

# DOSSIER D'INFORMATION

16 septembre 2011 - IPANEMA



*Première pierre d'IPANEMA,  
la plateforme européenne de recherche  
dédiée à l'étude des **matériaux anciens**  
adossée au synchrotron SOLEIL*

IPANEMA

ANCIENT MATERIALS  
RESEARCH PLATFORM

# IPANEMA, une plateforme unique pour les matériaux anciens

## L'Institut Photonique d'Analyse Non-destructive Européen des Matériaux Anciens

Depuis 2006, archéologues, paléontologues, scientifiques de la conservation et des environnements anciens, se réunissent au synchrotron SOLEIL pour concevoir la structure qui répondra le mieux à leurs besoins de recherche. De cette réflexion commune et transdisciplinaire est née IPANEMA, en cours de construction. IPANEMA est destinée à accueillir des équipes franciliennes, françaises, européennes et internationales.

IPANEMA a été créée grâce au soutien de la Région Ile-de-France, qui finance intégralement la construction du bâtiment dans le cadre du Contrat de projets État-région (CPER) 2007-2013, soit un investissement de 4,5 millions d'euros (50% du projet). Pour mémoire, la Région soutient depuis l'origine le Synchrotron SOLEIL, équipement de recherche majeur, essentiel pour le rayonnement scientifique de la France. Elle a financé sa construction à hauteur de 148.6 millions d'euros, soit son investissement le plus lourd dans le domaine de la recherche. La plateforme est dédiée à l'étude avancée des matériaux de l'archéologie, de la paléontologie, des environnements anciens et du patrimoine culturel. IPANEMA est mise en place conjointement par SOLEIL, le CNRS, le ministère de la Culture et de la Communication, le Muséum national d'histoire naturelle, avec le soutien de la Commission européenne (projet CHARISMA), de l'opérateur de recherche néerlandais NWO. IPANEMA est partie intégrante du nouveau laboratoire d'excellence PATRIMA.



*Perspective du futur bâtiment de la plateforme IPANEMA en construction (crédits : Yves Chemineau Architecte)*

Le projet de plateforme IPANEMA comprendra à terme deux composants : un nouveau bâtiment attenant au synchrotron SOLEIL pour faciliter la préparation d'analyses de micro-prélèvements, objets et œuvres anciens et une ligne synchrotron optimisée pour les matériaux anciens, PUMA, mise en place dans le cadre d'IPANEMA.

Aujourd'hui unité propre de service du CNRS, IPANEMA prendra la forme d'une unité mixte de recherche et de service. Les recherches nécessitant l'étude de larges corpus archéologiques, historiques, etc. bénéficieront d'un soutien accru pour accéder à toutes les lignes de SOLEIL et à d'autres installations. Le nouveau bâtiment permettra l'entreposage et le transport des spécimens et objets sur les lignes de lumière de SOLEIL selon les règles de l'art. L'équipe de la plateforme occupe aujourd'hui des locaux temporaires à SOLEIL. Elle mène deux activités visant à encourager une recherche de pointe sur les matériaux anciens :

- L'accompagnement des projets synchrotron de scientifiques hébergés,
- Une recherche méthodologique originale en imagerie et spectroscopie photonique de matériaux anciens et traitement et analyse des données.

IPANEMA contribue ainsi à renforcer la position de leader mondial de la France sur ces thématiques et fait bénéficier aux sciences des matériaux anciens du développement de la recherche sur le plateau de Saclay.

## ➤ Des Partenaires nationaux et européens

### ➤➤ Le synchrotron SOLEIL

Le synchrotron SOLEIL héberge l'unité IPANEMA, projet qu'il a initié. Les lignes de SOLEIL alimentent les recherches d'un large ensemble de communautés scientifiques : physique, chimie, sciences des matériaux, du vivant, de la Terre, de l'environnement, des matériaux anciens, etc. Le synchrotron SOLEIL développe depuis 2003 des projets dédiés à ces dernières thématiques.

### ➤➤ Le ministère de l'Enseignement supérieur et de la recherche La Région Île-de-France

La construction et l'équipement d'IPANEMA, incluant la ligne synchrotron PUMA, sont financés à parité par l'État français et la Région Île-de-France, dans le cadre du Contrat de projets État – région 2007-2013, qui a été signé le 23 mars 2007.

### ➤➤ Le Centre national de la recherche scientifique

Principal organisme de recherche français, le CNRS intervient dans IPANEMA à travers quatre instituts : l'Institut écologie et environnement, l'Institut des sciences humaines et sociales, les Instituts de physique et de chimie. IPANEMA est actuellement unité propre du CNRS en cours de transformation en unité mixte de service et de recherche.

### ➤➤ Le ministère de la Culture et de la Communication

Le ministère de la Culture et de la Communication soutient le fonctionnement d'IPANEMA par l'apport d'un budget récurrent et par des financements sur projets.

### ➤➤ Le Muséum national d'Histoire naturelle

Structure de recherche scientifique, d'enseignement et de formation, le Muséum national d'histoire naturelle est un partenaire essentiel concerné au premier plan par la recherche sur les matériaux de l'archéologie, la paléontologie, les paléo-environnements et la conservation des collections patrimoniales.

### ➤➤ La Commission européenne

La Commission européenne soutient l'accès des scientifiques européens à IPANEMA à travers le projet CHARISMA du 7e programme-cadre de recherche et de développement technologique.

### ➤➤ L'opérateur et agence de financement de la recherche néerlandais NWO

NWO contribue à la mise en place d'IPANEMA depuis le 30 Mars 2010 et soutient spécifiquement les projets développés sur IPANEMA dans le cadre de son appel à projets Science4Arts.

### ➤➤ Comité de pilotage d'IPANEMA

Le Comité de pilotage d'IPANEMA regroupe les partenaires institutionnels de la construction et de l'exploitation. Il se réunit régulièrement depuis 2008 pour piloter l'avancement et les orientations d'IPANEMA et assurer la mise en place de la gestion financière et administrative.



**➤ L'archéologie**

L'archéologie est actuellement la discipline qui utilise le plus les techniques synchrotron sur des matériaux anciens. Ces techniques apportent des informations essentielles sur les modes de production des objets (provenance, voies de circulation, technologies), leurs usages, leurs contextes.

Les techniques synchrotron permettent l'étude de matériaux archéologiques extrêmement diversifiés : métaux, céramiques, verres, textiles, matériaux lithiques, vestiges organiques, matières colorantes, etc.

