



## **« Les technologies du CEA au service du patrimoine »**

**Petit-déjeuner de presse – 19 décembre 2006**

### **SOMMAIRE**

<b>Introduction</b>	<b>p 1</b>
<b>La magnéto­métrie au CEA</b>	<b>p 2</b>
<b>ARC-Nucléart : conservation et restauration du patrimoine</b>	<b>p 7</b>
<b>Les technologies 3D pour l'art et le patrimoine</b>	<b>p 14</b>
<b>Les « archéomatériaux »</b>	<b>p 16</b>
<b>L'analyse de peintures rupestres par fluorescence X</b>	<b>p 19</b>
<b>La gammagraphie : étude de la structure interne d'œuvres d'art</b>	<b>p 22</b>
<b>Les neutrons percent les secrets des haches étrusques</b>	<b>p 24</b>
<b>Le carbone 14 et la datation de l'art préhistorique</b>	<b>p 27</b>

## Introduction

Le Grand Palais accueille tout au long de l'hiver 2006-2007 l'exposition « Trésors engloutis d'Égypte », consacrée aux découvertes de l'archéologue sous-marin Franck Goddio dans la baie d'Aboukir et le port d'Alexandrie. Plus de 500 pièces exceptionnelles ont été extraites des fonds marins égyptiens, grâce, notamment, à des technologies de magnétométrie développées par le CEA dans les années 1990.

L'équipe de M. Goddio fait au CEA l'honneur de mettre en avant ce savoir-faire, en y consacrant un espace en marge de l'exposition.

Régulièrement, certains laboratoires du CEA mettent en effet à disposition des musées, des archéologues ou des professionnels de l'art leurs compétences et leurs instruments, issus des technologies du nucléaire et de la recherche fondamentale associée.

Ces collaborations illustrent l'engagement du CEA vis-à-vis de domaines de recherche a priori éloignés et, de ce fait, le caractère très « diffusant » des technologies développées pour le nucléaire.

Nous vous présentons dans ce dossier un aperçu de ces technologies développées au CEA dont l'apport se révèle décisif pour les professionnels du patrimoine. Nous y présentons également les études du CEA sur la magnétométrie : après le transfert de technologies effectué pour son utilisation en archéologie sous-marine, la magnétométrie constitue toujours un domaine important de recherche appliquée, pour d'autres types d'utilisations.

### Intervenants

- **Alain Bugat** – Administrateur général du CEA
- **Franck Goddio** – Directeur de l'IEASM (Institut européen d'archéologie sous-marine)
- **Pierre Vaudaine** - Directeur d'ARC-Nucleart ;  
Laboratoire dédié à la restauration et à la conservation d'objets du patrimoine
- **Laurent Letellier** - Chercheur au CEA-List (Laboratoire d'intégration des systèmes et des technologies) ;  
Reconstitution d'œuvres 3D, modélisation 3D en architecture
- **Philippe Dillmann** : Chercheur au CEA-Drecom (Département de recherche sur l'état condensé, les atomes et les molécules) – Laboratoire Pierre Süe ;  
Archéomatériaux et prévision de l'altération des matériaux archéologiques

## La magnétométrie au CEA Une technologie aux applications multiples

### Qu'est-ce que la magnétométrie ?

La Terre est entourée d'un champ magnétique. Selon un modèle simplifié, notre planète peut être vue comme un aimant dont les pôles seraient reliés par des courbes appelées lignes de champ magnétique formant une enveloppe.

Sous la surface de la Terre se cache un océan essentiellement constitué de fer liquide, il représente 16% du volume de la planète. Le champ magnétique terrestre naît des mouvements qui animent cet océan, conducteur d'électricité.

La magnétométrie mesure les composantes du champ magnétique terrestre, qui ne sont pas perceptibles pour l'homme, ce qui permet de le caractériser et de le cartographier.

Lithosphère  
Manteau  
Noyau externe  
Noyau interne

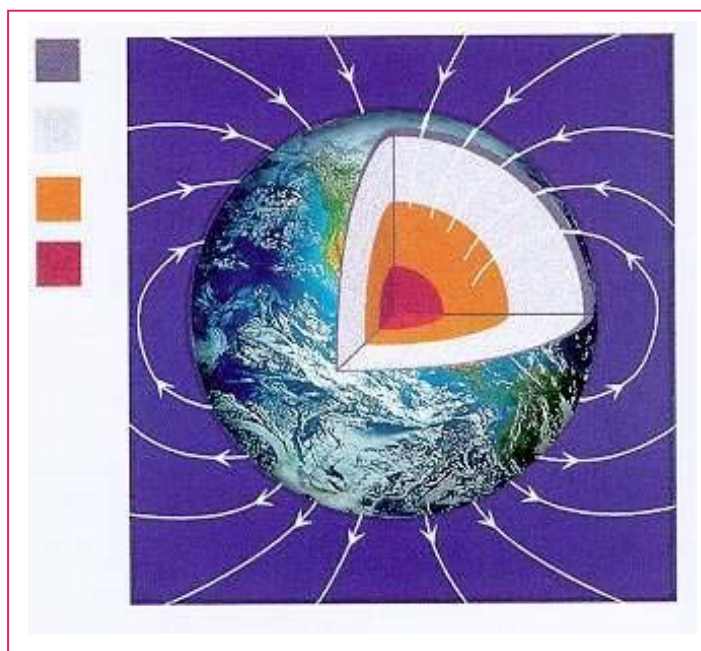


illustration du champ magnétique terrestre

A partir de l'étude des perturbations du champ magnétique, de multiples applications sont envisageables : détection de sous-marins, d'épaves ou d'objets enfouis (canalisations, mines...), recherche minière, pétrolière, aquifère, volcanologique ou archéologique.

