





# SOLEIL ou le Rayonnement Synchrotron

---

Afin de se familiariser avec le sujet, je vous propose d'analyser et de répondre ensemble à quelques questions simples:

- **Qu'est ce** que le Rayonnement synchrotron?
- **Comment** est-il produit?
- **depuis Quand?** un peu d'histoire
- **Pourquoi faire?** quelques exemples
- **SOLEIL**

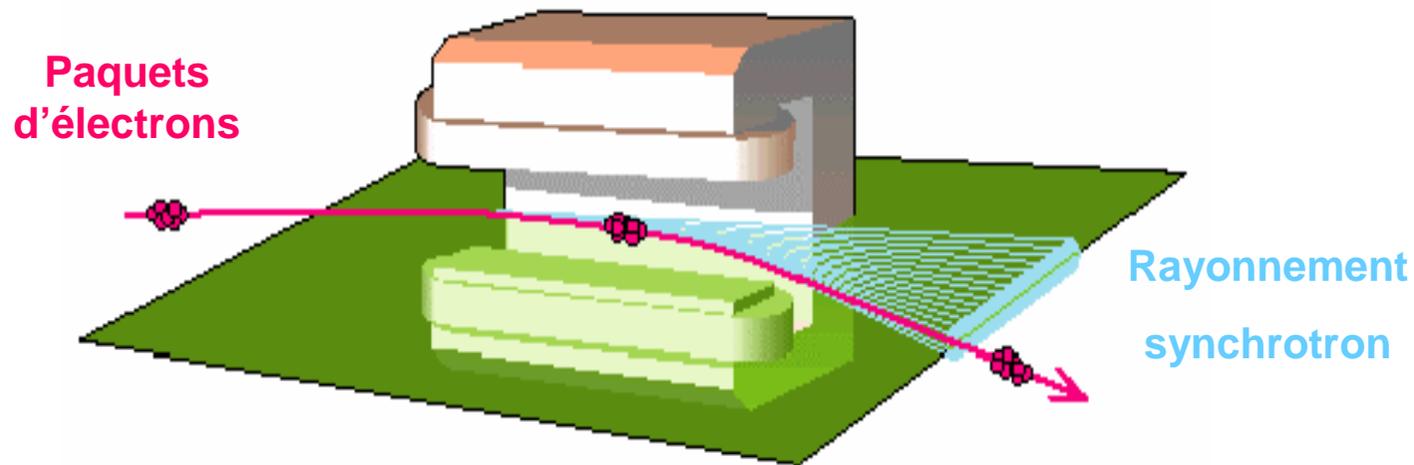
- **Le site**
- **Visite virtuelle**
- **Organisation**
- **Planning général - Jalons**
- **Budgets**
- **Retombées économiques**
- **Autres synchrotrons dans le monde**
- **État d'avancement du projet**
- **Adresses et information du public**

## Qu'est-ce ?

- Une **source de lumière extrêmement brillante**, de l'infrarouge aux rayons X, une **sorte de phare, de sonde**, à l'échelle atomique.
- Un outil de **recherche interdisciplinaire** aux multiples applications en **recherche appliquée et fondamentale** (physique, chimie, nouveaux matériaux, nanotechnologies, sciences de l'environnement, biologie, médecine).
- Mais aussi...un **nouvel outil pour les industriels**

## Comment ?

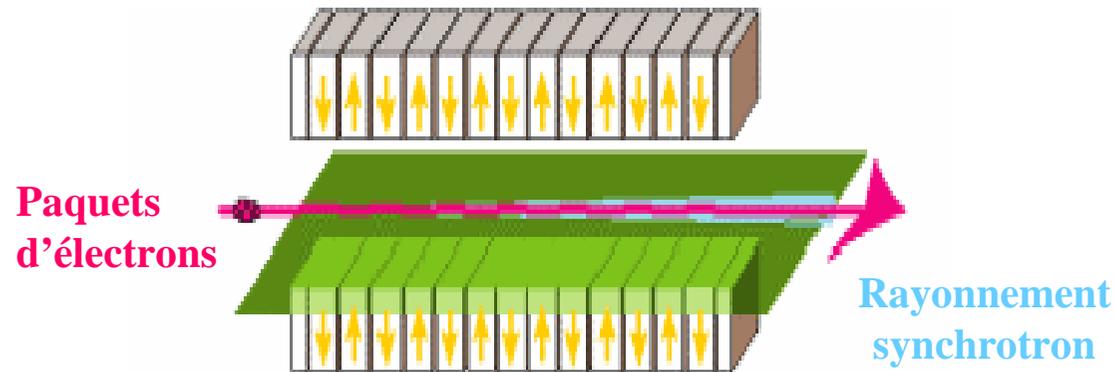
### Les aimants de courbure (dipôles)



Les **aimants de courbure** servent à boucler la trajectoire des électrons. Ils constituent également des sources de rayonnement synchrotron.

Le faisceau de lumière a une **brillance moyenne** et une **divergence assez grande**.

## Les onduleurs

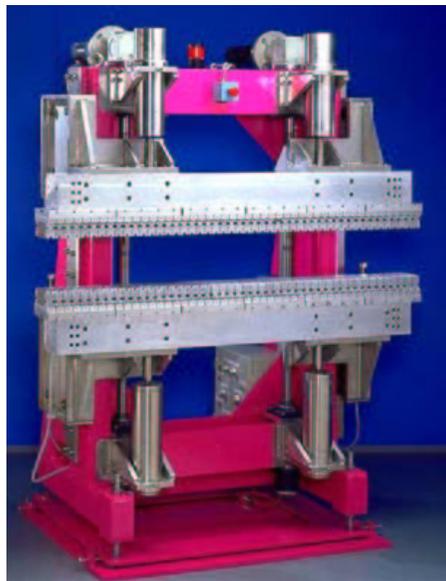


Les **onduleurs**, de conception plus récente, sont constitués d'une série de petits aimants juxtaposés qui impriment aux électrons un mouvement ondulé plus ou moins rapide.

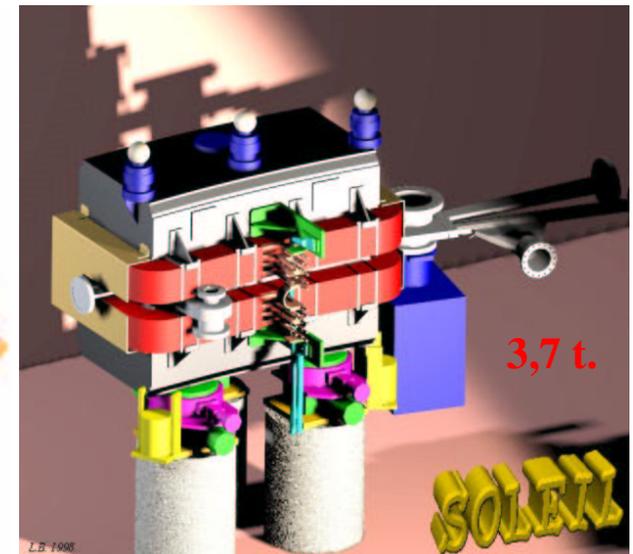
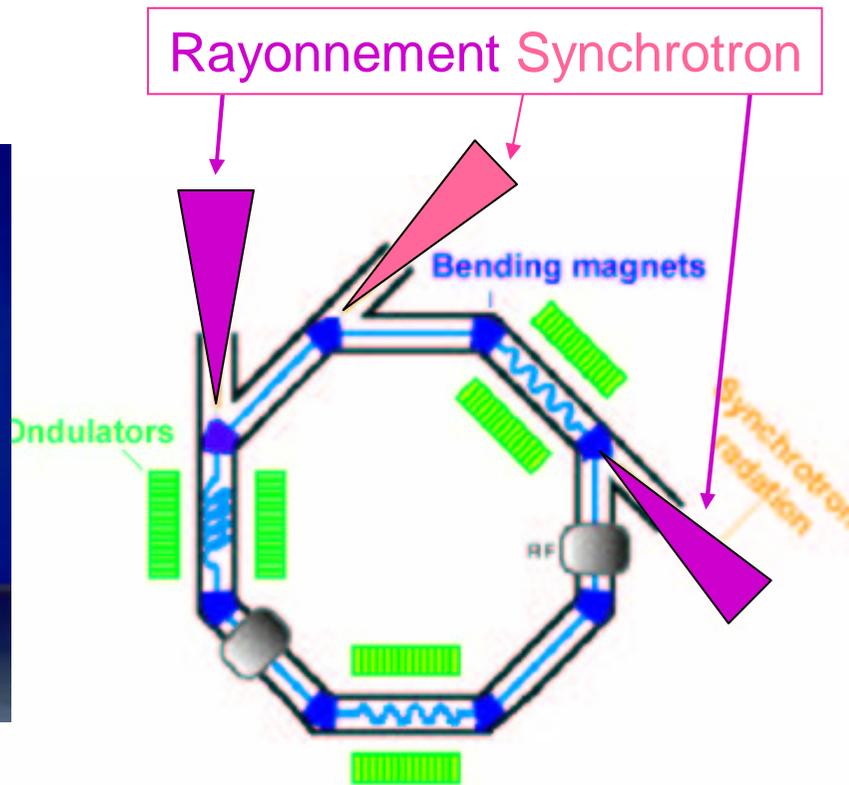
Le faisceau de lumière qui en résulte est **beaucoup plus fin et très brillant** (10 000 fois plus intense que la lumière solaire).

# Schéma de principe d'un « Anneau de stockage »

Toutes ces conditions sont réunies dans un **anneau de stockage** équipé de dispositifs magnétiques qui forcent les électrons, accélérés jusqu'à la **vitesse de la lumière**, à suivre des trajectoires courbes ou ondulées.

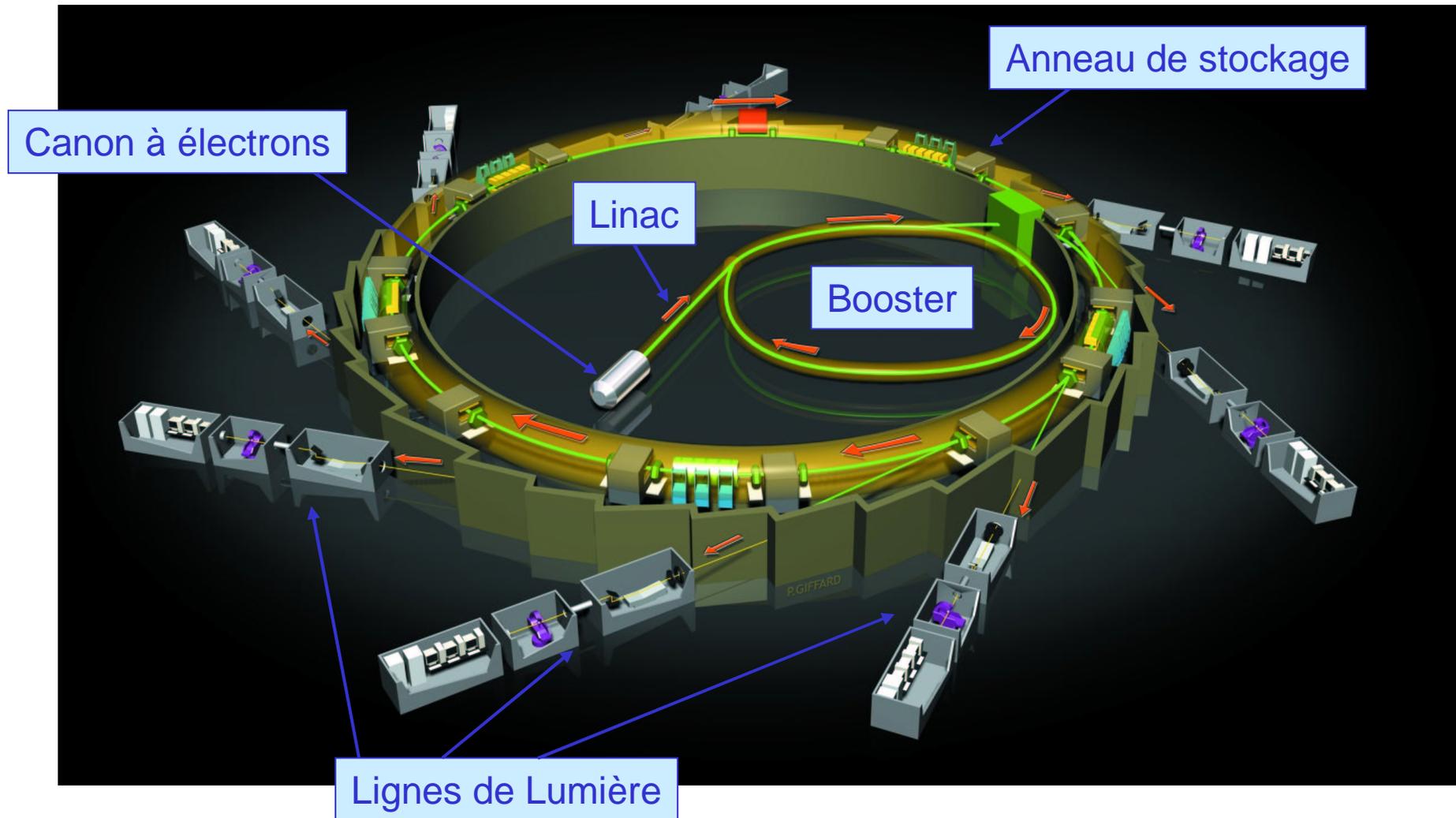


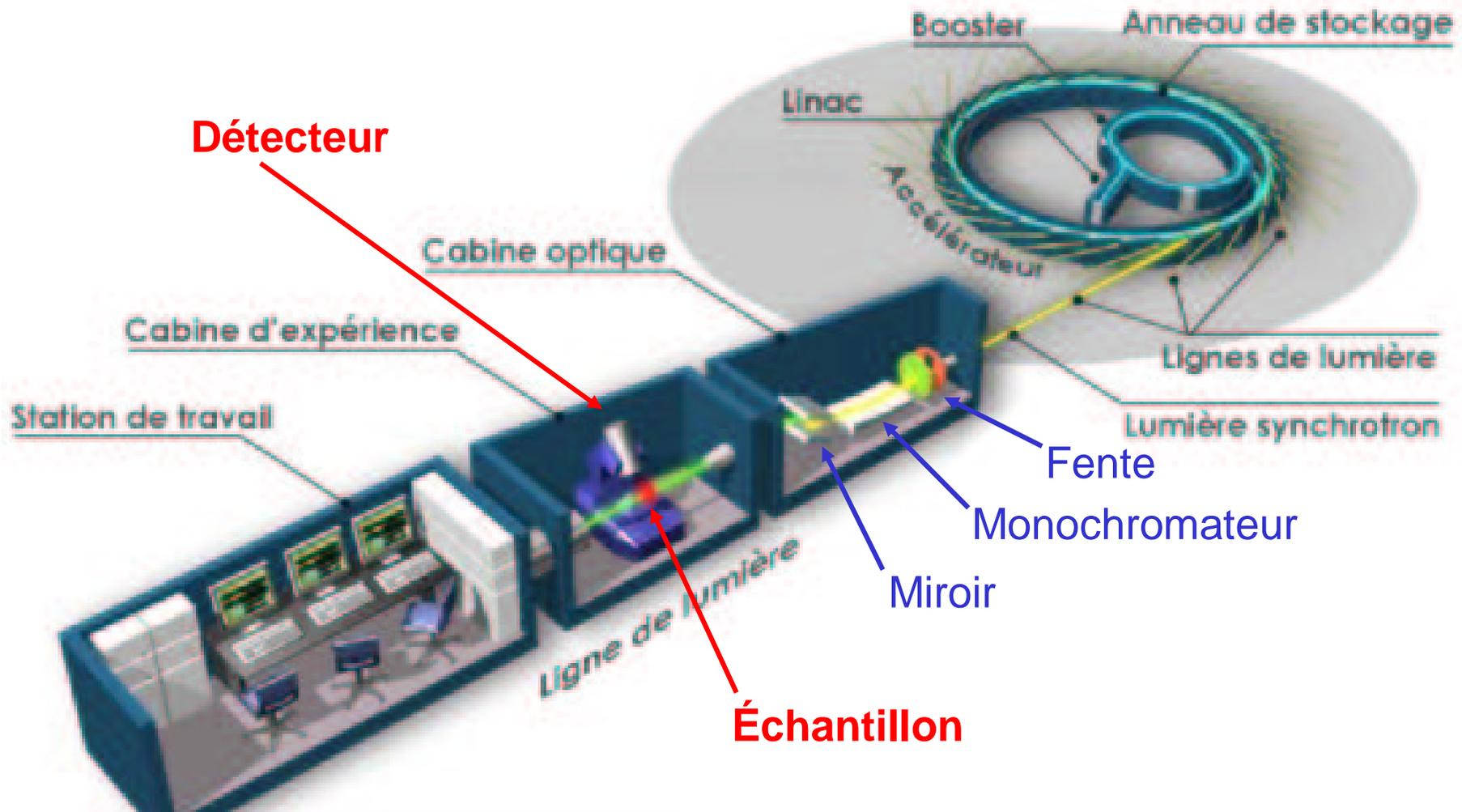
Onduleur



Aimant Dipôle

## Schéma de principe





Équipe de chercheurs pour la journée ou la semaine

**LURE - Orsay**



# Progression des sources de radiation en un siècle



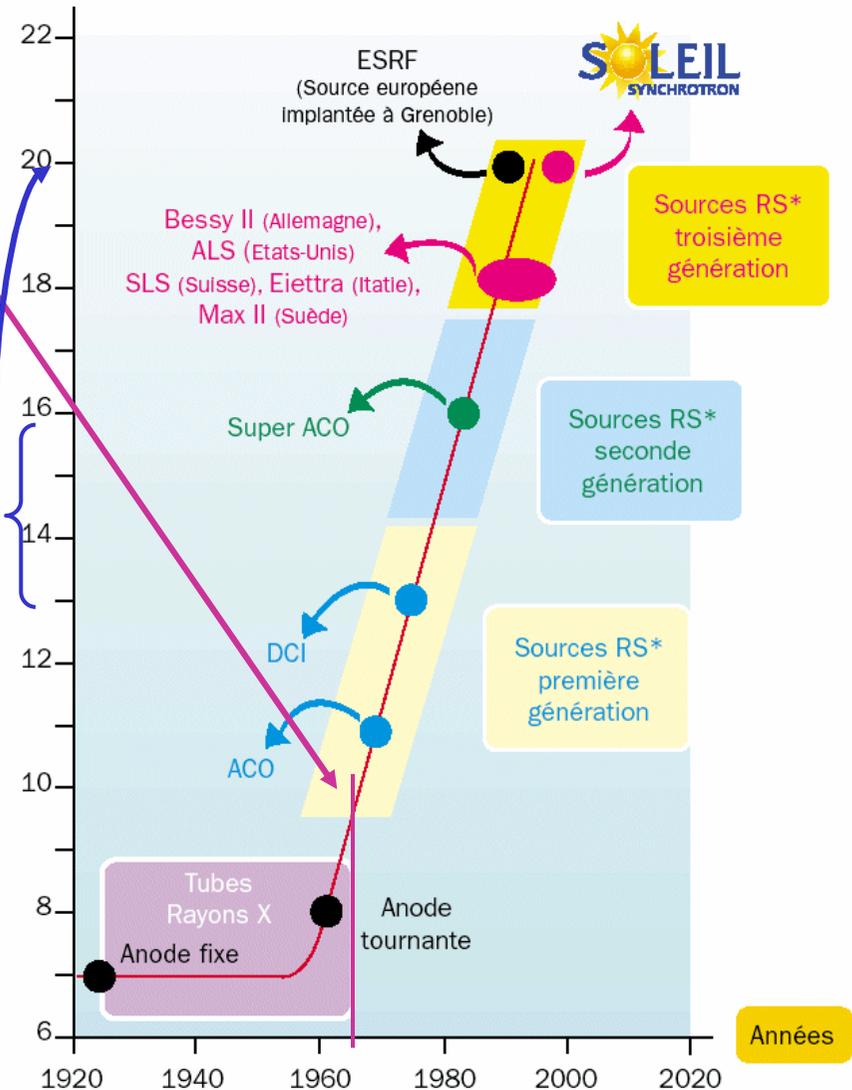
## Depuis Quand ?

