

SOLEIL au service du rayonnement de la recherche française

Michel van der Rest

Directeur Général de SOLEIL



- 1) Le rayonnement synchrotron
- 2) Les sources de lumière
- 3) Quand la lumière rencontre la matière
- 4) Ressources et accès à ce TGE
- 5) Naissance d'un TGE



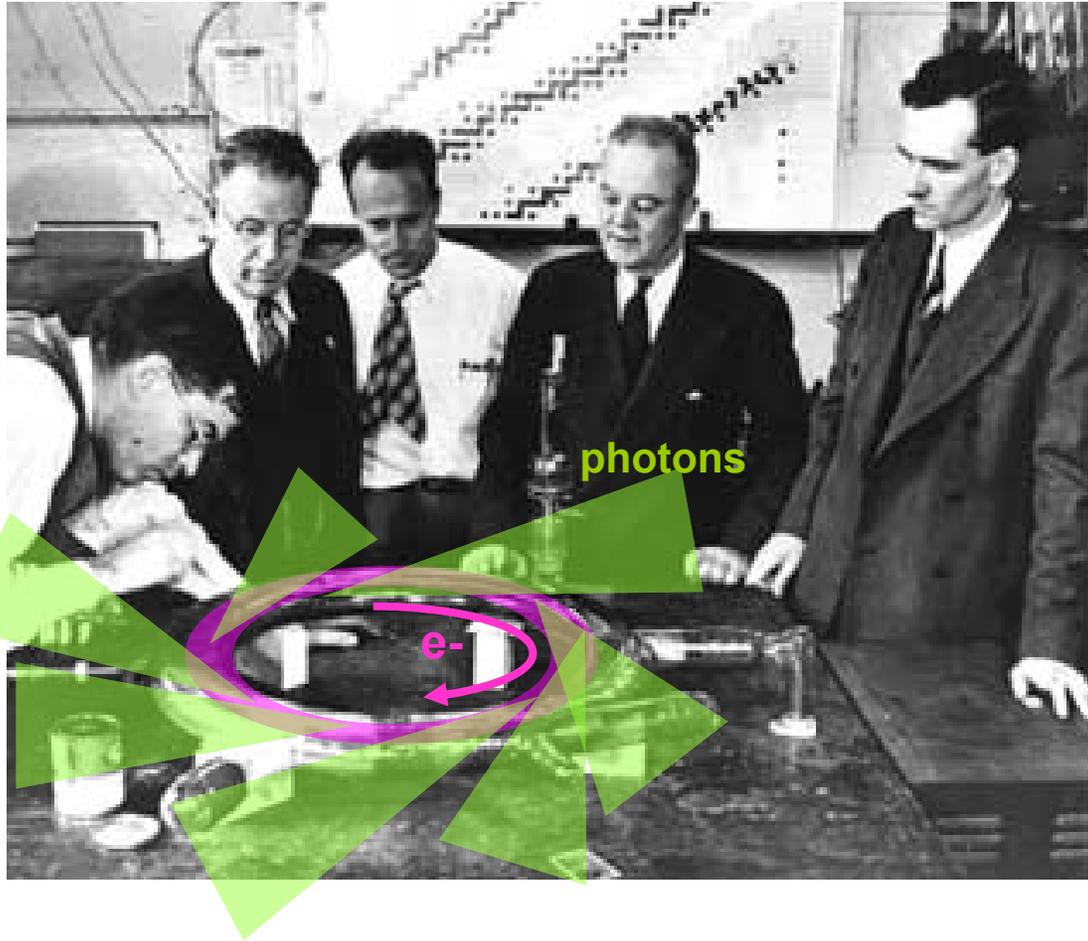
- 1) **Le rayonnement synchrotron**
- 2) Les sources de lumière
- 3) Quand la lumière rencontre la matière
- 4) Ressources et accès à ce TGE
- 5) Naissance d'un TGE



© Atelier d'architecture Chaix & Morel et associés

Le rayonnement synchrotron

Principe : c'est un rayonnement très intense produit lorsque des particules chargées de très haute énergie sont déviées par l'action d'un champ magnétique et perdent leur énergie. (**Mc Millian, Veksler, 1945**).



1946 : J-P Blewett

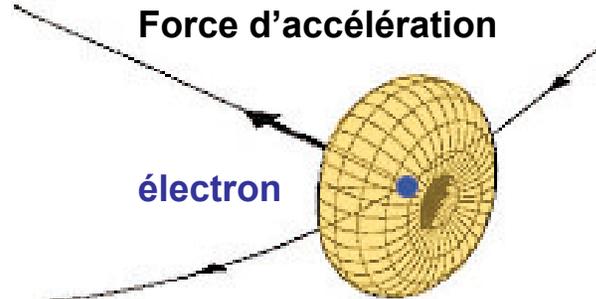
Première observation du rayonnement Synchrotron à General Electric (USA)

Des électrons relativistes

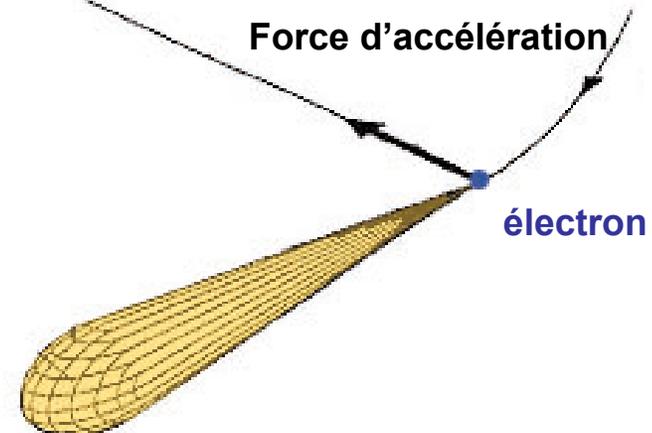
Quand les électrons sont accélérés avec une **faible vitesse** (ondes radio, par exemple), ils émettent un rayonnement électromagnétique dans **toutes les directions**.

Quand la vitesse des électrons approche la **vitesse de la lumière** (électrons relativistes), l'émission se fait dans **une seule direction** et toute la puissance est concentrée dans un **cône très étroit** ($15 \mu\text{m}$ hauteur / $150 \mu\text{m}$ largeur sur dipôle).

Rayon de courbure



Rayon de courbure



Rayonnement électromagnétique

Le rayonnement synchrotron

électrons



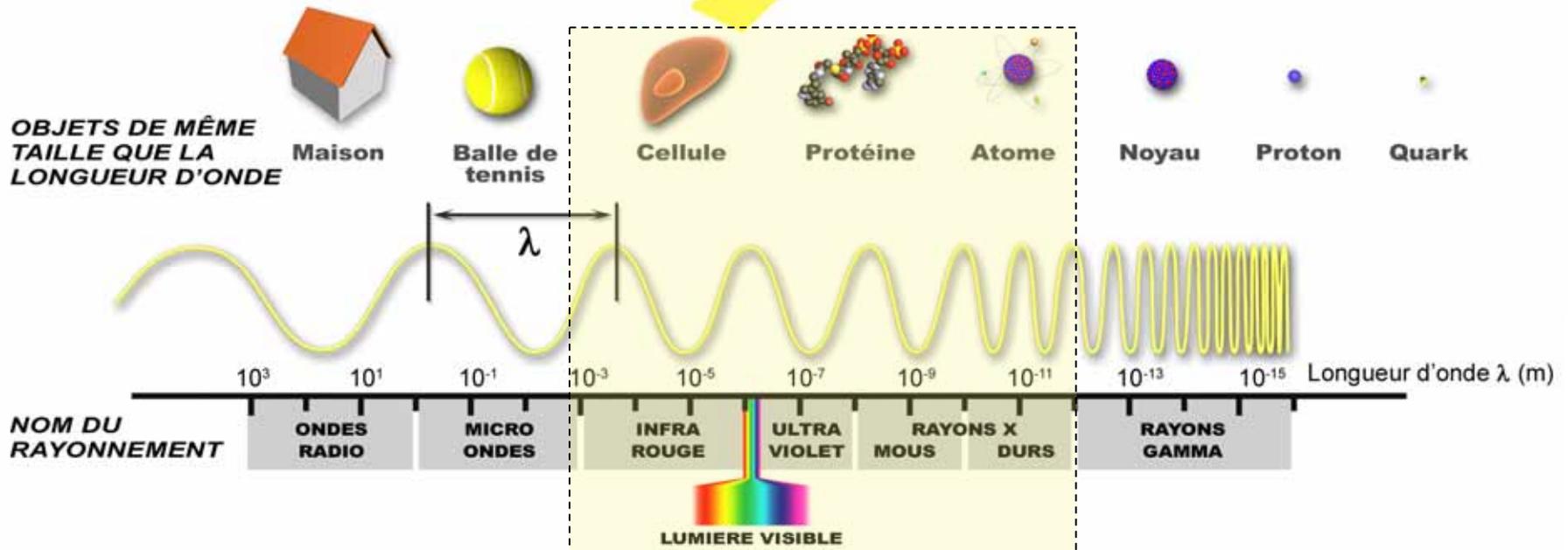
lumière

Les propriétés du rayonnement synchrotron :

- Source « **blanche** », continue et accordable (sélectivité de l'infrarouge aux rayons X)
- Source **brillante** et **faible divergence** (intense et focalisée sur une petite surface, sensibilité)
- Lumière **polarisée** (symétrie des molécules, phénomènes magnétiques)
- Source **pulsée** (50 picosecondes toutes les 3 nanosecondes), phénomènes dynamiques
- **Stable en position** (importance pour petits échantillons, et en **intensité** (fiabilité des résultats)

Une gamme spectrale étendue

Des IR lointains aux RX durs



DECOUVERT
PAR...
EN...



Hertz
1885



Ponte
1940



Herschel
1800



Newton
1666



Ritter
1801



Röntgen
1895



Villard et Rutherford
1900



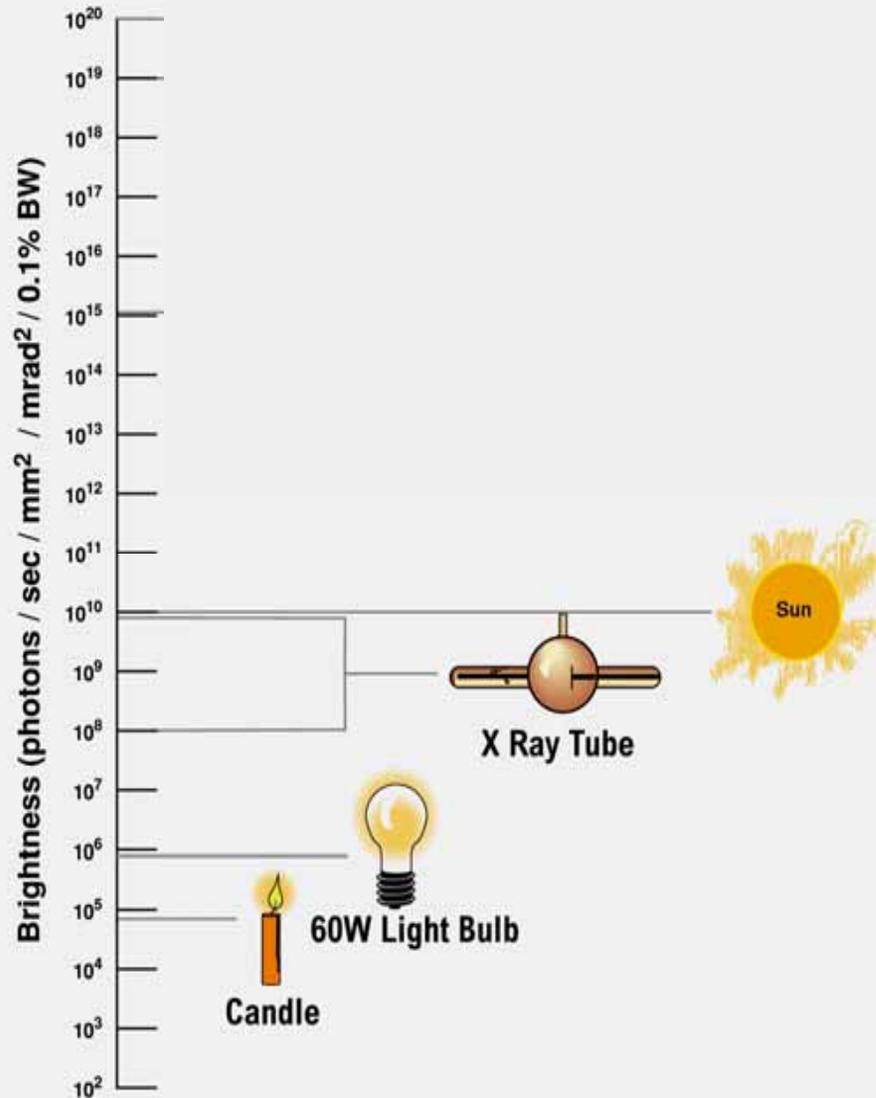
Notion de brillance



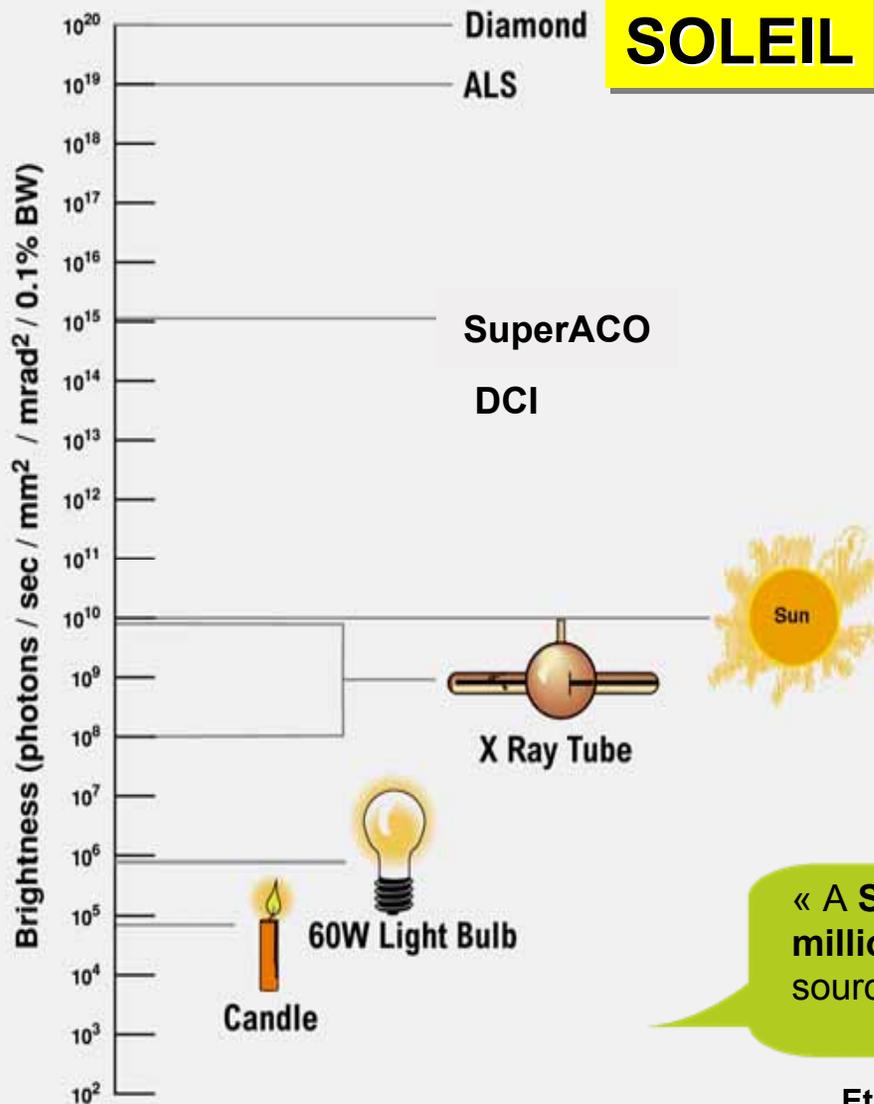
Une autre vision !



Progression de la brillance



Progression de la brillance



« A **SOLEIL**, la brillance émise est de **10 000 à 10 millions de fois** plus élevée que sur les anciennes sources françaises (**DCI et Super ACO**) »

Et 1,000,000,000,000 plus brillant que les RX à l'hôpital!

