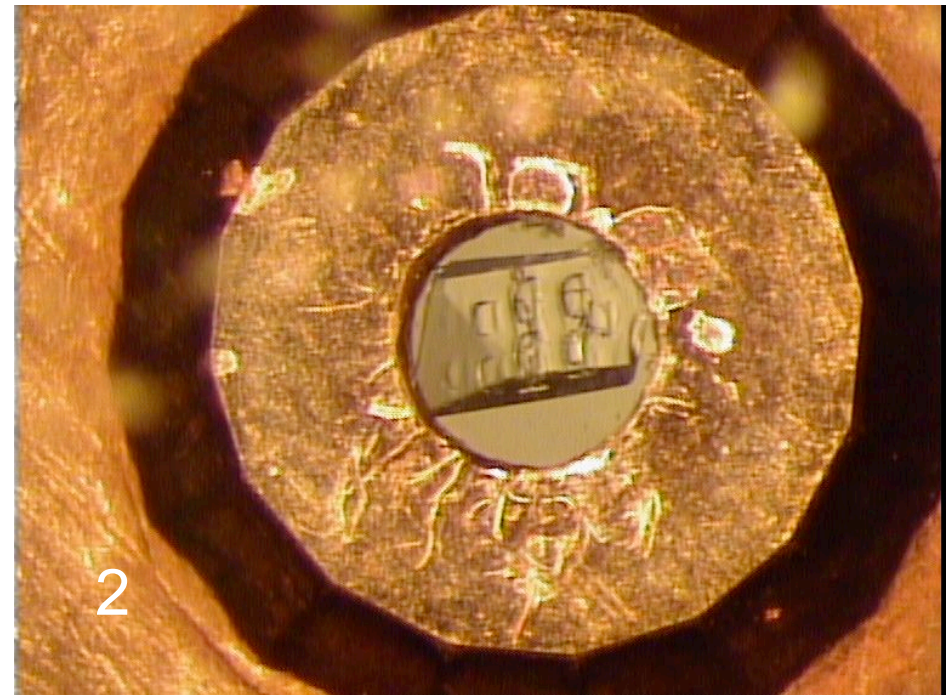
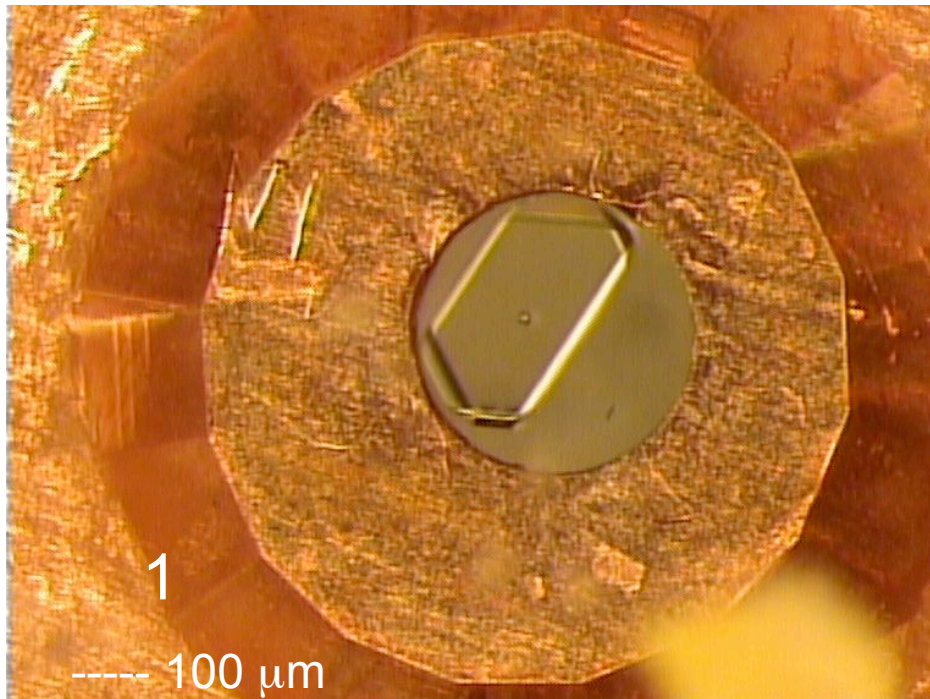
- Observation des transitions de phase
- Composition chimique et cristallographique
- Astrophysique

à SOLEIL , cellules diamants, chauffage laser + pression :100 GPa T° 3000K

Cristallographie des macromolécules sous haute pression :0,1-1,5 GPa (15 kbars)

Intérêt: notamment

- exploration du paysage énergétique d'une protéine. La pression modifie la répartition relative des conformères sur le critère de la compacité croissante.
→ *Structure de conformères de haute énergie d'intérêt pour l'étude de la fonction.*
- amélioration de l'ordre dans les cristaux de macromolécules