Les installations de rayonnement Synchrotron ont démarré dans les années soixante. (1<sup>ère</sup> génération)

En terme de brillance, SOLEIL surpassera les installations nationales actuelles (SUPERACO et DCI) de **4 à 7** ordres de grandeur

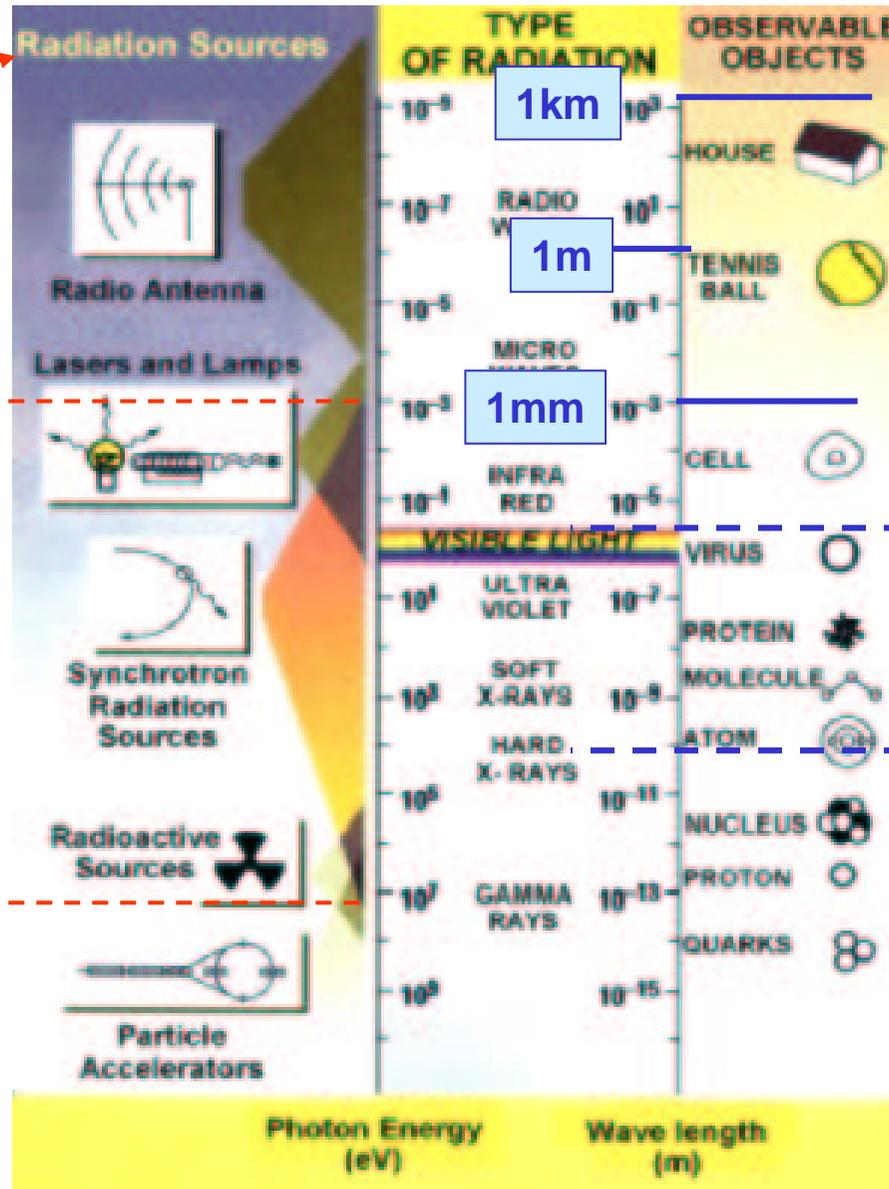
Brillance: (flux émis divisé par la surface et le cône d'émission de la source)

Brillance de la source (en logarithme)

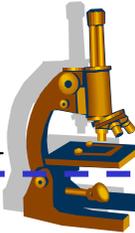
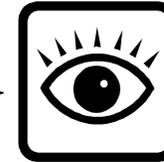


Outils disponibles

Gamme spectrale du Rayonnement Synchrotron



Taille Objets observés

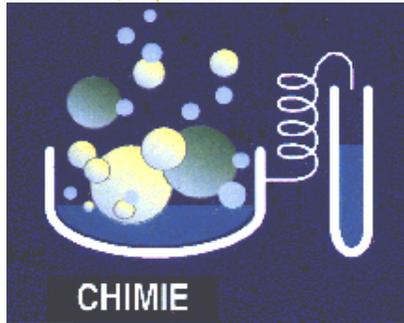


Gamme spectrale de SOLEIL

IR  
X durs

Gamme ESRF

# Les principaux domaines d'application

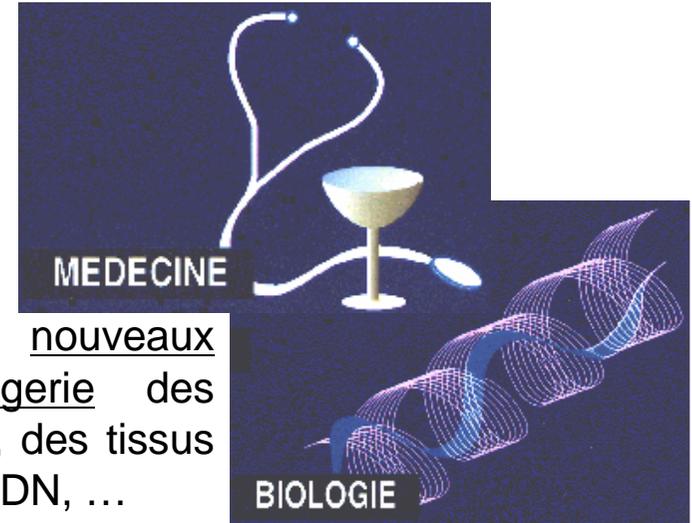


CHIMIE

Détection de substances polluantes dans l'environnement, optimisation des pots catalytiques, élaboration de nouveaux matériaux



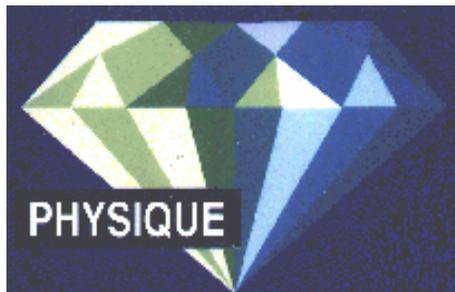
SCIENCE DE L'ENVIRONNEMENT



MEDECINE

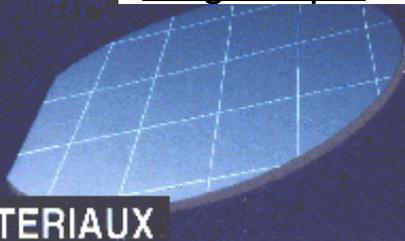
BIOLOGIE

Recherche de nouveaux médicaments, imagerie des vaisseaux sanguins, des tissus osseux, étude de l'ADN, ...

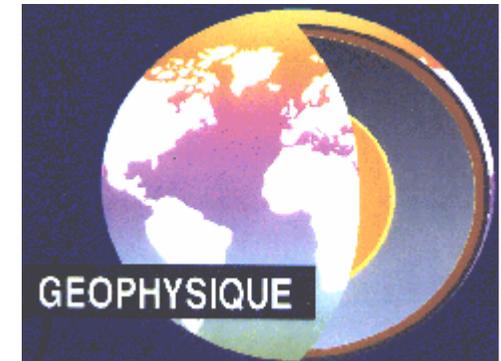


PHYSIQUE

Exploration de la matière et meilleure connaissance de sa structure et de ses propriétés électroniques et magnétiques: nouvelle électronique, stockage magnétique haute densité



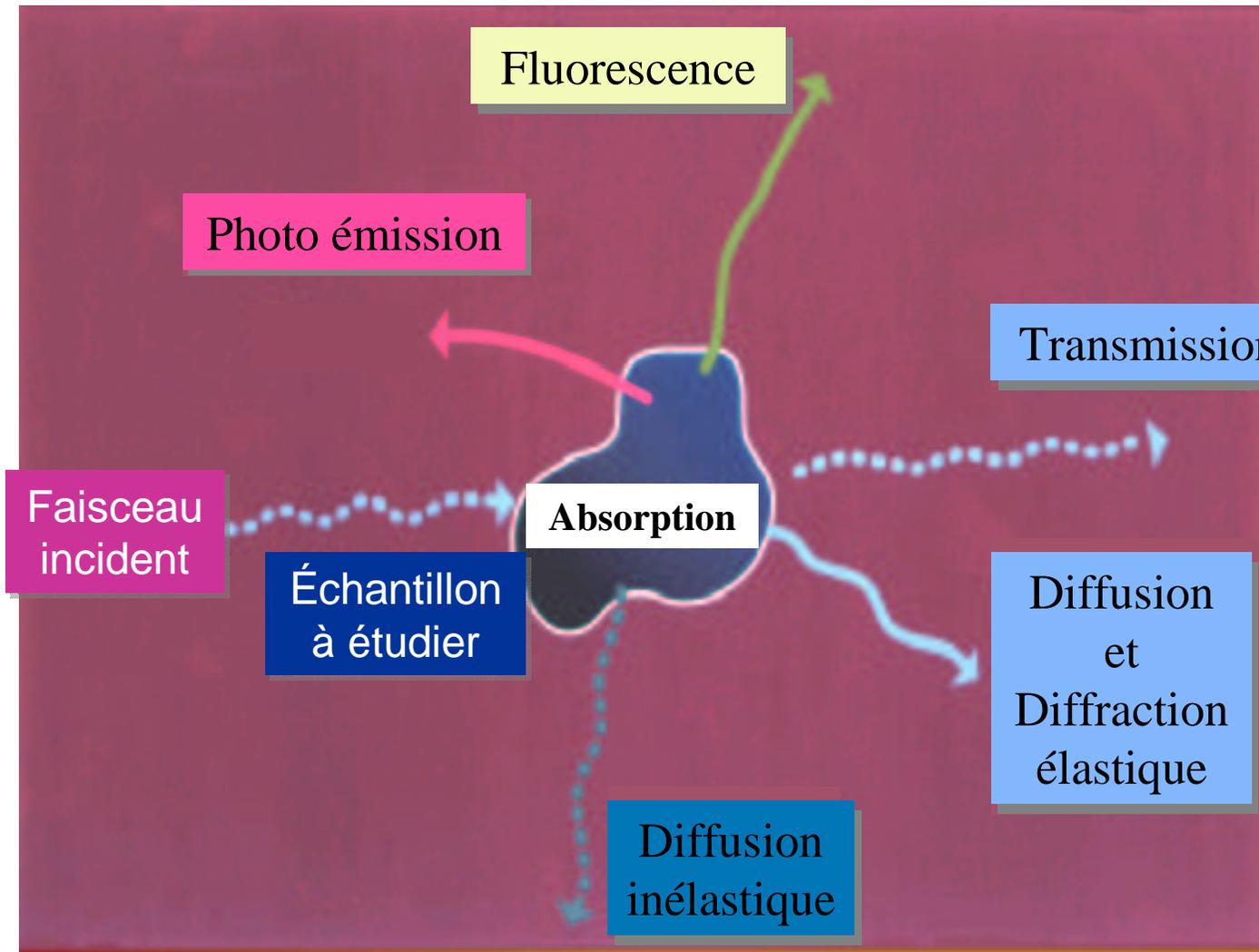
SCIENCE DES MATERIAUX



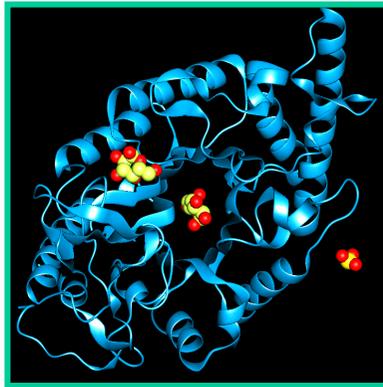
GÉOPHYSIQUE

Connaissance de la structure des matériaux du manteau terrestre

Dans tous les domaines, un large accueil est prévu pour **les industriels**



## La structure 3D d'une protéine

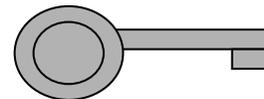
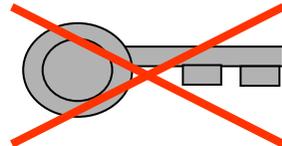


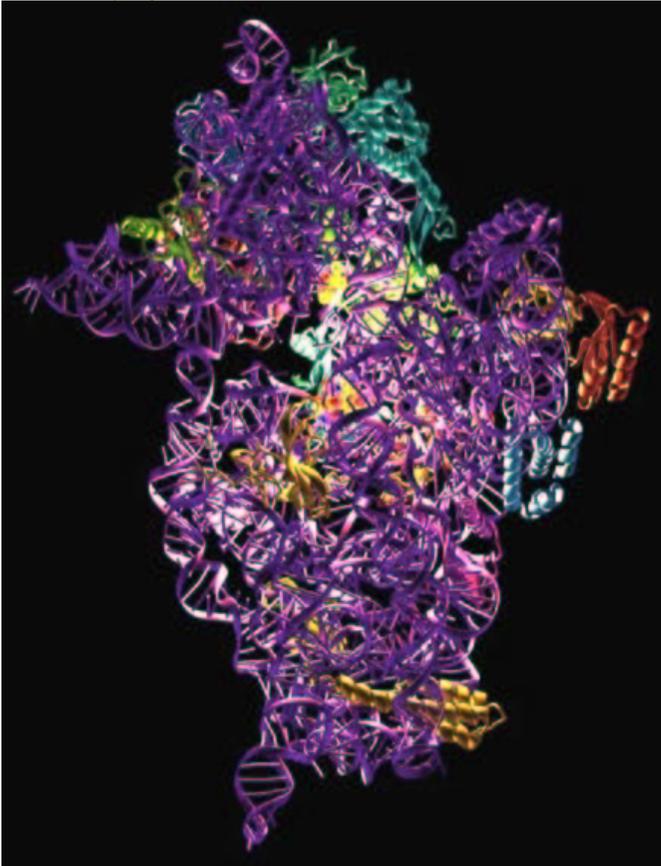
**Sa fonction** dans l'organisme:

- transport (O<sub>2</sub>)
- messenger chimique (hormones)
- composants parois cellulaires...



Possède une **“serrure interne”** (site actif)  
qui est activée avec une clé spécifique.





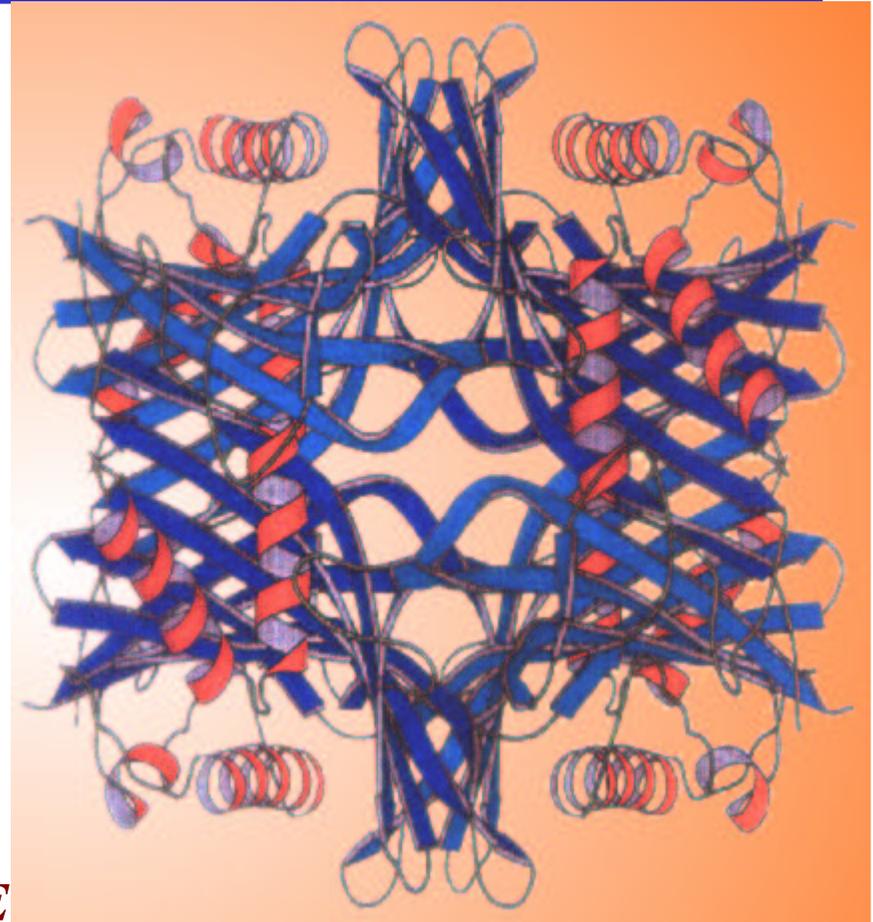
- **Le Ribosome** est la « machine » à fabriquer les **protéines** à partir de **l'information génétique**. Ce complexe macromoléculaire, situé au cœur de la cellule, est constitué d'ADN et de nombreuses protéines.
- Tous les regards se portent sur sa **structure**, car c'est une des **clés** permettant d'accéder à la compréhension de la vie.