### Principe de fonctionnement d'un magnétomètre

Au-delà des technologies utilisées, on distingue deux types de magnétomètres : les magnétomètres dits « scalaires » permettent de définir la valeur du champ mesuré (en Teslas). Les magnétomètres dits « vectoriels » permettent d'obtenir cette même valeur avec également la projection du champ magnétique dans l'espace. Dans ce cas, la mesure est plus complète, la direction du champ magnétique étant connue. Selon le type d'application visée, l'usage d'un type de magnétomètre est privilégié, les contraintes d'utilisation étant également différentes.

Parmi les magnétomètres développés au Léli (Laboratoire d'électronique et des technologies de l'information) du CEA Grenoble, les magnétomètres à Résonance Magnétique Nucléaire (RMN) sont les plus connus.

C'est ce type de magnétomètre qui a été utilisé par l'équipe de Franck Goddio pour les fouilles sous-marines dans la baie d'Aboukir et le port d'Alexandrie.

Les magnétomètres RMN exploitent le comportement des noyaux d'hydrogène, qui ont leur propre mouvement magnétique, appelé 'Spin'. Le Spin se comporte comme une petite aiguille aimantée, dont l'orientation dépend du champ magnétique. En présence d'un champ magnétique, ces 'aiguilles' se mettent à tourner autour de l'axe du champ dans un mouvement dit de précession, comme le ferait une toupie autour de son axe de rotation. L'orientation de ces 'aiguilles' diffère de celle du champ et traduit des états énergétiques différents.

Ce sont ces changements d'état énergétique que vont mesurer les magnétomètres RMN.

La détection se fait par un capteur contenant un liquide, dont la concentration en protons et en électrons a été artificiellement modifiée afin d'obtenir un signal mesurable (cette phase est appelée « polarisation dynamique »). Un montage électronique permettra ensuite d'amplifier ce signal.

La réputation de la RMN développée au Léli réside dans la capacité de mesure de très faibles variations du champ, ainsi que dans la possibilité d'utiliser le magnétomètre quelle que soit l'orientation du capteur.

### La prospection magnétique en pratique

En raison des multiples sources magnétiques, la mise en œuvre dans le domaine de l'archéologie nécessite l'usage de plusieurs capteurs. Typiquement, le dispositif de mesure est constitué de deux magnétomètres synchronisés : un premier capteur est fixé à une station de référence, le second, mobile, se déplace avec un opérateur.

Le signal, ou 'anomalie' détectée, résulte de la différence de ces mesures. L'acquisition de tous les profils et la constitution de modèles permet de cartographier les variations du champ.

illustration d'une mesure magnétométrique



## Histoire de la magnétométrie au CEA

Dès l'origine, l'œuvre scientifique du Professeur Louis Néel (Prix Nobel de physique et fondateur du centre CEA de Grenoble) se distingue dans le domaine du magnétisme. Ce sera l'une des toutes premières activités du centre. Dans les années 1960, les premiers magnétomètres à Résonance Magnétique Nucléaire (RMN) voient le jour et c'est dans le domaine de la défense que la magnétométrie trouve ses premières applications.

Des besoins pour la lutte anti-sous-marine et la protection des côtes naissent les premiers appareils embarqués dans des avions de surveillance. Ces équipements exploitent la détection magnétique MAD (Magnetic Anomaly Detection) pour mesurer l'anomalie magnétique que représente le déplacement d'un sous-marin dans le champ magnétique terrestre.

En 1991, la Délégation Générale pour l'Armement (DGA) confie au CEA-Léti la réalisation de magnétomètres RMN de très grande résolution et commande la cartographie d'une zone de 100 km<sup>2</sup> au large de Toulon, afin de valider un concept de détection sous-marine.

Destinée dans un premier temps aux applications militaires, la magnétométrie trouve également de nombreuses applications dans le domaine civil durant les années 1970. Aidée par les progrès réalisés en électronique, notamment dans les circuits intégrés et en matière de traitement du signal, la magnétométrie est exploitée dans le domaine médical, et surtout pour la recherche minière, pétrolière, aquifère, volcanologique et archéologique. Les sondes sont certes embarquées à bord d'avions, de bateaux, mais également tractées au bout d'un câble sous un hélicoptère voire suspendues sous un ballon.

### **A la recherche de trésors archéologiques**

Qu'il s'agisse de prospections terrestres ou maritimes, nombreux sont les exemples de travaux à des fins archéologiques :

Dès 1982, des prospections magnétiques sont réalisées sur l'île de Batz (Finistère) pour la localisation d'un four préhistorique. En effet, la présence de sédiments remaniés ou transformés par les activités anthropiques passées, peut modifier localement la valeur de la susceptibilité magnétique. L'importation de terre extérieure ou encore l'érosion des minéraux magnétiques par les processus chimiques au cours de la décomposition de la matière organique sont généralement à l'origine de variations locales de susceptibilité.