À titre d'exemple, les méthodes de microanalyse X synchrotron permettent de clarifier les étapes de production d'objets archéologiques ferreux et de suivre la diffusion des procédés métallurgiques en Europe [Dillmann et al.]



*IPANEMA a contribué à l'étude des techniques d'art rupestre des San en Afrique du Sud (Crédits : IPANEMA)*

**➤ La paléontologie**

En paléontologie, le développement des méthodes d'imagerie 3D de type microtomographie X constitue une véritable révolution technologique. Sans plus avoir à sectionner les spécimens, ces techniques permettent de visualiser la structure interne des fossiles à une échelle sans cesse plus fine, pouvant aujourd'hui descendre à une fraction de micromètre. En plein développement, les modalités de mise en œuvre de ces méthodes (par contraste de phase ...) permettent de préciser la morphologie des zones totalement indiscernables par toutes les méthodes conventionnelles. Des approches d'imagerie 2D apportent également des informations biologiques et phylogénétiques (évolution des espèces).

Des reconstitutions portant sur des embryons fossiles du Précambrien permettent de décrire les étapes majeures de l'embryogenèse des premiers métazoaires [Donoghue et al.].



© CNRS Photothèque /  
DE FRANCHESCHI Dario

*Mandibule de gavial du bassin amazonien*

### ➤ **Les paléo-environnements**

Les techniques micro-faisceau nous informent sur l'environnement des sites anciens et les climats du passé.

La plateforme participe à des travaux allant au-delà de l'objet, portant sur le contexte environnemental des sites archéologiques et paléontologiques, sur les processus d'altération des objets au cours du temps et les évolutions du climat à long terme. Des données du passé cruciales pour comprendre l'environnement et le climat de demain.

L'étude de la composition en éléments-traces de stalagmites a permis de suivre les évolutions climatiques passées avec un rythme annuel [Genty et al.].

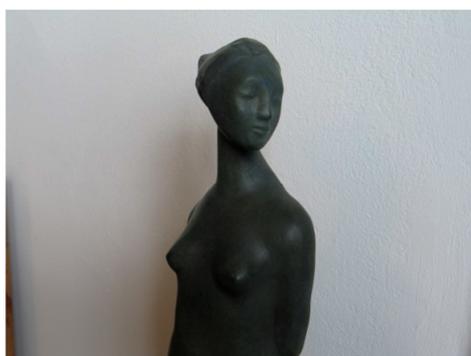
### ➤ **Les sciences de la conservation**

En sciences de la conservation, les techniques synchrotron conduisent à une meilleure compréhension des processus d'altération du patrimoine mobilier, du patrimoine bâti et permettent notamment d'évaluer l'efficacité des traitements appliqués en restauration. En outre, l'utilisation de méthodes micro-faisceau permet d'identifier la « main de l'artiste » à partir de signatures moléculaires d'ateliers ou d'artistes.

Le couplage de méthodes de micro-fluorescence X et micro-absorption X a permis de comprendre les processus de dégradation du bois d'épaves anciennes, entraînant le développement de traitements appliqués à des navires entiers [Sandström et al.].



(D.R.)



(D.R.)

## La mobilisation de scientifiques nationaux et internationaux

Les premiers travaux publiés croisant archéologie et synchrotron datent de la fin des années 80, avec une croissance très forte ces dix dernières années. À travers ses lignes de micro-fluorescence X, de diffraction et absorption X, sa ligne de spectro-microscopie infrarouge, le LURE, synchrotron précurseur de SOLEIL, a joué un rôle clé dans les développements qui se poursuivent aujourd'hui à SOLEIL.

### ➤ 4 groupes de travail thématiques

La conception d'IPANEMA repose sur quatre groupes de travail thématiques et l'équipe permanente en cours de constitution. Les groupes de travail ont été formés à partir des communautés scientifiques concernées : archéologie/archéométrie, paléontologie, environnements anciens et sciences de la conservation. Ils se réunissent depuis 2008 pour définir les déterminants des objectifs et du fonctionnement de la plateforme. Ils ont ainsi directement participé à la définition des modes d'opération de la plateforme et de ses équipements. Ces quatre groupes de travail ont réuni à SOLEIL plus d'une centaine de scientifiques des matériaux anciens.

### ➤ Des centaines de rencontres

La mise en place s'appuie sur :

- depuis 2004 : des échanges avec plus de 200 équipes « matériaux anciens » visitées en France, en Europe et au-delà ;
- les réunions des groupes de travail d'IPANEMA (100 scientifiques impliqués) en février, avril et juin 2008 ;
- les 6 et 7 mai 2009, le colloque « IPANEMA 2009 - A beamline for ancient materials at SOLEIL » ;
- les 17 et 18 janvier 2011, le colloque « IPANEMA 2011 - Synchrotron radiation for Ancient Materials »



### ➤ Une structure ouverte aux échanges

Implanté sur le plateau de Saclay, territoire faisant l'objet d'une Opération d'Intérêt National (OIN), IPANEMA bénéficie de l'exceptionnel développement des organismes scientifiques du plateau. Localement en région Île-de-France et au niveau national, IPANEMA est membre fondateur du laboratoire d'excellence (Labex) PATRIMA.

IPANEMA travaille en complémentarité avec les grands instruments et plateformes instrumentales de son environnement proche et en Europe. Ainsi, le projet CHARISMA de la Commission Européenne (7<sup>e</sup> PCRD) rassemble outils synchrotron (IPANEMA), faisceaux d'ions et sources neutroniques au service de la recherche sur les matériaux anciens.



## » Une plateforme tournée vers l'Europe

### »» Utilisateurs européens

Un quart des projets déposés sur l'axe « matériaux anciens » provient d'équipes pilotées par des porteurs non nationaux.

### »» CHARISMA

Le synchrotron SOLEIL, en tant que porteur d'IPANEMA, est membre du projet européen d'accès aux infrastructures de recherche européennes pour le patrimoine culturel du 7<sup>e</sup> PCRD CHARISMA. Ce grand projet européen soutient depuis octobre 2009 l'accès des utilisateurs européens à des plateformes instrumentales, des instruments portables et des ressources documentaires. IPANEMA fait partie du volet « centre d'analyse », avec AGLAE du C2RMF (CNRS/Ministère de la Culture et de la Communication) Louvre en France et deux centres de l'Académie des sciences hongroise.