- 1) Le rayonnement synchrotron
- 2) Les sources de lumière
- 3) Quand la lumière rencontre la matière
- 4) Ressources et accès à ce TGE
- 5) Naissance d'un TGE



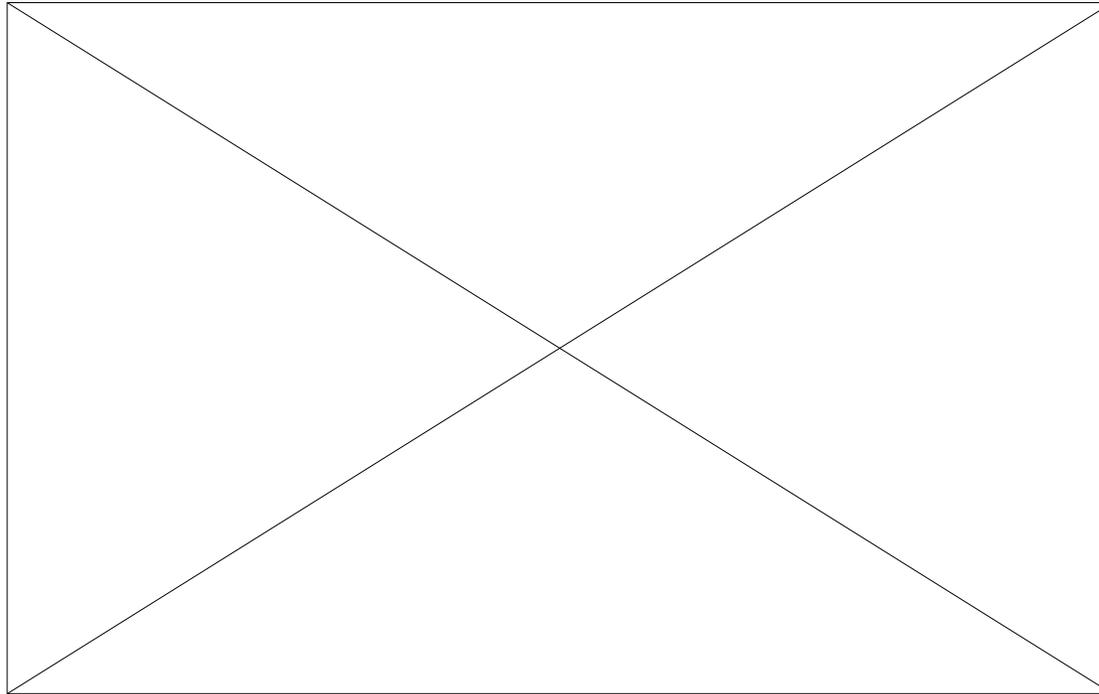
- 1) Le rayonnement synchrotron
- 2) Les sources de lumière**
- 3) Quand la lumière rencontre la matière
- 4) Ressources et accès à ce TGE
- 5) Naissance d'un TGE



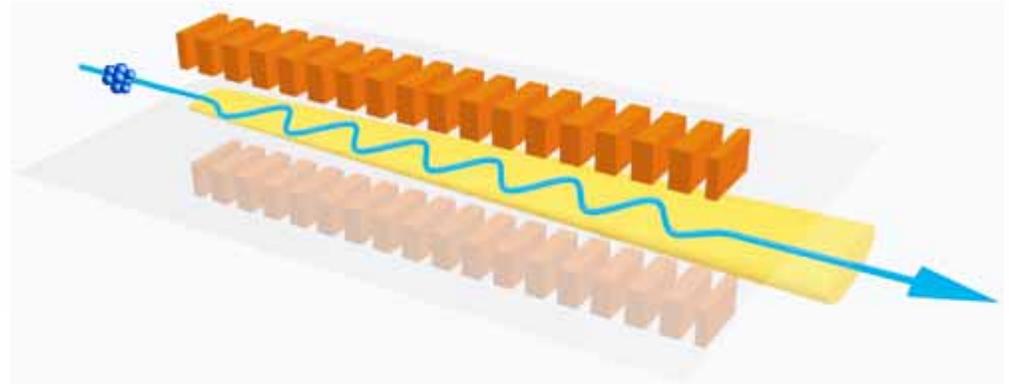
Le rayonnement synchrotron

Dans les centres de recherche, le rayonnement synchrotron est produit lorsque des particules chargées (**électrons**) et en mouvement (**vitesse de la lumière**) sont déviées par un **champ magnétique** (force de Lorentz).

Les longueurs d'onde de ce rayonnement vont de **l'infrarouge aux rayons X**.



L'onduleur : source de 3ème génération



APPORTS DU SYNCHROTRON :

- des performances accrues pour chaque longueur d'onde (onduleur spécifique pour chaque ligne de lumière)
- une brillance multipliée par 1000

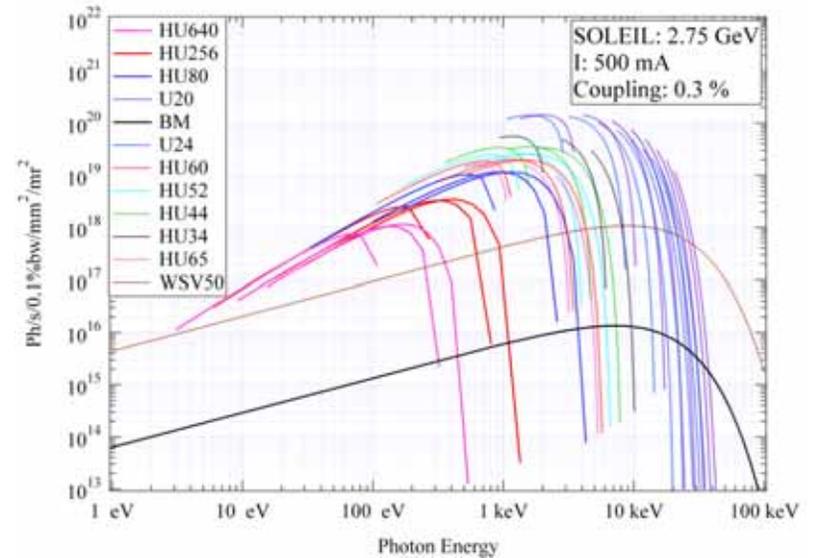
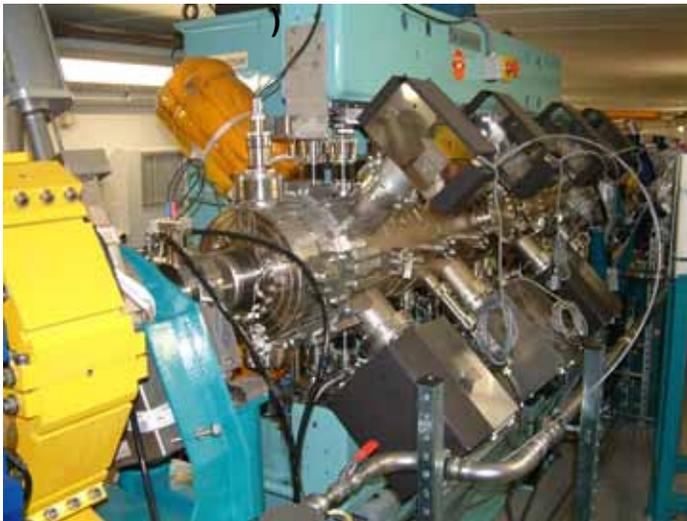
HU 640 : ligne DESIRS
(5 eV – 50 eV : Ultra Violet)



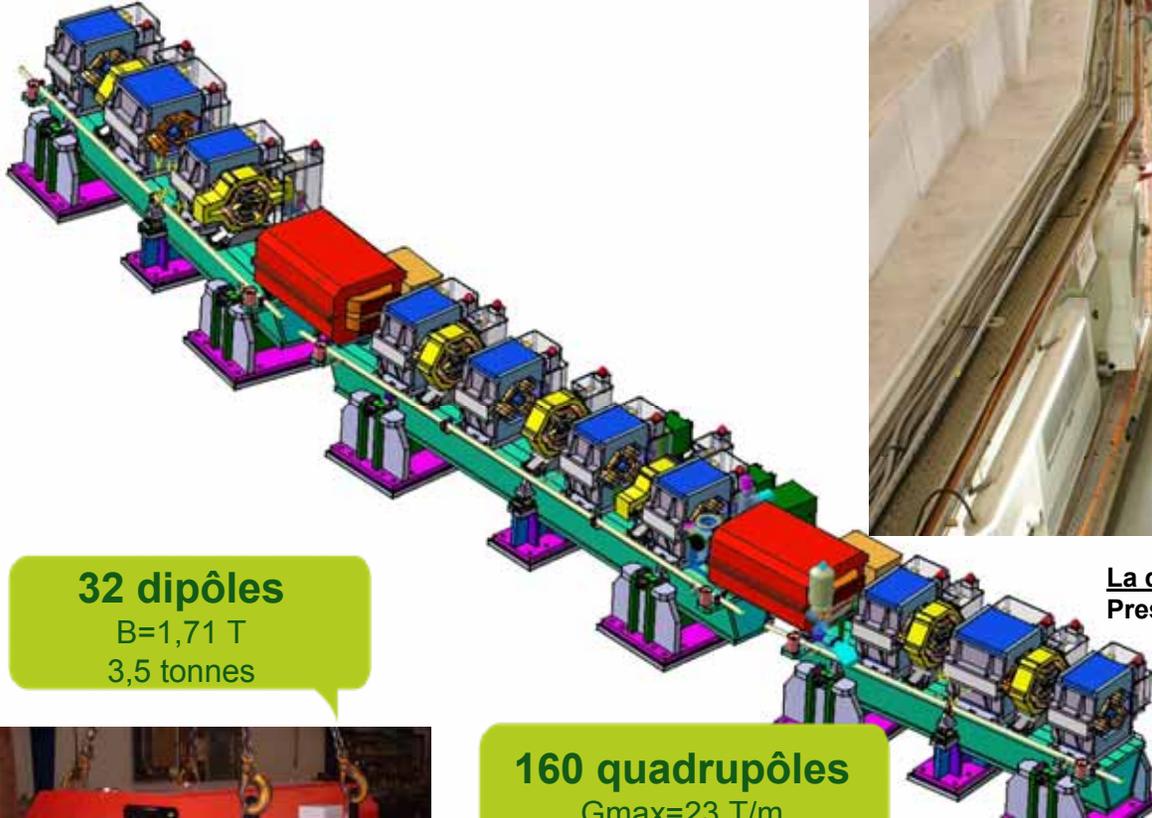
HU 80 : ligne TEMPO
(100 eV - 3 keV : Rayons X mous)



U 20 : ligne PROXIMA
(4 keV - 30 keV : Rayons X durs)



Vue du tunnel Anneau



32 dipôles

$B=1,71\text{ T}$
3,5 tonnes

La qualité du vide :