• Plusieurs équipes utilisent le **rayonnement synchrotron** pour étudier **l'action d'antibiotiques sur la production des protéines par le ribosome d'une bactérie**.

Établir la structure tridimensionnelle d'une **protéine** à l'échelle atomique par **cristallographie**.

**Modéliser** des molécules capables d'inhiber ou stimuler les fonctions biologiques.

**Synthétiser** ces molécules.



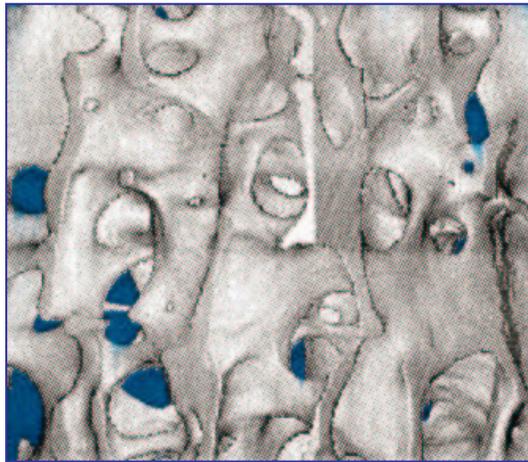
*LMCP & SANOFI à LURE*

La figure ci-contre représente l'unité fonctionnelle de « **l'urate oxydase** », **protéine** utilisée comme **médicament** pour dégrader l'acide urique qui s'accumule dans l'organisme durant une **chimiothérapie**.

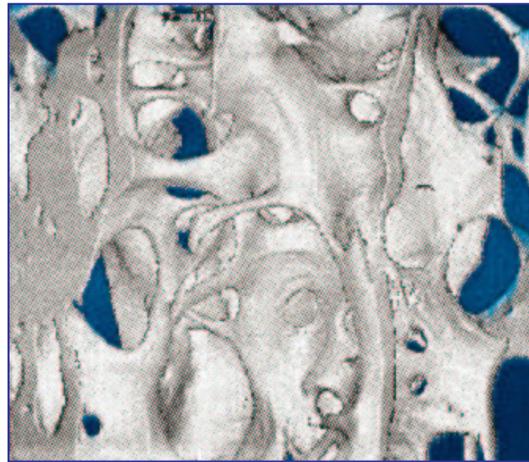
## Micro-tomographie des os = aide au diagnostic

(ESRF, ligne médicale)

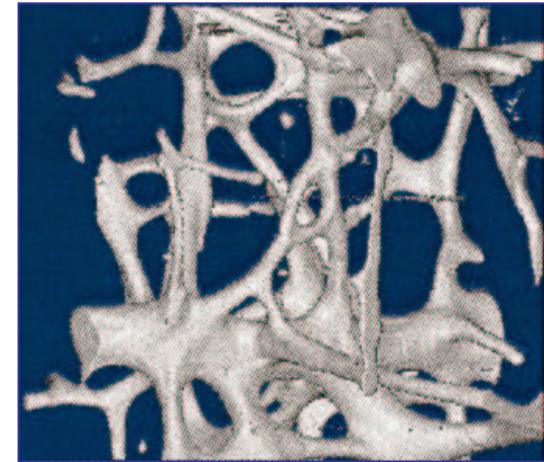
1mm  
↔



33 ANS



55 ANS



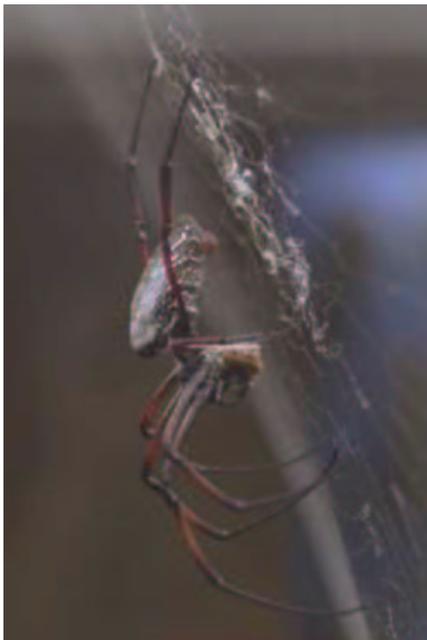
72 ANS

Evolution dégénérative d'une patiente atteinte  
d'**ostéoporose**

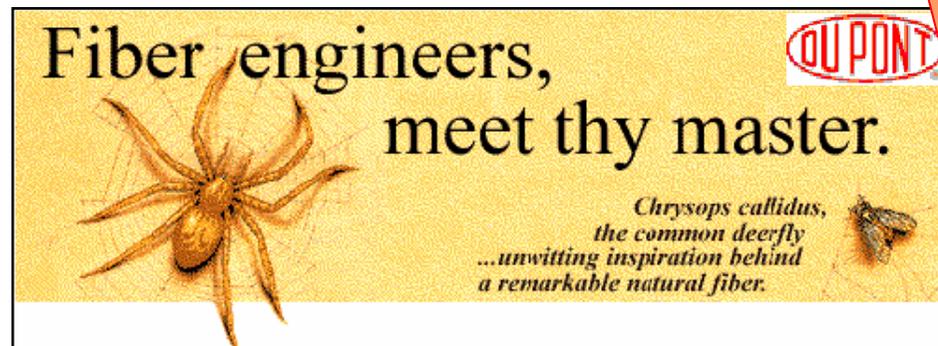
Peut-on imaginer de créer un polymère qui aurait **la résistance d'un fil d'acier** et qui serait en même temps **2 fois plus élastique que le nylon**? ... **il existe dans la nature** ...

→ **l'araignée en produit tous les jours pour sa toile!**

A l'ESRF, des chercheurs étudient le fil au cours de sa fabrication par l'araignée. Ils essaient de comprendre comment les molécules s'organisent les unes par rapport aux autres pour donner des propriétés mécaniques aussi extraordinaires.



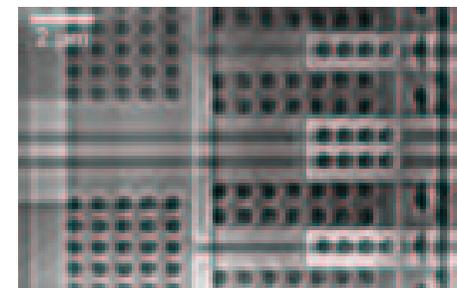
Les applications d'un tel **polymère artificiel** seraient innombrables: médecine, bâtiment, habillement, sport, industrie automobile, etc.



Les **composants microélectroniques** jouent un rôle crucial dans de nombreuses industries. Parce que des phénomènes physiques à l'œuvre dans ces composants ne sont pas encore parfaitement compris et maîtrisés, il est **parfois difficile de connaître la cause de certains dysfonctionnement.**

L'observation à l'échelle microscopique des composants microélectroniques est donc un enjeu de taille pour l'industrie.

Le pouvoir de pénétration des rayons X produits par le **Rayonnement Synchrotron** permet une observation **non destructrice** des microcircuits électroniques et leur brillance fournit des images avec une extrême « **haute résolution** ».



~1 nm = 1/1000 μm

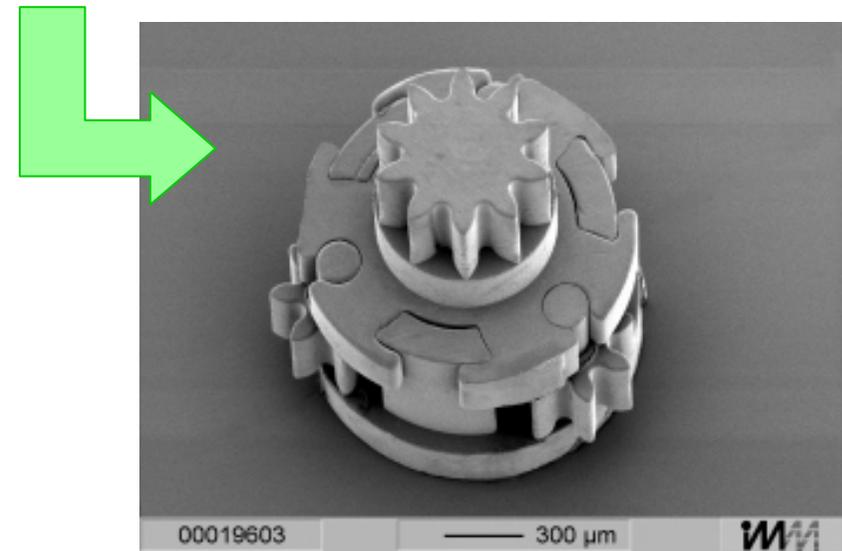
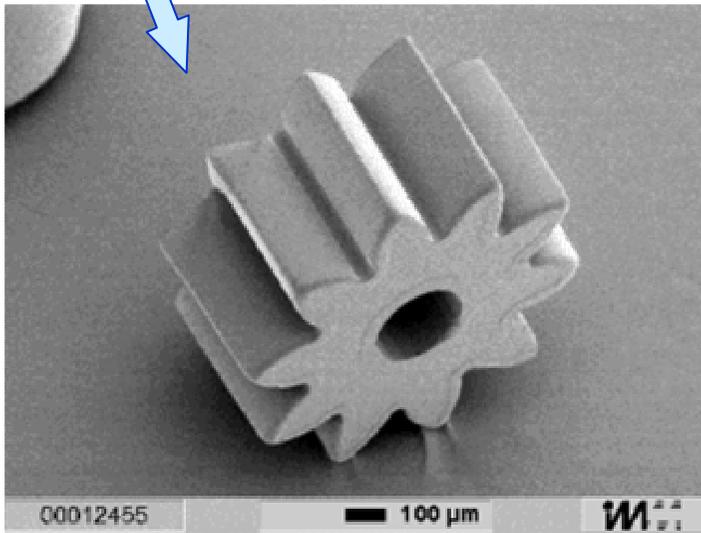
**Procédé LIGA:** Irradiation en profondeur de résines photosensibles sous Rayons X durs

Réplique d'un masque par ombre portée

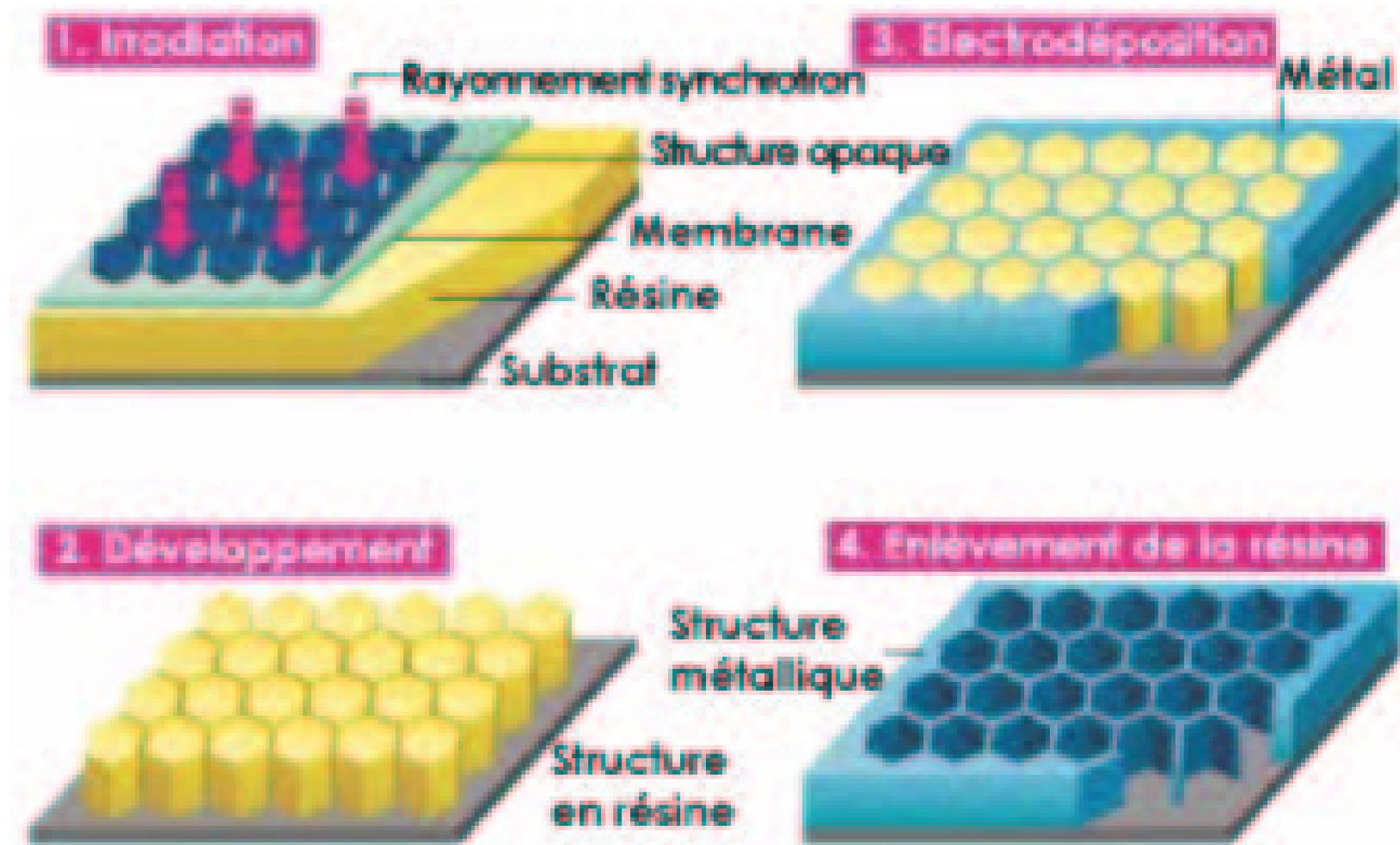
Rayon<sup>t</sup> Synchrotron = faisceaux //  $\perp$  Profils très haute qualité

Dents d'1 micro engrenage (~25  $\mu\text{m}$ ) obtenues par procédé LIGA

Assemblage en micro moteurs utilisables en médecine



## En quoi consiste le procédé « LIGA » ?



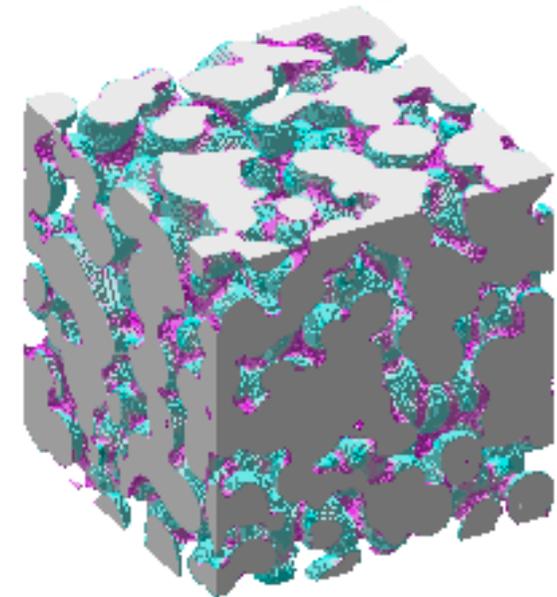


De plus en plus **d'accidents mortels** sont à déplorer **suite aux avalanches** aux abords des stations de sport d'hiver.

Afin de mieux maîtriser les phénomènes avalancheux, les **météorologistes étudient la structure microscopique de la neige.**

Des recherches par **micro tomographie** ont permis d'obtenir des images en 3 dimensions de grains de neige fournissant des Informations essentielles sur la stabilité du manteau neigeux.

Ces nouvelles données seront intégrées dans les **programmes de simulation** qui évaluent les **risques d'avalanche.**



## Notre planète, cette inconnue

**Les tremblements de terre, les volcans** ou la tectonique des plaques sont les **manifestations à la surface** de notre planète de **mouvements** de très grande ampleur **prenant naissance à des milliers de kilomètres sous nos pieds.**

Afin de mieux comprendre ces phénomènes, les **géophysiciens s'intéressent à la composition et à la structure des matériaux** présents dans la croûte terrestre, ainsi que dans le manteau et le noyau.



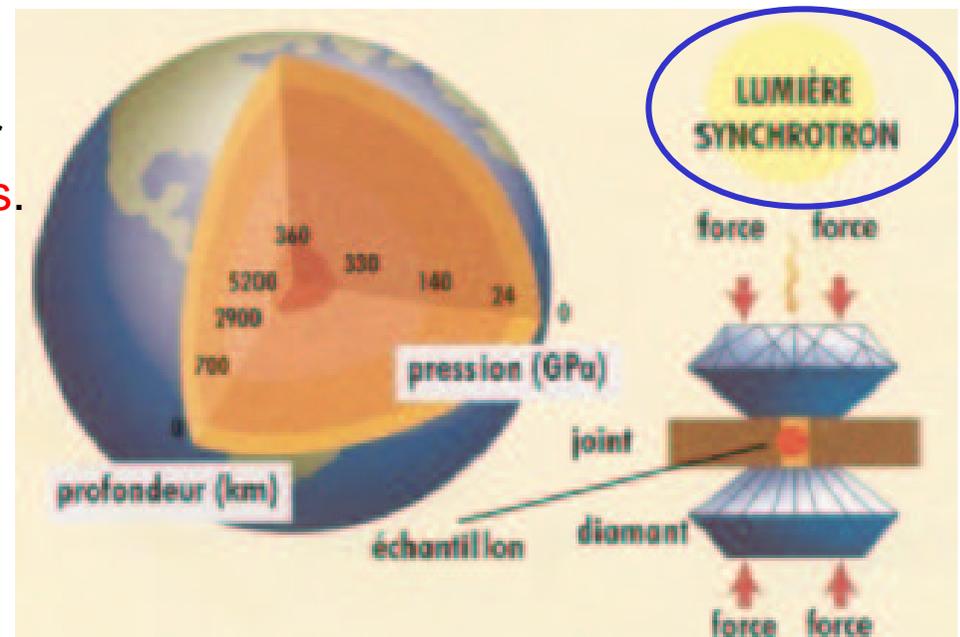
Ces matériaux sont **exposés à des conditions extrêmes de température et de pression.**

Les connaissances acquises au cours de ces recherches pourraient également aider à répondre à la question suivante: **“Y a - t’il une vie ailleurs dans l’univers ?”**

Comme **il n'est pas question d'aller au centre de la Terre**, les scientifiques doivent tenter de **reconstituer en laboratoire les conditions extrêmes de température et de pression** qui y règnent.