### »» Agence et opérateur néerlandais de recherche NWO

L'agence et opérateur néerlandais de recherche NWO aux Pays-Bas participe au Comité de pilotage d'IPANEMA depuis le 30 mars 2010. En janvier 2011, NWO a lancé le projet Science4art soutenant l'accès des équipes néerlandaises à IPANEMA.

### »» COST

Le réseau COST soutient depuis 2004 le cycle européen de formation « New Lights on Ancient Materials », école unique au monde, centrée sur l'utilisation des méthodes synchrotron pour les matériaux anciens.

### »» Participation d'acteurs étrangers

IPANEMA coopère avec de grandes institutions de recherche sur les matériaux anciens, notamment la Smithsonian Institution aux Etats-Unis.

La plateforme a également établi des relations étroites avec des équipes en Afrique du Sud, en Argentine, ...



Signature de l'accord avec  
la Smithsonian Institution en juin 2010



## Un centre de 1800 m<sup>2</sup> consacré aux matériaux anciens

La plateforme de recherche et de service d'IPANEMA occupera 1800 m<sup>2</sup> sur le site du synchrotron SOLEIL.

La mise en place de la nouvelle structure d'IPANEMA comprend deux opérations majeures sur le site de SOLEIL : la construction du bâtiment de la plateforme et celle de la ligne synchrotron PUMA. Le futur bâtiment comprendra deux zones principales :

- des espaces de bureaux et de salles de réunion pour accueillir les scientifiques hébergés et l'équipe de l'unité IPANEMA,
- des espaces de laboratoire et de stockage pour les analyses préalables et la préparation des échantillons en vue des études synchrotron.

Le traitement architectural des locaux favorise la compatibilité avec la présence et l'étude de biens culturels, la maintenance, l'entretien courant et l'exploitation du bâtiment dans les locaux de type techniques (laboratoires, etc.) et privilégie la convivialité dans la zone de bureaux (échanges et communication entre utilisateurs du bâtiment). La construction du bâtiment IPANEMA s'appuie sur la norme XP-X80-001 (conservation des biens culturels - pôle de conservation). Un accès au bâtiment synchrotron permet la circulation et le transport des objets et des prélèvements. La mise en place d'IPANEMA s'inscrit également dans un processus de qualité environnementale. Celui-ci vise à minimiser l'impact de la plateforme sur l'environnement, maîtriser au maximum ses consommations (amélioration de la performance énergétique, limitation des émissions de polluants, réduction de la production de déchets) et créer un environnement intérieur sain et confortable pour les scientifiques hébergés.



PERSPECTIVE D'INSERTION SUR L'ENTRÉE

(Crédits : Yves Chemineau Architecte)



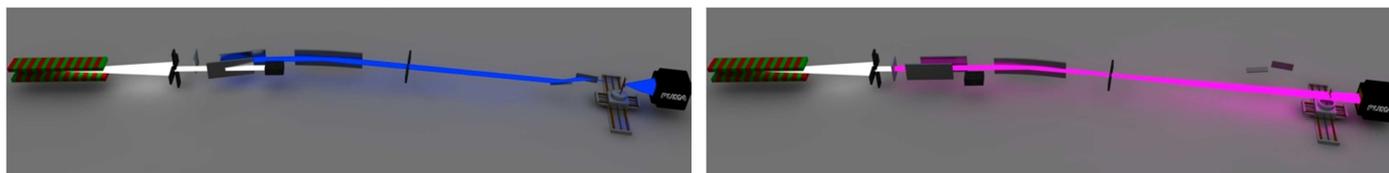
# PUMA, la ligne optimisée pour les matériaux anciens

## ➤ Des objectifs définis par la communauté

En matière d'équipement synchrotron, la priorité établie par les disciplines est l'imagerie 2D et 3D de rayons X. Ces méthodes d'imagerie sont en effet les plus demandées pour comprendre la morphologie, la composition, la structure et les priorités des matériaux anciens.

## ➤ Une ligne, deux branches d'imagerie

Le projet de ligne PUMA (Photons Utilisés pour les Matériaux Anciens) visera à alimenter deux stations expérimentales : l'une de spectro-microscopie X durs (imagerie 2D et microanalyses ponctuelles), l'autre de microtomographie X durs (imagerie 3D). Les deux branches viseront une résolution de l'ordre du micromètre. La ligne sera optimisée pour minimiser les temps de réglage et permettre la mesure de larges collections d'échantillons.



Visualisation des différentes configurations optiques de la ligne PUMA optimisée pour les matériaux anciens

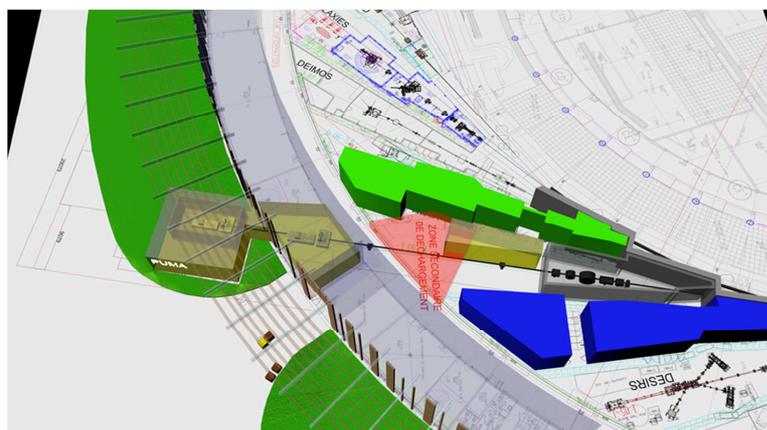
## ➤ Étapes clés

Comme pour l'ensemble d'IPANEMA, la définition de PUMA s'appuie sur un large travail collectif qui a culminé en mai 2009 avec le colloque « A beamline for ancient materials at SOLEIL ».

Sur cette base, le groupe optique est en train de créer un schéma optique pour la ligne de lumière en tenant compte des recommandations nombreuses de la communauté scientifique.