1. Cristal non-irradié d'urate oxidase comprimé dans une cellule à enclumes de diamant.

2. Cristaux irradiés après plusieurs translations

3. Eclat de diamant utilisé pour modifier l'orientation d'un cristal dans la cavité.

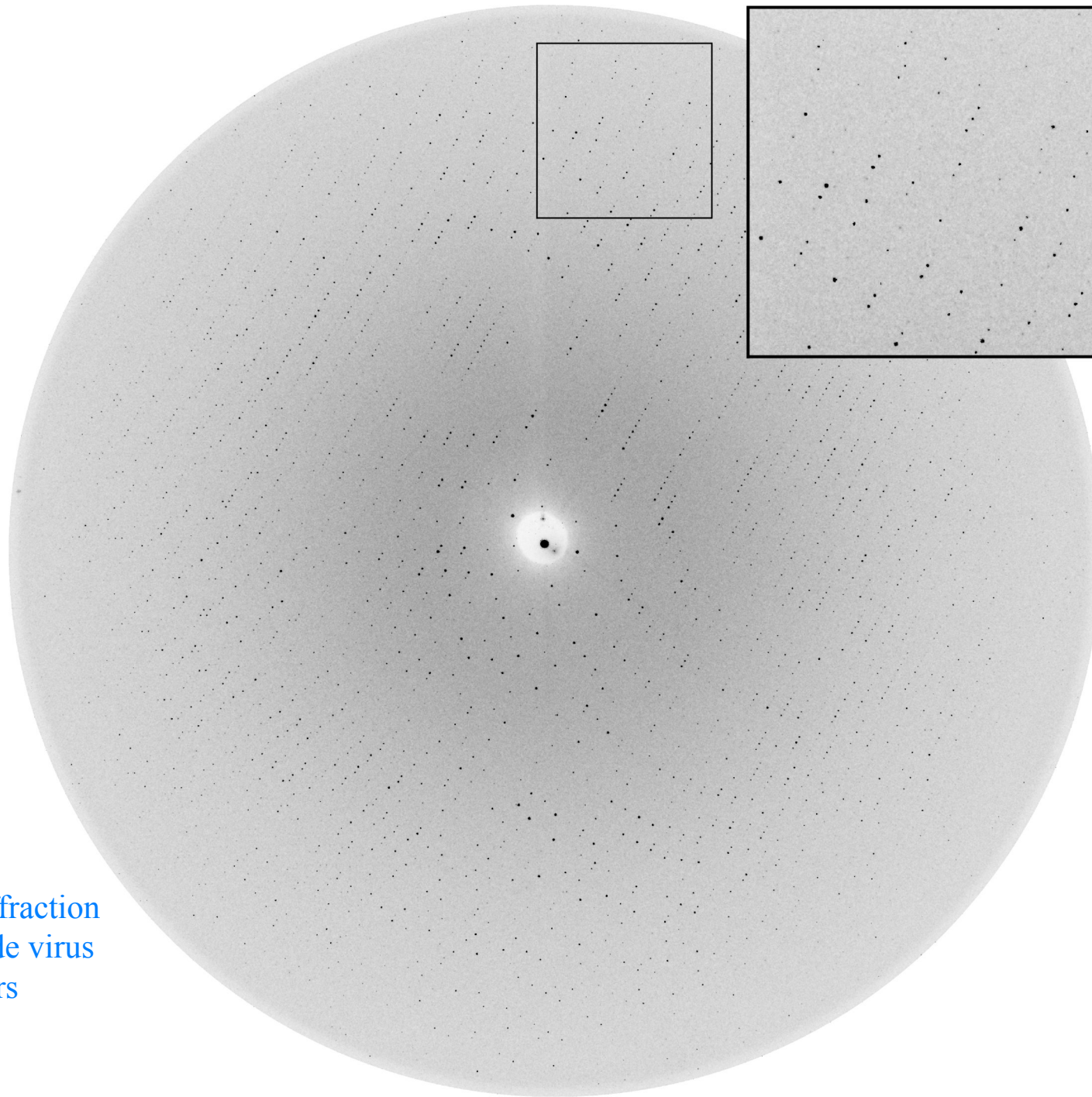


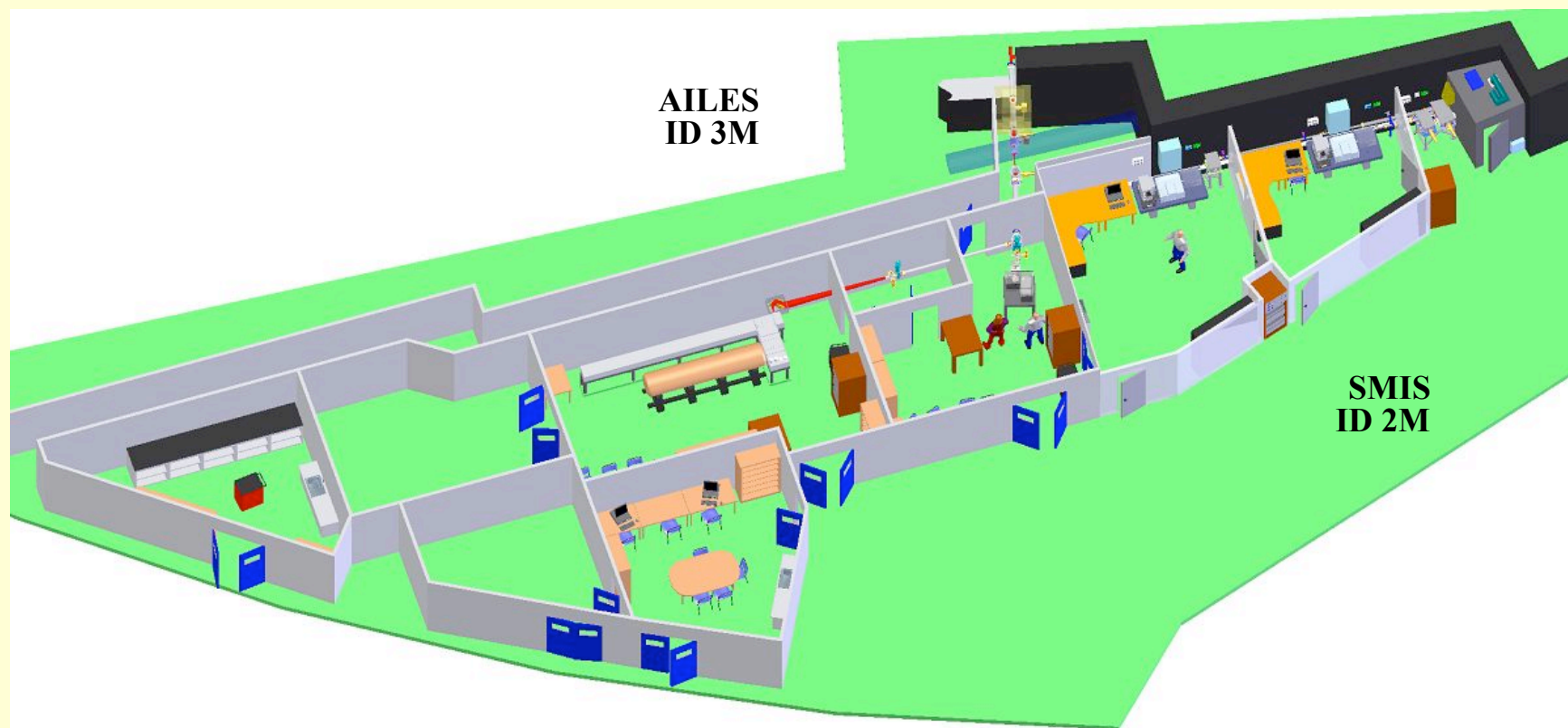
Image de diffraction
d'un cristal de virus