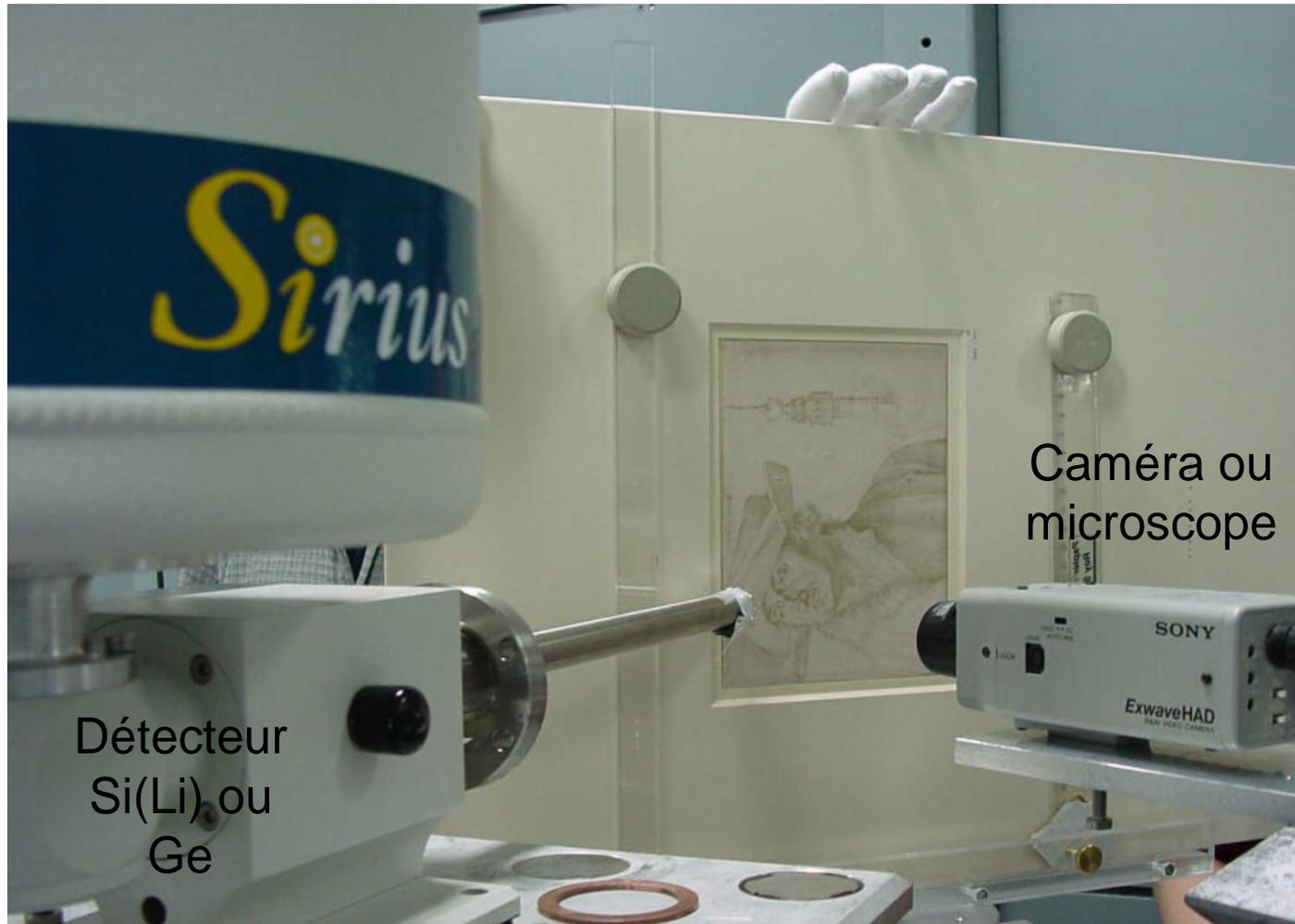
Une cellule faite avec 2 pointes de diamant enserme un échantillon de matière microscopique ( $\sim 100 \mu\text{m}^3$ ), permet de porter cette cellule à une pression de  $\sim 1000$  tonnes. Simultanément, un faisceau laser peut faire croître la température jusqu'à **plusieurs milliers de degrés**.

Pour extraire l'information de ce micro-échantillon, les scientifiques utilisent des Rayons X extrêmement brillants, comme le **Rayonnement synchrotron**.

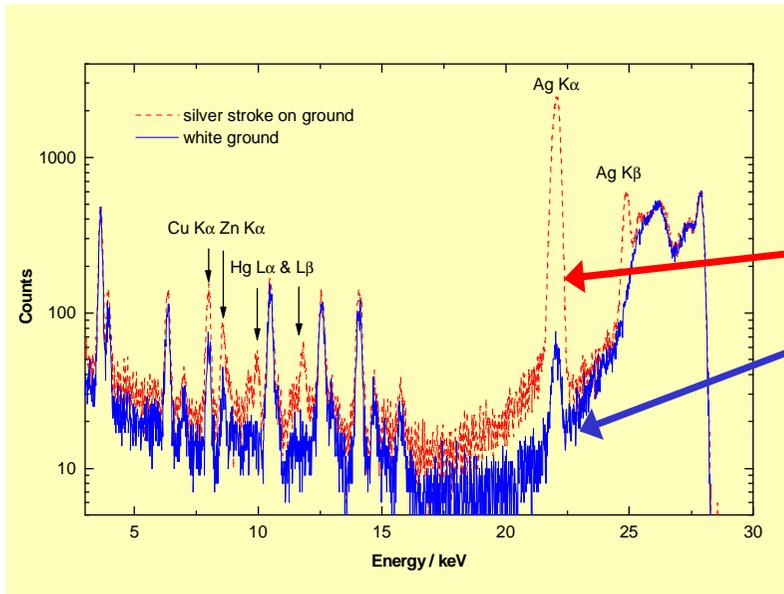


Les données obtenues aident les chercheurs à **mieux connaître la Terre**, mais aussi les autres planètes.

## Montage expérimental



## Analyse des originaux



I. Reiche et al. CRRMF



*Une jeune et une vieille femme de Bergen-op-Zoom, Chantilly.*

**Le tracé des dessins du carnet de voyage d'Albrecht Dürer**



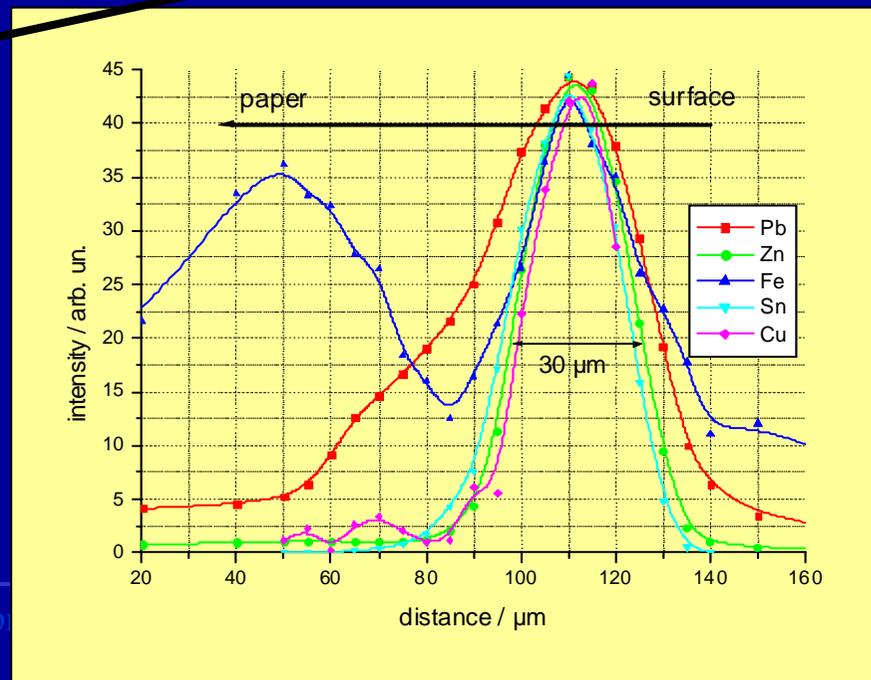
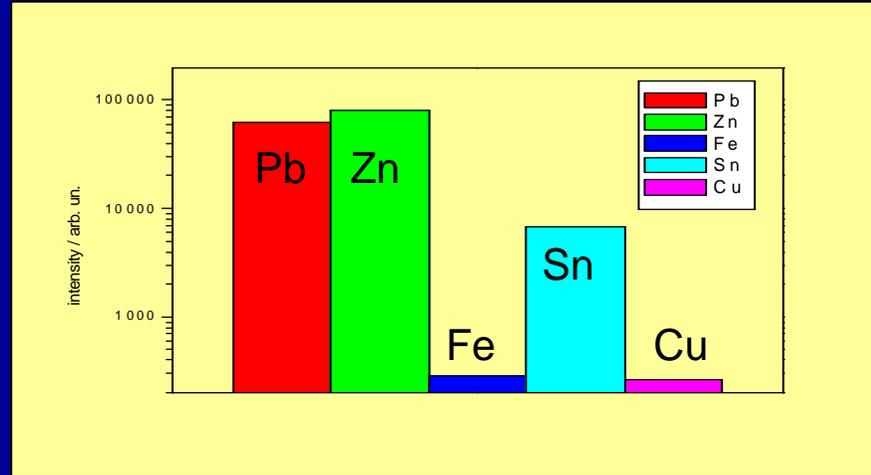
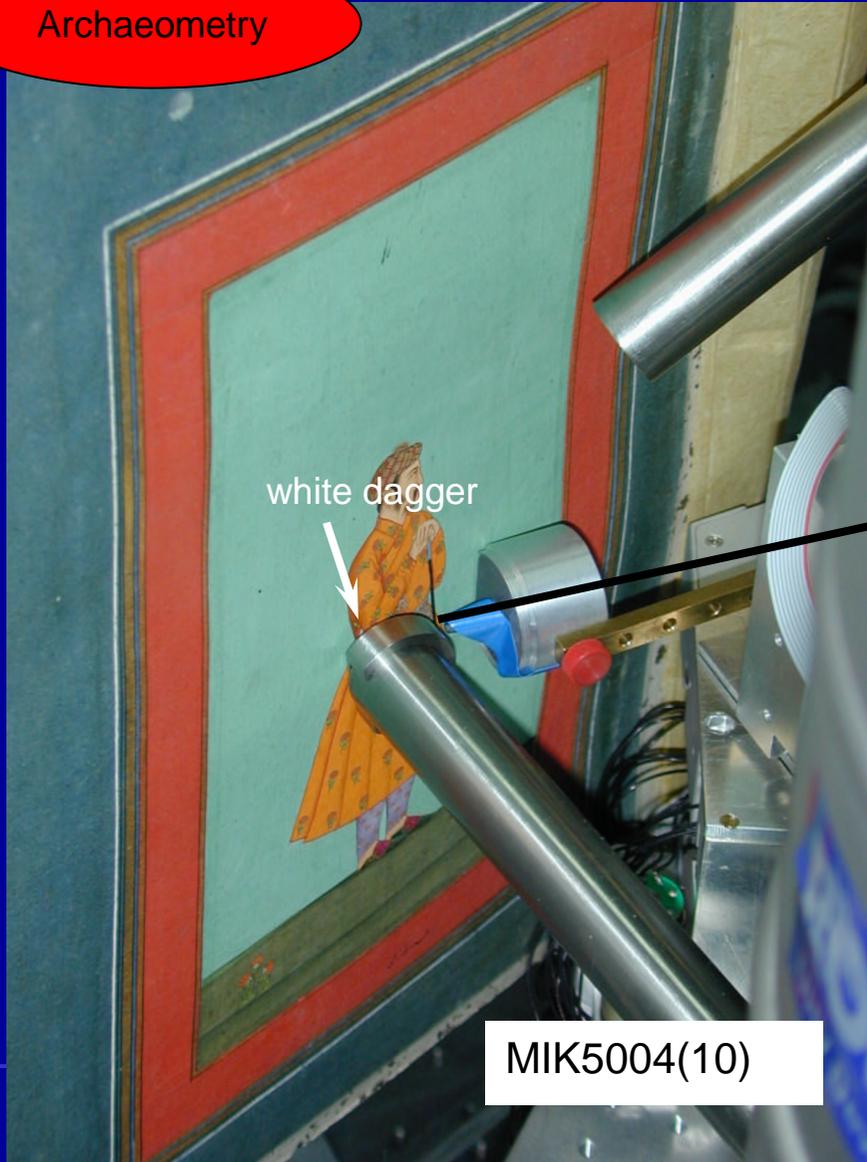
*Evêque trônant et homme au bonnet de fourrure Berlin.*

**Une exception:  
la partie du dessin  
“homme au bonnet de fourrure” :  
13.0 % Cu, 5.3 % Zn et 81.7 % Ag**



**Composition de la pointe utilisée : argent + cuivre  
Présence de mercure : phénomène d'altération**

Archaeometry





Source  
Optimisée  
de Lumière  
d'Énergie  
Intermédiaire  
de LURE (1)

(1) Laboratoire d'Utilisation du Rayonnement Electromagnétique

---

Localisé dans le département de l'**Essonne**,  
sur le « **plateau de Saclay** », commune de **Saint Aubin**,  
de part et d'autre de la route départementale 128