Les jalons de la construction de la ligne PUMA sont :

- juin 2009 : présentation de l'esquisse au Conseil scientifique de SOLEIL
- 2011 : réalisation et constitution de l'avant-projet sommaire
- 2012 : avant-projet détaillé et cahiers des charges de PUMA
- 2015 : Démarrage des expériences utilisateurs



Perspectives de la future ligne

## ➤ *Deux missions : accompagnement et recherche*

Les missions de la plateforme sont l'accompagnement des projets synchrotron en complément de l'apport des scientifiques des lignes de SOLEIL et la recherche méthodologique sur les matériaux anciens. L'accompagnement inclut un support à la préparation d'échantillons, aux méthodes analytiques par des formations ou des développements instrumentaux, au traitement et l'analyse des données jusqu'à la valorisation des résultats. L'unité développe parallèlement une recherche méthodologique en instrumentation et analyse de données, motivées par les besoins spécifiques des thématiques matériaux anciens.



## ➤ *Hébergement de scientifiques à moyen terme*

À l'ouverture du nouveau bâtiment, la plateforme apportera un soutien à la recherche sur les matériaux anciens exercé soit dans le cadre de projets ponctuels de quelques jours, format classique pour une installation synchrotron, soit dans le cadre de projets à moyen terme, souvent plus adaptés aux problématiques matériaux anciens. Ces projets à moyen terme, pouvant aller jusqu'à trois ans, permettront d'accueillir 20 à 25 scientifiques hébergés comprenant des étudiants en thèse, post-doctorats et chercheurs.

Les interactions facilitées entre spécialistes des matériaux anciens et des méthodes au niveau européen participeront à la formation sur place et l'optimisation des demandes de temps de faisceau.



## ➤ *Sélection des projets*

Un Comité indépendant évaluera les projets sur la plateforme IPANEMA a priori et a posteriori. Les modes de sélection seront conformes aux exigences de publication des résultats, de durée des projets et de mise à disposition libre des données. Ces modes permettront notamment des approches statistiques et des tests exploratoires.

## ➤ *Un Conseil scientifique garant des réalisations*

Le Conseil consultatif d'orientation scientifique d'IPANEMA (CCOSI) regroupe des experts indépendants qui se réunissent tous les 6 mois pour garantir la qualité des recherches développées sur la plateforme.

## ➤ L'unité aujourd'hui

Loïc BERTRAND est le directeur de l'unité IPANEMA et coordonne l'axe « Imagerie et spectroscopie ».

Serge COHEN assure la coordination de l'axe « traitement des données » et le suivi de la définition des équipements de tomographie X durs dans le cadre d'IPANEMA.

William JOSSE prend en charge les volets instrumentation électronique et mécanique.

Marie-Angélique LANGUILLE coordonne la définition et l'acquisition d'équipements d'analyse photonique et leur déploiement sur la plateforme et travaille au développement de méthodes analytiques couplées.

Regina OPRANDI est l'assistante du groupe.

Laurianne ROBINET approfondit l'axe spectrométrie infrarouge et les méthodologies de préparation d'échantillons associés pour les matériaux anciens. Elle travaille au développement de méthodes analytiques couplées principalement sur les matériaux du patrimoine.

Sebastian SCHOEDER est le responsable de la ligne de lumière PUMA

L'équipe comprend également des thésards et stagiaires.

## ➤ L'équipe demain

Une quinzaine de personnes constituera l'unité d'IPANEMA. Elle rassemblera des compétences en méthodes d'analyse physique de laboratoire et synchrotron (imageries 2D, 3D et spectroscopies), en analyse de données, en instrumentation électronique et mécanique et techniques de préparation, dégagant ainsi trois axes structurants pour l'unité (préparation / analyse photonique / données).

Chaque personnel s'impliquera alors avec sa spécialité sur plusieurs projets à moyen terme portés par les scientifiques hébergés.



## *Un accompagnement des projets synchrotron de scientifiques hébergés*

IPANEMA permet un support accru aux utilisateurs non-experts des techniques synchrotron et facilite en particulier l'étude de corpus et de collections d'objets, études redondantes de séries statistiques cruciales pour les thématiques des matériaux anciens, en plus des cas d'école plus habituellement étudiés sur grands instruments. Cette activité de soutien à la recherche s'est concrétisée au 1<sup>er</sup> janvier 2010 par la création de l'Unité propre de service IPANEMA (UPS-3352) du CNRS, en cours de transformation en unité mixte de service et de recherche.

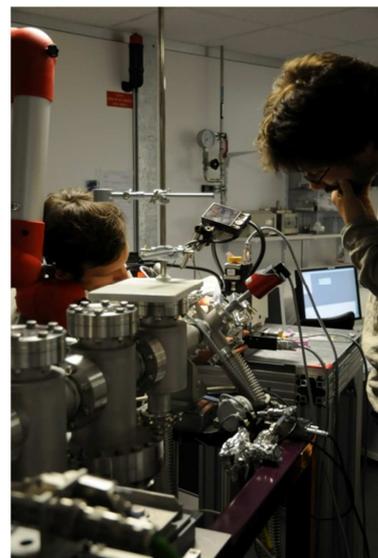
### ➤ *Une aide au montage de projets synchrotron*

L'unité soutient les scientifiques des communautés moins habitués au formalisme des demandes de temps de faisceau propre aux synchrotrons à préciser leurs besoins en expériences synchrotron pour leur sujet de recherche.

### ➤ *Adapter l'échantillon ou... la méthode analytique*

Parce que les échantillons anciens sont la plupart du temps fortement hétérogènes, la phase de préparation de l'échantillon est décisive pour extraire des informations exploitables des analyses. De plus, le temps de faisceau synchrotron étant limité, il est indispensable de connaître au mieux l'échantillon à analyser. C'est pourquoi la plateforme est équipée d'instruments de préparation et de caractérisation permettant de préparer et repérer en amont les zones à analyser.

IPANEMA assure le suivi et la mise en place de ces équipements et de la ligne PUMA, et soutient les travaux menés sur les lignes de lumière. Elle mènera des développements instrumentaux spécifiques pour les projets des scientifiques hébergés sur la plateforme. L'intégration des études de corpus est en soi un défi pour l'expérimentation synchrotron, prise en compte notamment dans le développement de la ligne PUMA.



### ➤ *Un soutien approfondi au traitement des données*

La quantité de données extraites d'une expérience synchrotron est telle que le traitement des données est un enjeu fort pour la plateforme. L'unité propose des méthodes adaptées pour veiller à une exploitation aboutie des jeux de données.

Les travaux menés conjointement conduiront à la diffusion des résultats sous forme de publications, de bases de données de référence, de méthodes et programmes à libre disposition de la communauté.

IPANEMA constituera donc un lieu d'échanges continus, convivial et stimulant.