Pression de 10^{-10} mbar $2,5 \cdot 10^7$ molécules/cm³

160 quadrupôles

$G_{\max}=23\text{ T/m}$
900 à 1200 kg

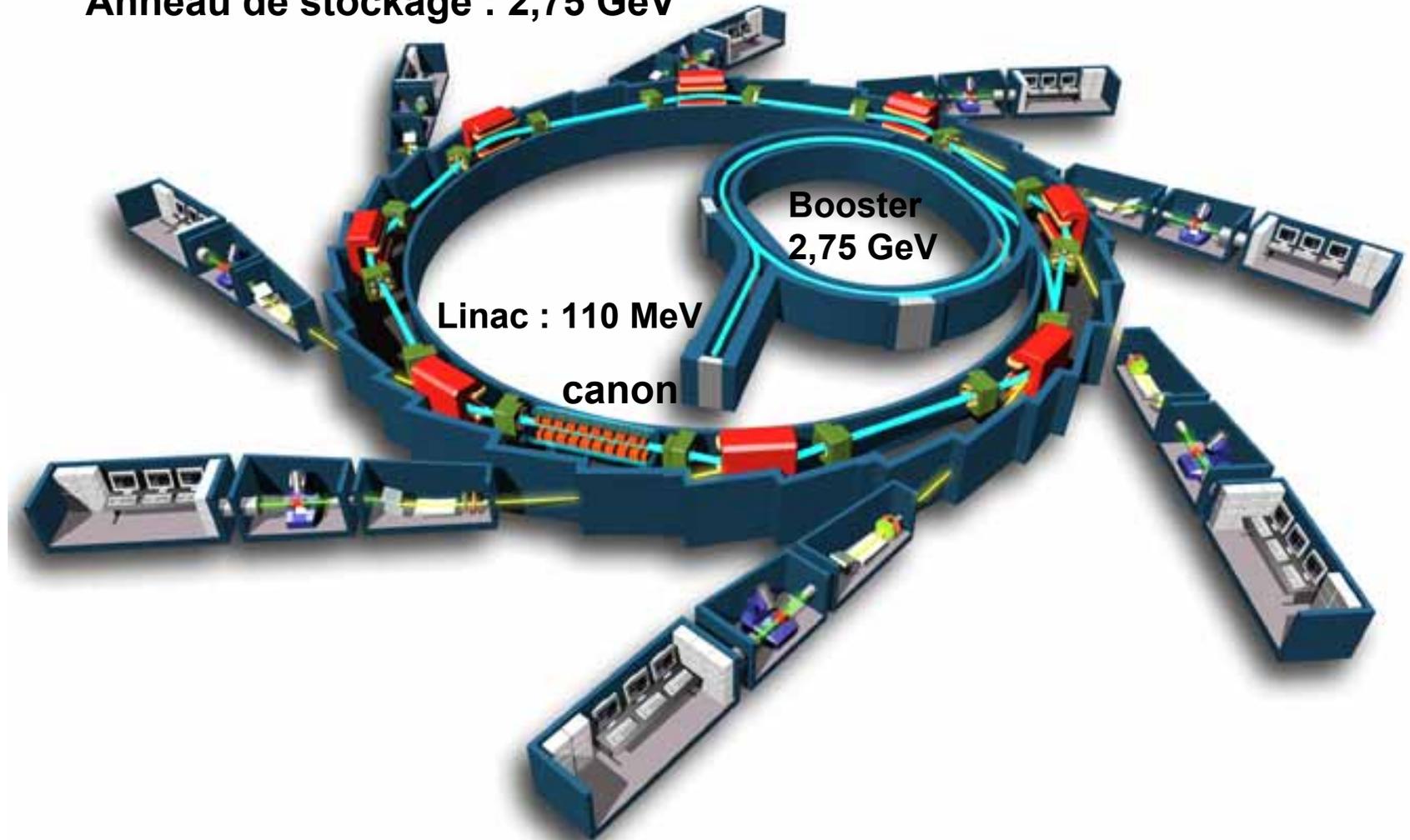
120 hexapôles

$H_{\max}=320\text{ T/m}^2$
220 à 280 kg

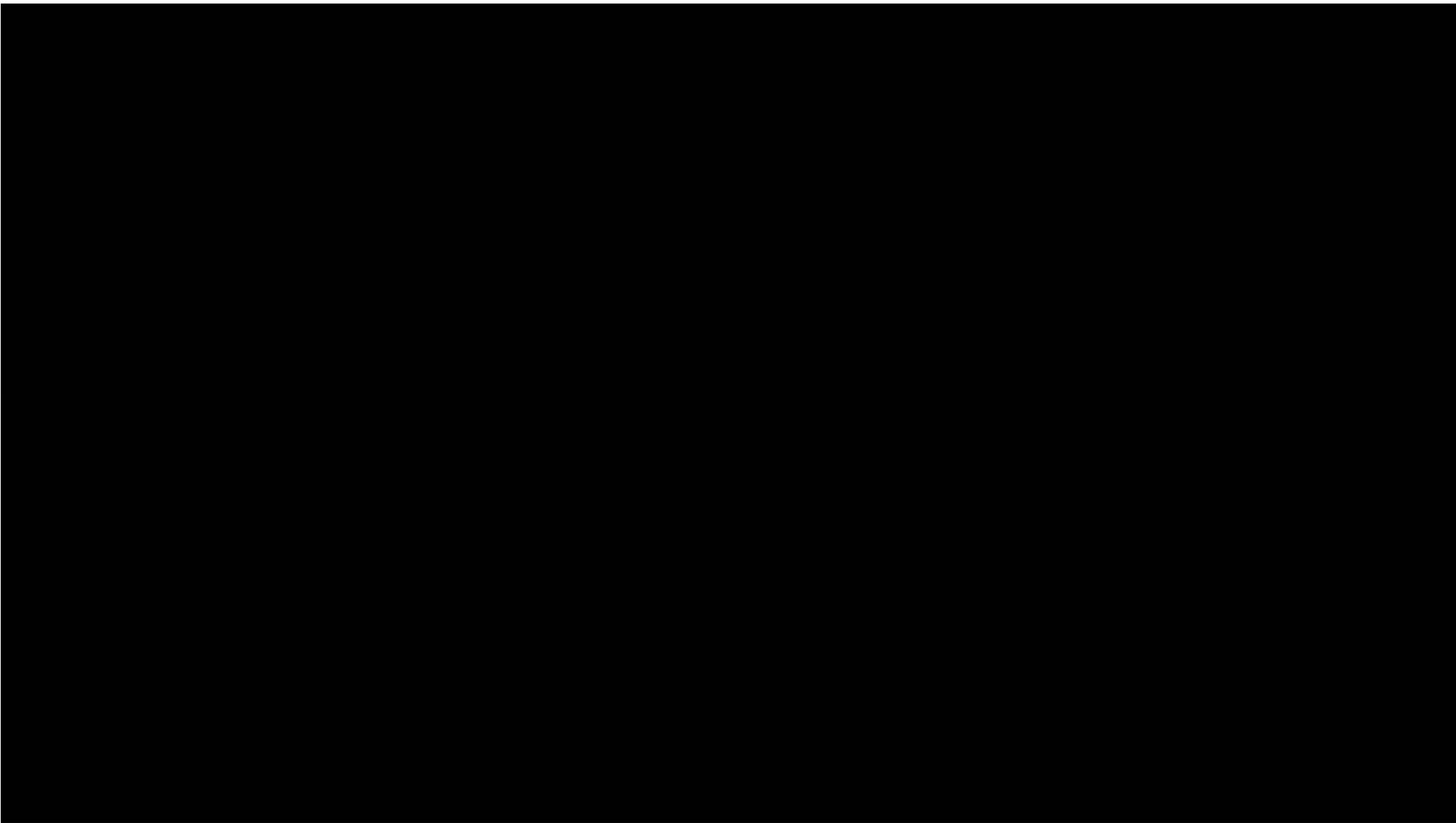


Le Synchrotron : principe

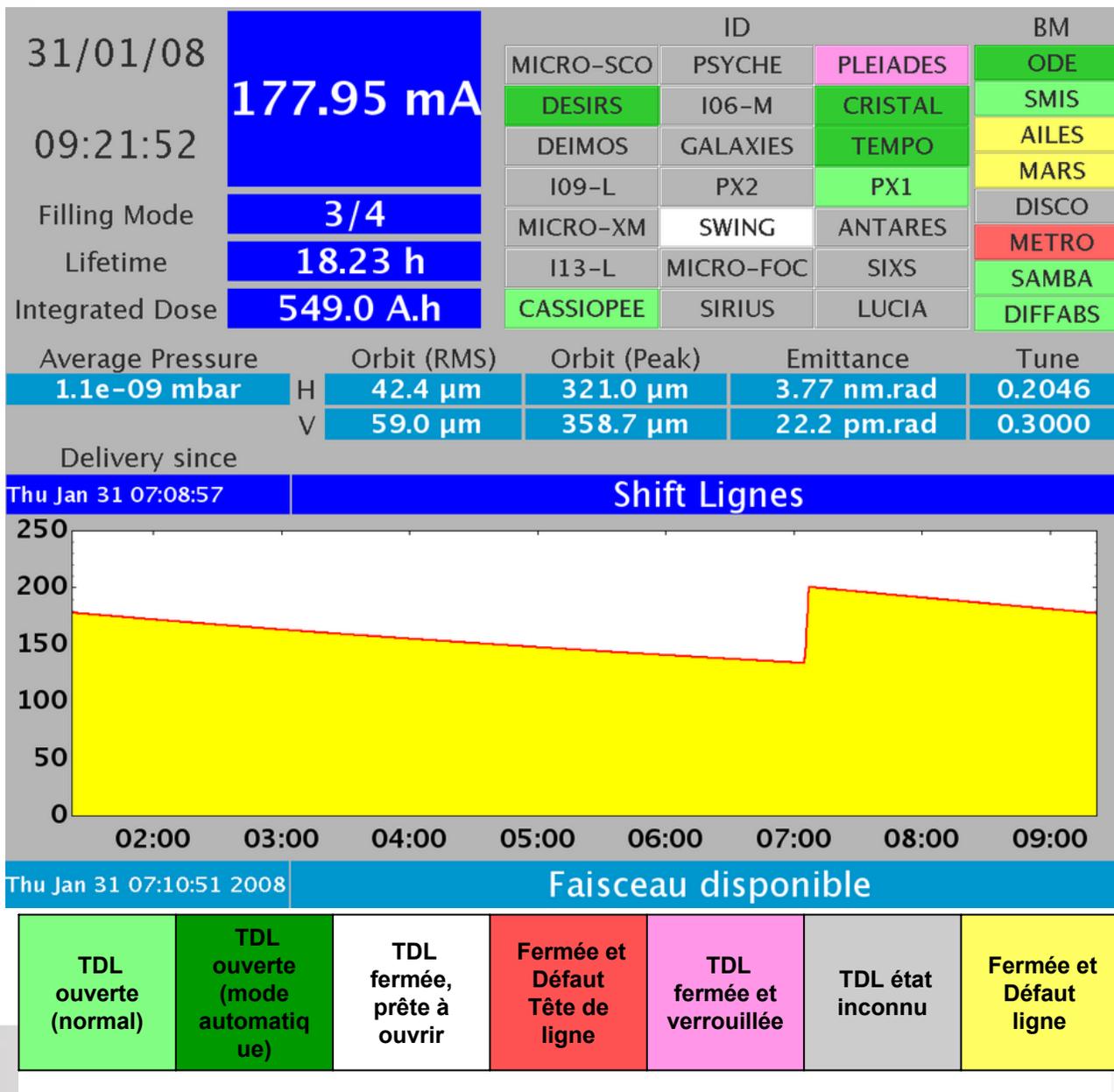
Anneau de stockage : 2,75 GeV



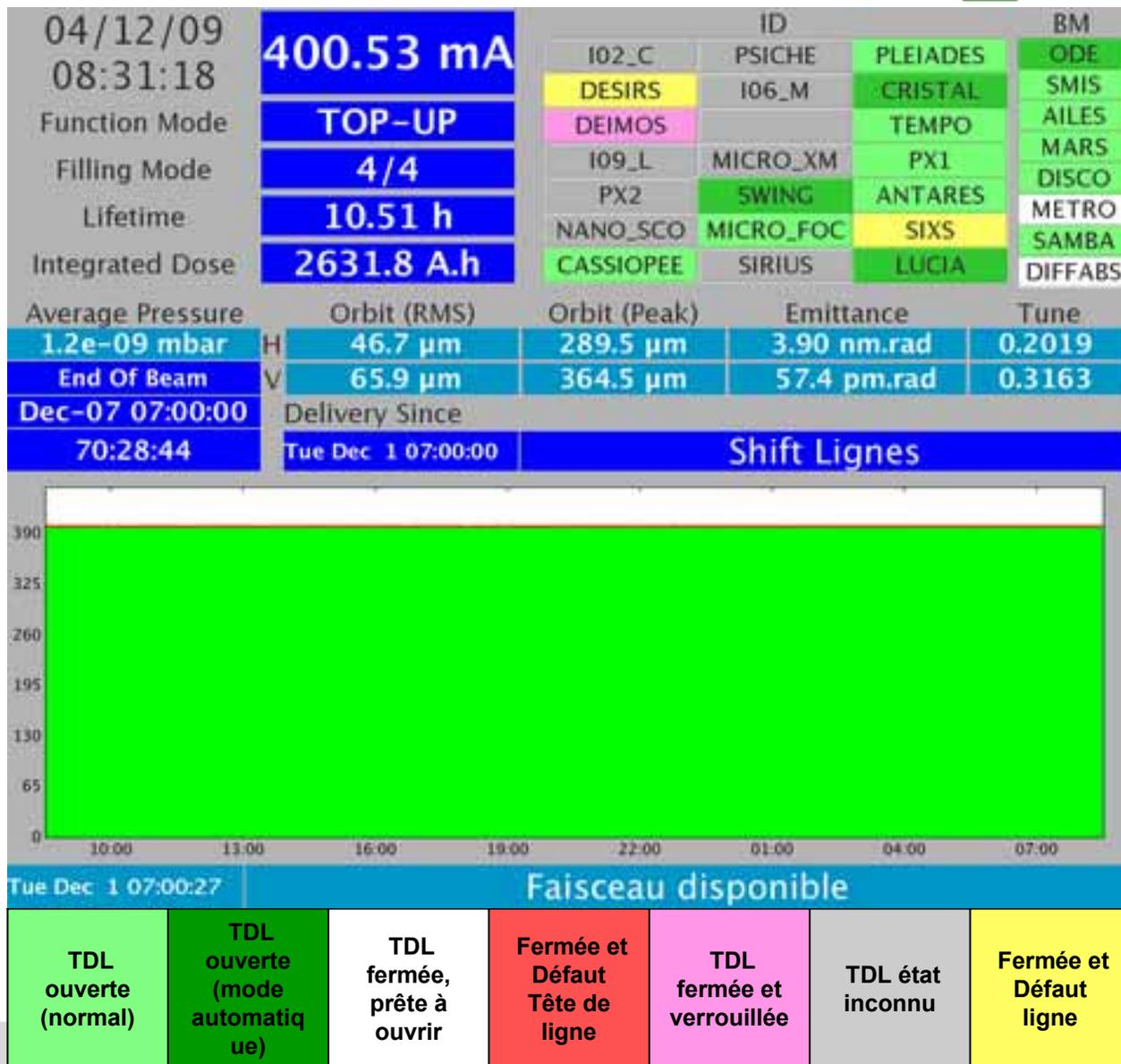
Le synchrotron comme si vous y étiez ...



Etat de la machine, avant mars 2009



Etat de la machine aujourd'hui



Ligne de lumière : 3 cabines

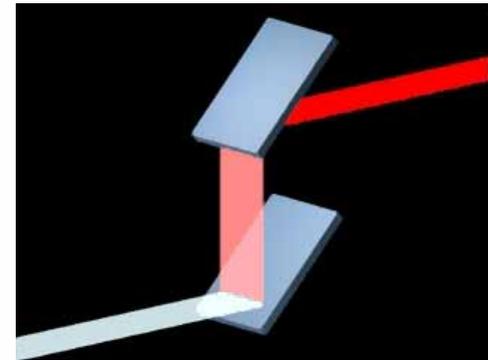
Anneau de stockage

Ligne de lumière

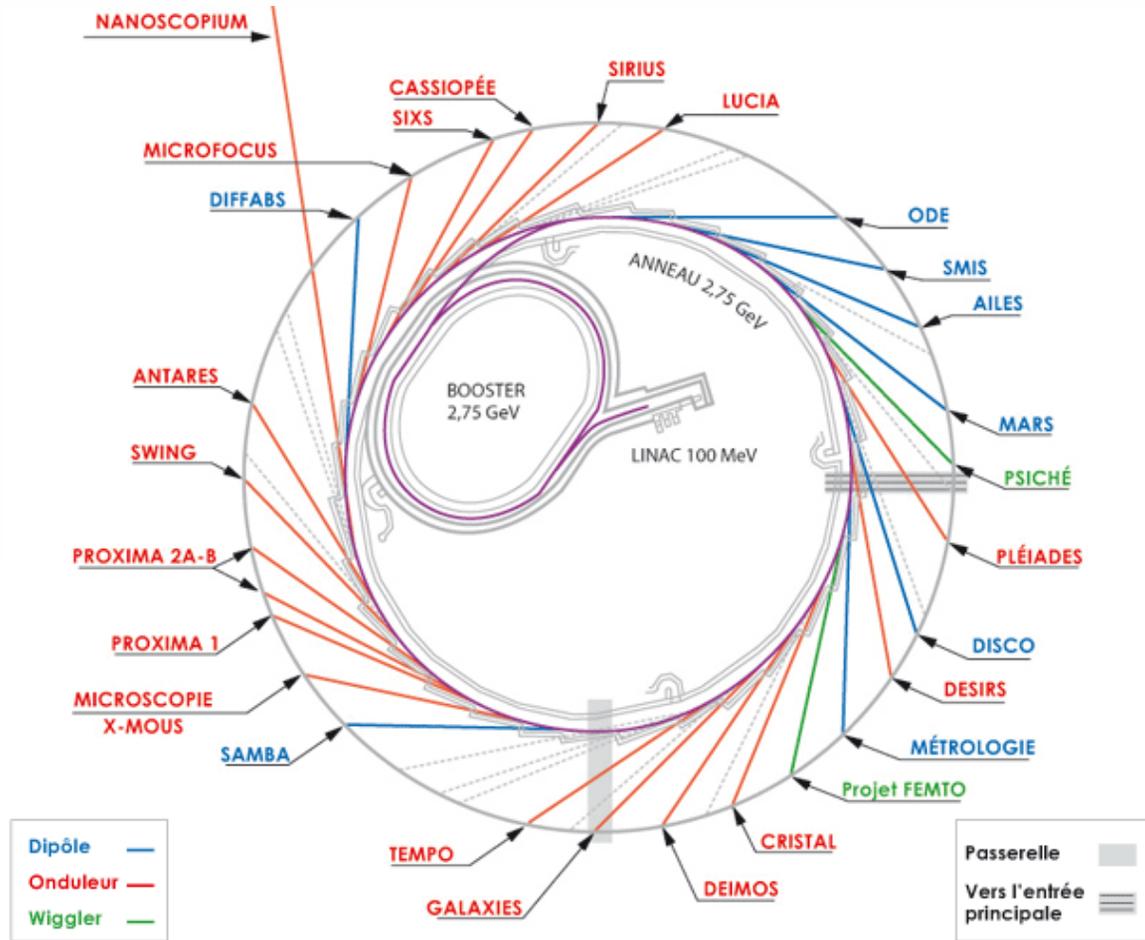
Cabine optique

Cabine d'expérience

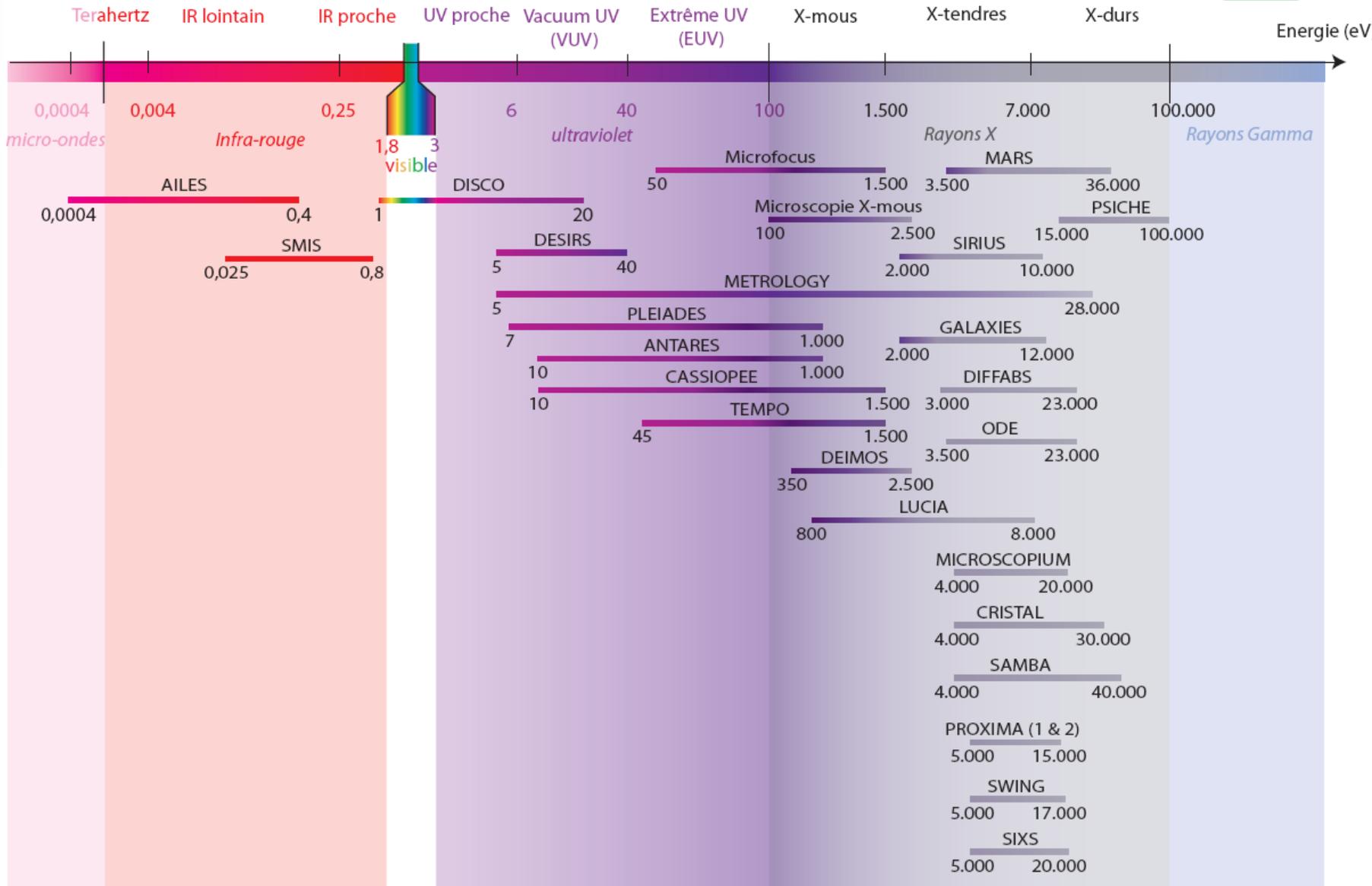
Station de travail



Les lignes de lumière prévues à SOLEIL



43 lignes de lumière possibles dont 21 sur onduleur (un record pour une machine de 354m) + 22 sur aimant de courbure. **26 lignes sont prévues à SOLEIL jusqu'à 2010.**