sous 3,3 kbars

Infrarouge

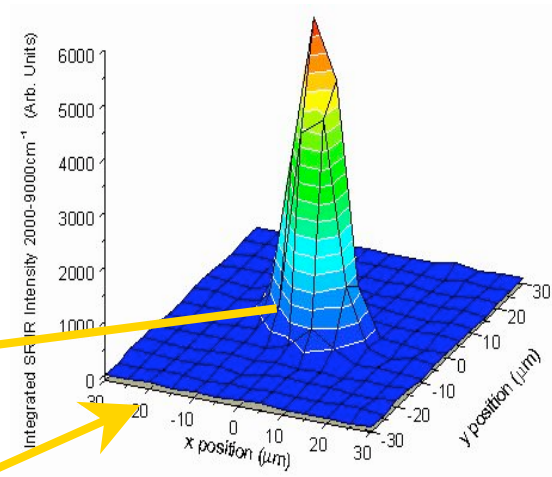
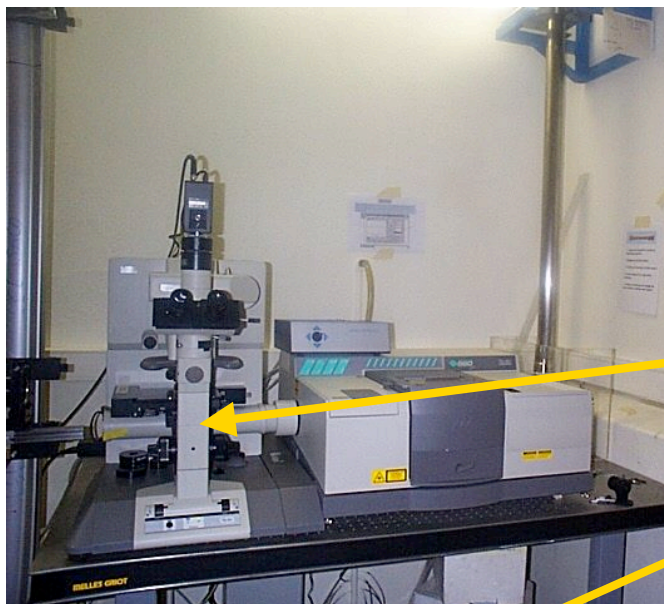
- **SMIS**: ligne de microscopie et microspectrométrie dans l'IR moyen. Deux branches, chacune équipée d'un microscope
- **AILES**: ligne de spectroscopie dans l'IR lointain. Deux spectromètres, à moyenne et très haute résolution