# Une recherche méthodologique originale

L'hétérogénéité propre aux matériaux anciens, résultant de leur histoire, requiert l'analyse de corpus d'échantillons en imagerie pour pouvoir en extraire une information significative. Les matériaux anciens constituent des systèmes difficilement modélisables. La recherche méthodologique d'IPANEMA vise donc à la construction de stratégies analytiques adaptées à ces matériaux. Deux axes sont poursuivis : le développement de méthodes d'imagerie, et l'analyse de données multivariées de matériaux anciens. Cette recherche méthodologique progresse sous l'impulsion des besoins relatifs à l'étude des matériaux anciens et de leurs particularités. Pour cela, l'unité développe les collaborations nécessaires pour répondre à cette mission majeure, mais aussi pour anticiper les besoins futurs. Elle met à profit le contexte exceptionnel des laboratoires du plateau de Saclay.

## ➤ *Axe Spectroscopie et imagerie de matériaux anciens*

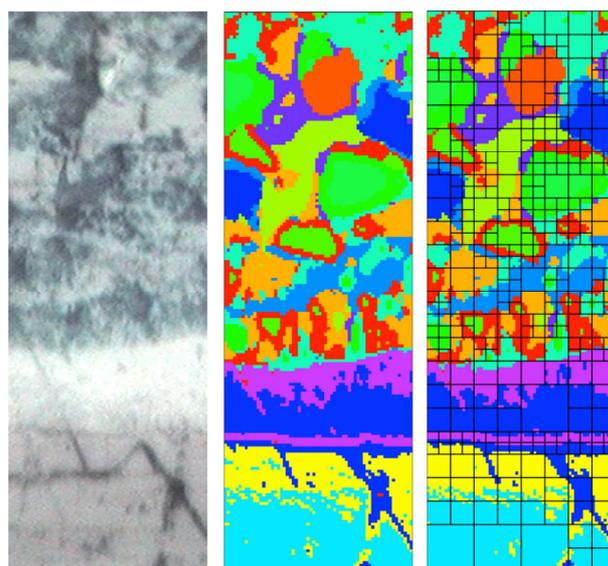
Les expériences synchrotron permettent d'obtenir des informations aussi bien morphologiques, que structurales, chimiques et élémentaires grâce à la résolution énergétique, la faible divergence et l'accordabilité des faisceaux produits. Ces caractéristiques permettent l'utilisation de techniques de spectro-microscopie et de tomographie haute résolution pour comprendre l'hétérogénéité multi-échelle des matériaux anciens. Cet axe s'oriente vers :

- le développement de nouvelles méthodologies d'analyse 2D et 3D;
- la conception de couplages analytiques spécifiques avec pour ambition la caractérisation complète de l'échantillon ;
- la manipulation de l'échantillon et des populations d'échantillons, et leurs environnements d'analyse (notamment pour les études in situ des objets re-crées en vue de l'établissement de systèmes modèles);
- le repérage sur l'échantillon avec des techniques non-invasives.

## ➤ *Axe Données multivariées de matériaux anciens*

Pour exploiter pleinement les quantités de données produites par ces expériences, l'équipe d'IPANEMA poursuit une recherche originale en traitement de données axée sur :

- l'analyse multivariée de données de spectro-microscopie, en vue d'améliorer la qualité des estimations faites à partir de ces données ;
- la systématisation et l'automatisation des traitements, pour rendre possible la caractérisation de corpus d'objets et atteindre la reproductibilité requise pour faire des comparaisons inter-corpus;
- la combinaison de l'information a priori avec les résultats des mesures pour améliorer la qualité des modèles générés, notamment en tomographie ;
- la mise au point d'algorithmes permettant la combinaison de mesures effectuées dans des modalités différentes ;



*Classification des spectres infrarouge pris sur un échantillon de peinture en intégrant un modèle de mélange gaussien (S. Cohen).*

## Formations, vie et diffusion scientifique

Autour d'IPANEMA se mettent en place des formations et une vie scientifique centrée sur l'étude des matériaux anciens. La diffusion des connaissances produites, auprès des communautés scientifiques, comme du grand public, est une des missions de la plateforme.

### ➤ *Un cycle européen : New lights on ancient materials*

Depuis 2004, SOLEIL organise le premier cycle de formation dédié à l'étude synchrotron des matériaux anciens. Tous les trois ans, cette formation, très sollicitée, réunit 30 à 40 jeunes chercheurs avec le soutien d'instances européennes (COST, Commission européenne), du CNRS et des collectivités locales.

### ➤ *Une participation aux formations universitaires*

Les chercheurs d'IPANEMA interviennent dans plusieurs modules de formation universitaire en France et en Europe. Ces interventions favorisent le transfert de connaissances sur les développements méthodologiques synchrotron récents vers les laboratoires d'archéologie, de paléontologie, de science de la conservation et sur les paléo-environnements. La formation est également un axe développé par le laboratoire d'excellence PATRIMA dont IPANEMA est membre depuis sa fondation en 2011.

### ➤ *Diffusion scientifique*

Les résultats des recherches menées sur IPANEMA sont publiés dans des revues de sciences « dures » et de sciences humaines.

Les groupes de travail qui ont contribué à la définition d'IPANEMA ont insisté sur le rôle que doit jouer la plateforme dans l'hébergement de bases de données de référence.

IPANEMA accueille et organise des événements scientifiques à portée internationale (colloques, ateliers thématiques, séminaires). Par exemple, en 2009 et 2011, deux colloques ont rassemblé les communautés pour la définition scientifique et technique d'IPANEMA et de la nouvelle ligne de lumière PUMA optimisée pour les matériaux anciens.



### ➤ *Diffusion auprès du grand public*

IPANEMA a la volonté de partager avec différents publics les résultats de ses recherches à l'interface entre les disciplines suivantes : physique, chimie, mathématique appliquée, sciences des matériaux et sciences humaines. Par exemple, les Journées européennes du Patrimoine ont été l'occasion en 2009 d'ouvrir le synchrotron à des visites thématiques en collaboration avec l'association ArkéoMédia.



Les méthodes d'analyse synchrotron (fluorescence, diffraction, diffusion aux petits angles, absorption, microscopie, tomographie de rayons X, microscopie infrarouge, imagerie UV...) complètent celles de laboratoire lorsqu'une résolution plus fine, des données quantitatives ou une sélectivité chimique précise en imagerie sont recherchées. Les demandes sont principalement dirigées vers les méthodes de micro-imagerie (X et infrarouge), d'absorption, spectroscopie et de diffraction de rayons X. À terme, SOLEIL offrira également l'accès aux méthodes de micro-tomographie de rayons X.