**Saint Aubin**

Saclay

La Mare  
du Vivier  
12 ha

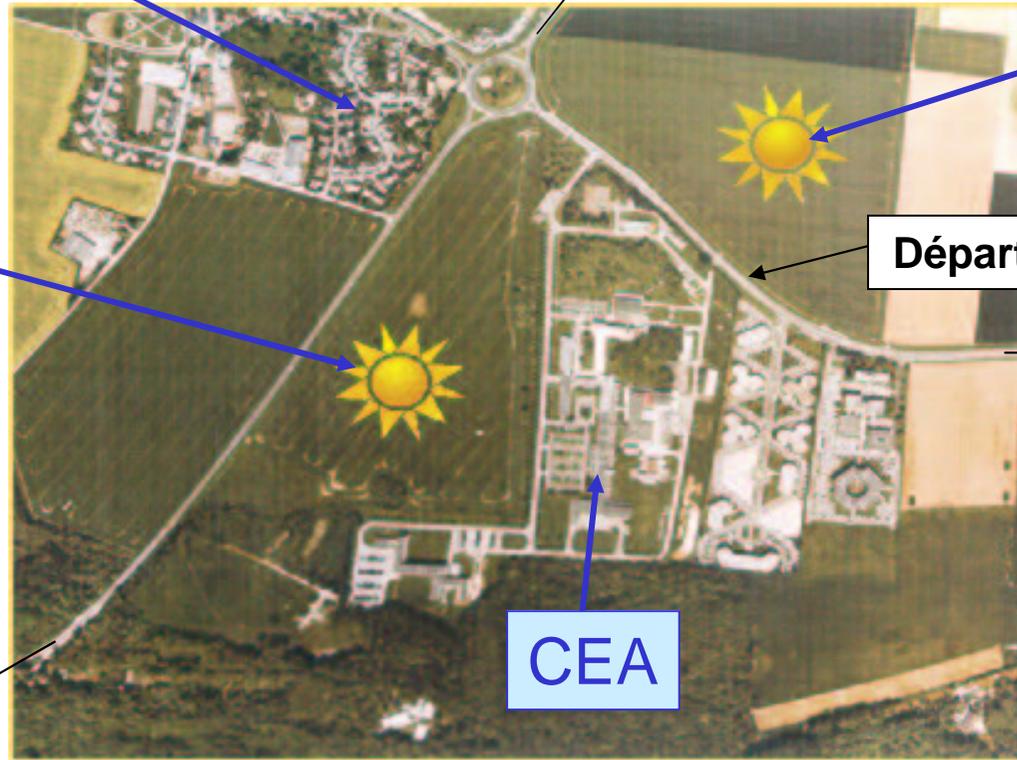
L'Orme  
des Merisiers  
17 ha

Départementale 128

Supelec

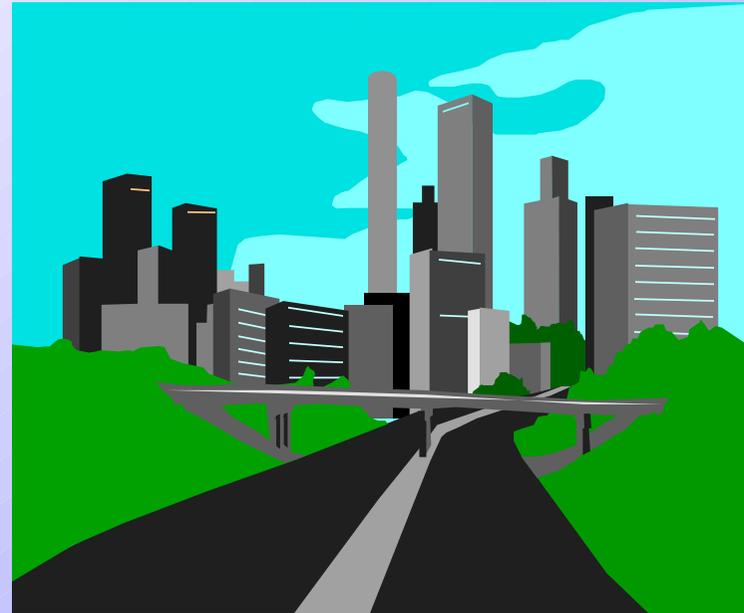
CEA

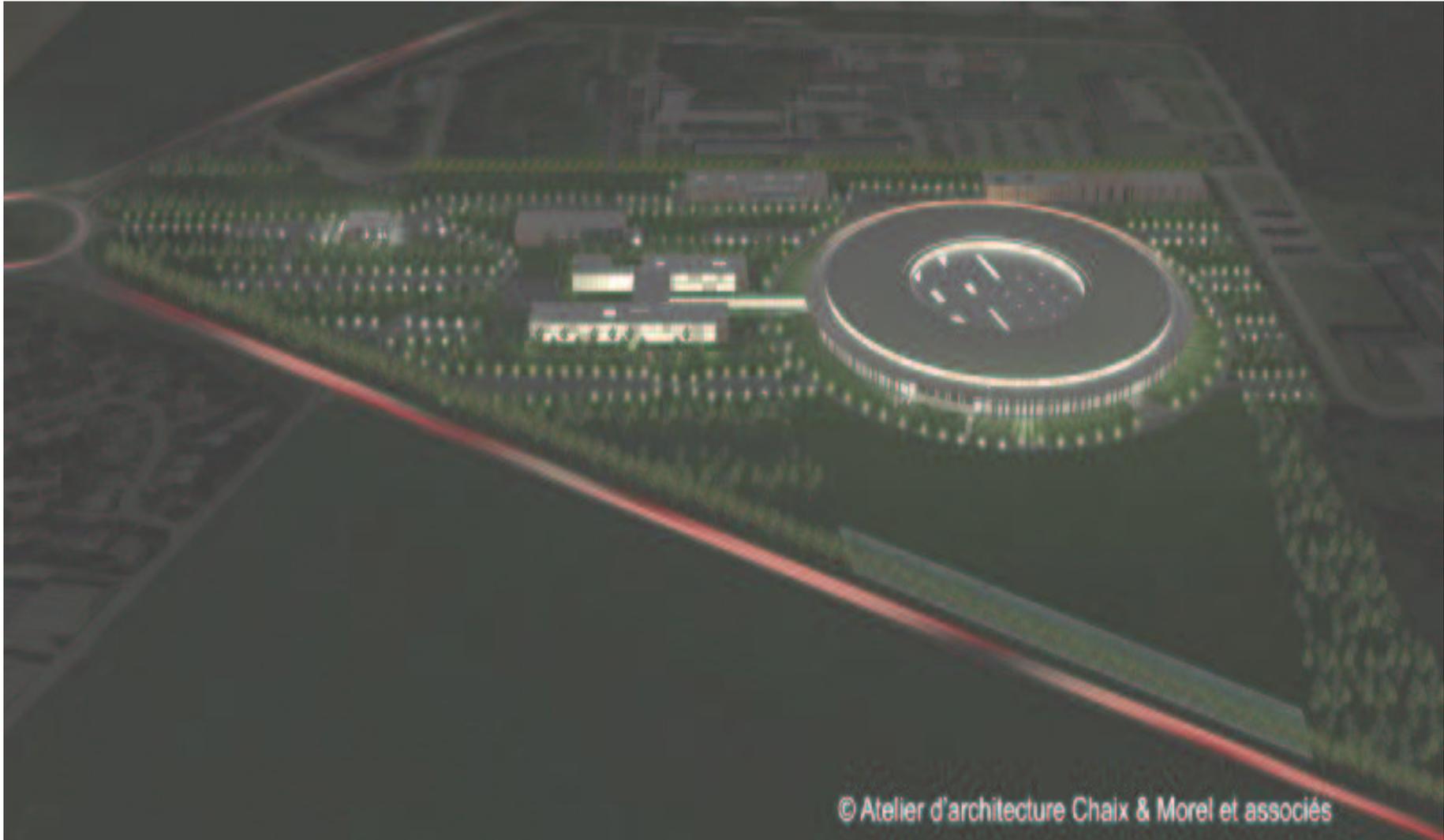
Gif sur Yvette





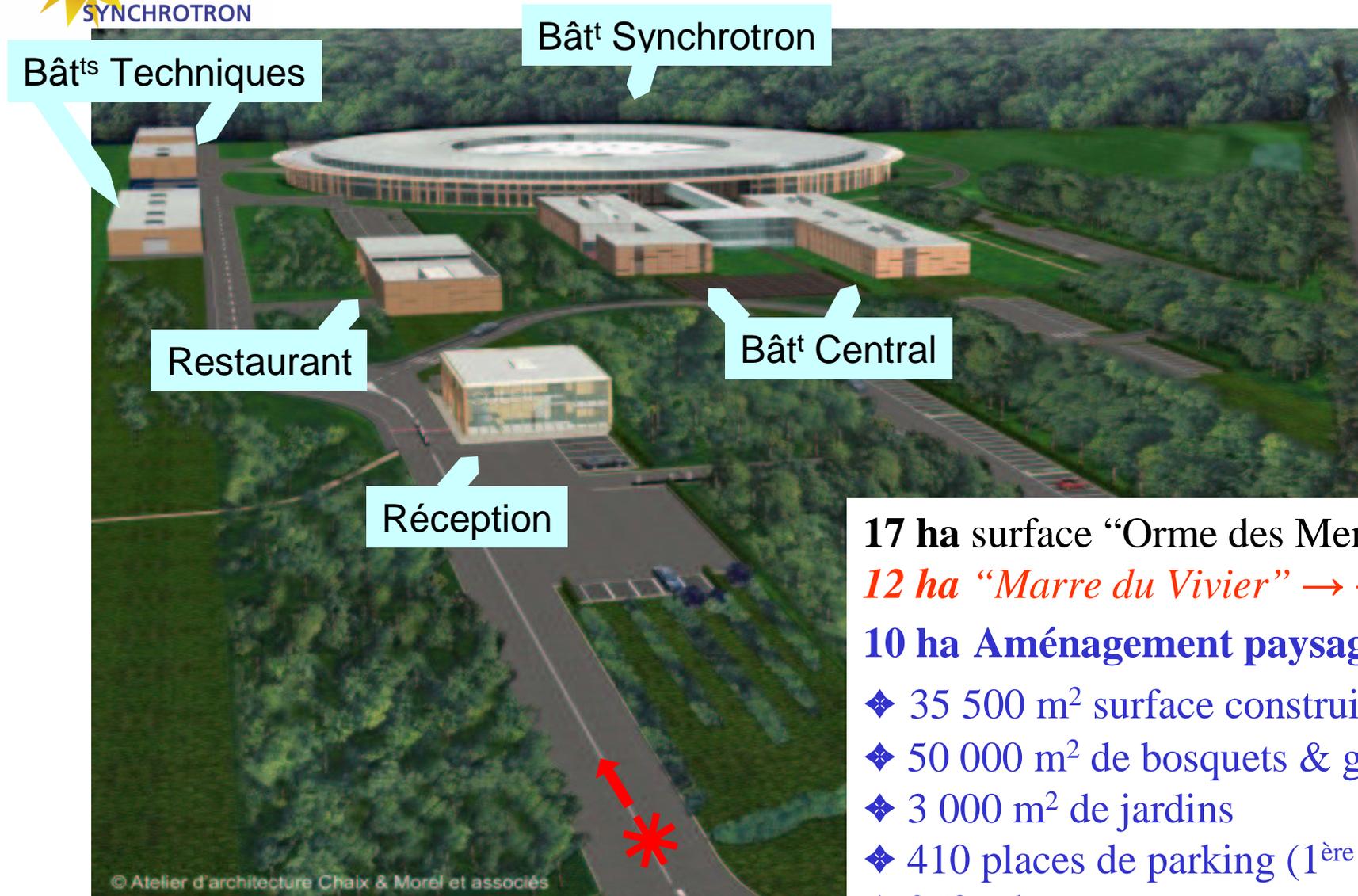
# *“VISITE GUIDEE”*





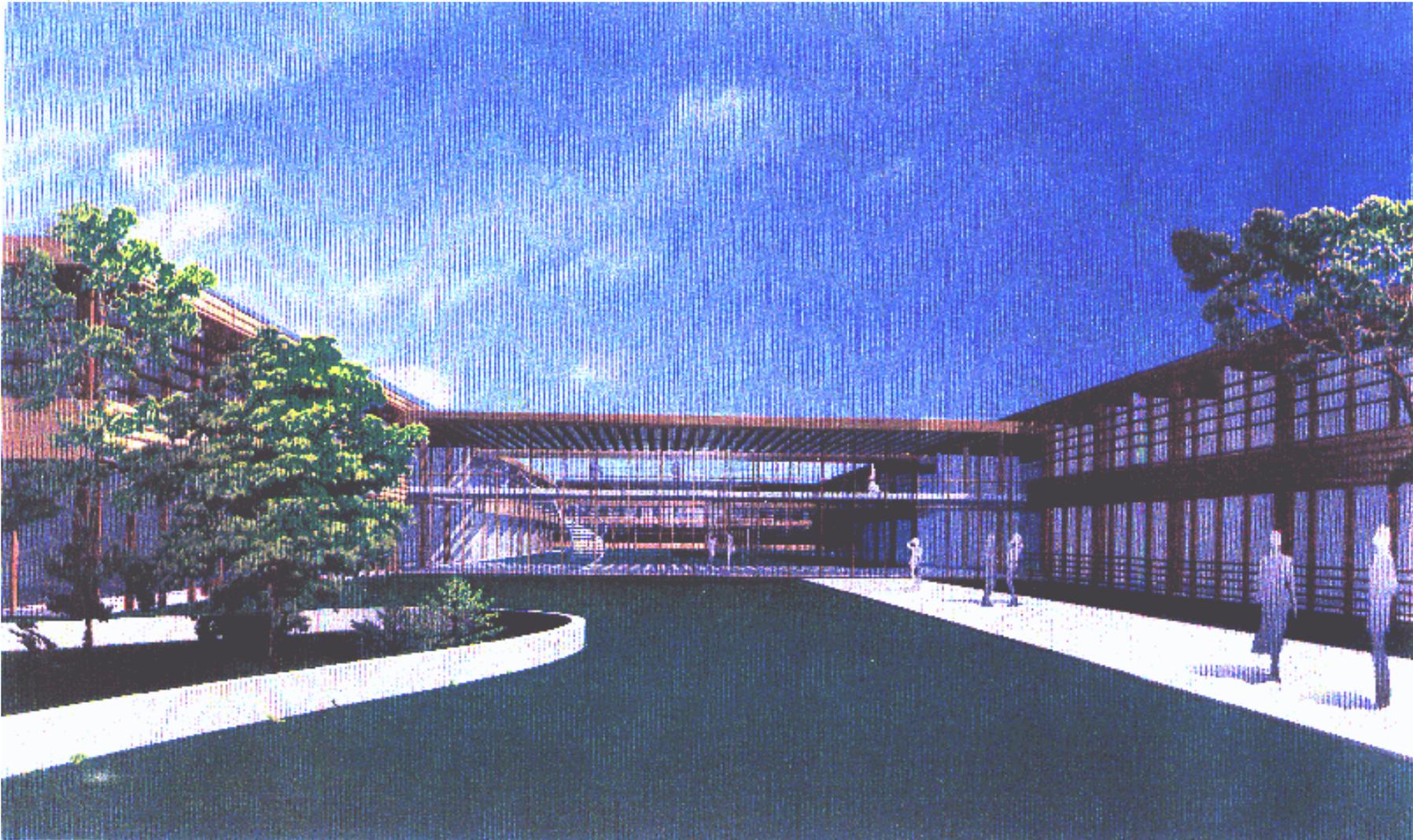


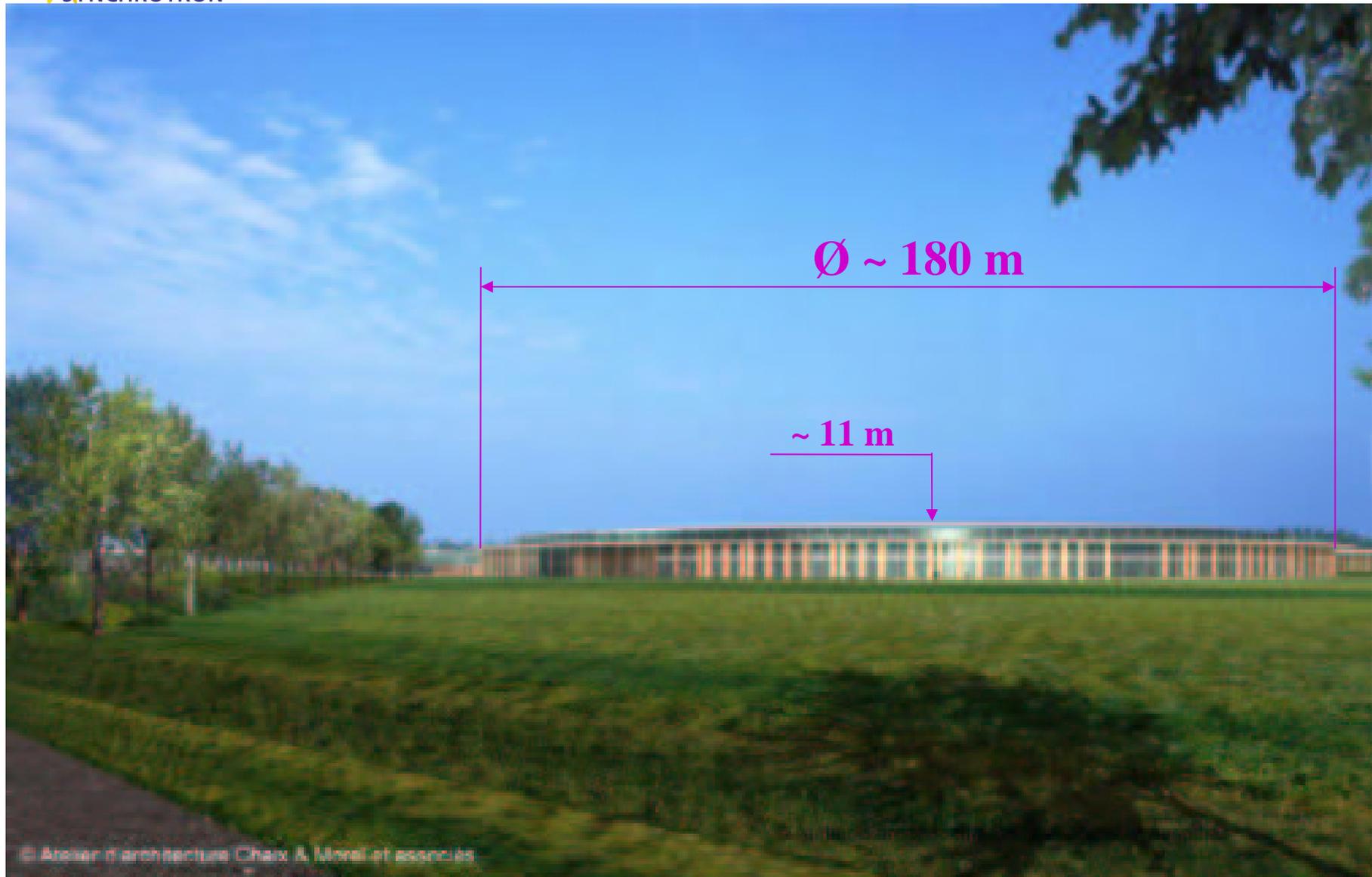
# Aménagement site de l'Orme

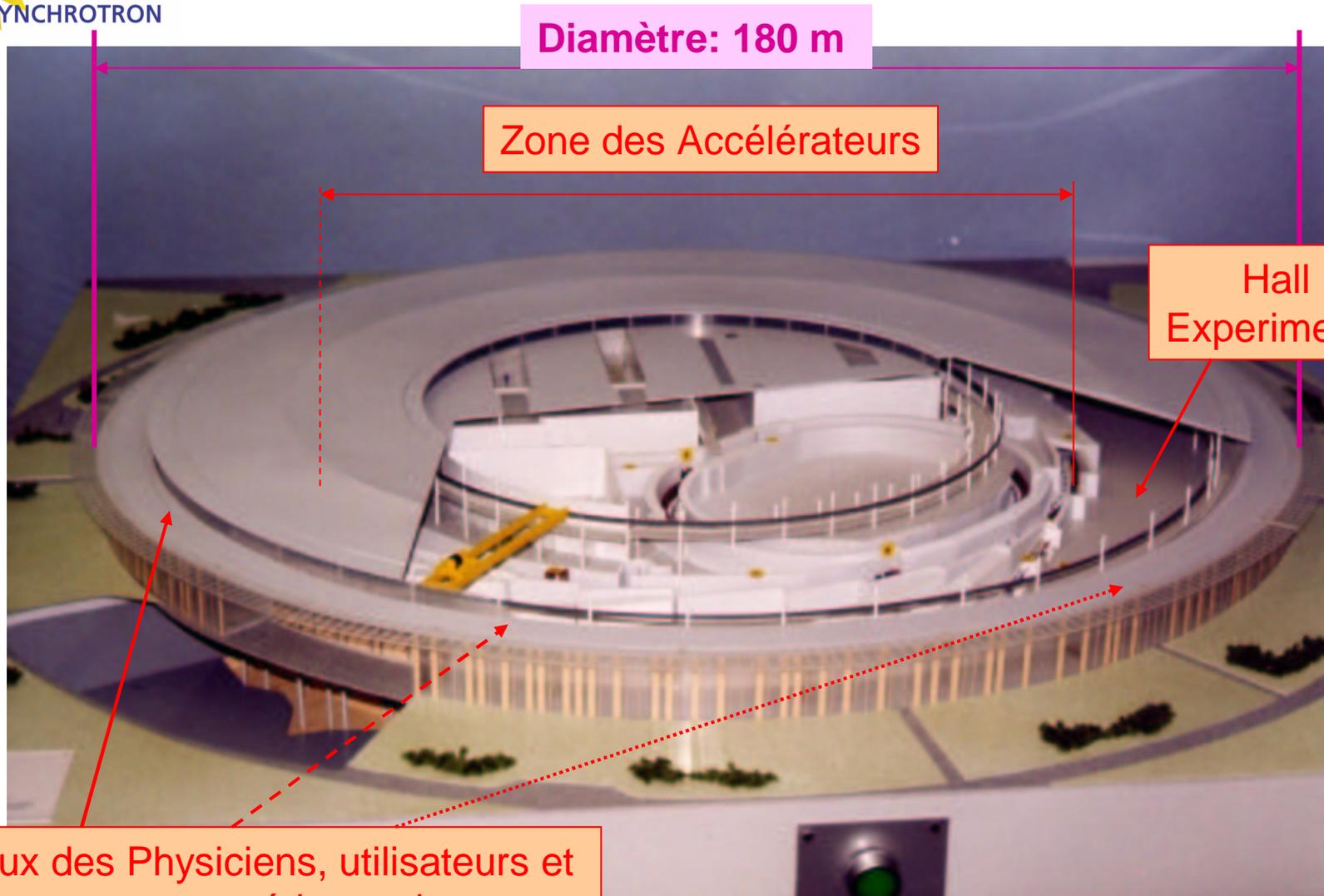


- 17 ha** surface "Orme des Merisiers"  
**12 ha** "*Marre du Vivier*" → + **tard**  
**10 ha Aménagement paysagé:**
- ❖ 35 500 m<sup>2</sup> surface construite
  - ❖ 50 000 m<sup>2</sup> de bosquets & gazon
  - ❖ 3 000 m<sup>2</sup> de jardins
  - ❖ 410 places de parking (1<sup>ère</sup> phase)
  - ❖ 260 arbres