Autre exemple, en 1987, la magnétométrie est déployée sur le site d'une grotte préhistorique en Ardèche.

Mais c'est dans le domaine maritime que les expéditions phares ont été menées, utilisant ainsi les générations successives des magnétomètres du CEA-Léti.

En juillet-août 1985, une campagne de mesures franco-américaine menée dans l'Atlantique Nord a pour objet la localisation de l'épave du Titanic. C'est au terme de cette mission que les premiers signaux prometteurs apparaissent, participant au repérage de l'épave du paquebot un mois plus tard. Au cours de l'année 1986, les équipes du CEA déploient leurs dispositifs de mesure à la recherche de galions du XVI<sup>ème</sup> siècle dans le bassin d'Arcachon et la rade de Calvi. Durant ces campagnes, les dernières générations de sondes RMN sont utilisées dans des prototypes submersibles.

La prospection archéologique menée par le CEA permet également en décembre 1990 la découverte de l'épave de La Méduse, une frégate disparue en juillet 1816 au large des côtes mauritaniennes.

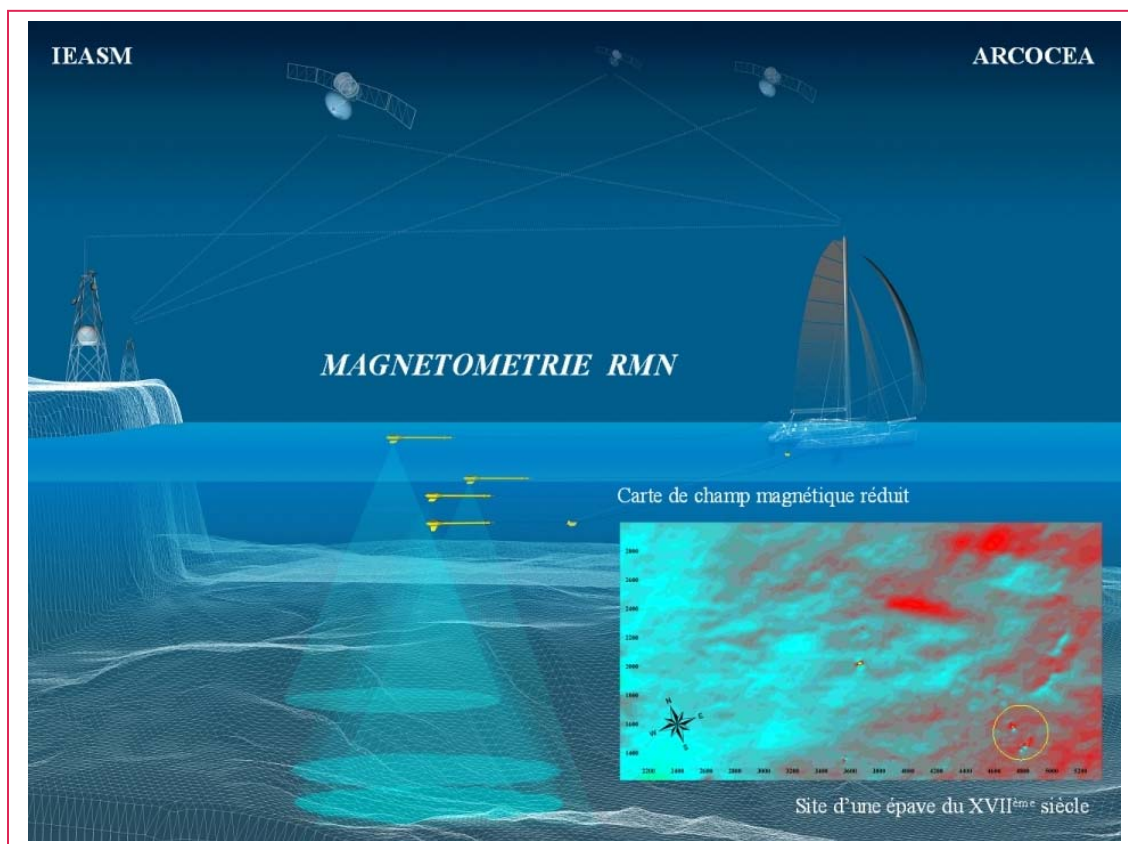
En 1990-1991, les magnétomètres développés au Léli et leur électronique associée font l'objet d'un partenariat avec l'IEASM (Institut Européen d'Archéologie Sous-Marine), fondé par Franck Goddio. C'est en Mer de Chine qu'ils permettent, entre autres, la découverte du San-Diego, une épave espagnole naufragée en décembre 1600, dans l'Archipel des Philippines. Ce trésor riche de plus de 1500 objets (monnaie, bijoux, vaisselle, astrolabe, boussoles...) a fait l'objet d'une exposition à Paris en 1994.

En 1992, le CEA et l'IEASM signent un accord de licence de 20 ans dans le domaine de la magnétométrie RMN, accompagné d'un transfert de technologie. Ce transfert de technologie donne naissance à la société Arcocea, start up fondée par deux ingénieurs du CEA\Léli. Arcocea continue aujourd'hui son activité pour l'IEASM.