Le village IR

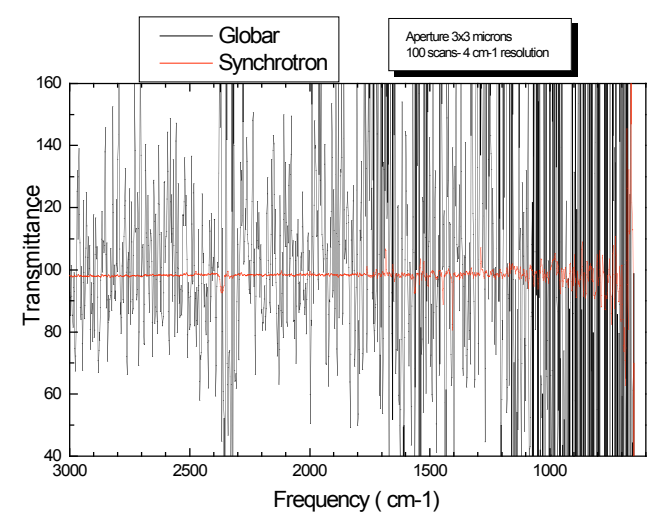
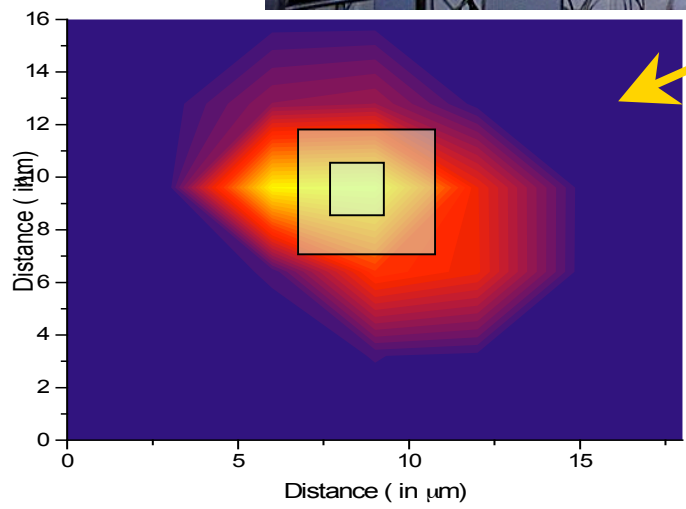
Village IR