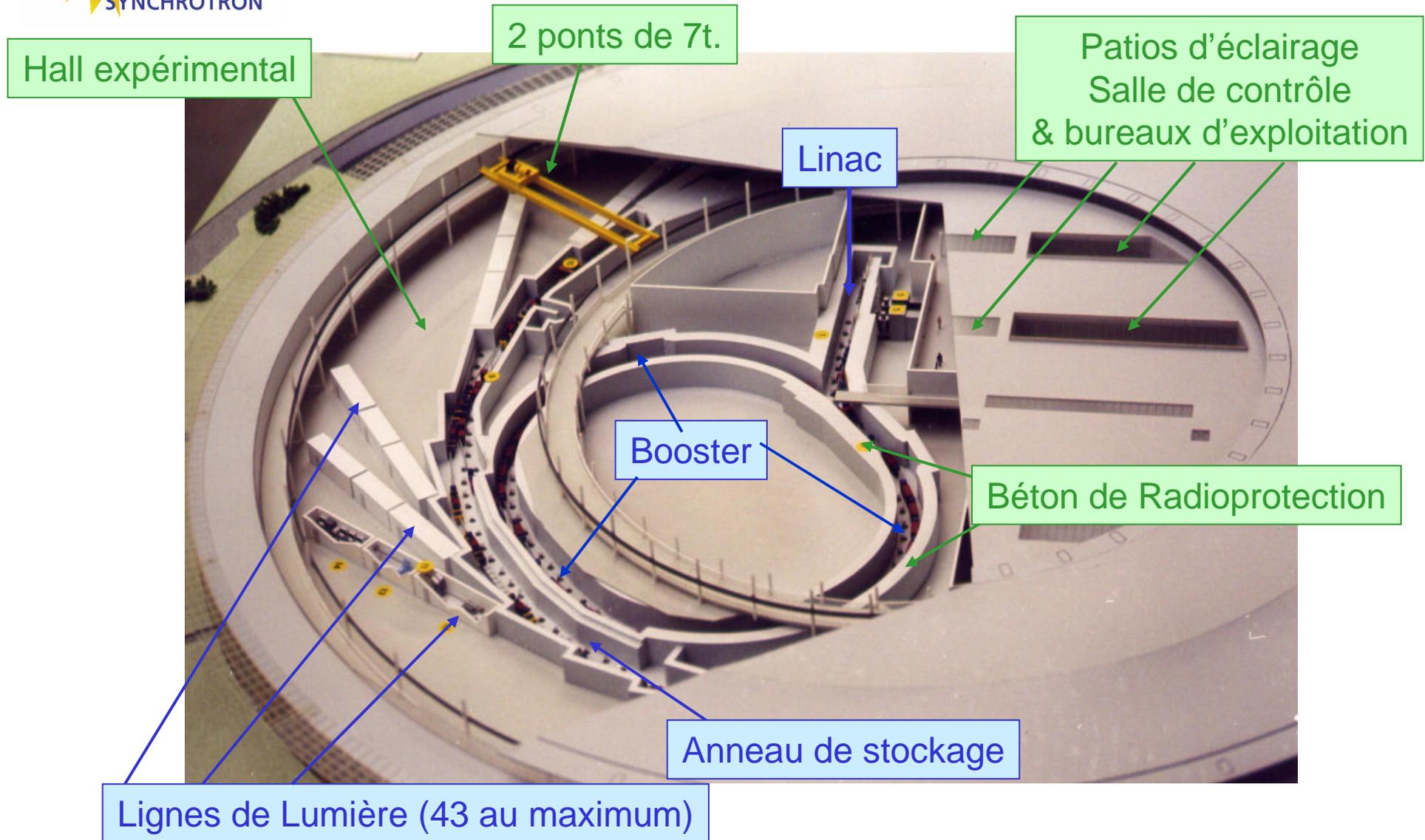


Diamètre: 180 m

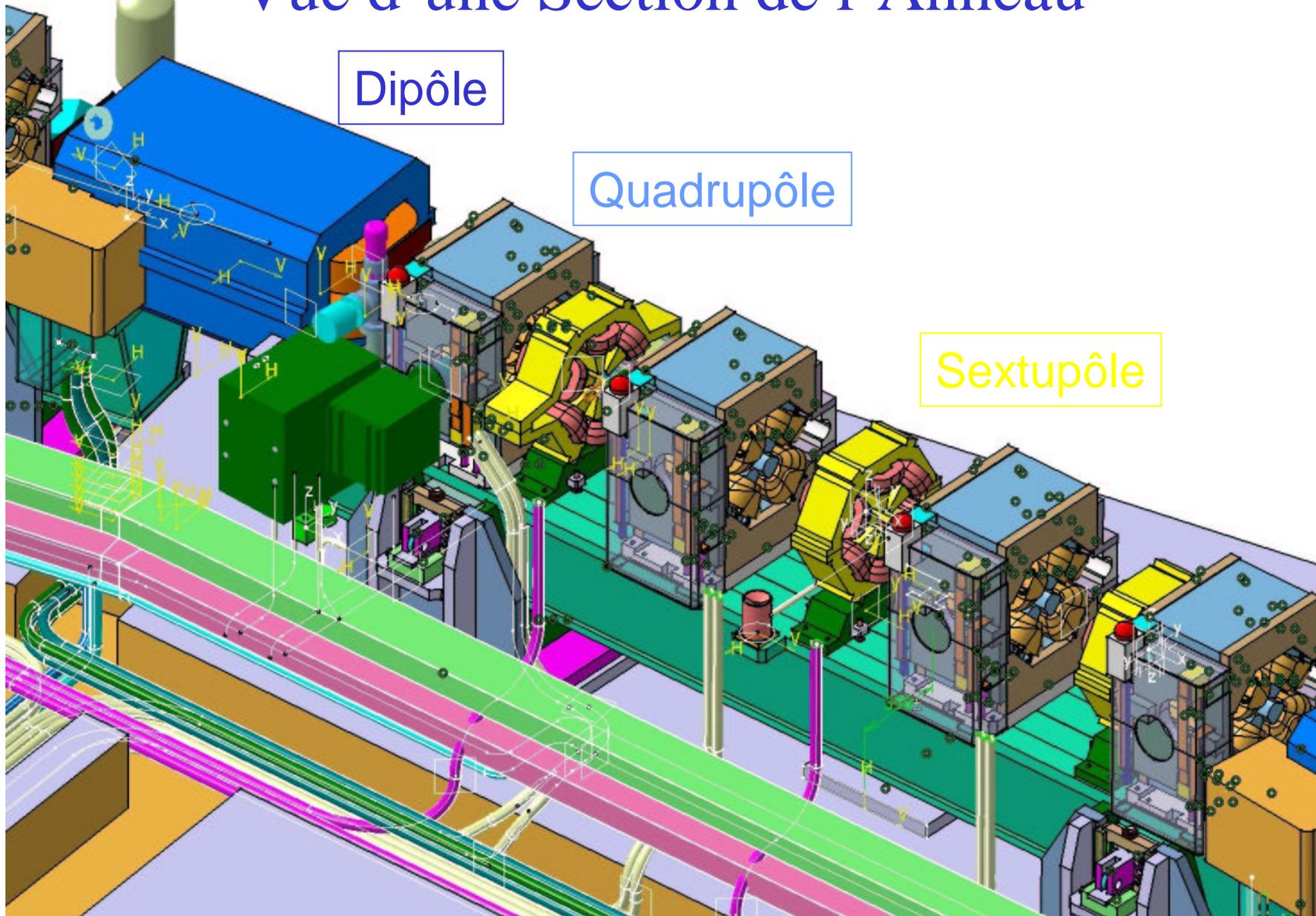
Zone des Accélérateurs

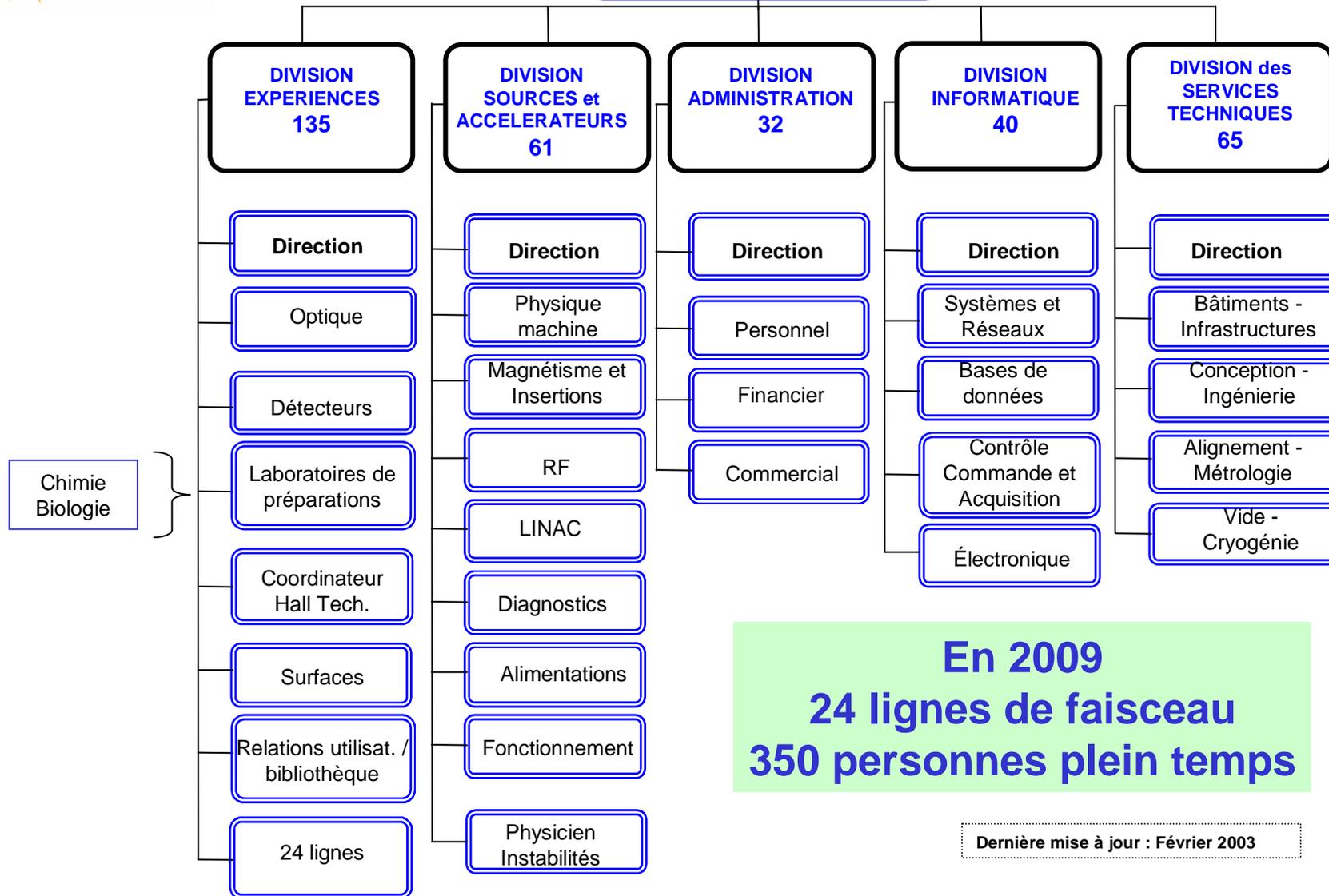
Hall  
Experimental

Bureaux des Physiciens, utilisateurs et  
support expérimental



# Vue d'une Section de l'Anneau







# ORGANIGRAMME DIVISION EXPERIENCES

24 lignes

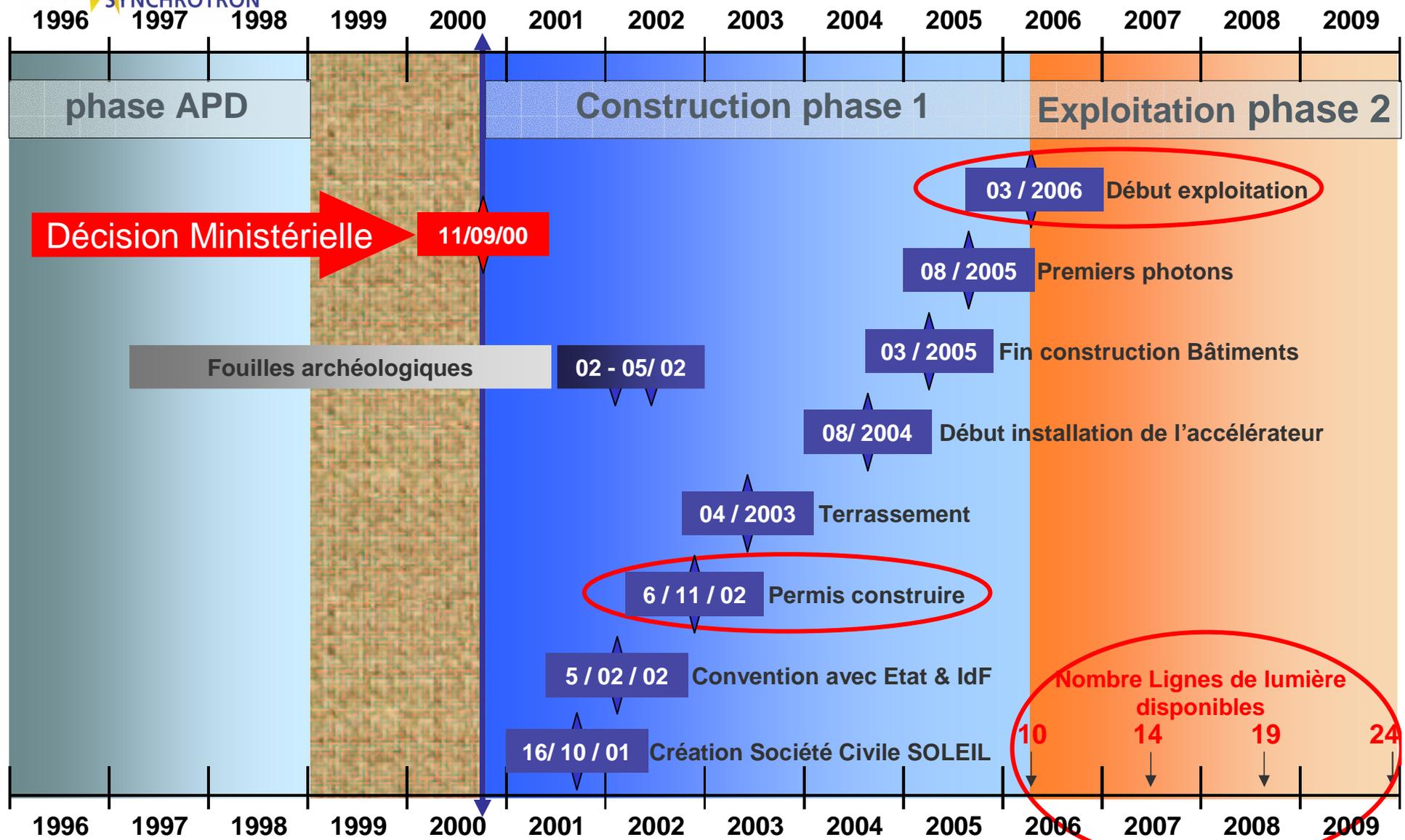
<b>DIRECTION SCIENCES DE LA MATIERE</b> 1 Directeur :	<b>DIRECTION SCIENCES DU VIVANT</b> 1 Directeur :
<b>Période de Construction</b> 2 Adjointes aux Directeurs	<b>Période de Fonctionnement</b> Responsables des Sections Scientifiques

1 C-5 NC  
**Secrétariat**  
**Relations Utilisateurs**  
**Documentation**

<b>4 lignes et expériences</b> 12 Chercheurs 4 Techniciens 1 Ingénieur	<b>4 lignes et expériences</b> 12 Chercheurs 4 Techniciens 1 Ingénieur
<b>4 lignes et expériences</b> 12 Chercheurs 4 Techniciens 1 Ingénieur	<b>4 lignes et expériences</b> 12 Chercheurs 4 Techniciens 1 Ingénieur
<b>4 lignes et expériences</b> 12 Chercheurs 4 Techniciens 2 Ingénieurs	<b>4 lignes et expériences</b> 12 Chercheurs 4 Techniciens 2 Ingénieurs

<b>Informatique</b> <b>Électronique</b> 6 Ingénieurs 6 Techniciens
<b>Conception</b> <b>Ingénierie</b> 6 Ingénieurs 3 Techniciens

1 C		
<b>Instrumentation et Supports Expériences</b>		
<b>Optique</b> <sup>4C-2NC</sup> 4 Ingénieurs 2 Techniciens	<b>Détecteurs</b> <sup>3C-2NC</sup> 3 Ingénieurs 2 Techniciens	
<b>Chimie</b> <sup>1C-1NC</sup> 1 Ingénieur 1 Technicien	<b>Biologie</b> <sup>1C-NC</sup> 1 Ingénieur 1 Technicien	<b>Surfaces</b> <sup>1C-1NC</sup> 1 Ingénieur 1 Technicien
24 Techniciens*		<b>Coordinateur Hall</b> <sup>6NC</sup> <b>expérimental</b> 6 Techniciens





# SOLEIL – Calendrier du personnel

---

- **16 octobre 2001** Décision Ministérielle de construire SOLEIL

**2001: 60 personnes**

- **2003 à 2005** Construction des bâtiments et instal. scientifiques.

**2005: 260 personnes**

- **Printemps 2006** Début d'exploitation avec les **10** premières lignes

- **2006 à 2009** Construction et mise en service des **14 autres** lignes  
~ 4 à 5 personnes / ligne (*physiciens, ingénieurs, techniciens*)

**2009: 350 personnes**

SOLEIL fonctionnera pour les utilisateurs en service continu **5 500 heures** par an, efficacité de **95%**, **43** lignes de faisceau à terme.