La mise en œuvre des magnétomètres en milieu marin impose de très fortes contraintes d'utilisation. L'usage d'une annexe amagnétique est nécessaire pour s'affranchir des effets induits par une coque métallique de bateau.

Ces principales missions menées dans le domaine de la prospection archéologique ont pu être réalisées après de longs efforts technologiques initiés dès les années 1960 pour en faire des instruments de haut niveau. Les critères choisis comme axe de développement ont été la résolution, la précision du capteur et son isotropie (performances invariantes quelle que soit l'orientation du capteur).

Depuis, les magnétomètres RMN utilisés n'ont pas fondamentalement évolué, du fait de leur qualité originelle, de leur robustesse et de leur durée de vie. Cette technologie a essentiellement progressé au niveau du traitement du signal et de l'acquisition des données.



**illustration de fouilles sous-marines à l'aide de magnétomètres  
(image Arcocea – IEASM)**

## Vers une nouvelle génération de magnétomètres

A partir de 1987, de nouveaux capteurs ont été développés, contrairement aux sondes RMN, à partir d'un milieu gazeux actif. Cette génération de magnétomètres se caractérise par une cellule remplie d'Hélium qui constitue l'élément sensible de la sonde. La tête de mesure comporte notamment un laser, qui est utilisé pour faire un pompage optique.

Cette nouvelle technologie offre une sensibilité supérieure à celle des capteurs RMN. Ces dispositifs offrent également une bande passante plus élevée et sont exempts d'effets gyromagnétiques dans une utilisation courante, ce qui en fait un intérêt majeur dans le domaine de la métrologie.

Actuellement, les activités dans ce domaine se concentrent autour d'un projet pour le spatial qui vise à équiper trois satellites SWARM en constellation pour la cartographie du champ magnétique terrestre dès 2009. Ce projet fait suite à deux premiers satellites Oersted et CHAMP qui ont été équipés de magnétomètres RMN et dont les mesures sont exploitées depuis leur lancement en 1999 et 2000. Cette nouvelle mission vise à réaliser une étude fine du champ magnétique terrestre et de ses variations (magnétosphère, ionosphère, courants océaniques) afin de mieux comprendre les mouvements internes du globe et de sa dynamique.

### **ARCHEOscan : nouveau projet pour l'archéologie**

Au cours de l'année 2006, avec le soutien de la Direction de la Recherche Technologique du CEA, une étude de faisabilité a été initiée sur le thème de la prospection archéologique du sous sol. L'objectif vise à développer un outil d'auscultation du sol afin de détecter les vestiges archéologiques enfouis –notamment les vestiges en bois humide (spécificité du laboratoire ARC-Nucléart)– et permettant de reconnaître la forme des objets et de les localiser sans les déterrer. Ces recherches sont aidées par de nouvelles technologies qui placent les magnétomètres du Légi à des niveaux de résolution où les objets, en bois par exemple, deviennent détectables au même titre que des objets magnétiques. Parmi les méthodes géophysiques couramment employées, la magnéto-métrie et notamment les nouvelles générations de capteurs hélium offrent donc des perspectives encourageantes pour la prospection archéologique.

## ARC-Nucléart, Conservation et restauration du patrimoine

ARC-Nucléart, implanté sur le site du centre CEA de Grenoble, est un atelier de conservation et de restauration d'objets du patrimoine culturel, de toutes époques et de toutes provenances. Doté d'une équipe pluridisciplinaire de 16 personnes associant ingénieurs physiciens et chimistes, techniciens, restaurateurs et un conservateur, l'Atelier Régional de Conservation a pour missions essentielles de :

- réaliser les traitements nécessaires à la consolidation, au séchage, à la restauration, la désinfection et la désinsectisation d'objets en matériaux organiques secs et gorgés d'eau, en bois ou en cuir, cordages ou vanneries,
- effectuer des recherches afin d'étudier les matériaux et de développer les méthodes les mieux adaptées au traitement des objets et des collections,
- informer les milieux de la culture et le grand public des techniques développées pour la conservation du patrimoine,
- entreprendre des actions de formation par la recherche, accueillir des stagiaires et des jeunes chercheurs,

C'est en 1970 que le laboratoire Nucléart du CEA de Grenoble a commencé à **appliquer la technologie des rayonnements gamma à la conservation du patrimoine culturel** en traitant le parquet marqueté du XVIII<sup>e</sup> siècle de l'ancien hôtel de ville de Grenoble.

Depuis plus de 35 ans, une grande partie de l'activité du laboratoire, devenu en 1997 groupement d'intérêt public à vocation culturelle (GIPC) ARC-Nucléart, a été consacrée à la conservation des bois et cuirs archéologiques gorgés d'eau. Le GIPC est constitué entre l'Etat - Ministère de la Culture et de la Communication, la Ville de Grenoble, la Région Rhône-Alpes, le CEA et l'Association pour le développement du programme Nucléart, PRO-Nucléart.