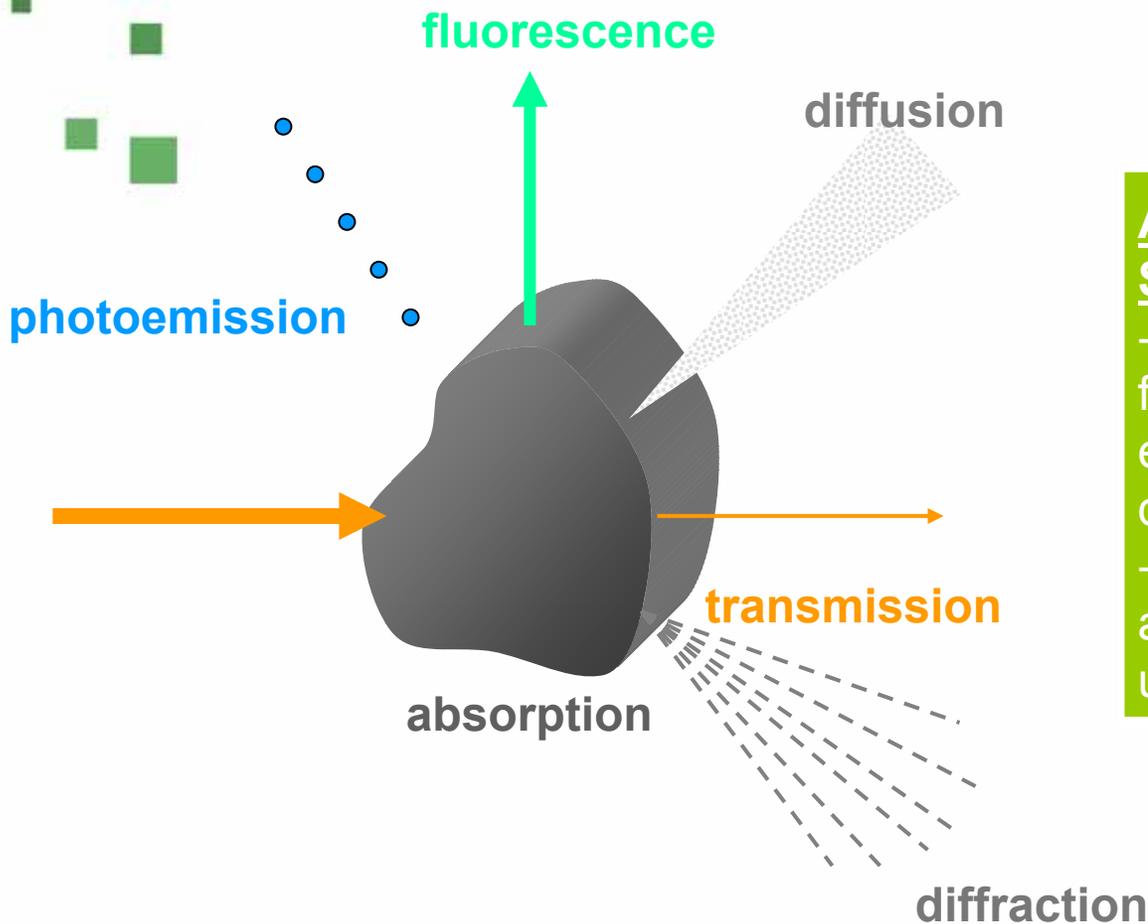
- 1) Le rayonnement synchrotron
- 2) Les sources de lumière
- 3) Quand la lumière rencontre la matière
- 4) Ressources et accès à ce TGE
- 5) Naissance d'un TGE



- 1) Le rayonnement synchrotron
- 2) Les sources de lumière
- 3) Quand la lumière rencontre la matière**
- 4) Ressources et accès à ce TGE
- 5) Naissance d'un TGE



Les interactions lumière/matière



APPORTS DU SYNCHROTRON :

- performances accrues en fluorescence, en diffraction et en microtomographie utilisant des rayons X
- techniques spécifiques en absorption et microscopie utilisant des rayons X



Sciences de l'environnement



Physique



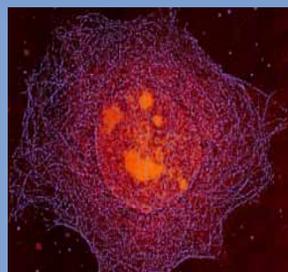
Géophysique



Médecine

Dans tous les domaines, un large accueil est prévu pour les industriels et acteurs des enjeux sociétaux

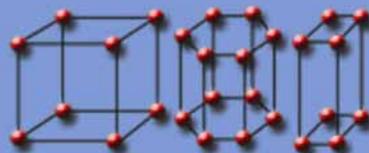
Archéologie, patrimoine, aéronautique, pharmacologie, microélectronique...



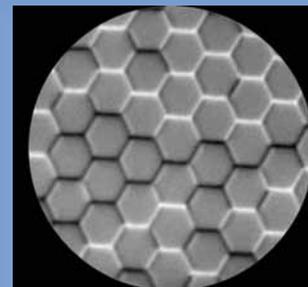
Biologie



Chimie



Sciences des matériaux



Nanotechnologies



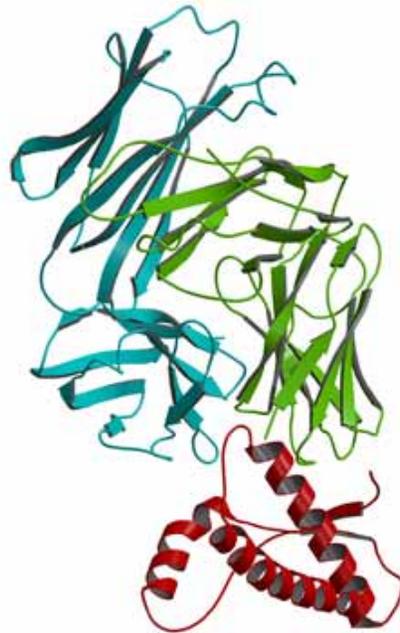
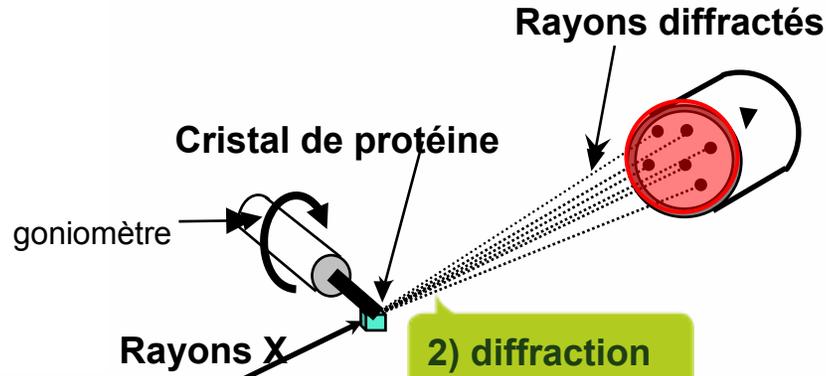
Matériaux anciens

La Biocristallographie

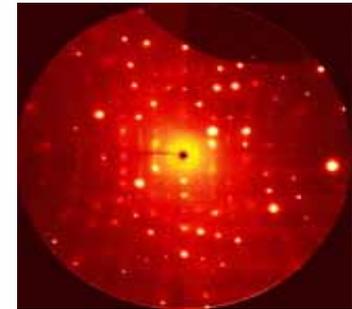


1) cristal

Electrons émettant
des rayons X



3) Enregistrement
des clichés



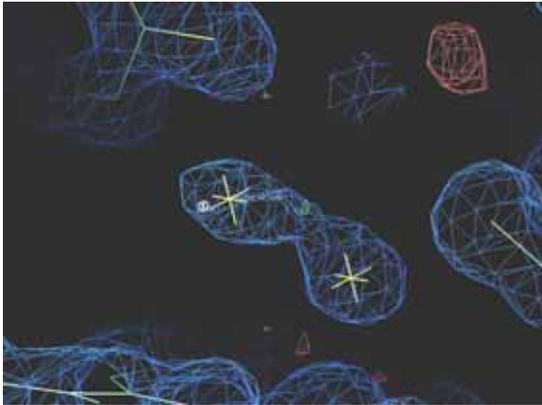
4) Reconstitution de la structure 3D



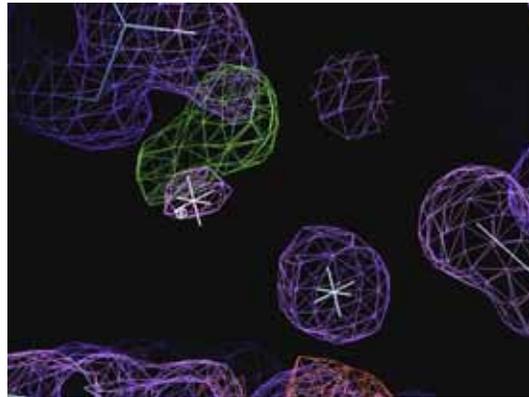
PROXIMA 1

Suivi d'une catalyse dans le site actif (MH Ledu, IBiTec)

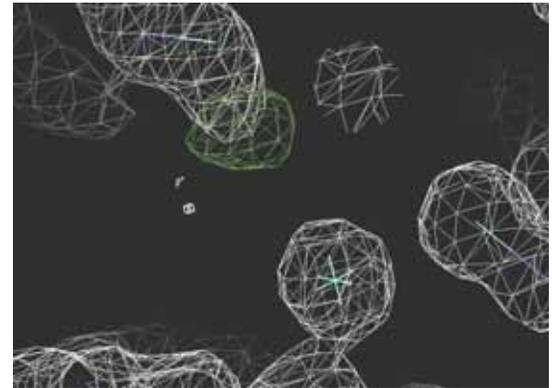
t = 0 sec , résolution 1.4 Å



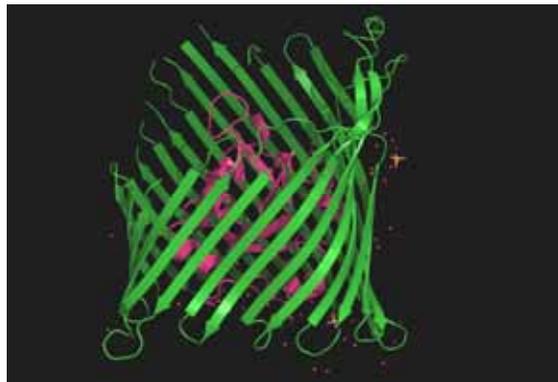
t = 5 sec , résolution 1.2 Å



t = 10 sec , résolution 1.3 Å

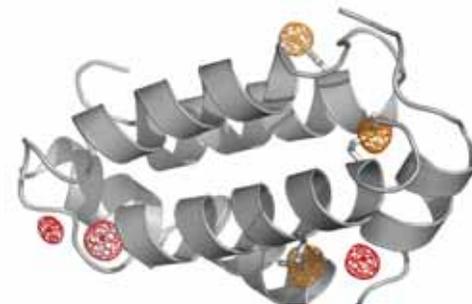


Structures de protéines membranaires intrinsèques (D. Cobessi, IBS Grenoble)



Vers une compréhension du transport de l'hème par le transporteur ShuA de la membrane externe de *Shigella dysenteriae*

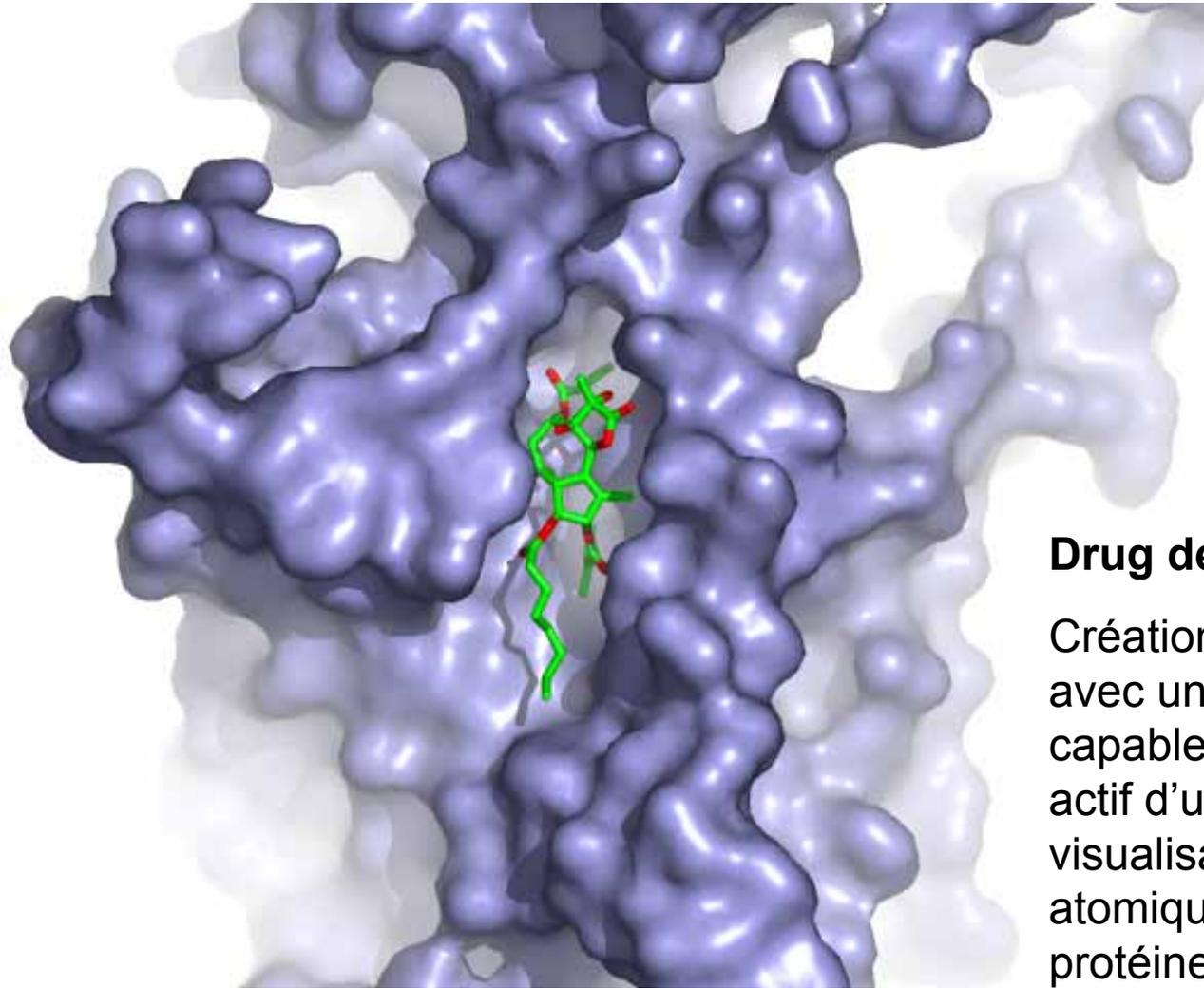
Protéine virale archea par S-SAD
Adeline Goulet, AFMB, Marseille



Haute redondance
 $\lambda = 2 \text{ \AA}$
 κ goniostat

En moyenne
1 structure par jour de faisceau a été résolue depuis mars 2008

Recherche de nouveaux médicaments



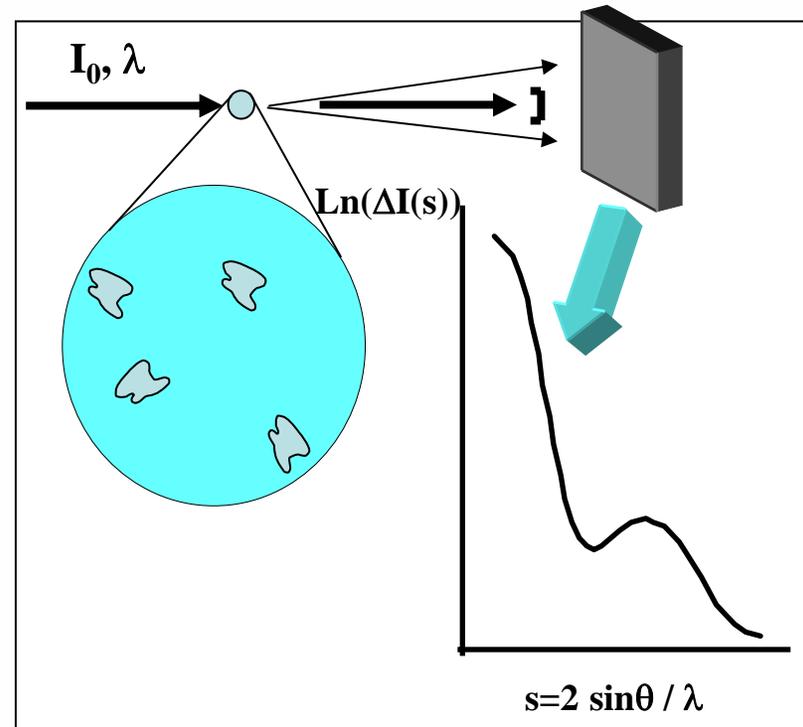
Drug design

Création d'un médicament avec une molécule capable d'agir dans le site actif d'un récepteur et visualisation à l'échelle atomique des interactions protéine-médicament (HIV, cancer, grippe...)