## ➤ *Micro-spectroscopie et imagerie 2D IR, UV, visible et X*

Les microfaisceaux infrarouge, UV/visible et de rayons X, d'un diamètre de l'ordre du micromètre ou inférieur sont employés soit pour des analyses ponctuelles sur micro-prélèvements soit pour l'acquisition de cartographies de balayage et d'images 2D (voire 3D). De telles cartes permettent d'accéder à la composition, la chimie locale et la structure à une échelle du micromètre, informations cruciales pour la compréhension des matériaux pour l'étude de leur vieillissement et des traitements qui leur sont (ou ont été) appliqués. Le couplage des différentes informations spectroscopiques et structurales est un enjeu majeur pour faire face à l'hétérogénéité des matériaux anciens.

## ➤ *Imagerie 3D par tomographie de rayons X*

Certaines spécificités du rayonnement synchrotron (monochromaticité, très forte intensité, faisceau quasi-parallèle et cohérence) sont particulièrement adaptées à l'étude tomographique d'échantillons difficiles à imager à l'aide d'équipements conventionnels de laboratoire. En particulier, l'effet de 'durcissement de faisceau' dû à la polychromaticité des sources de rayons X de laboratoire est supprimé et le contraste de matériaux relativement homogènes en densité peut être fortement augmenté en mode 'contraste de phase'. De nombreux travaux récents sur les lignes de tomographie synchrotron ont porté sur des spécimens paléontologiques.

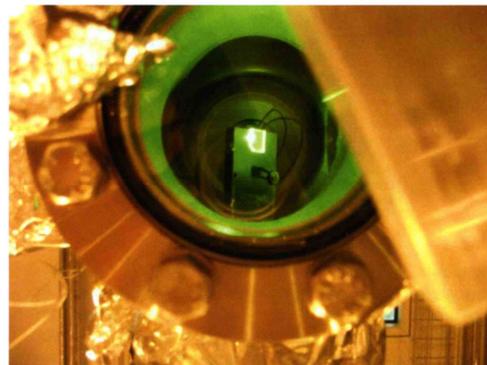
## ➤ *Absorption et diffraction de rayons X*

Les méthodes d'absorption de rayons X (EXAFS, XANES) sont employées afin de déterminer les environnements électroniques et atomiques d'un élément chimique. En archéométrie, histoire de l'art ou en conservation, ces méthodes permettent de déterminer précisément l'environnement d'atomes donnés, pour confirmer leur état d'oxydation ou pour identifier un composé chimique à partir de références.

La diffraction de rayons X permet d'identifier les constituants cristallins d'un échantillon (poudre, coupe mince, échantillons massifs) ou de déterminer la structure à l'échelle atomique d'un composé cristallin. L'analyse poussée permet d'accéder à la taille des domaines cristallins, à la texture (orientation préférentielle), aux défauts de structure, etc. et peut ainsi révéler des traitements thermiques ou mécaniques (cuisson, martelage...). Les exemples dans le domaine du patrimoine portent notamment sur le suivi in-situ de la préparation de pigments, l'analyse de poudres cosmétiques anciennes, etc. La diffusion de rayons X aux petits angles est principalement employée pour déterminer l'organisation 'supramoléculaire' et identifier des fibres anciennes (protéines, cellulose...) dans les textiles, parchemins, papiers anciens et restes d'origine humaine, ou afin de déterminer la distribution de pores dans un échantillon.

### ➤ *Analyse in situ*

La brillance du faisceau synchrotron permet de suivre en temps réel l'évolution de systèmes soumis à des sollicitations (température, traitement chimique). Un outil clé pour comprendre les méthodes de fabrication du passé ou suivre le processus d'altération des objets archéologiques.



## Quelques travaux déjà effectués à SOLEIL sur les matériaux anciens

De nombreuses recherches ont déjà été menées à SOLEIL sur les matériaux anciens.

### ➤ *Sur la piste du fer médiéval*

Il y a plusieurs centaines d'années, quand nos ancêtres transformaient du minerai de fer pour fabriquer un objet de la vie quotidienne ou des matériaux de construction, ils nous laissaient d'infimes indices de leurs savoir-faire et de leurs modes de vie.

Plusieurs lignes de lumière synchrotron européennes (dont DIFFABS à SOLEIL) ont permis de mener une analyse non destructive en micro-fluorescence X de petites inclusions au sein d'objets ferreux de différents sites des régions pyrénéennes et alpines, grands centres médiévaux de production. Ces travaux ouvrent la voie à une compréhension globale des circuits d'échange de ces matériaux aux époques anciennes, chose impossible jusqu'à ce jour.

### ➤ *La décoloration du pigment bleu de smalt*

Le smalt était l'un des pigments bleus les plus communément utilisés par les artistes entre les 16<sup>e</sup> et 18<sup>e</sup> siècles. Ce pigment est hélas instable et tend à se décolorer au cours du temps. Des scientifiques d'IPANEMA, du synchrotron SOLEIL, de la National Gallery de Londres et du C2RMF (CNRS/ Ministère de la Culture et de la Communication), du Louvre ont résolu en 2011 l'énigme chimique de cette décoloration, décrite depuis quatre siècles. Ces résultats ont été obtenus grâce à l'analyse synchrotron par micro-absorption X (ligne LUCIA) et micro-spectroscopie infrarouge (ligne SMIS) de micro-échantillons prélevés sur des toiles du peintre baroque Murillo et d'autres artistes.

### ➤ *La détérioration des parchemins médiévaux par les encres ferro-galliques*

Du Moyen-âge au début du 20<sup>e</sup> siècle, l'encre ferro-gallique est l'encre qui a été la plus utilisée en occident. Elle est constituée de sels de fer, de gomme arabique et de noix de galle, des excroissances d'arbres riches en tanin. Mais ce type d'encre ne fait pas toujours bon ménage avec le papier...Principal constituant incriminé dans cette dégradation, le fer. D'autres facteurs comme l'acidité de l'encre, la composition du papier ou encore l'humidité pourraient favoriser l'action corrosive du fer. L'équipe Franco-belge menée par Véronique Rouchon et Koen Janssens a mis à contribution 3 lignes de lumières du synchrotron SOLEIL : DIFFABS, SMIS et SWING. À l'issue de ces travaux, les chercheurs en savent un peu plus sur le processus d'altération des documents par les encres ferro-galliques et contribuent à l'amélioration des techniques de restauration.