Aujourd'hui, l'activité d'archéologie liée aux vestiges sous-marins ou extraits des lacs et rivières est toujours prépondérante au laboratoire : début 2006, une vingtaine d'embarcations, entières ou fragmentées, étaient présentes dans les locaux d'ARC-Nucléart à différents stades de traitement. L'atelier traite également depuis plusieurs années une collection très riche en pièces d'accastillage et objets de la vie à bord des bateaux, issus des fouilles des épaves corsaires de La Natière, coulées au large de Saint-Malo au XVIII<sup>e</sup> siècle. En juin 2005 a été inaugurée à Douarnenez l'exposition « La mer pour mémoire », réalisée par le DRASSM<sup>1</sup> et l'association Buhez (musées et écomusées de Bretagne), qui réunit 550 pièces majeures issues de plus de 40 épaves, pour la restauration desquelles ARC-Nucléart a été fortement sollicité.

Par ailleurs, l'activité bois secs et sculptures polychromes se développe au sein du laboratoire. En août 2006, cette activité a fourni une occasion pour le laboratoire d'intervenir directement à l'étranger avec la méthode Nucléart, en l'occurrence sur une sculpture de l'époque Maya conservée à Mexico (voir plus loin).

---

<sup>1</sup> Département des recherches archéologiques subaquatiques et sous-marines – ministère de la Culture

Au total en 2006, une centaine de collections archéologiques ou de sculptures réparties en France ont fait appel aux procédés de traitement d'ARC-Nucléart. L'atelier est également intervenu sur des objets provenant de Chine, d'Italie et de Mongolie.

### Les procédés utilisés

#### **Le procédé Nucléart**

ARC-Nucléart utilise les propriétés du rayonnement gamma pour désinsectiser d'une part, consolider d'autre part des matériaux poreux par une résine radiodurcissable, qui s'applique aux objets du patrimoine culturel en bois gorgé d'eau et en bois sec.

Le procédé de consolidation consiste à imprégner le matériau par une résine liquide radiodurcissable qui pénètre sa structure, et à la durcir grâce à une exposition aux rayonnements gamma. Le processus comprend donc deux phases distinctes : l'imprégnation et le durcissement.



**Statues en cours de désinsectisation**

**Pour les bois gorgés d'eau**, l'imprégnation de résine est réalisée dans une cuve, à pression atmosphérique. L'eau contenue dans le bois est d'abord remplacée par l'acétone, avec une série de bains successifs de concentration croissante. Quand le bois est gorgé d'acétone, celui-ci est remplacé à son tour par de la résine styrène polyester radiodurcissable, par le même principe des bains successifs.

**Pour les bois secs ou les matériaux poreux**, l'objet est placé dans un autoclave. Un vide partiel permet d'extraire l'air contenu dans l'objet. Celui-ci est ensuite immergé dans la résine qui pénètre le matériau. Une surpression d'azote facilite l'imprégnation. Ce processus assure une imprégnation de la résine au cœur du bois.

Après avoir retiré l'objet du bain d'imprégnation, la polymérisation de la résine est obtenue par action du rayonnement gamma sur les molécules de styrène polyester. Cette opération s'effectue dans une cellule d'irradiation.

Les dimensions de la pièce à consolider sont limitées par celles du dispositif d'irradiation et des autoclaves d'imprégnation.

Le durcissement de la résine renforce ainsi la structure du matériau. En surface, la résistance à l'abrasion ou aux frottements est augmentée. En profondeur, la solidité et la résistance aux chocs sont elles aussi améliorées. Le matériau est stable vis-à-vis des variations de température et peu sensible aux conditions climatiques du lieu de sa présentation.

### **Le procédé PEG**

ARC-Nucléart utilise également, pour la consolidation des objets gorgés d'eau, le procédé d'imprégnation au polyéthylène glycol (PEG) largement utilisé dans le monde. Le PEG est une résine soluble dans l'eau. L'objet à consolider est immergé dans une solution aqueuse de PEG et la résine entre lentement dans les pores du bois. La concentration de PEG est progressivement augmentée de façon à ce que, petit à petit, la résine remplace l'eau dans le bois. L'opération peut durer jusqu'à deux ans pour des pièces très massives.

Il faut ensuite sécher le bois en éliminant l'eau résiduelle. Cette opération délicate est réalisée soit dans une chambre spéciale permettant de descendre très lentement et de manière contrôlée l'hygrométrie jusqu'à celle de l'air ambiant (durée de l'opération: 1 an), soit dans un lyophilisateur. La technique de lyophilisation, bien connue en agro-alimentaire pour assécher les aliments, consiste à congeler les pièces humides, puis à faire le vide de façon à permettre à l'eau de sortir du bois par sublimation (passage direct de l'état solide à l'état gazeux sans passer par l'état liquide).



**Grand bassin de traitement PEG**

Une fois consolidée, la pièce peut ensuite être restaurée par les restaurateurs pour lui permettre d'être exposée au public.

## Exemples de réalisations

### La pirogue de Bercy

Au sud-est de Paris, d'importants vestiges ont été mis à jour lors de la construction dans les années 1990 de Bercy-Village, au bord d'un paléochenal de la Seine. Près d'une dizaine de pirogues en chêne très dégradées et gorgées d'eau ont été découvertes, entières ou fragmentées. La pirogue la plus complète est datée de 3900 ans avant J.C.. Après un traitement d'imprégnation à saturation de PEG, la pirogue a été séchée dans une ambiance contrôlée.