Microscopie IR

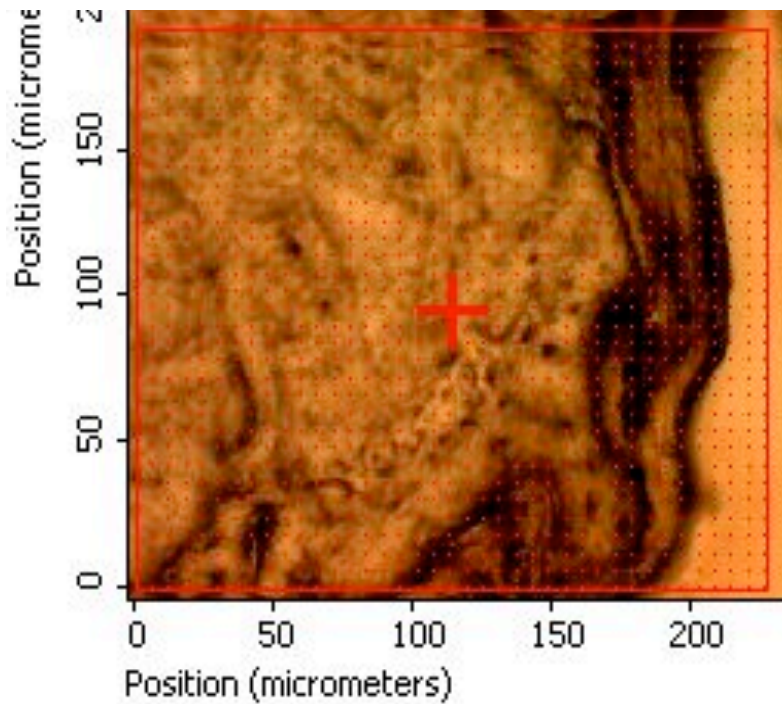


3x3 microns

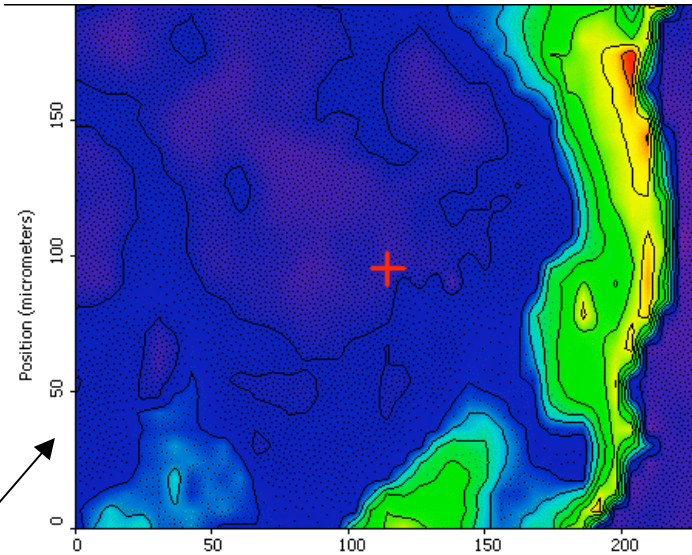


Après collection des données spectroscopiques avec une grande résolution (bénéficiant du synchrotron), identification et localisation:

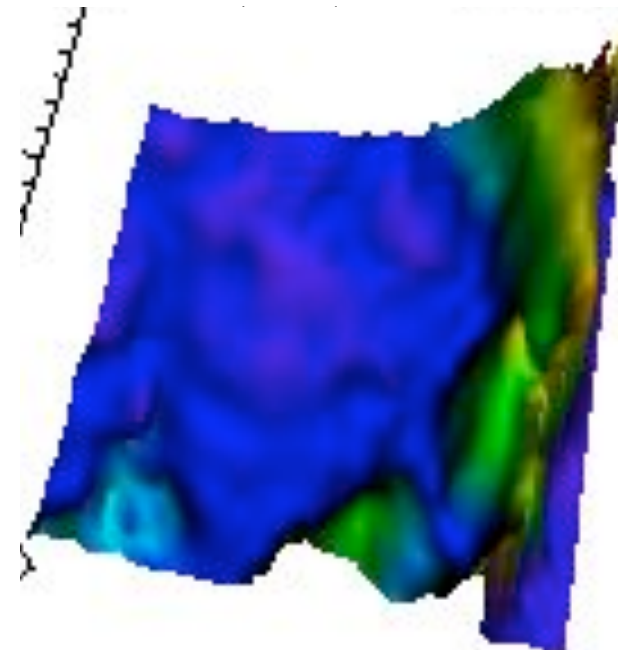
1- Ou sont les phospholipides?