Restauration de parchemins anciens (D.R.)

### ➤ *Le vernis des Stradivarius à la lumière de SOLEIL*

Le vernis utilisé par Antonio Stradivarius, le légendaire luthier italien, pour revêtir ses prestigieux instruments, fait depuis plus de deux siècles l'objet de multiples hypothèses et controverses. Les travaux portant sur le vernis des Stradivarius ont été effectués par microscopie infrarouge sur la ligne synchrotron SMIS par une équipe de la Cité de la Musique (Jean-Philippe Echard). Pour la première fois, cette étude nous apprend que Stradivarius employait des matériaux de base courants à son époque, en particulier un vernis constitué de deux très fines couches : La première couche, simplement à base d'huile, similaire à celle des artistes-peintres, pénètre légèrement le bois de l'instrument. La seconde couche est un mélange d'huile et de résine de pin. Stradivarius y a incorporé différents pigments utilisés en peinture. La technique de Stradivarius, qui semble s'inspirer de celles des peintres pourrait donc expliquer la chatoyance des reflets et la texture des bois vernis des violons qui l'ont rendu célèbre.

### ➤ *Mise au point d'une nouvelle méthode d'imagerie UV/visible synchrotron des matériaux du patrimoine et de l'archéologie*

Employées depuis des décennies par les restaurateurs et scientifiques des musées, les techniques de luminescence ultraviolette permettent une analyse, le plus souvent qualitative, des matériaux de l'art et du patrimoine. En exploitant les possibilités d'analyse de la ligne de lumière DISCO, une nouvelle approche vient d'être mise au point pour caractériser la luminescence des matériaux anciens comme par exemple le pigment blanc de zinc. Utilisé en pharmacie depuis l'Antiquité, introduit comme pigment à la fin du 18<sup>e</sup> siècle et utilisé dans les arts graphiques tels que l'aquarelle ou la peinture à l'huile, seul ou en mélange. Nous sommes en pleine période impressionniste et Van Gogh par exemple sera très utilisateur de cet oxyde. Parfois à l'état de constituant mineur, le blanc de zinc peut être difficile à identifier sans ambiguïté, même au microscope électronique à balayage. Un des enjeux consiste à détecter sa présence lorsqu'il est mélangé, parfois en infimes quantités, à du blanc de plomb. Il s'agit de la première utilisation de cette méthode synchrotron sur des matériaux anciens.

SOLEIL est le centre français de production et d'exploitation de lumière synchrotron pour l'étude de la matière.

Inauguré le 18 décembre 2006, SOLEIL est une source de rayonnement synchrotron de troisième génération.

Installation de très haute technologie, le synchrotron SOLEIL est à la fois une machine qui produit un rayonnement dont la brillance surpasse toutes les autres sources de lumière et un laboratoire de recherche à la pointe des techniques expérimentales.

Le synchrotron SOLEIL aura accueilli l'ensemble de la communauté scientifique française et internationale. Il a fallu cinq années pour mettre au point cet équipement de très haute technologie implanté sur le plateau de Saclay au cœur d'un environnement scientifique de très haut niveau. Le programme expérimental prévoit à terme la mise à disposition de 2 lignes de lumière (en incluant PUMA), avec une moyenne de 2 000 utilisateurs par an.



## ► *Ses applications*

Physique, chimie, sciences des matériaux, électronique, sciences du vivant, médecine, sciences de la terre et de l'atmosphère, environnement, agroalimentaire, cosmétique, pharmacie, matériaux anciens ... Les recherches qui y sont menées sont d'une aussi grande diversité que les domaines qu'elles couvrent. Si les centres de rayonnement synchrotron sont très complémentaires des autres dispositifs d'exploration de la matière, ils offrent aux scientifiques un panel de techniques spécifiques très large et sont aujourd'hui les sources de lumière les plus performantes.

## ► *SOLEIL : 5 partenaires de premier plan*

Un projet de l'envergure scientifique et technologique de SOLEIL a pu voir le jour grâce au soutien de partenaires convaincus et engagés à ses côtés dès le début du processus. Ils sont actuellement au nombre de 5 à s'investir activement dans la vie de SOLEIL : le CNRS et le CEA – les deux plus grands organismes de recherche français – la Région Île-de-France, le Conseil général de l'Essonne et la Région Centre – 3 collectivités territoriales de premier plan.

SOLEIL est un espace de recherche, qui se veut également espace de dialogue avec les scientifiques, les industriels mais aussi le grand public.

Un synchrotron produit une lumière extrêmement brillante employée pour percer les secrets les plus intimes de la matière.

Au service des scientifiques comme des industriels, cette installation de très haute technologie offre les moyens d'investigation désormais indispensables aux chercheurs.

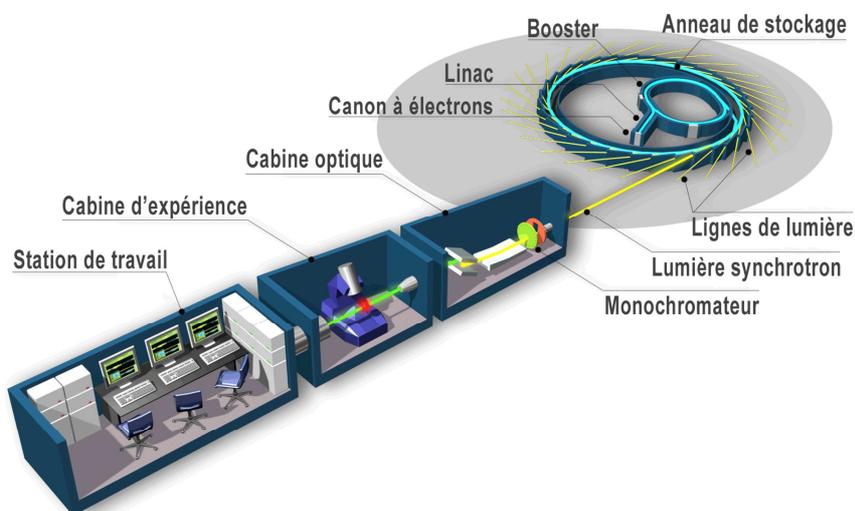
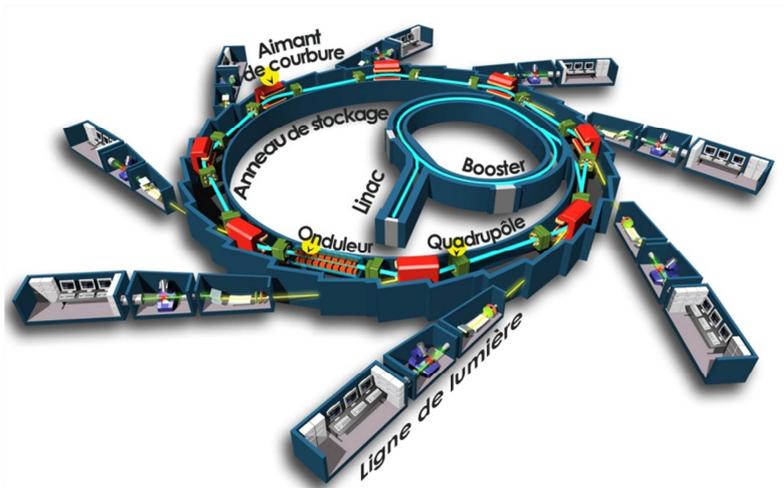
Des électrons de très haute énergie sont soumis à l'action d'un champ magnétique pour courber leur trajectoire. Ils perdent alors de leur énergie, libérée sous la forme d'un rayonnement lumineux.