Le séchage a duré 9 mois et a nécessité le contrôle régulier du taux d'humidité du bois, en surface et à cœur. Ensuite, une spectaculaire opération a permis le retournement de l'embarcation. En effet, le berceau métallique qui a servi au prélèvement et au traitement n'était pas adapté à une présentation muséographique. Après préparation et calage de la pirogue, le châssis a donc été retourné, puis enlevé par le haut.

La coque extérieure de la pirogue a ainsi été accessible pour un nettoyage complet et pour un colmatage des fentes et des lacunes avant de procéder au moulage du support de présentation en résine polyester.

Une fois la pirogue sur son support définitif peinte d'une couleur proche de celle du bois, des opérations rapprochées de collages des fragments et de comblement des lacunes ont achevé le traitement. Cette pirogue est exposée depuis 2000 au musée Carnavalet.



## Les objets du Parc Saint-Georges, à Lyon

L'opération d'archéologie préventive conduite en 2003 et 2004 par l'INRAP sur le chantier de construction du parc de stationnement souterrain Saint Georges à Lyon, a donné lieu à la découverte d'une impressionnante quantité d'objets divers, de toutes époques et de toutes natures, et de seize embarcations, de l'antiquité au XVIII<sup>e</sup> siècle. La concentration d'un aussi grand nombre d'épaves s'explique par la proximité immédiate des berges de la Saône et celle, attestée par des documents d'archives, d'un port actif dès le Moyen-âge et remontant probablement à la période gallo-romaine.

L'embarcation du XVIII<sup>e</sup> siècle et six barques et pirogues sont actuellement en cours de traitement à ARC-Nucléart, et trois barques gallo-romaines sont entreposées en eau dans un étang en attente de traitement.



## **Sauvetage d'une sculpture de l'époque Maya, à Mexico**

En 2002, des contacts avaient été pris avec ARC-Nucléart par l'Institut national d'anthropologie et d'histoire du Mexique. Ils ont abouti mi-2006 à la restauration d'une sculpture en bois sec de l'époque Maya. La pièce est une statuette représentant un nain, de 20 cm de haut, très dégradée et dont le bois s'effritait au moindre contact. Le traitement de consolidation Nucléart a eu lieu en juillet dernier, au cours d'une mission à Mexico d'un ingénieur du laboratoire grenoblois, opération prise intégralement en charge par les autorités mexicaines. La pièce a été imprégnée de résine styrène-polyester liquide sur place, puis irradiée en 48 heures dans un centre de l'Institut national d'investigations nucléaires, à 40 km de Mexico. Le traitement a permis une consolidation de la sculpture et une bonne tenue de la polychromie, qui permet de diminuer les risques de dégradation lors d'expositions, dans un pays connaissant de fortes variations climatiques.

De la même façon, ARC-Nucléart est sollicité depuis un an par des archéologues du Viêtnam pour la conservation sur place d'objets archéologiques en bois humide.

## **Valorisation industrielle**

ARC-Nucléart a utilisé la méthode de consolidation Nucléart pour densifier du bois contemporain pour la réalisation de parquets. Le procédé a fait l'objet d'un transfert industriel auprès de la société Huot Parquets (Troyes) qui exploite le procédé et commercialise un parquet haute résistance pour des locaux soumis à un très fort passage. Des redevances ont été perçues par ARC-Nucléart jusqu'en 2004.

Par ailleurs, l'atelier développe un procédé de stabilisation du bois pour applications en extérieur. Ce procédé, qui est couvert par des brevets, consiste à imprégner le bois avec un polymère de synthèse fortement polaire, ayant la propriété de pénétrer très profondément au sein des parois cellulaires du bois. Il permet de diviser par deux, voire par trois, l'instabilité initiale du bois vis-à-vis de l'humidité. Des actions de coopération sont en cours avec la société Huot et d'autres industriels sont intéressés.

Ce procédé pourrait à terme être également appliqué pour des actions de conservation du patrimoine culturel.

### **Concours de sauvegarde du patrimoine « ARC-Nucléart »**

Lancé en novembre 2001 par le CEA, en partenariat avec l'Association des Maires de France, ce concours a pour objectif d'offrir à des communes françaises la restauration d'œuvres en bois ou en cuir de leur patrimoine grâce aux techniques développées par l'atelier ARC-Nucléart.

Pour sa quatrième édition, (2005), 33 communes ont déposé un dossier de candidature pour la restauration d'un bien culturel et 4 ont été retenues.

Les quatre lauréates étaient les mairies de :

- La Clayette (Saône-et-Loire), pour un maître autel en bois, datant du XVIII<sup>e</sup> siècle ;
- Pinsot (Isère) pour une roue hydraulique qui servait à actionner un moulin et datant de la seconde moitié du XIX<sup>e</sup> siècle ;
- Ponsonnas (Isère) pour un tabernacle en bois du XVII<sup>e</sup> siècle ;
- Xaintray (Deux-Sèvres) pour une statue de Sainte-Marthe en bois peint (polychromé) datant de la fin du XVI<sup>e</sup> siècle.