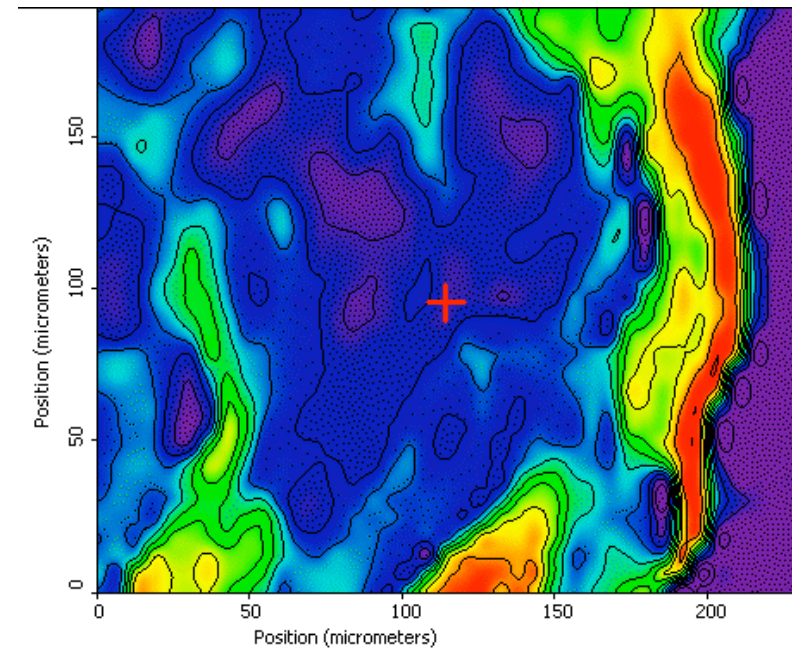
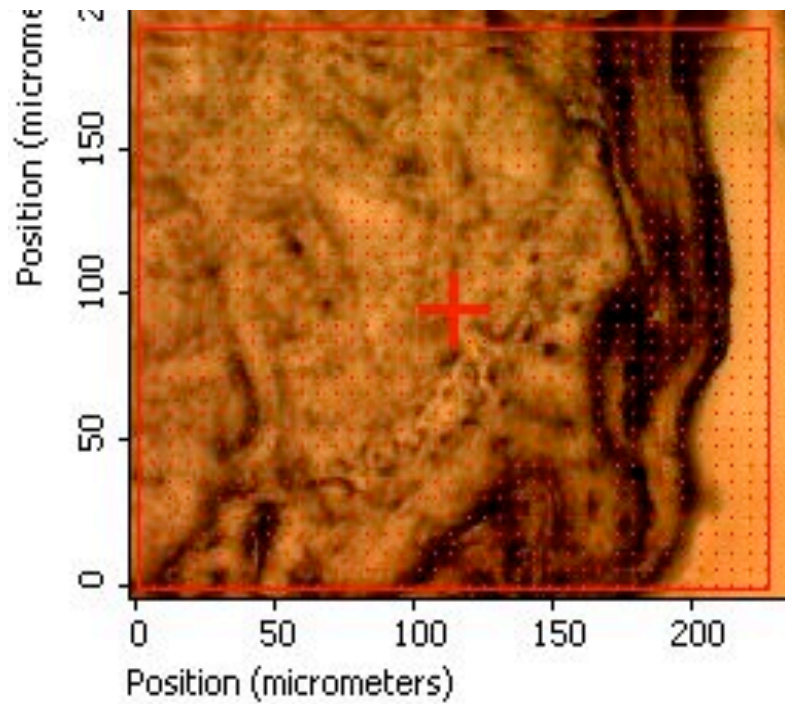
2D



3D



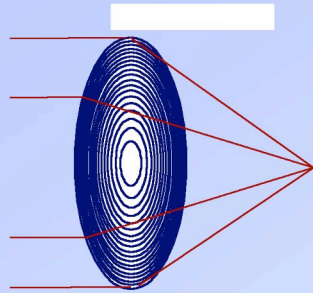
2- Comment sont réparties les protéines?



Microscopie X mous

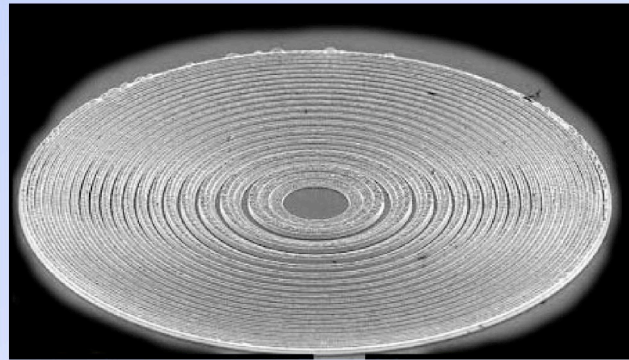
Lentilles diffractives pour microscope X mou