SAXS applied to macromolecules in solution

Molecular structure at low resolution

- ✓ *Ab initio* determination of molecular envelope
- ✓ Conformation of complexes based on structures of individual partners
- ✓ Conformational changes
 - at equilibrium : titration experiments
 - time resolved after perturbation (rapid mixing, T or P jump)



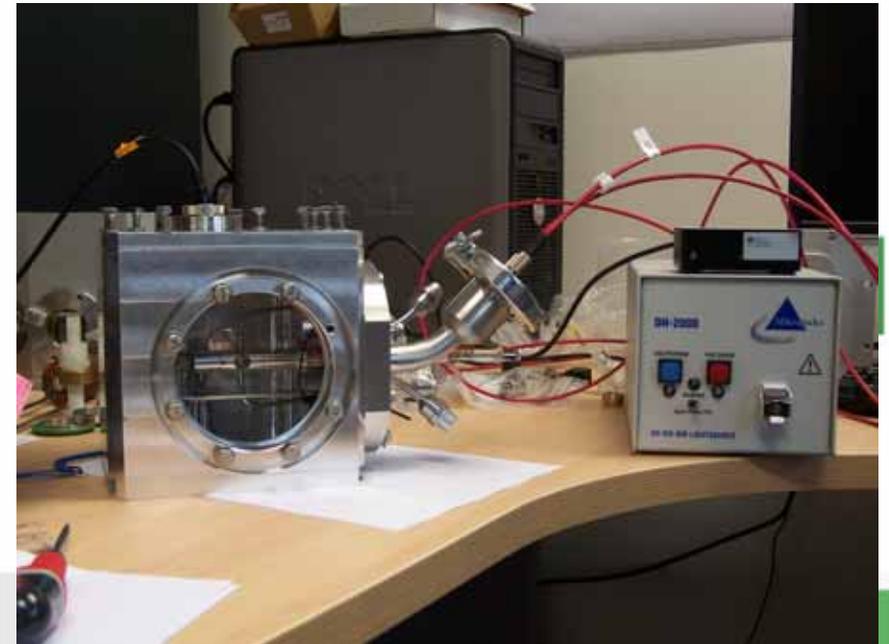
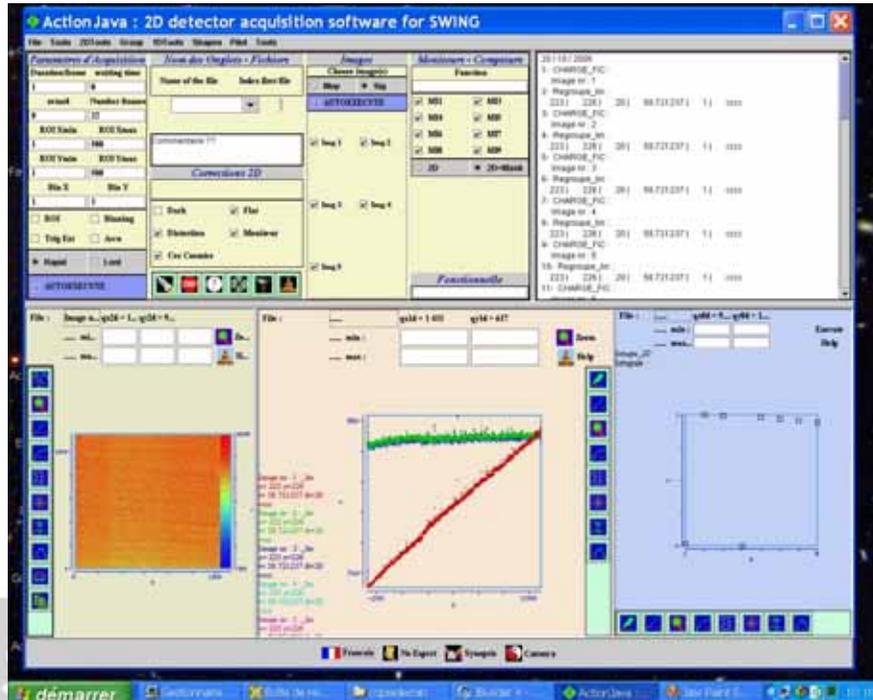
Interactions between molecules in solution

- ✓ *Physical chemistry of proteins (crystallisation)*

**High sensitivity
detector**

SWING

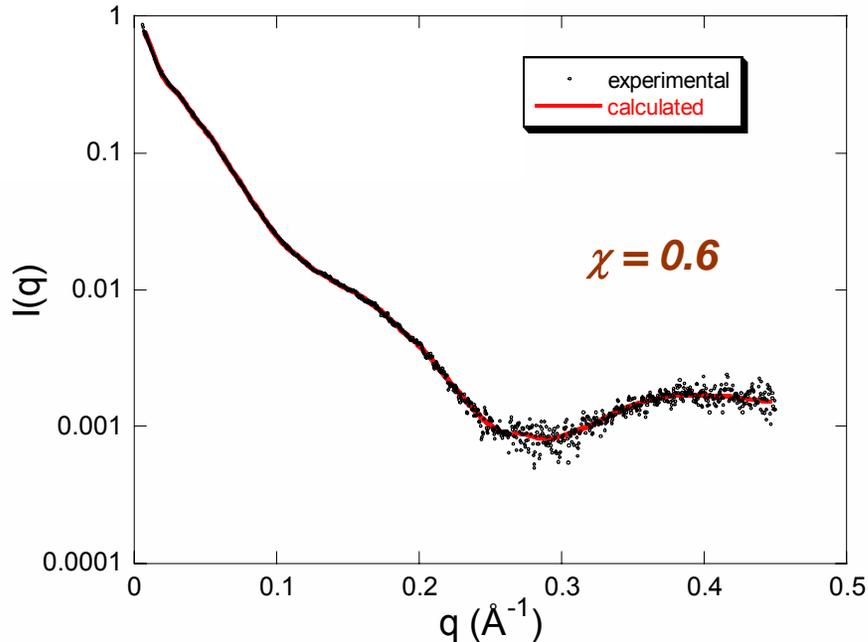
Small angle X-ray scattering



SAXS data collected at the SWING beamline (April 2008)

Large protein: 1356 amino acids

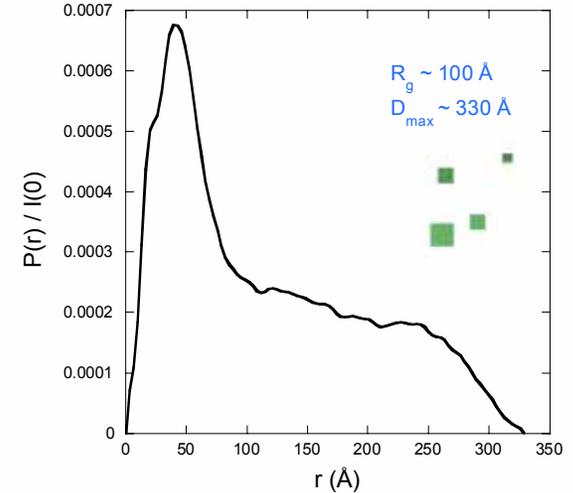
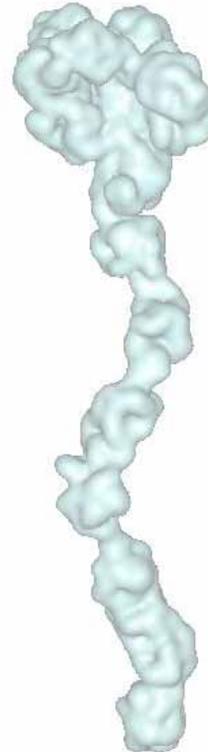
Concentration: 3 mg.mL⁻¹



Acquisition time: 16 x 2s

$$Q_{\min} = 0.0063 \text{ Å}^{-1}$$

$$Q_{\max} = 0.45 \text{ Å}^{-1}$$



Conformation determined *ab initio* from the scattering curve using the program GASBOR which generates a compact chain of dummy residues

Known structural modules can be perfectly accommodated within the envelope.

In situ nucleation and crystal growth of zeolite A studied by

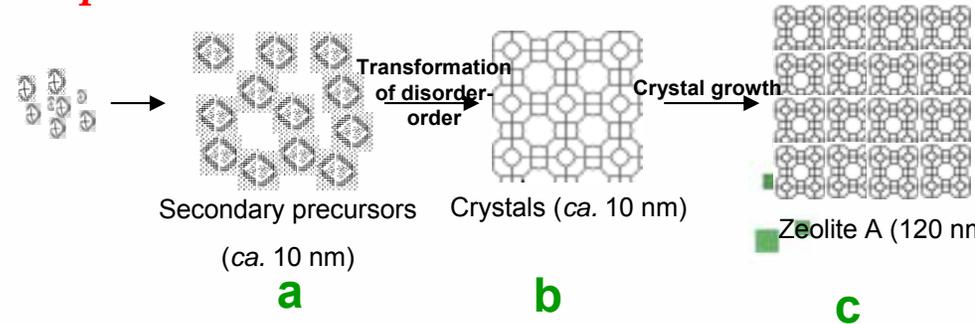
Proposed Mechanism:

Beamline, SWING

Technique, Small Angle X-ray Scattering

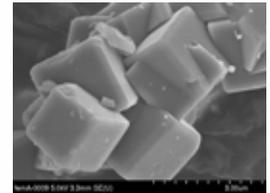
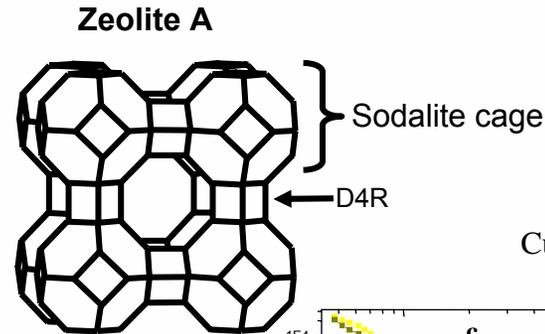
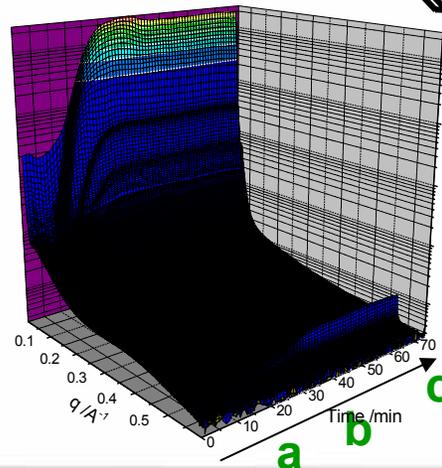
Energy, Hard X-ray

Sample environment, Nanoporous aluminosilicates synthesis

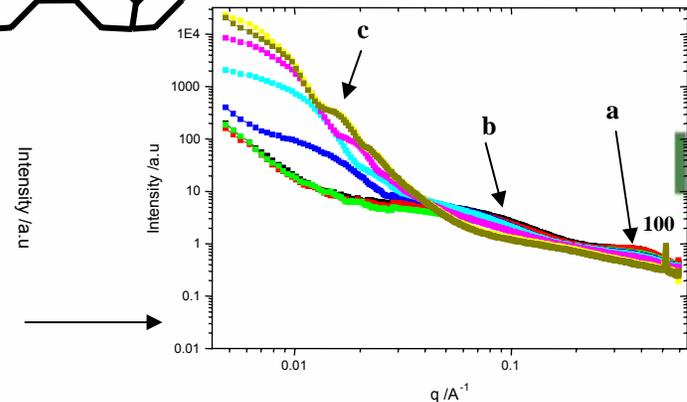


Scientific case, to understand the size and shape of particles formed during the initial stages of the nucleation and growth processes associated with the crystallisation of these systems and relate them to the production of specific structures.

Results, in situ time-resolved SAXS experiments allow to describe the nucleation and growth of specific particles produced at the initial stages of the crystallisation process.



Cubic crystals of zeolite A ($\text{Na}_{12}\text{Al}_{12}\text{Si}_{12}\text{O}_{48}$)

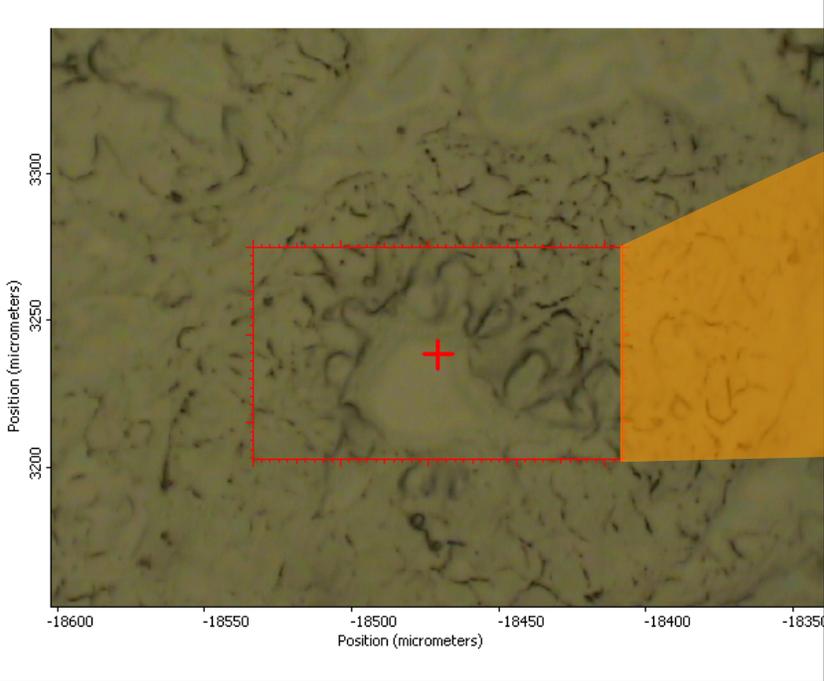


In Situ SAXS patterns collected on SWING

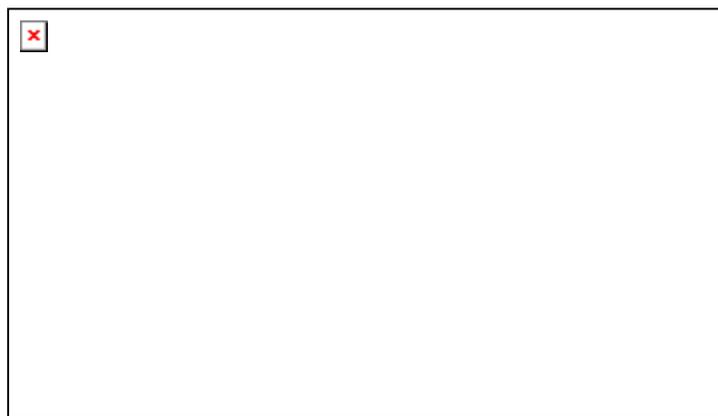
Formation of (a) primary precursors (1 nm-2 nm) and (b) secondary precursors (ca. 10 nm) prior to the crystallization of zeolite A (c).

Microscopie infrarouge

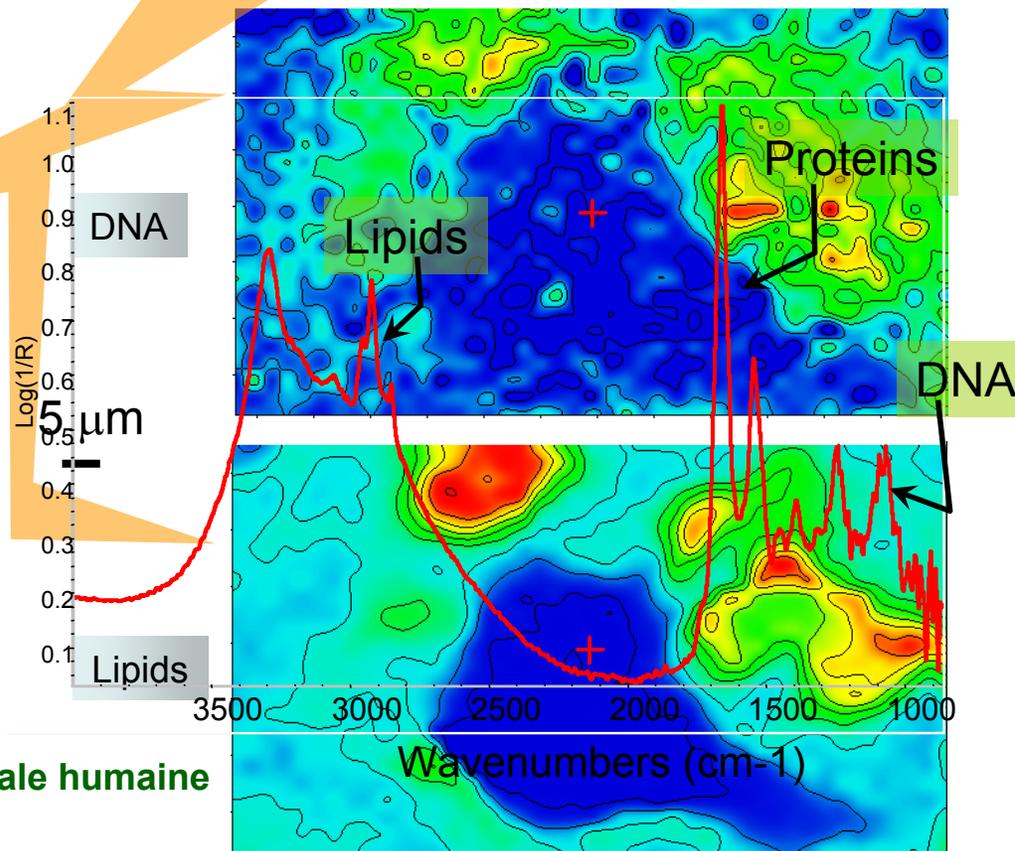




50 μm



Proteins



5 μm

Wavenumbers (cm^{-1})

Sections congelées (6 μm) de muqueuse intestinale humaine
 M-P. Bralet and F. Le Naour, INSERM U775
 Hôpital Européen Georges Pompidou, Paris;



Vernis multi-couches complexes sur des instruments de musique historiques

▪ Les vernis présentent souvent une structure complexe de couches de moins de 10 ou 20 μm (mélange de matériaux organiques (huiles, résines naturelles , ...) et inorganiques (pigments, siccatifs, ...).