Les communes lauréates se voient offrir, par le CEA, le traitement de conservation et la restauration des œuvres sélectionnées. La sélection des œuvres proposées s'est faite selon des critères tenant compte de l'intérêt historique et esthétique de l'objet et des compétences de l'atelier ARC-Nucléart. Toute commune peut ainsi proposer un élément de son patrimoine nécessitant une opération de sauvegarde en raison de son état d'altération. Par exemple, une œuvre en bois pour laquelle un traitement de consolidation et de restauration se justifie (la consolidation d'une statue, d'un élément de mobilier, d'une boiserie ou d'un parquet mosaïque).

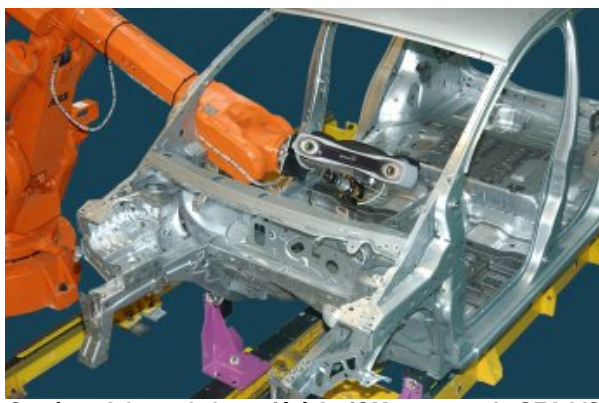
Le jury est composé de 5 membres :

- Jacques Pelissard, Président de l'Association des maires de France,
- Jean-Pierre Le Roux, Administrateur Général Adjoint du CEA,
- Christiane Naffah, Directrice du Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France,
- Isabelle Pallot-Frossard, Directrice du Laboratoire de recherche des Monuments Historiques,
- Jean Guibal, Directeur de la Conservation du patrimoine de l'Isère.

Les résultats du concours 2006 seront communiqués en janvier 2007.

## Les technologies 3 D pour l'art et le patrimoine

Les technologies de vision ont été initialement développées au CEA à des fins de maintenance industrielle. Elles avaient alors pour but d'accélérer la modélisation 3D TQC (Tel Que Construit) des sites industriels des acteurs du nucléaire, à partir des centaines de clichés pris sur place. Le CEA LIST (Laboratoire d'intégration des systèmes et des technologies) a plus particulièrement développé des logiciels et des techniques basés sur le traitement des images pour faciliter cette phase et ainsi réduire les coûts associés. Cette expertise a notamment permis à deux ingénieurs du CEA LIST de créer en 2000 la start-up ActiCM, qui produit et commercialise des systèmes de mesure vidéo 3D de grande précision pour l'industrie, notamment pour le contrôle de carrosserie sur les lignes de fabrication des constructeurs automobiles. La maîtrise de ces technologies permet aussi au CEA LIST de participer à de nombreux projets de recherche nationaux et européens. Parmi ceux-ci, les projets ARCO et SCANNER 3D ont contribué à la conservation et la diffusion des œuvres d'art et du patrimoine.



Système Advent de la société ActiCM, start-up du CEA LIST

### ARCO

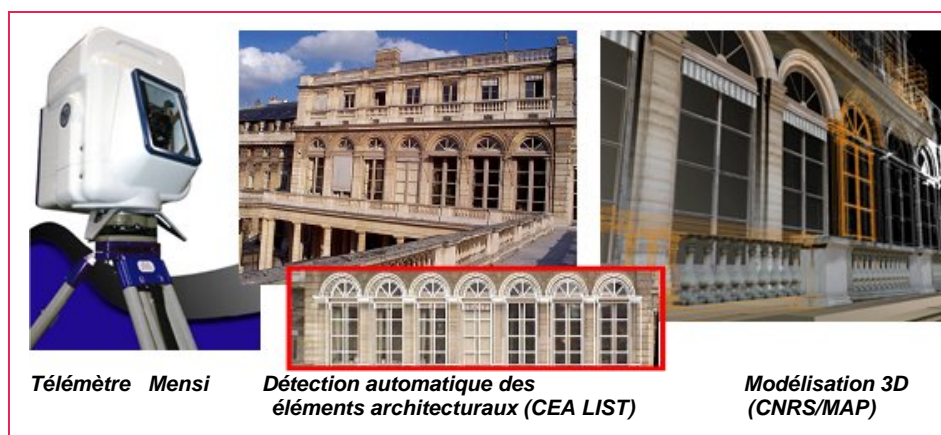
Le projet ARCO (Augmented Representation of Cultural Objects), partiellement financé par la Communauté Européenne dans le cadre de son programme Société de l'Information, avait pour objectif le développement de solutions simples pour mettre en valeur des objets d'art. Dans ce projet, le CEA LIST a développé un système économique de numérisation 3D d'œuvres d'art de taille réduite, basé sur deux caméras et un projecteur vidéo classique, associé à un logiciel de reconstruction spécifiquement développé. Les fichiers 3D obtenus autorisent la consultation interactive des œuvres sur Internet : l'utilisateur peut choisir un point de vue inaccessible en réalité, comme par exemple le dessous d'une statue.