Cette lumière, 10 000 fois plus intense que la lumière solaire, est émise de l'infrarouge aux rayons X, en passant par les ultraviolets visibles.

Les photons émis viennent frapper un échantillon (objet, matière ou molécule) et permettent ainsi d'étudier ses propriétés physiques et chimiques et sa morphologie en surface ou en volume.

Les spécificités du synchrotron sont : sa gamme étendue de longueur d'onde, son intensité, sa stabilité, sa cohérence... Ces spécificités sont des atouts de premier plan pour mieux comprendre les propriétés de matériaux de tous types.

L'utilisation du rayonnement du synchrotron de SOLEIL concerne un très large ensemble d'activités tant en recherche fondamentale qu'en recherche appliquée ou industrielle : La physique, la biologie et la santé, l'environnement, les matériaux, la chimie et les cosmétiques, la géosciences ainsi que... les matériaux anciens.



# Les étapes clés d'un projet de grande envergure

	Administratif	Vie scientifique	Bâtiment et équipements	Résultats principaux
<b>2011</b>	<p><b>Été 2011</b> Annonce par le CNRS de la mise en place de l'unité mixte de service et de recherche sur évaluation positive du Comité National</p>	<p><b>25 mars 2011</b> Lancement du laboratoire d'excellence PATRIMA</p> <p><b>17 et 18 janvier 2011</b> <b>Colloque IPANEMA 2011</b> Rayonnement synchrotron pour les matériaux anciens</p>	<p><b>16 septembre 2011</b> Pose de la première pierre d'IPANEMA</p> <p>Lancement des appels d'offre de la construction du bâtiment d'IPANEMA</p>	<p>Compréhension des mécanismes d'altération du pigment <b>smalt</b></p> <p>Suivi de la <b>diffusion du fer médiéval</b> par l'étude de micro-inclusions</p>
<b>2010</b>	<p><b>10 juin 2010</b> Signature d'un accord de partenariat avec la Smithsonian Institution</p> <p><b>Mars 2010</b> NWO soutient l'accès à IPANEMA dans le cadre du programme Science4arts</p> <p><b>1<sup>er</sup> janvier 2010</b> Création de l'unité UPS IPANEMA</p>	<p><b>13 septembre 2010</b> Première réunion du Conseil scientifique d'IPANEMA (3 à ce jour)</p>	<p><b>Phase de travaux préparatoires</b> sur le site d'IPANEMA</p> <p><b>9 juillet 2010</b> Validation de l'APD du bâtiment d'IPANEMA</p>	<p>Première utilisation de la <b>luminescence UV /visible synchrotron</b> sur des matériaux anciens</p> <p>Étude de la <b>fossilisation des os</b> en milieu archéologique</p>
<b>2009</b>	<p><b>1<sup>er</sup> octobre 2009</b> La Commission européenne soutient l'accès à IPANEMA dans le cadre du programme européen CHARISMA</p>	<p><b>6 et 7 mai 2009</b> <b>Colloque IPANEMA 2009</b> Une ligne optimisée pour les matériaux anciens</p>	<p><b>Décembre 2009</b> Cas scientifique de PUMA validé par le Conseil scientifique de SOLEIL.</p>	<p>Elucidation de la recette des vernis <b>d'A. Stradivari</b></p>
<b>2008</b>	<p><b>30 mai 2008</b> Premier Comité de pilotage d'IPANEMA (9 à ce jour)</p>	<p><b>Février, Avril et Juin 2008</b> Réunions des groupes de travail d'IPANEMA</p>	<p><b>8 décembre 2008</b> Validation de l'APS du bâtiment d'IPANEMA</p> <p><b>Juillet 2008</b> Premières acquisitions d'équipement. Début des calculs optiques de la ligne PUMA.</p>	<p><b>Janvier 2008</b> Premiers travaux soutenus sur SOLEIL</p>
<b>2007</b>	<p><b>27 mars 2007</b> Signature du Contrat de projets Etat-région lançant IPANEMA</p> <p><b>30 janvier 2007</b> Présentation au conseil de SOLEIL</p>	<p><b>Consolidation du projet</b> par échange avec les équipes de recherche</p>	<p>Aménagement de locaux temporaires pour installer les équipements d'IPANEMA et mener les premiers travaux</p> <p>Préparation du cahier des charges de maîtrise d'œuvre de la construction</p>	
<b>2006</b>	<p><b>Dépôt du dossier CPER IPANEMA</b></p>			
<b>2004</b>	<p><b>Création d'HALO</b> (Heritage and ARchaeology Liaison Office) permettant de rassembler les communautés</p>			

IPANEMA UPS 3352 CNRS, SYNCHROTRON SOLEIL  
L'Orme des Merisiers – Saint-Aubin – BP 48 – 91192 GIF-SUR-YVETTE CEDEX  
E-mail : [ipanema@synchrotron-soleil.fr](mailto:ipanema@synchrotron-soleil.fr)  
Téléphone : 01 69 35 97 80  
[www.synchrotron-soleil.fr/ipanema/premierepierre](http://www.synchrotron-soleil.fr/ipanema/premierepierre)