Micro-lentilles de Fresnel



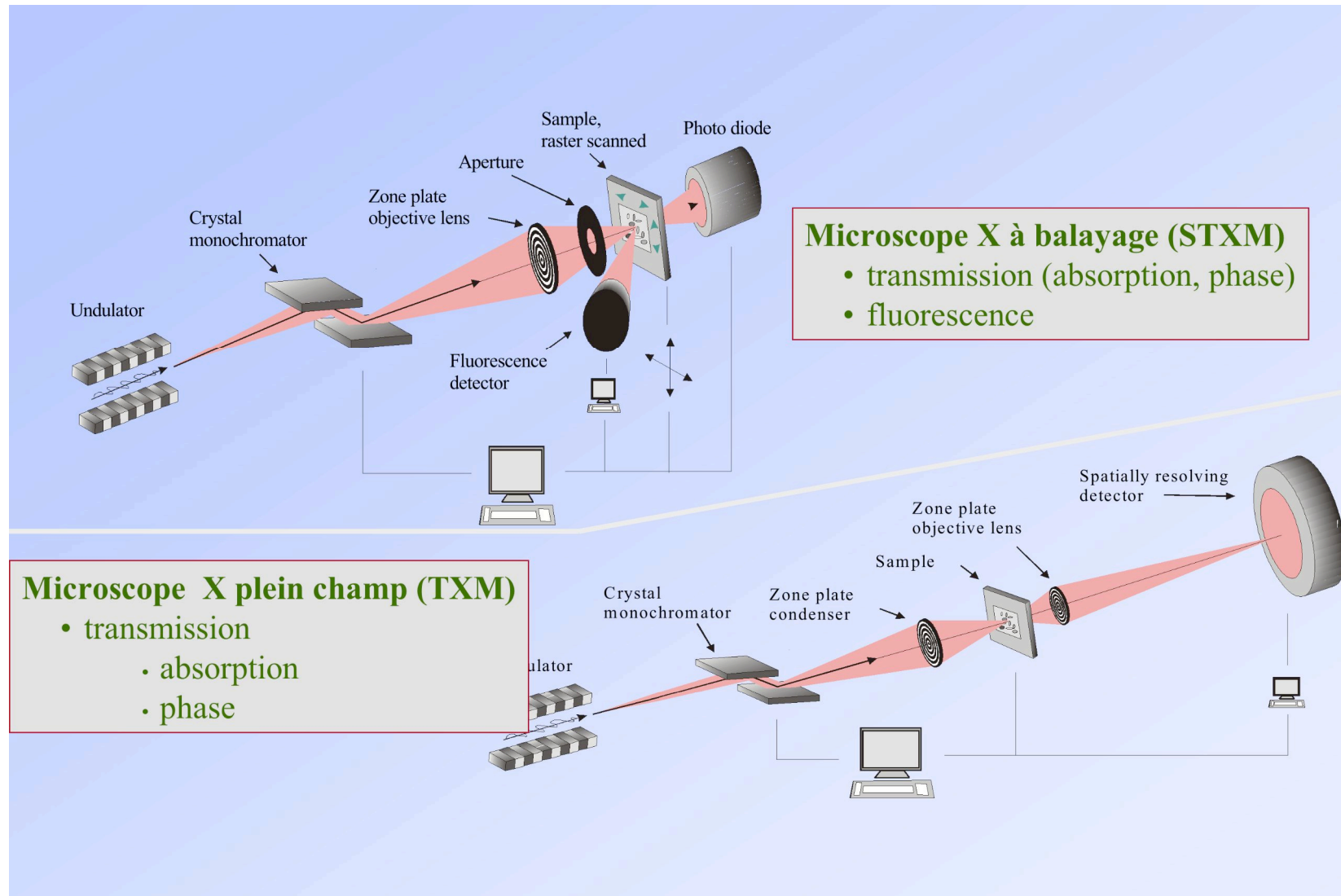
$\sim 0,1 \times 0,1 \mu\text{m}^2$

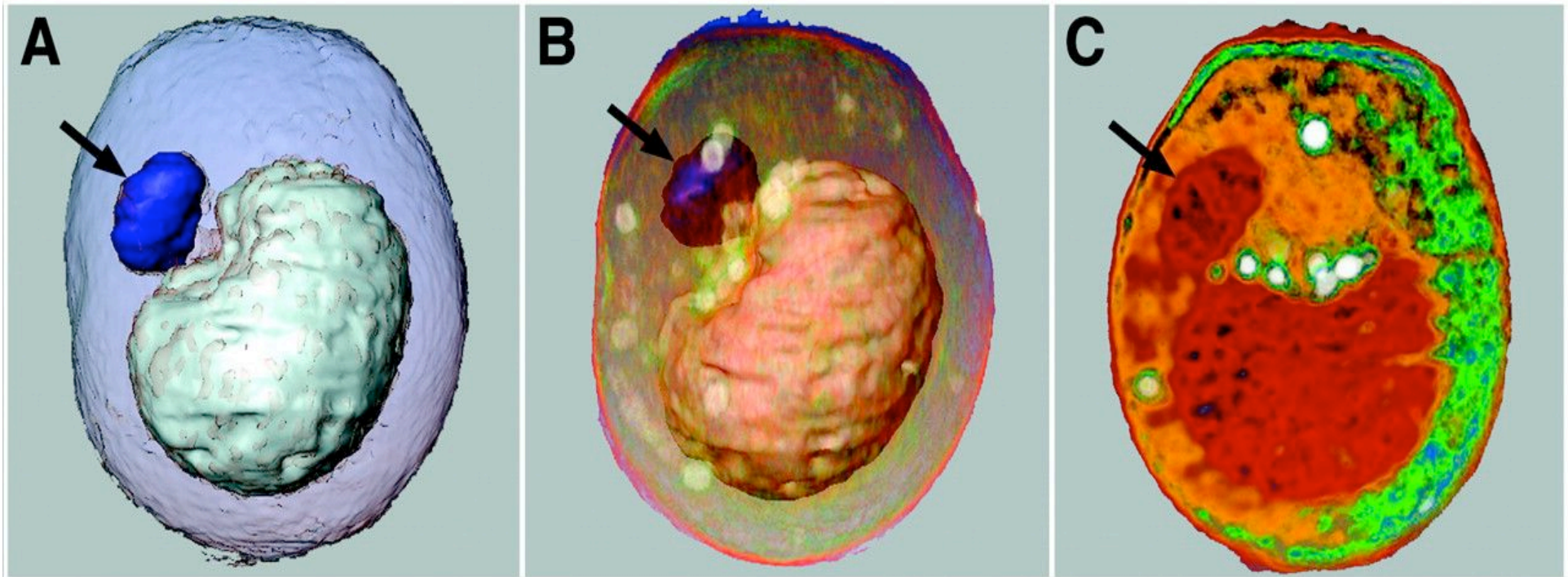
David *et al.*, APL, 77(23), (2000)