▪ Objectif : recréer un vernis ancien idéal, comme celui d'Antonio Stradivari

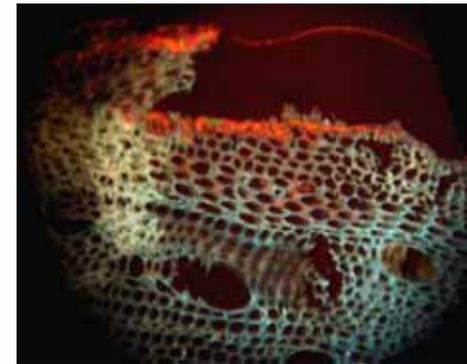
Le microscope de SMIS permet d'identifier par fluorescence la région d'intérêt (a).

La présence d'une couche protéique a été identifiée par son spectre IR caractéristique (b) et (c).

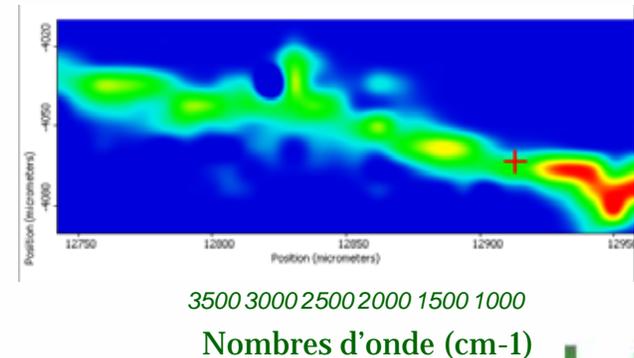
C'est la première fois qu'une couche protéique est identifiée dans le vernis d'un violon ancien.

Dr J.P. Echard (Cité Musique Paris) Dr.Loïc Bertrand (SOLEIL) , Dr.A.S Le Hô (SOLEIL), Dr.S. Vaiedelich (Cité Musique) Dr. S. Le Conte (Cité Musique). Alex VON BOHLEN (Germany)

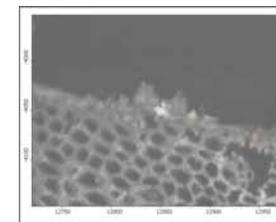
(a)



(b)



(c)



50 μm

**PUBLIE AUJOURD'HUI DANS
Angewandte Chemie (on line)**

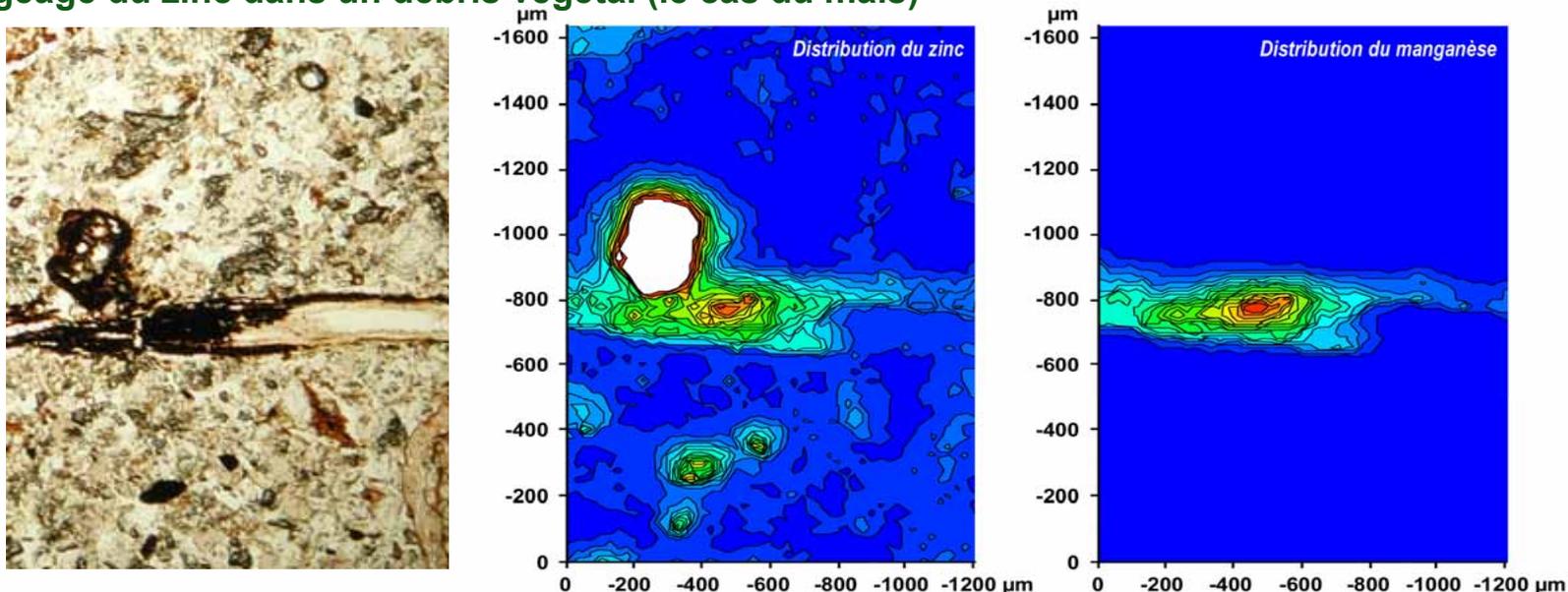
The Nature of the Extraordinary Finish of Stradivari s Instruments

Jean-Philippe Echard, Loïc Bertrand, Alex von Bohlen, Anne-Solenn Le Hô, Céline Paris, Ludovic Bellot-Gurlet, Balthazar Soulier, Agnès Lattuati-Derieux, Sylvie Thao, Laurianne Robinet, Bertrand Lavédrine, Stéphane Vaiedelich

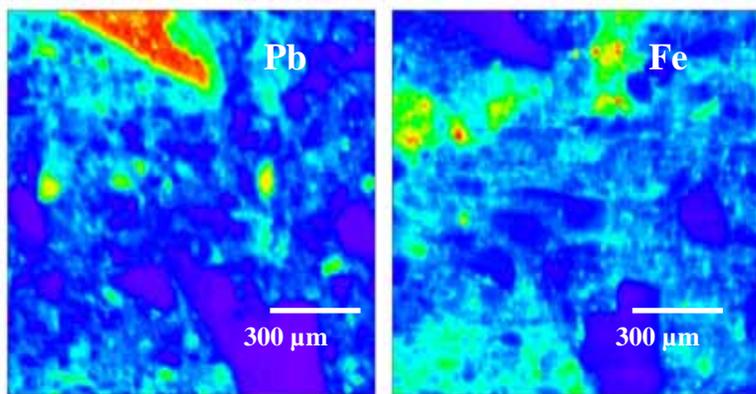
**Information reprise dans
“Le Monde” et le “New York Times”**

sciences de l'environnement

Piégeage du zinc dans un débris végétal (le cas du maïs)



Distributions du **zinc** et du **manganèse** enregistrées par **fluorescence** dans une racine de maïs, située à proximité d'un déchet riche en Zinc et en manganèse.



Cartographie de microfluorescence d'un sol pollué : corrélation spatiale entre les concentrations de plomb et de fer dans le sol d'un stand de tir (*D. Vantelon et R. Kretzschmar*)

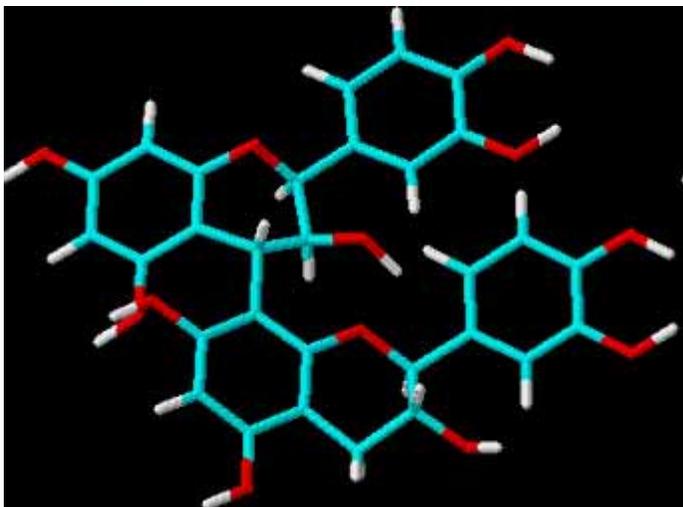
Tracer la circulation de produits ferreux au Moyen Age ? (ligne DIFFABS)

- Deux sources de productions prestigieuses, les Pyrénées et les Alpes italiennes.
- Exemple : les armures en acier lombard, vendues à travers l'Europe médiévale.
- Un traceur : les inclusions non métalliques piégées au sein du métal.
- 1^{ère} étape : mettre en évidence les signatures régionales en éléments traces.
- 2^{ème} étape : suivre ces signatures dans les objets archéologiques eux-mêmes.



*A gauche : Objet en fer archéologique retrouvé sur un site des Pyrénées
A droite : Inclusion piégée dans la matrice métallique de l'objet*

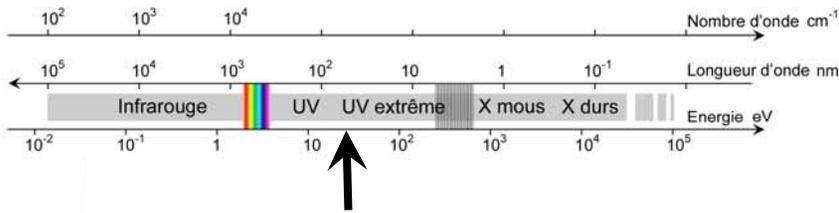
Le vin, une complexe affaire de goût



Certains viticulteurs sont capables de déterminer la maturité des raisins en les goûtant. Ils détectent ainsi le moment où l'équilibre est le plus favorable entre « bons » et « mauvais » tannins qui influent sur les qualités gustatives des vins.

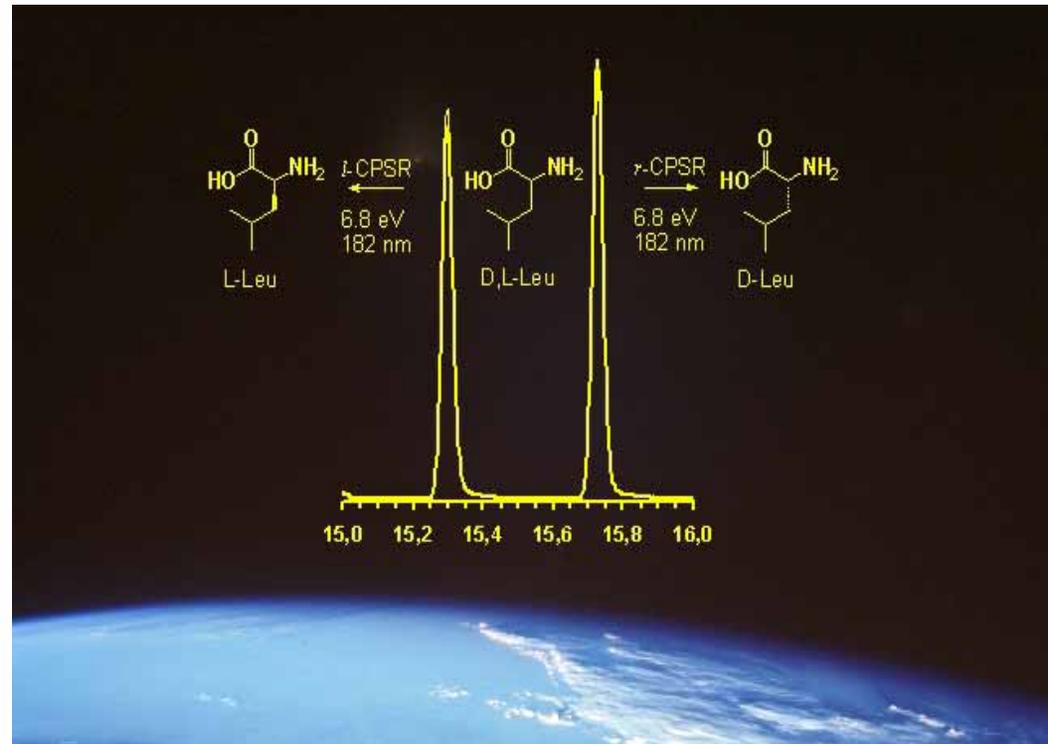
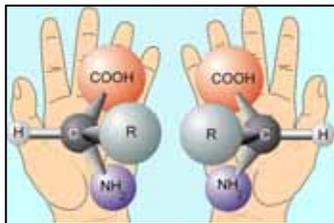
Aude Vernhet et Francis Canon, chercheurs à l'UMR 1083 Sciences pour l'Oenologie de Montpellier, ont entrepris de compléter cette méthode empirique en tentant d'établir des liens entre la forme, la structure du tannin et le phénomène d'astringence qu'il provoque en se fixant aux protéines salivaires. Bienvenue sur les lignes de lumière [SWING](#) et [DISCO](#) qui se prêtent tout particulièrement à l'étude- très difficile- de ces molécules flexibles.

The origins of life



Analysis of amino acids irradiated under interstellar conditions to discover the origins of homochirality of life macromolecules

The implementation of a new analytical technique has permitted to identify a selective degradation of one of the enantiomer of leucine after irradiation with a circularly polarized beam, leading to an enantiomeric surplus of 2.6%, from a racemic mix.

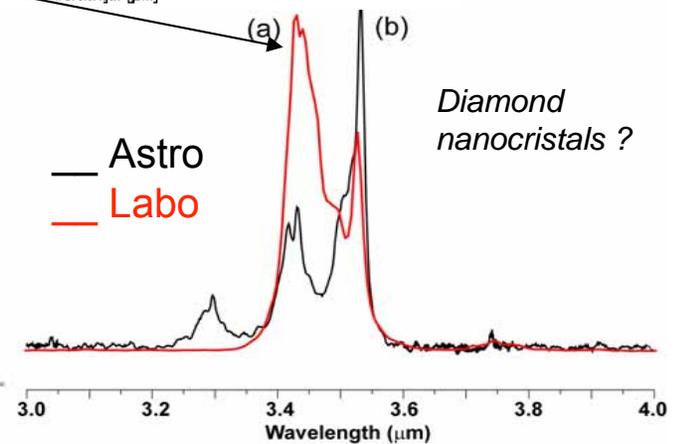
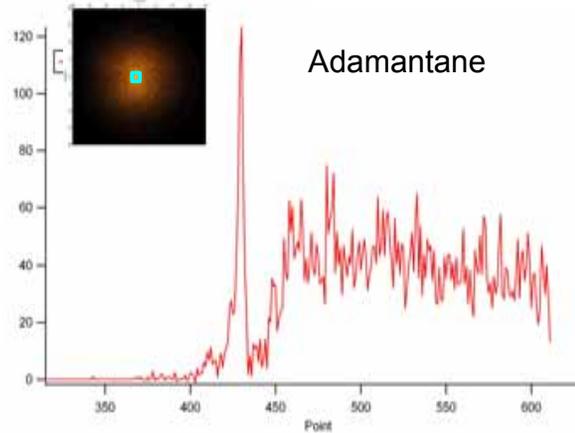
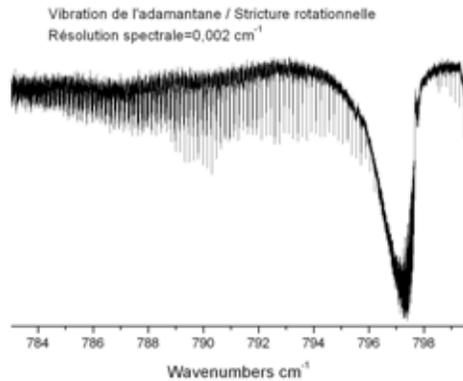
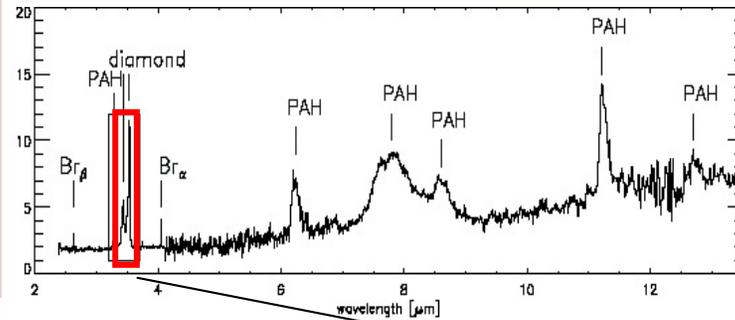


Beamlines, DESIRS and AILES

Technique, ultra high resolution molecular spectroscopy

Energy, VUV and IR

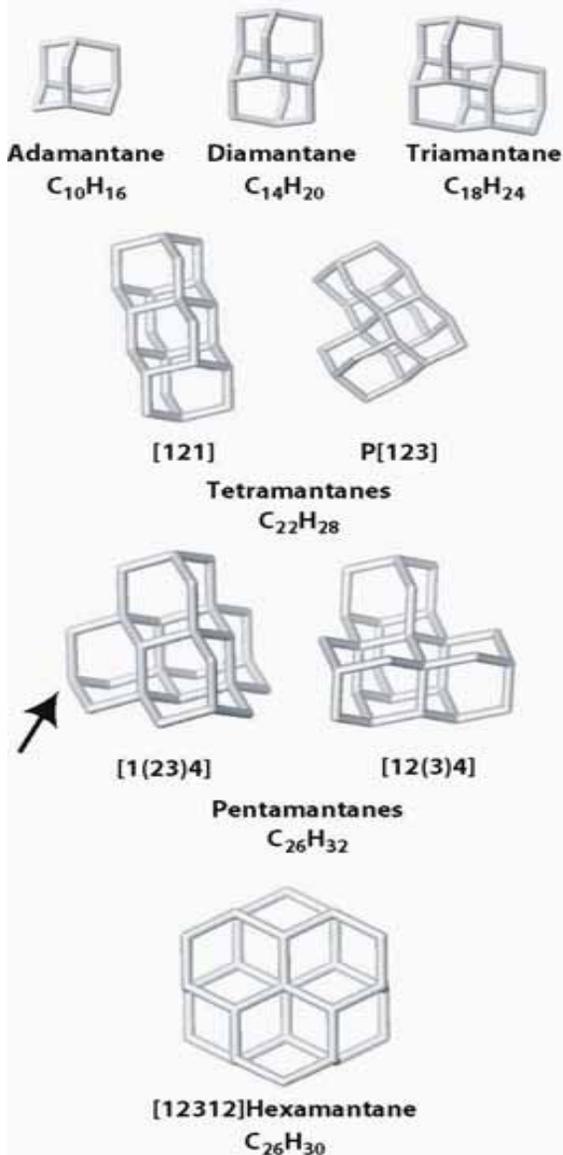
Sample environment, adamantane phase gaz



Scientific case. Which molecules does carbon form in interstellar environment under extremely cold and diluted conditions? how to interpret the IR vibrational bands observed by satellite embarked spectrometers (panels on the right) ?