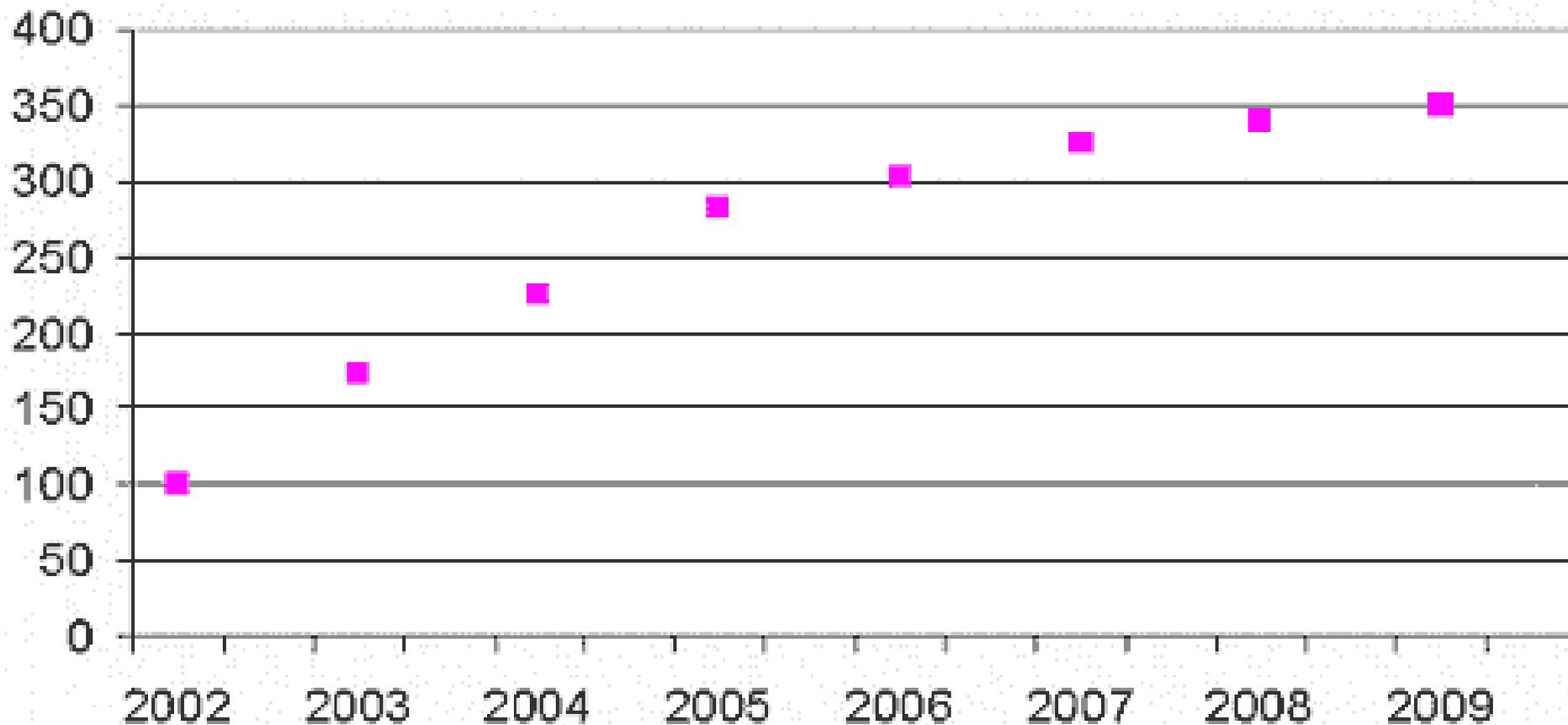
(le cycle typique d'exploitation est de 24h/jour pendant 6 semaines).

SOLEIL accueillera ~**2000** utilisateurs par an (25 % d'étrangers)

**520 personnes**

# Évolution prévisible des effectifs

*(effectifs fin d'année)*



Le budget total, pour la période **2002 - 2009** sera **386M€**  
(soit ~ 2532 millions de francs), les grands postes étant:

<b>Investissements</b>	<b>207 M€</b>
<b>Fonctionnement</b>	<b>40 M€</b>
<b>Salaires</b>	<b>139 M€</b>

La région Ile de France contribue pour **148.7 M€**

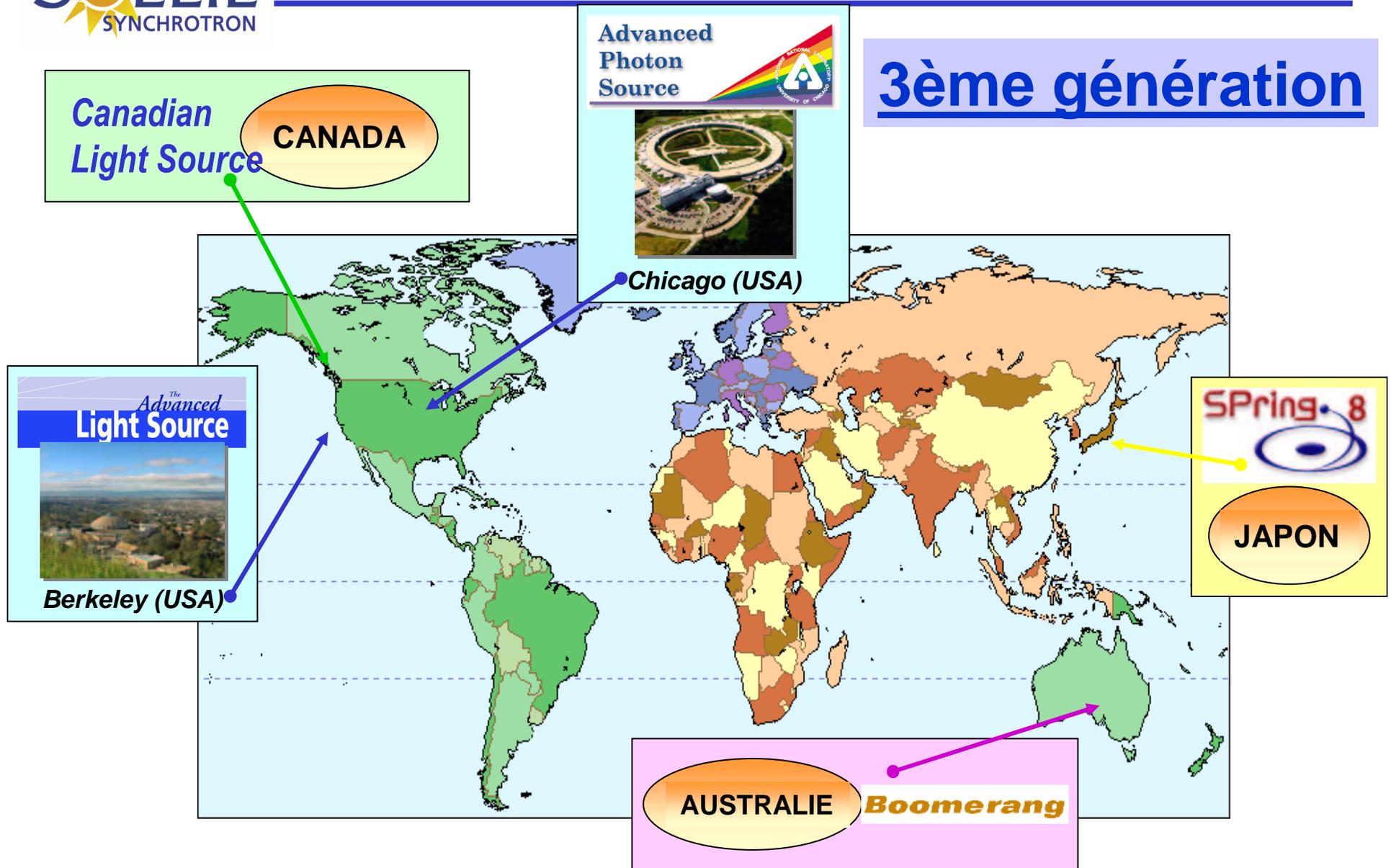
Le département de l'Essonne **34.3 M€**

Le reste financé par CEA (30%) & CNRS (70%)

**Après 2009, (Budget annuel de fonctionnement) : ~ 40M€.**

- **Dynamiser l'axe de Recherche Saclay / Evry**
  - Remplacement d'une machine ancienne de 40 ans: LURE - Orsay
  - SOLEIL fait partie des 40 grands équipements scientifiques français  
*Ganil à Caen, LLB à Saclay, ESRF à Grenoble, Tore Supra (ITER) à Cadarache, etc.*
  - Synergie dans des domaines préétablis: biologie, optique
  - Attirer d'autres installations de recherche ou instituts sur le plateau  
*(Danone, Thomson, Motorola, Polytechnique, Supélec, consortium lasers, Génôme, etc.)*
- **Renforcer l'économie locale**
  - Activité générée par la construction d'un projet important
  - ~ **80%** du budget de fonctionnement retomberont sur des entreprises franciliennes *(activités de service, de maintien et optimisation des équipements, etc.)*
  - Développement des activités tertiaires liées à la vie des chercheurs  
(350 familles et 2000 visiteurs / an) - **60 % des salaires**  
*(Développement des moyens de transport locaux, augmentation capacités accueil scolaire, pré - scolaire, ainsi que des activités culturelles et de loisirs, etc.)*

## 3ème génération





# Principaux synchrotrons en Europe

3ème génération



St Aubin (France)



Daresbury (UK)




Berlin (Germany)



LURE-Orsay (France)  
Arrêté en ~2004




Villigen (Suisse)



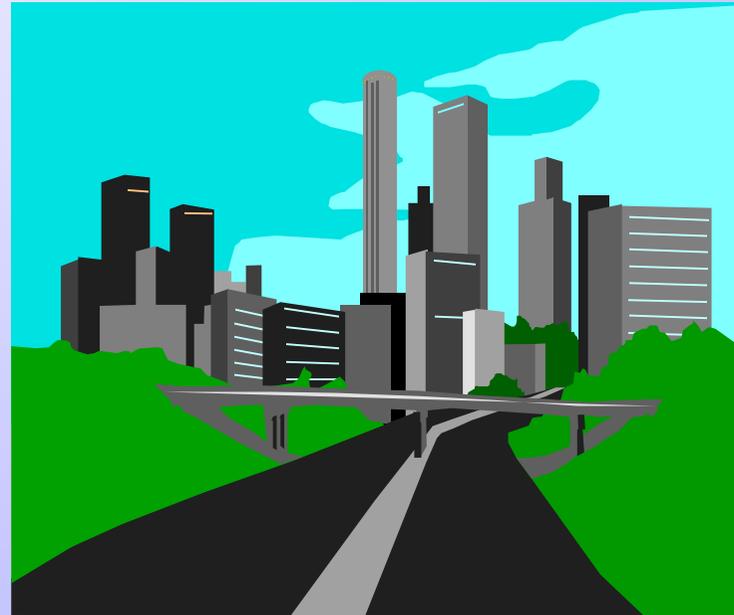

Grenoble (France)  
~25 % France




Trieste (Italy)

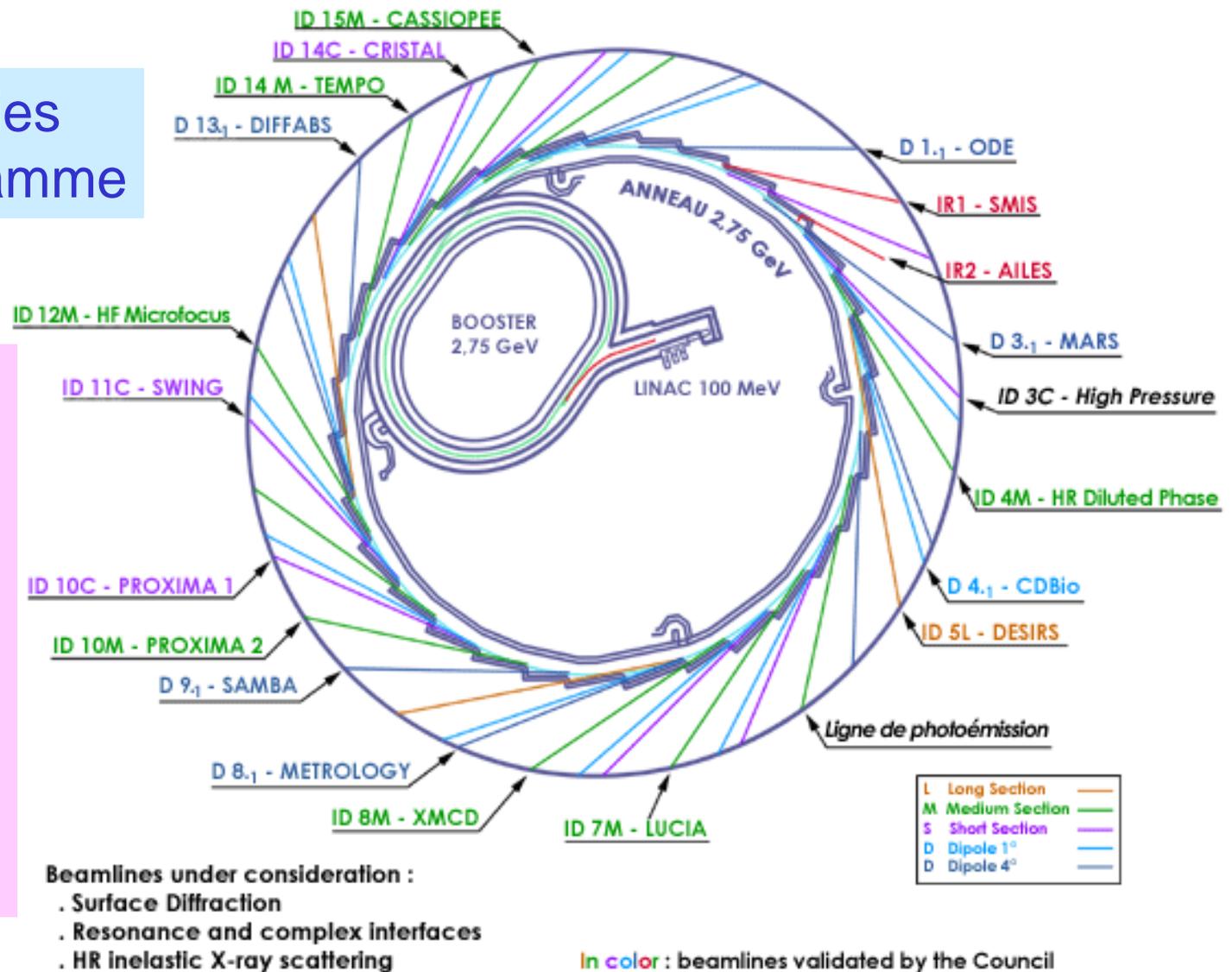


# *“Avancement Travaux”*



• 21 lignes définies sur 24 du programme

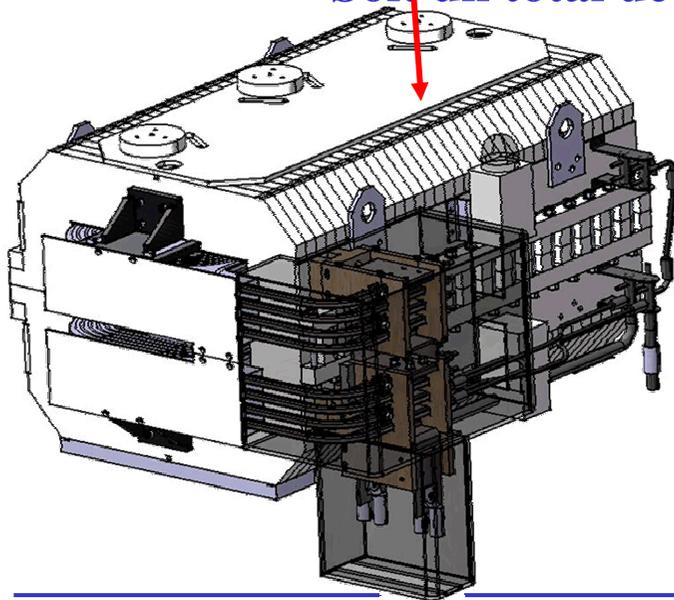
- 1 construite, tests en Suisse
- 10 décidées Phase APD pour 2006
- 10 en cours de finalisation pour 2006 → 2008



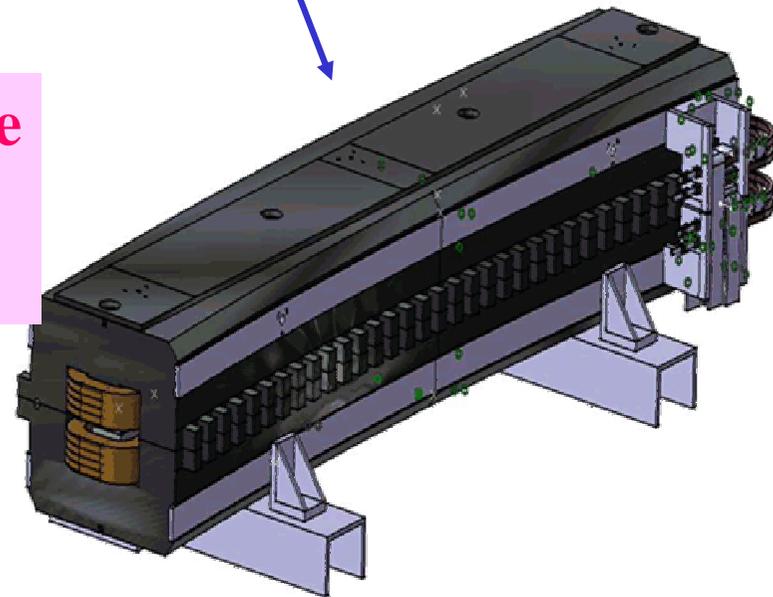
# Tableau des Aimants de SOLEIL

	ANNEAU			BOOSTER		
	Dipôles	Quadrupôles	Sextupôles	Dipôles	Quadrupôles	Sextupôles
<b>Nombre</b>	<b>32</b>	<b>160</b>	<b>120</b>	<b>36</b>	<b>44</b>	<b>28</b>
<b>Alimentation</b>	<b>1</b>	<b>160</b>	<b>10</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>2</b>
<b>Force</b>	<b>1.71 T</b>	<b>19et 23 T/m</b>	<b>320 T/m<sup>2</sup></b>	<b>0.74 T</b>	<b>11 T/m</b>	<b>16 T/m<sup>2</sup></b>
<b>Longueur(mm)</b>	<b>1052</b>	<b>320 ou 460</b>	<b>160</b>	<b>2160</b>	<b>400</b>	<b>150</b>

Soit un total de 420 Aimants.