n (<200) zones concentriques opaques (ou semi-opaques) sur support transparent. Interférence constructive du rayonnement émis par les zones transparentes. Interférence destructive des autres zones, bloquée par la non-transparence. Une telle lentille focalise le rayonnement ponctuellement en un point qui dépend de la longueur d'onde. Pour améliorer l'efficacité, lentilles à zones constituées de plusieurs marches approximant un profil en dent de scie ou zones planes avec gradient d'indice radial

Microscopes X à lentilles de Fresnel





Cryo X-ray tomography of whole yeast cell, 5 μm diameter, viewed using several processing algorithms after reconstruction.

- ✂✂✂ Combination of translucent outer surface and opaque surfaces that demark internal organelles; arrow points to nucleus that has been color-coded blue;
- ✂✂✂ (B) surfaces from A combined with volume rendering; arrow points to nucleus that is colored blue, lipid droplets appear white, and the surface of a large vacuole in the center of the yeast is color-coded pink;
- ✂✂✂ (C) 0.5- μm -thick section that had been volume-rendered according to the amount of X-ray absorption; lipid droplets are white, the internal structures of the vacuole and nucleus (arrow) appear red, and other cytoplasmic structures appear green and orange. (Larabell et al, ALS Berkeley)

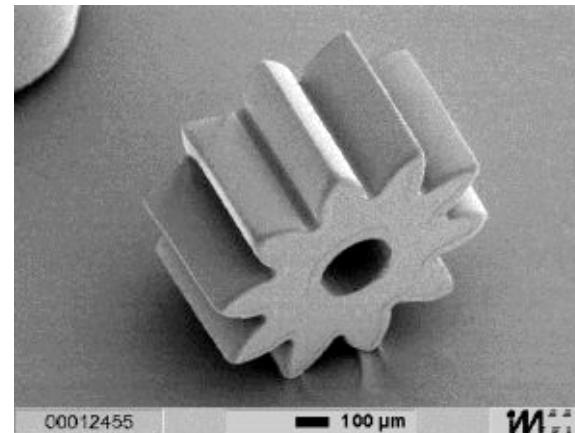
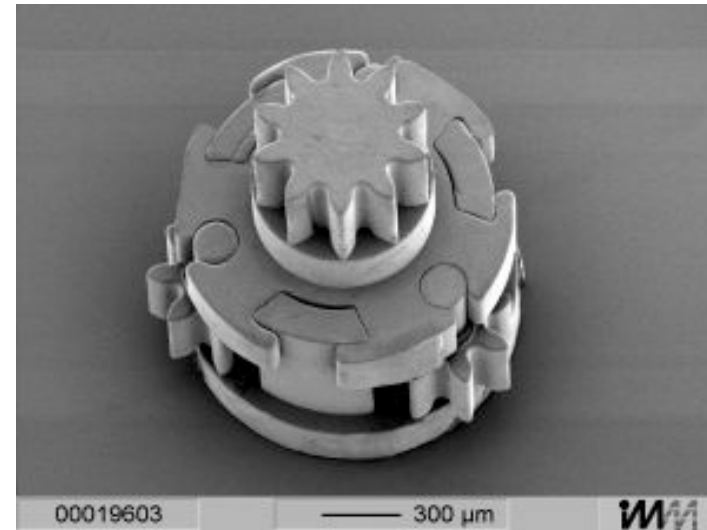
Résolution actuelle 15 nm

Recherche appliquée : ex micro-fabrications

Recherche appliquée : ex micro-fabrications

LIGA : irradiation profonde par rayons X durs (0.1-0.4 nm) de résines photosensibles.
Réplication de masques par ombre portée

Faisceau X parallèle → grande qualité du profil



Un outil pour faire de la science, mais aussi...

- Un lieu d'éveil scientifique pluridisciplinaire.
- Un lieu d'accueil et d'échange :
 - la création d'un bâtiment d'accueil du public,
 - un circuit de visite du synchrotron.
- Une priorité affichée :
 - pour l'information scientifique et la communication pédagogique en direction des lycées et des collèges.