Results. The molecules (purified from oil) were first analyzed in the gas phase by very high resolution VUV spectroscopy (beamline DESIRS, central panel). The very high resolution IR spectrum (left panel) has permitted an unambiguous assignment of the vibrational modes and the rotational structures.

Presentation of the molecules



Structure:

- ✓ diamond-like carbon cages
- ✓ sp³ hybridised
- ✓ terminated with hydrogen atoms

Synthesis:

- 3 smaller can be synthesized
- Higher : isolated from petroleum (Dahl et al., Science, 299, 96, 2003)

Spectroscopy:

- Adamantane, diamantane : IR spectra and calculations
- First spectroscopic characterization for the higher diamondoids

Spectroscopy of diamondoids

First coherent diffraction experiments on gold film

Beamline, CRISTAL

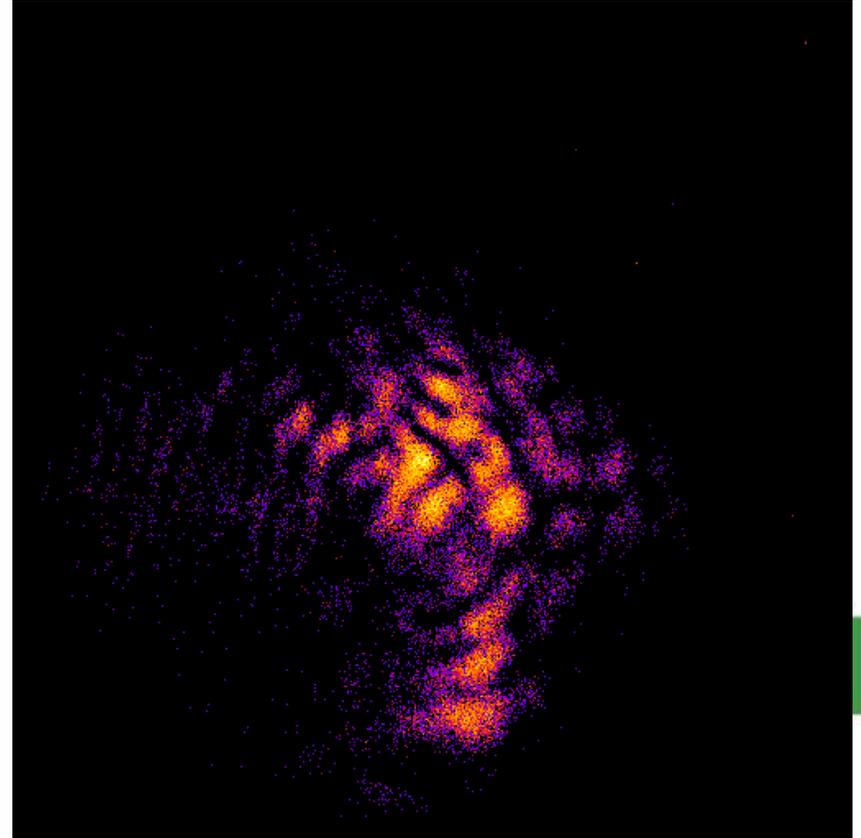
Technique, powder diffraction

Energy: Hard X-ray

Sample environment : 6 circle goniometer

Scientific case, Study of a thin film (200 nm) of polycrystalline gold. Such a thin film consists of small micrometer sized grains, in close contact through grains boundaries. The ultimate goal of the experiment was to obtain the shape of a grain and the local strain inhomogeneities

Results, This image shows the coherent diffraction pattern of the (111) Bragg reflection of a single grain. In spite of the lost of the diffracted beam phase, iterative algorithms have recently been developed to reconstruct the shape and the local strain of the grain, knowing oversampled diffraction patterns as the one presented here. The measurement of such patterns, which is now possible at SOLEIL, opens the way for such novel and challenging studies.



In operando characterisation of Li battery materials

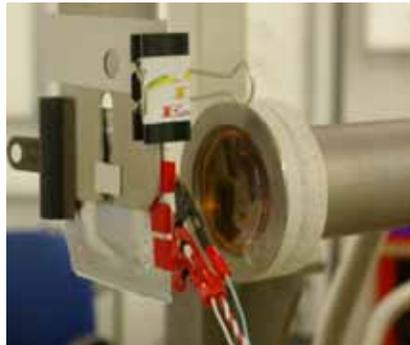
Beamlines, ODE, CRISTAL, SAMBA , LUCIA

Techniques, dispersive xas, scattering, xas, microspectroscopy X.

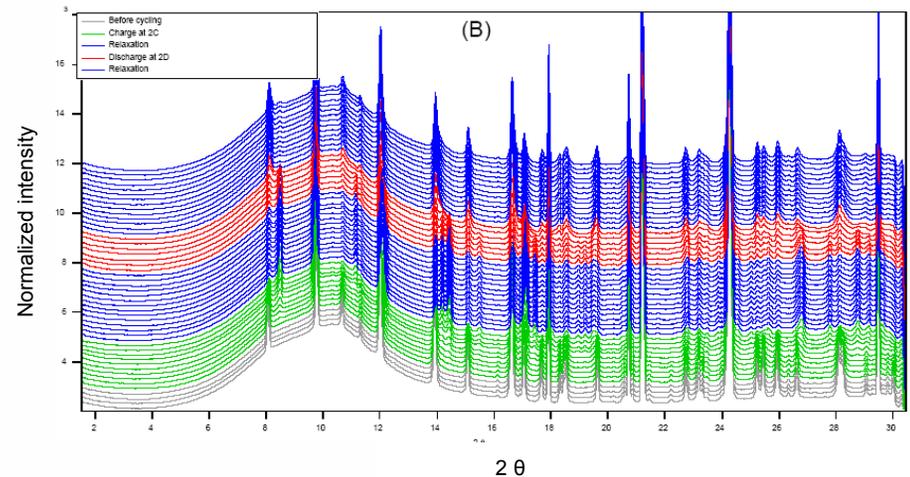
Energy, from Soft X-ray to hard X-ray

Sample environment , in operando

Results, The technical development of this new cell allowed us to perform in-situ synchrotron XRD study during the battery functioning. The high quality of the data obtained reveals the complex nature of the transformation dynamics during charge/discharge of LiFePO₄ electrode, which cannot be predicted from the equilibrium phase study. Further experiments are planned on CRISTAL, SAMBA, ODE and LUCIA beamlines, including investigations on the influence of the cycling regime and particle size..



Scientific case, Most of the efforts of research in the lithium battery materials are directed towards several directions, including a better understanding of the behaviour of the active materials. Characterize the lithium battery materials towards their structural and electronic evolution during the functioning of the batteries (in operando mode),



By using a special designed cell to perform in-situ synchrotron X-ray diffraction (XRD) we have highlighted a complex structural transformation taking place during charge/discharge of the LiFePO₄ electrode with a very high quality of such data.

Electronic structures and implications for novel hybrid photovoltaic Cell Design

Beamline, TEMPO

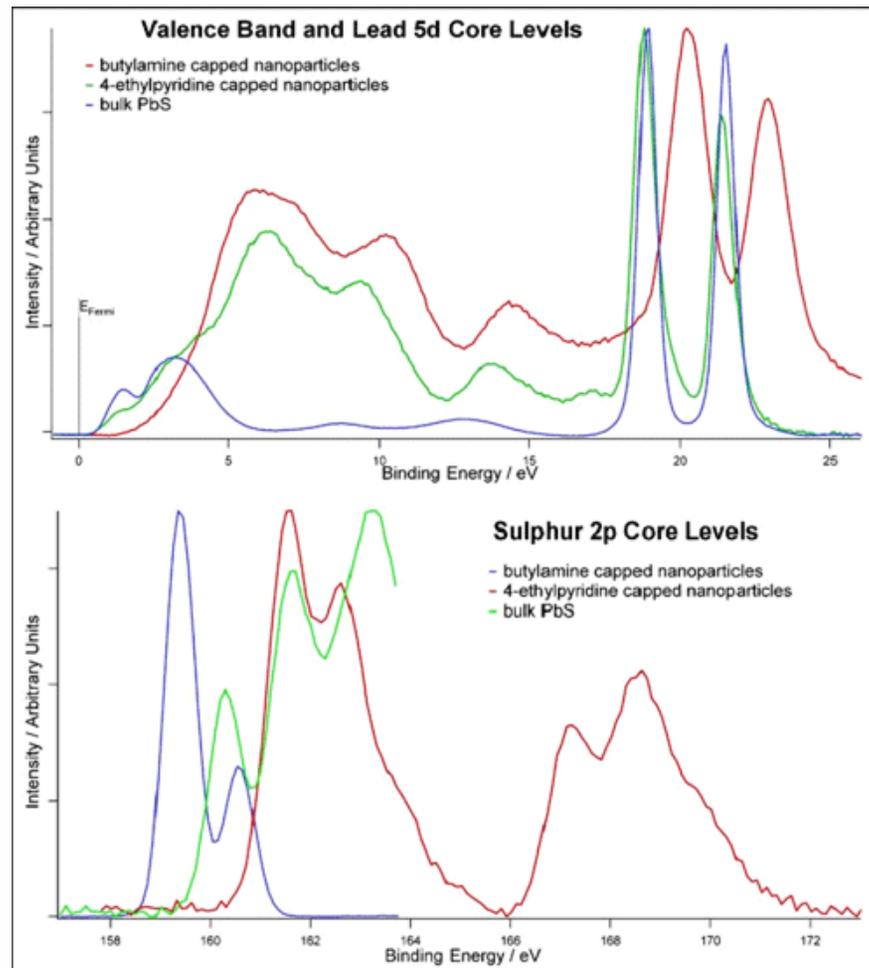
Technique, photoemission spectroscopy.

Energy, Soft X-ray

Sample environment, PbS nanoparticles capped

Scientific case, Lead sulphide, PbS, nanoparticles in particular have been suggested for use in photovoltaic devices because the absorption edge of PbS nanoparticles has been shown to be size-tuneable across much of the visible/near IR region, making them well-suited as photo-absorbers for solar cells

Results, The XPS spectra make it clear that the chemical composition of nanoparticulate PbS is very much more complex than that of the bulk material and the nature of the capping group appears to significantly affect the energy level positions, the chemical composition of the nanoparticle : the choice of capping group is a very important factor in photovoltaic cell design.



Monocrystalline materials for tunnel junctions

Beamline , CASSIOPEE

Technique, photoemission spectroscopy.

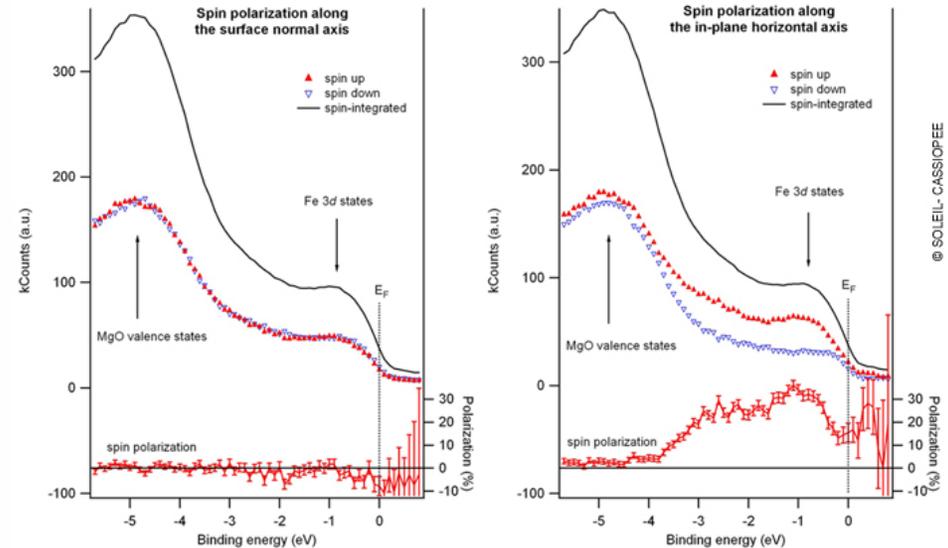
Energy, hard X-ray

Sample environment, a thick layer of epitaxial iron covered in two atomic planes of MgO

Scientific case, to understand the mechanisms leading to these strong system magnetoresistances.

Results, Thanks to the geometry of the experimental setup, spin polarisations can be measured simultaneously along the normal to the surface and along the horizontal axis of the surface plane. As expected, no spin polarisation is observed along the normal to the surface, whilst the 3d states of iron have approximately 45% polarisation along the magnetisation axis

Premiers spectres de photoémission résolue en spin sur CASSIOPEE



Spectra obtained from a thick layer of epitaxial iron covered in two atomic planes of MgO (i.e. an Fe/MgO bilayer, since measurements are not carried out directly on the Fe/MgO/Fe(001) trilayer). The sample exhibits remanent magnetisation along the horizontal axis in the surface plane.

The spectra show two distinct regions: around -5 eV there are the valency states of MgO, and the 3d states of iron appear around -1 eV, in the MgO gap.

Measuring the elastic properties of a thin film under compression

Beamline, DIFFABS

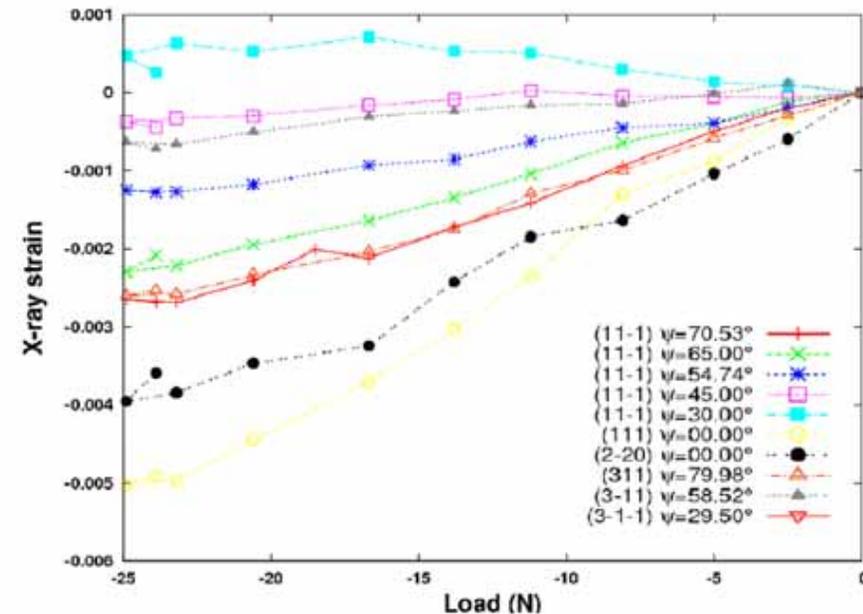
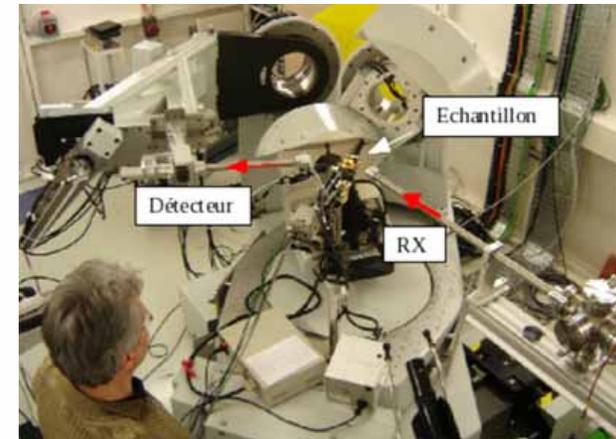
Technique, diffraction

Energy: Hard X-ray

Sample environment : 6 circle goniometer

Scientific case: study of the elastic behaviour of thin nano-structured films to characterise the mechanical response of these films experimentally and to interpret the experimental results using relevant mechanical modelling.