**Totalité livrée  
en cours  
de tests**

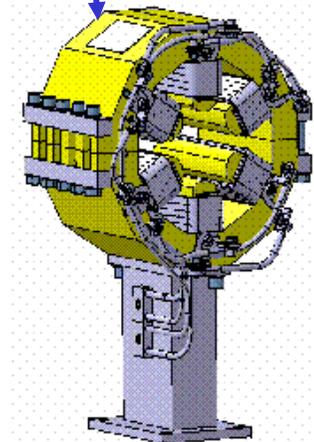
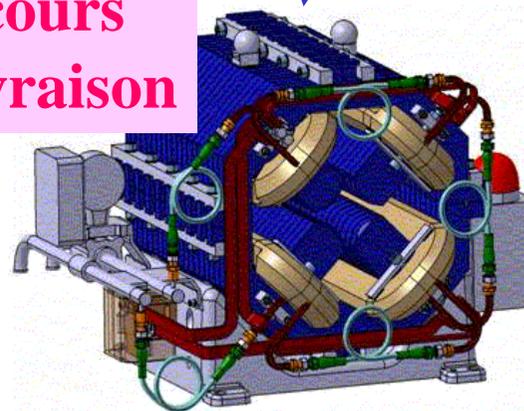
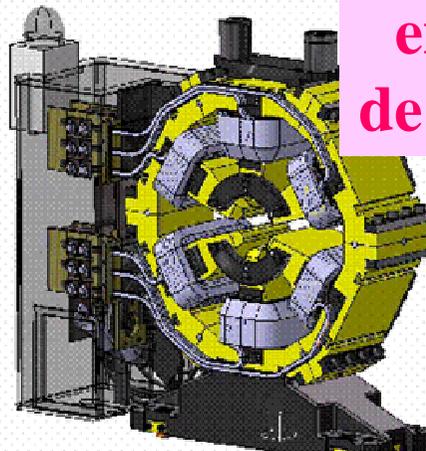
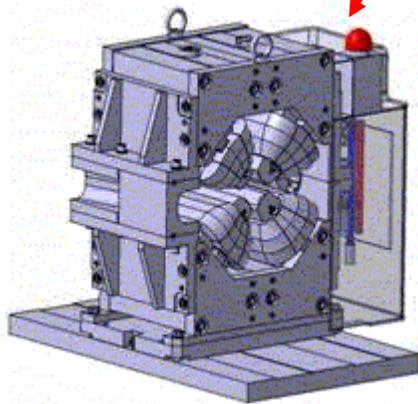


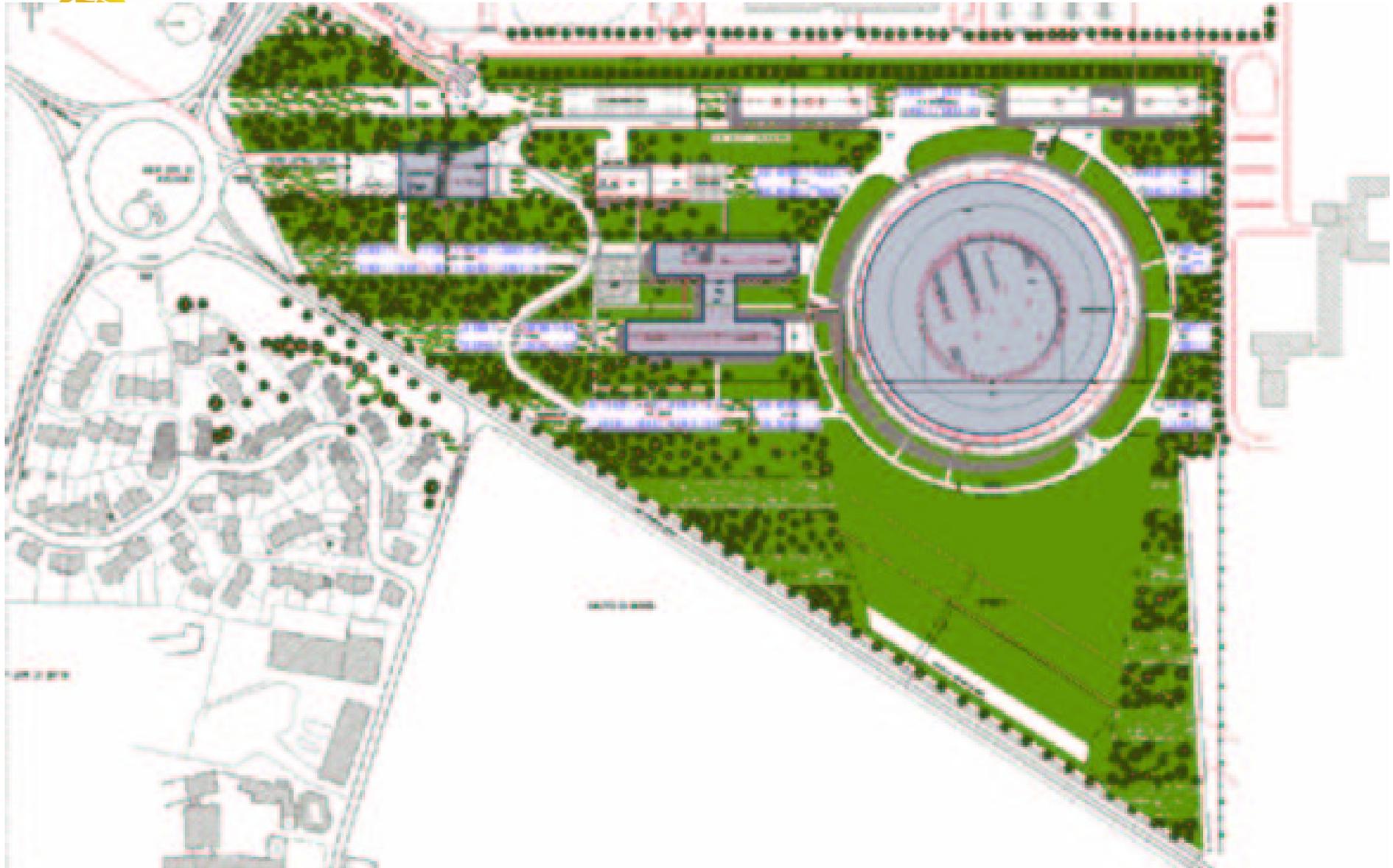
# Tableau des Aimants de SOLEIL

	ANNEAU			BOOSTER		
	Dipôles	Quadrupôles	Sextupôles	Dipôles	Quadrupôles	Sextupôles
<b>Nombre</b>	32	160	120	36	44	28
<b>Alimentation</b>	1	160	10	1	2	2
<b>Force</b>	1.71 T	19et 23 T/m	320 T/m <sup>2</sup>	0.74 T	11 T/m	16 T/m <sup>2</sup>
<b>Longueur(mm)</b>	1052	320 ou 460	160	2160	400	150

Soit un total de 420 Aimants.

Premiers  
en cours  
de livraison





**Avant**



**Octobre 2002**



**Février - Mai 2003**



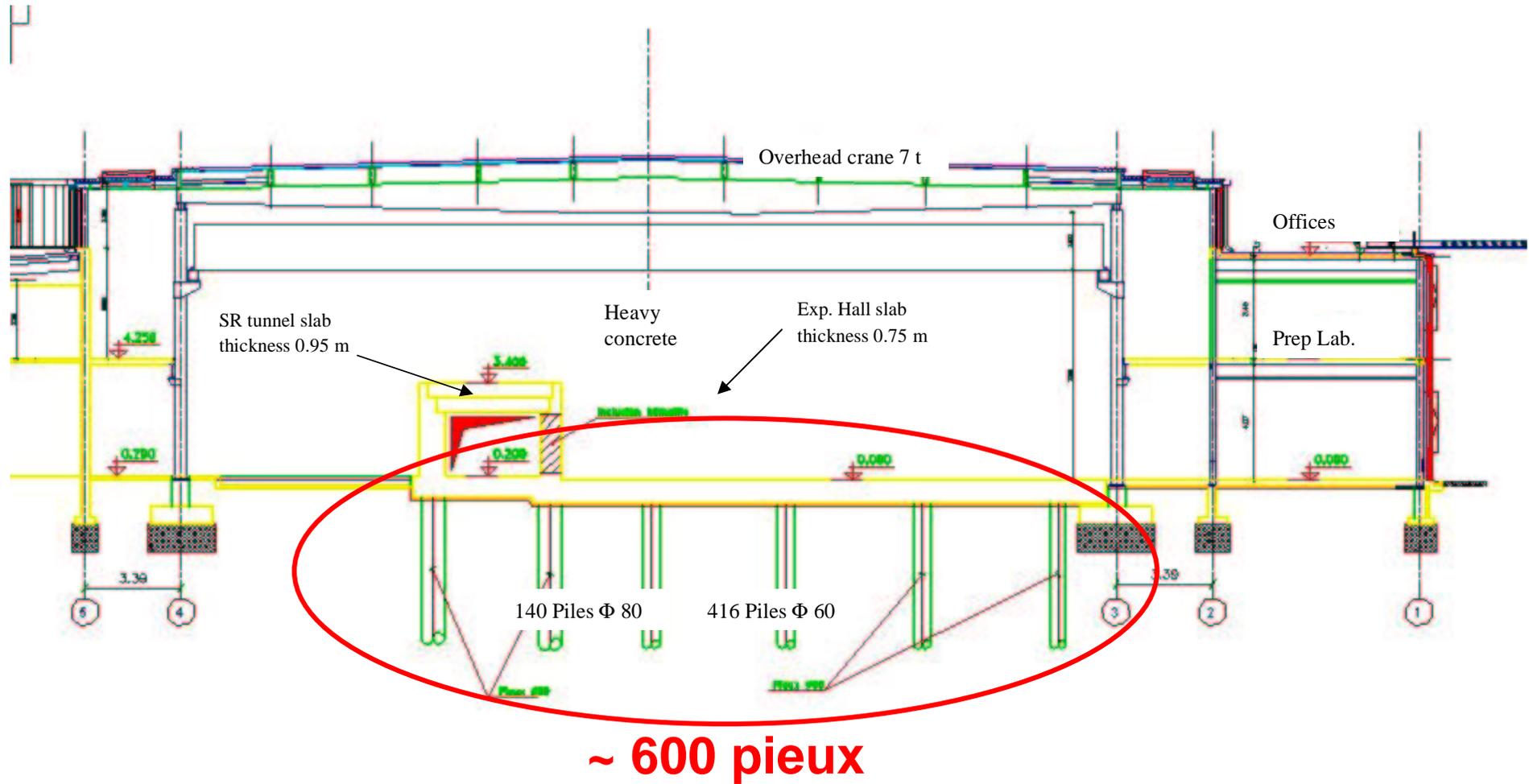
**23 Avril 2003**

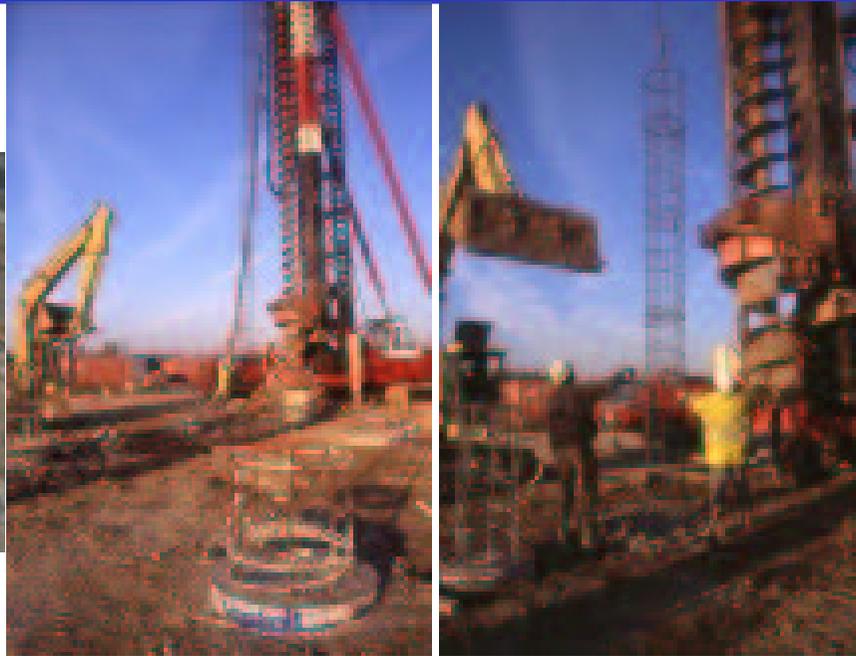


**Avril 2003**



## Vue générale des fondations





Afin de garantir la stabilité de l'anneau et des expériences, les accélérateurs et le hall d'expérimentation reposent sur des **pieux** en béton, ferrillés et ancrés à **15 mètres** de profondeur, dans la couche stable des sables de Fontainebleau.

Entre le **13 octobre 2003** et le **9 janvier 2004**, les équipes ont coulé les **595 pieux**, au rythme d'une **dizaine par jour**, de différents diamètres.  
(**1m** pour le Linac et le Booster, **80cm** pour l'anneau et **60cm** pour le hall d'expériences)

**Juin 2003**



juillet 2003



Janvier 2004



Février 2004



Mars 2004



## Début coulage dalle hall expérimental (80 cm)



# Bâtiments techniques (T1, T2 & T3)

Hall test des aimants



**Avril 2004**



Avril 2004



Avril 2004

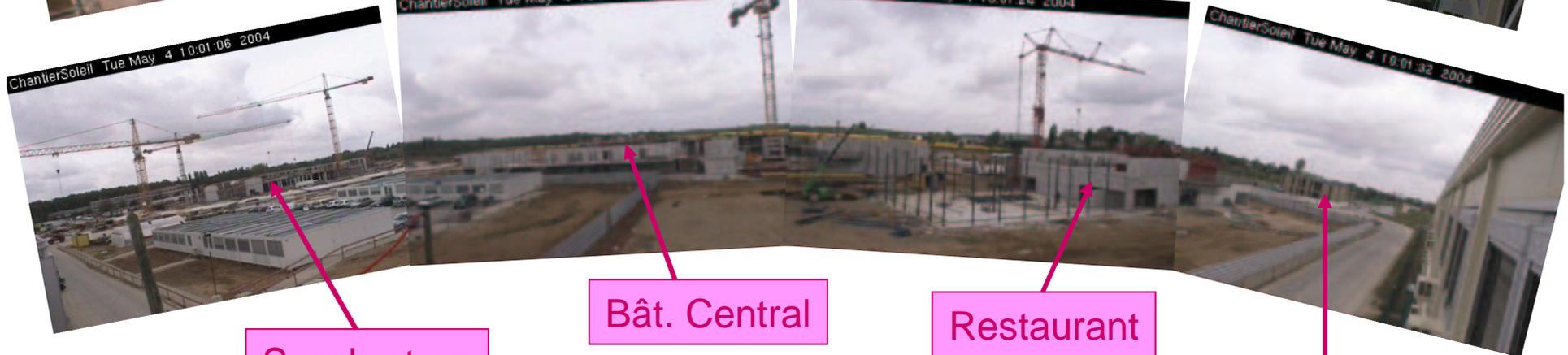


**Avril 2004**



## Evolution du chantier

2 Mars 2004



Synchrotron

Bât. Central

Restaurant

Bât Accueil

4 Mai 2004

[www.synchrotron-soleil.fr](http://www.synchrotron-soleil.fr)



**Tous les jours de 9h00 à 18h00**

**Synchrotron SOLEIL - l'Orme de Merisiers - Saint-Aubin - BP 48**

**91192 Gif sur Yvette cedex**

**Renseignements et visites gratuites**

**au 01 69 35 90 20**

- ▶ [Qu'est-ce que SOLEIL ?](#)
- ▶ [Comment fonctionne SOLEIL ?](#)
- ▶ [Qu'est-ce que le rayonnement Synchrotron ?](#)
- ▶ [Quels sont les domaines d'applications ?](#)
- ▶ [Existe-t-il d'autres synchrotrons en France ?](#)
- ▶ [Pourquoi sur le plateau de Saclay ?](#)
- ▶ [Quelles sont les avancées du chantier ?](#)
- ▶ [Quelles retombées économiques ?](#)
- ▶ [Quelle structure ? Quel budget ?](#)
- ▶ [Quel personnel et quel calendrier ?](#)



## En savoir plus

[SOLEIL est une machine de troisième génération](#)

[SOLEIL est une machine de 2,75 GeV](#)

[L'anneau de SOLEIL a une circonférence de 354 mètres](#)

[Les dispositifs magnétiques, sources du rayonnement](#)

[Le rayonnement synchrotron en France : 60 ans d'histoire](#)

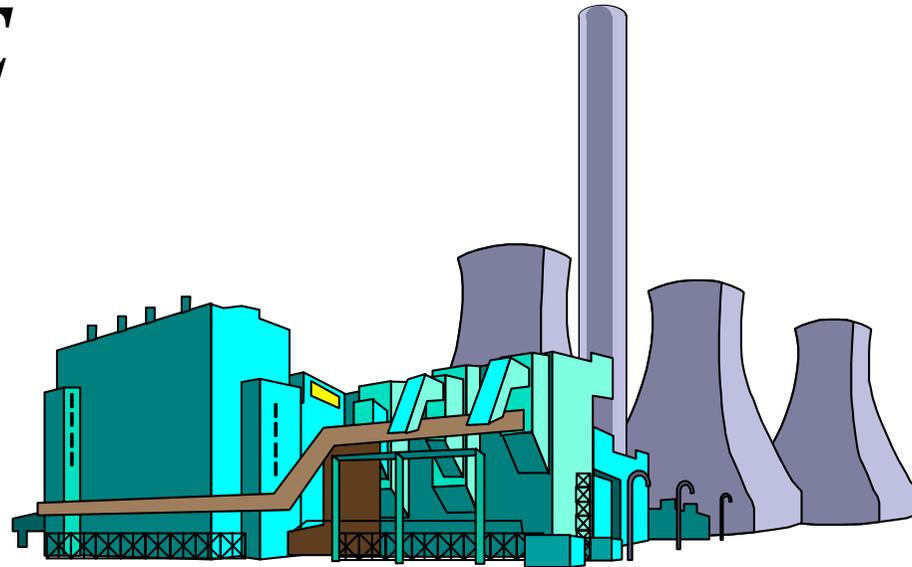
[Les propriétés remarquables du rayonnement de SOLEIL](#)

[Les lignes de lumière](#)

février 2004

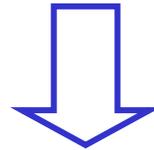


# ***CLASSEMENT du LABORATOIRE & SECURITE***

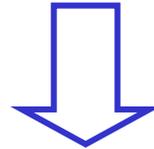




Recommandations: ICRP\* publication 60 (1991)



Directive Européenne 96/29/Euratom



Union Européenne : Législation Nationale

- **Décret n°. 2002-460 du 4 Avril 2002**, relatif à la protection générale des personnes (**public**) contre les risques des rayonnements ionisantes.
- **Décret n°. 2003-296 du 31 Mars 2003**, relatif à la protection des **travailleurs** contre les dangers des rayonnements ionisantes.

\* International Commission on Radiation Protection



Même si la **Sécurité** est l'affaire de tous, donc de chacun, elle est pilotée par une **équipe de sécurité** directement placée **sous l'autorité du Directeur de Laboratoire**, avec :

- une **organisation**,
- une **sensibilisation** permanente du personnel,
- une **démarche intégrée** dès la conception,
- application du principe **ALARA**,
- application réglementation Européenne pour le public (**1mSv/an pour toute personne, restant 2000 h à la même place**) pour calculer les épaisseurs des murs des tunnels de l'accélérateur
- une **autorisation** avant mise en exploitation,
- accès de l'accélérateur seulement possible à l'arrêt
- un **contrôle** continu.





Arrêté du 27 Avril 1982 relatif aux caractéristiques des accélérateurs de particules en tant qu'**INB**

→ Pour un accélérateur d'électrons (cas SOLEIL), une installation sera classée comme INB **si, à la fois:**

1) **L'énergie maximale** des électrons  $\geq 50$  MeV

**ET**

2) **La puissance du faisceau**  $\geq 1$  kW

Décret no. 2002-460 du 4 Avril 2002

mentionne que ce type d'accélérateur nécessite une autorisation de mise en exploitation délivrée par la DGSNR (Direction Générale de Sûreté Nucléaire et de Radioprotection)

# Recom. 29 : PUISSANCE DU FAISCEAU