Results: this experiment shows the deformations measured in the various crystallographic directions according to the force applied. The complete deformation tensor in 18-nm thick polycrystalline films is measured very accurately, (ii) At this small scale, the system is sensitive to elastic anisotropy (planes (1 1 1) and (2 -2 0)), and (iii) high values of elastic deformation are reached without causing delamination of the gold film on its substrate.



Strain for different planes (hkl) according to applied force for an 18 nm thin gold film

Catalysis « in operando », time resolved and quick mode

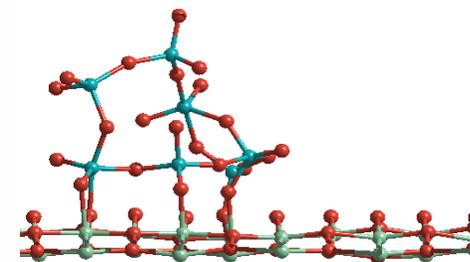
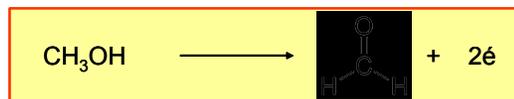
Beamline, SAMBA

Technique, X-ray absorption spectroscopy

Energy, Hard X-ray

Sample environment, temperature sampling under a flow of reactive gases.

Polymeric species for
7.5 % Mo/TiO₂

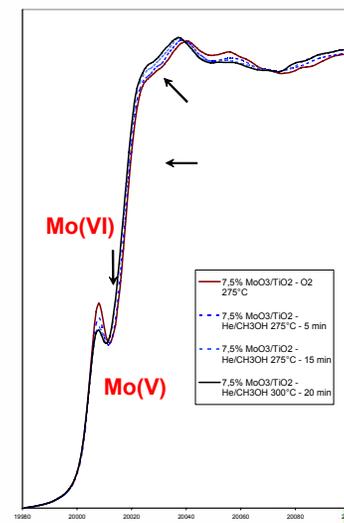
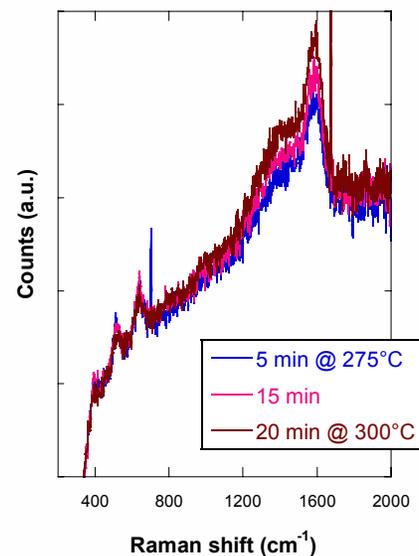


7.5% MoO₃/TiO₂

He /MeOH gas stream

Scientific case, can molecular dynamics calculations be validated experimentally to show the better reactivity of polynuclear Mo catalysts ?

Results, demonstration of the change in oxidation level of Mo (from VI to V), using a newly developed polyvalent cell for simultaneous detection by X-ray transmission and fluorescence allowing a dynamic spectroscopy « in operando » from RT to 600°C.



Operando study of methanol conversion on Mo/TiO₂ catalyst

Genesis of Titania nanoparticles by "Soft Chemistry"

Beamline, SAMBA

Technique, First UV-Vis and Quick-XANES
Combination

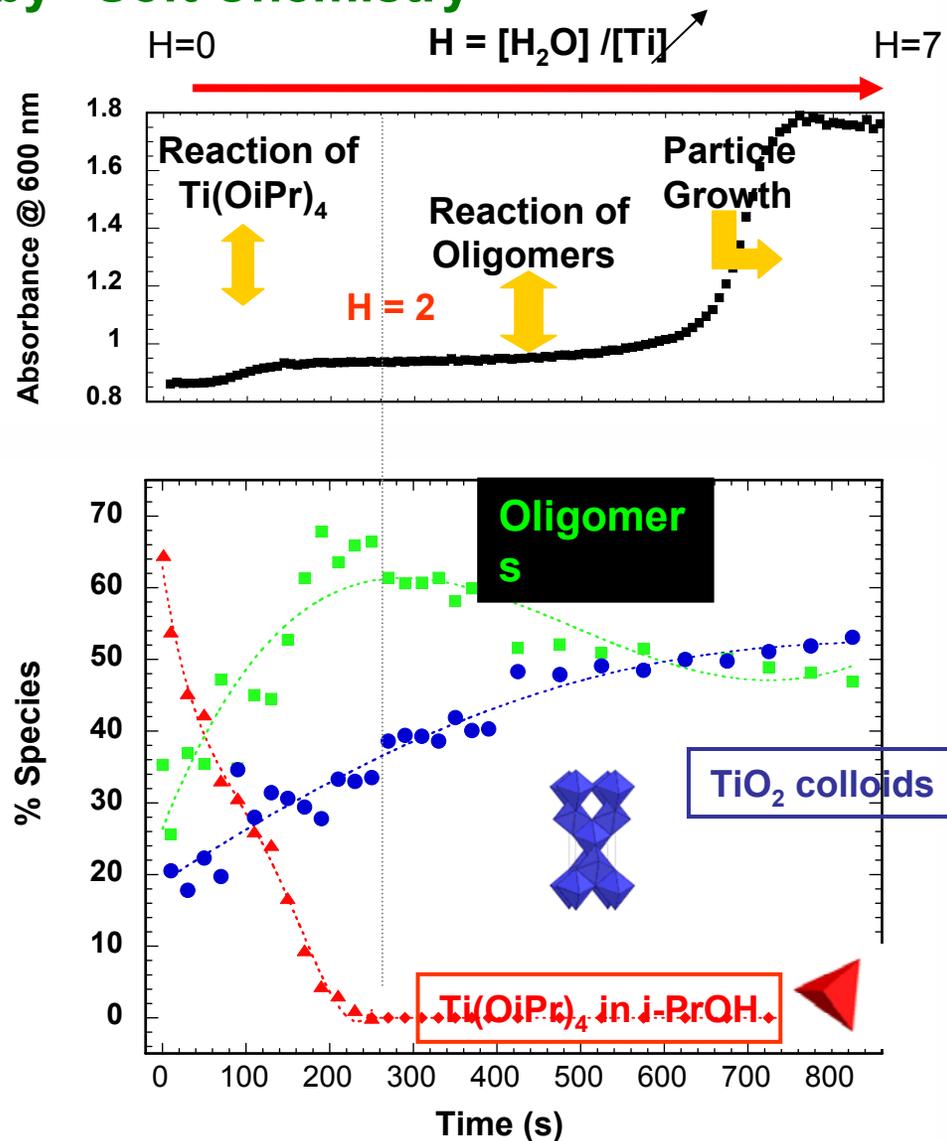
Energy, Hard X-ray

Sample environment, liquid sample evolving during the course of the experiment by addition of water (hydrolysis-condensation)

Scientific case, what are the reactional mechanisms resulting in the formation of TiO₂ and what are the intermediate species ?

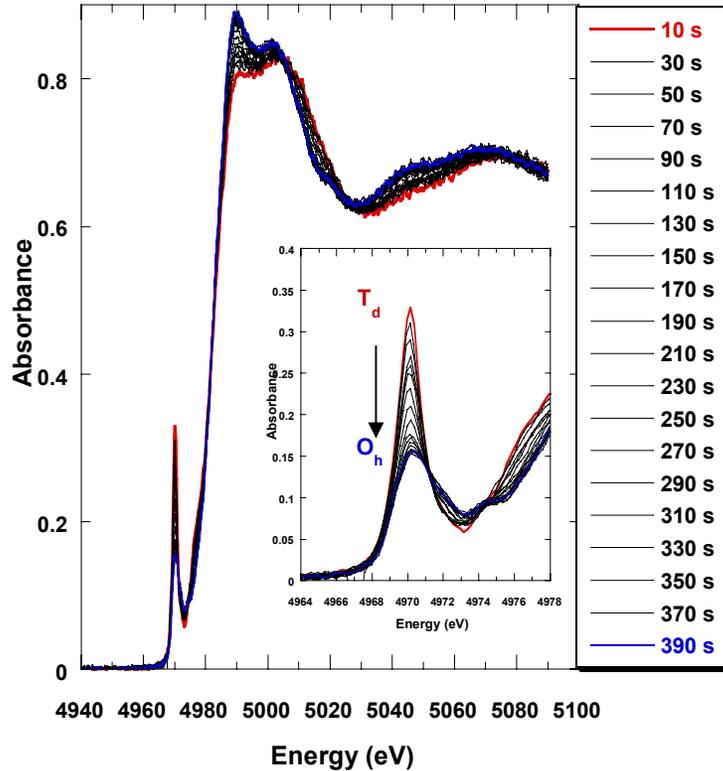
Results, combination XAS and UV for *in situ* study of TiO₂ genesis.

[chemical reaction followed in situ under the beam with very short acquisition times enabling a detailed analysis of the species formed and their statuses]

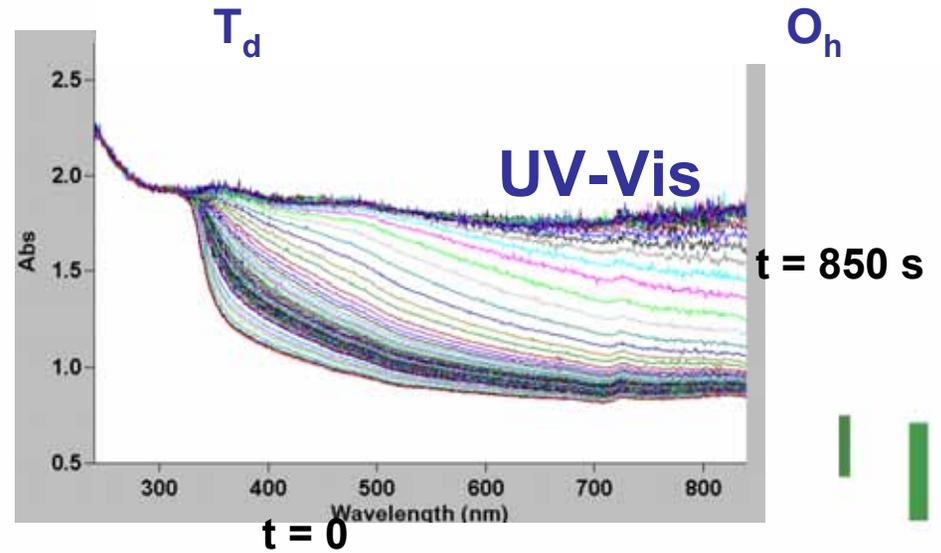


First UV-Vis and Quick-XANES Combination Genesis of Titania nanoparticles by “Soft Chemistry”

Reaction Time



Kinetic of hydrolysis-condensation :



Collection Time for one single spectrum : 5 s
Presented data : average between 4 scans

- 1) Le rayonnement synchrotron
- 2) Les sources de lumière
- 3) Quand la lumière rencontre la matière
- 4) Ressources et accès à ce TGE
- 5) Naissance d'un TGE



- 1) Le rayonnement synchrotron
- 2) Les sources de lumière
- 3) Quand la lumière rencontre la matière
- **4) Ressources et accès à ce TGE**
- 5) Naissance d'un TGE



Les principaux Synchrotrons dans le monde



Le site et son budget

(€ courants)

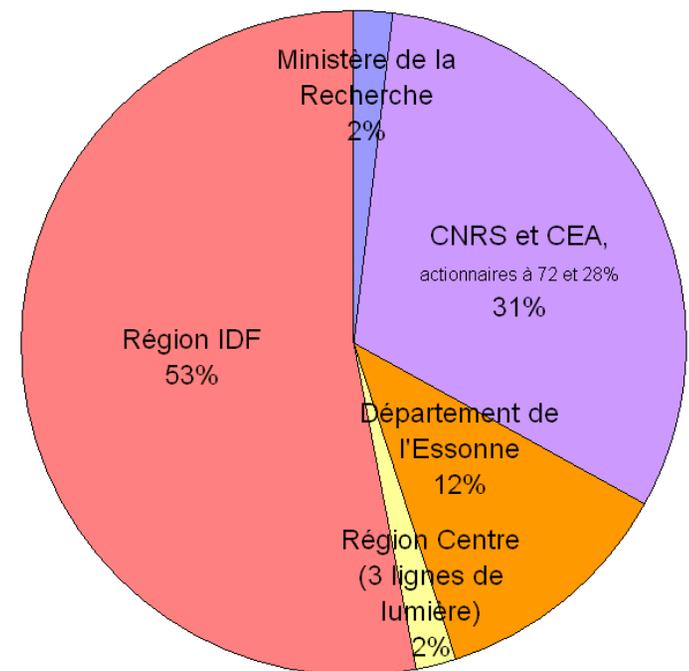
Le budget total pour la période de 2002 à 2012 : **634 M€**



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) : **57,2 M€/an**



Contributions à l'investissement

Université pour tous, 4 décembre 2009

Le personnel de SOLEIL

Depuis 2008, SOLEIL accueille **2000 utilisateurs** par an

Avec **357 personnes** en permanence.



Le personnel permanent
162 cadres
148 non cadres

Les chercheurs
21% détachés du CNRS
6,8% détachés du CEA

La moyenne d'âge
42% ont moins de 35 ans
60% ont moins de 40 ans

Direction 17 personnes

Division Expériences 138 personnes

Division Sources et Accélérateurs 61 personnes

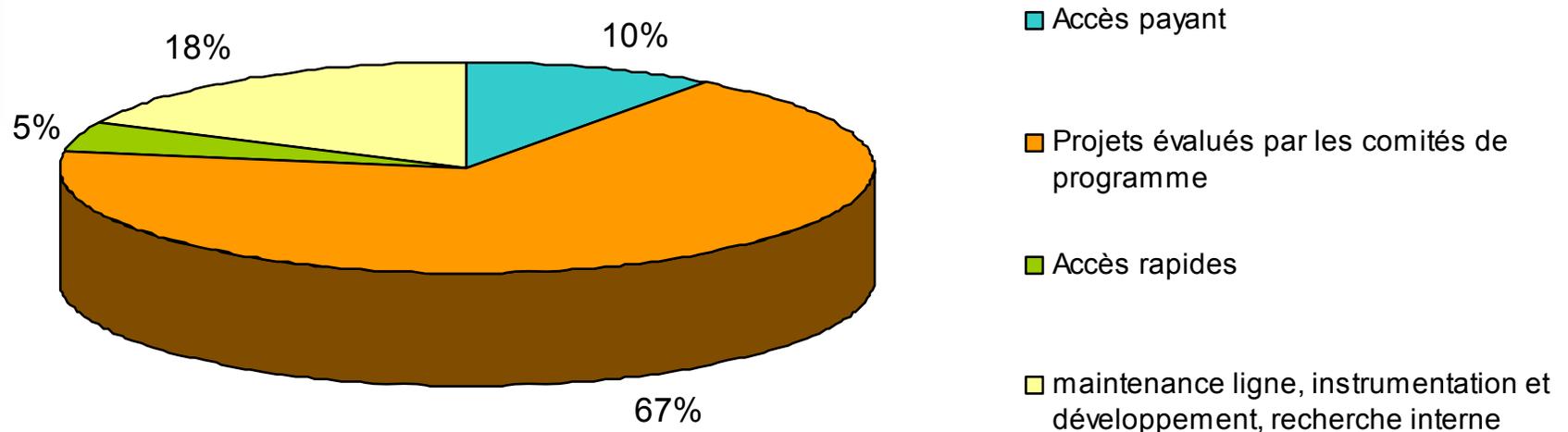
Administration 29 personnes

Services Techniques 65 personnes

Services Informatiques et Electroniques 40 personnes

Répartition du temps de faisceau

Le temps de faisceau pour les utilisateurs sera disponible 24h sur 24 et 6 jours par semaine, 40 semaines par an, complété par des arrêts techniques planifiés pour la maintenance des équipements .



- 1) Le rayonnement synchrotron
- 2) Les sources de lumière
- 3) Quand la lumière rencontre la matière
- 4) Ressources et accès à ce TGE
- 5) Naissance d'un TGE



- 1) Le rayonnement synchrotron
- 2) Les sources de lumière
- 3) Quand la lumière rencontre la matière
- 4) Ressources et accès à ce TGE
- 5) **Naissance d'un TGE**



Vue du site 2003

Vue du site et de l'emplacement du futur anneau



Vue du site juillet 2003

Vue aérienne du site – juillet 2003



Fin de chantier, juin 2005



Naissance d'un TGE

Le Président de la République a inauguré dans la matinée du lundi 18 décembre 2006 le synchrotron-SOLEIL implanté sur un site de 30 hectares sur la commune de Saint-Aubin...





Merci de votre attention

Place aux questions