Système de numérisation développé par le CEA LIST – Projet ARCO

## Scanner 3D

L'essor des applications de simulation, de visite virtuelle, de préservation du patrimoine et de planification d'urbanisme a conduit au développement de la modélisation tridimensionnelle de scènes urbaines. Dans ce contexte, le projet national Scanner 3D avait pour objectif la mise au point de techniques de modélisation 3D du patrimoine architectural en combinant la télémétrie laser avec des techniques vidéo permettant d'exploiter les règles architecturales. La télémétrie laser permet en effet d'obtenir avec précision les coordonnées tridimensionnelles de points de la scène, lors d'une première phase de numérisation. La modélisation permet ensuite à l'utilisateur de reconstruire manuellement, de manière longue et fastidieuse, les différents éléments architecturaux présents dans la scène à partir des coordonnées du grand nombre de points mesurés. En calibrant le système de vision, le CEA LIST a pu associer une caméra vidéo au télémètre. Ce couplage a permis l'exploitation des images pour le contrôle du télémètre lors des opérations de cadrage et de numérisation des profils horizontaux et verticaux des bâtiments. Des algorithmes innovants ont également été développés pour détecter les éléments architecturaux dans les images, permettant de simplifier grandement les opérations de modélisation : lors de la phase de numérisation, un modèle texturé est directement généré avec les différents éléments architecturaux du bâtiment, permettant un rendu 3D immédiat.



*Télémètre Mensi*

*Détection automatique des éléments architecturaux (CEA LIST)*

*Modélisation 3D (CNRS/MAP)*

## Les « Archéomatériaux »

L'équipe Archéomatériaux et prévision de l'altération (APA) est un groupe du Laboratoire Pierre Sûe qui réunit des chercheurs du CEA et du CNRS autour d'instruments d'analyse de pointe des matériaux tels que microsondes nucléaire, photonique, d'activation neutronique. La plupart de ces techniques est développée spécifiquement au sein du CEA. Elles sont basées sur la grande expérience de cet organisme en la matière, notamment au sein de la Direction des sciences de la matière (DSM).

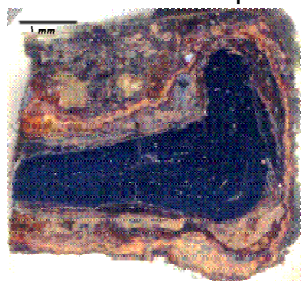
Au sein du Laboratoire Pierre Sûe, plusieurs groupes de chercheurs développent leurs propres thématiques autour de ces machines et sont à la fois experts dans leurs domaines de recherche et dans la mise en œuvre de ces moyens d'analyse.

L'équipe APA réunit aussi bien des ingénieurs CEA que des chercheurs et ingénieurs CNRS en chimie et matériaux. Dans le cadre d'un Laboratoire de Recherche Correspondant du CEA en collaboration avec l'Institut de Recherche sur les Archéomatériaux (CNRS), elle accueille même des archéologues, seuls capables de valider la valeur scientifique des objets. Cette collaboration unique en France permet d'étudier les matériaux archéologiques métalliques (et surtout les métaux ferreux) et ce pour deux objectifs complémentaires.



### Comprendre l'altération des objets archéologiques sur plusieurs siècles

L'étude de l'altération et de la corrosion des objets archéologiques est importante pour conservateurs et restaurateurs qui se doivent d'assurer l'intégrité de l'objet archéologique pour de longues années après sa sortie de fouille et son exposition dans les Musées. Elle est tout aussi importante pour les chercheurs qui mettent en place des moyens sûrs de

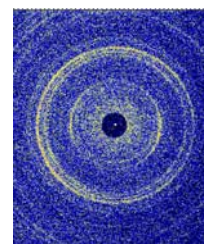


stocker les déchets et notamment les déchets radioactifs pour les générations futures. En effet, un des nombreux éléments destinés à séparer les déchets radioactifs de la biosphère sera constitué d'un conteneur en acier. Afin de modéliser la corrosion de cet acier sur plusieurs siècles, les équipes du CEA simulent et modélisent la corrosion en laboratoire. En complément nécessaire à ces expériences, l'étude de la corrosion des objets archéologiques et la modélisation de leur corrosion permet d'accéder aux seuls témoins réels de durées d'altérations aussi longues que celles demandées

au stockage. A ce titre, les objets anciens (armes, épées, clous) trouvés en fouille servent de témoins privilégiés et d'objets d'étude (appelés analogues par les spécialistes) pour prévoir le comportement des matériaux du futur.

### Etudier les procédés d'élaboration anciens, mieux comprendre les sociétés anciennes

Cet axe de recherche intéresse directement les archéologues. L'analyse des hétérogénéités du métal ainsi que des impuretés microscopiques qu'il contient permet de fournir des informations que la seule analyse de la forme des objets ne permet pas. Ainsi, à l'aide de la microfluorescence X et de la microdiffraction X il est possible de dire si un objet a été fabriqué avec tel ou tel procédé (ce qui constitue un moyen indirect de datation les alliages ferreux, impossibles à dater par d'autres techniques). Il est également possible de déterminer la provenance d'objets archéologiques, de voir si



ceux-ci ont été fabriqués par un même artisan... Autant d'informations cruciales pour l'histoire des techniques et l'archéologie.

### Du chantier archéologique aux sondes photonique et nucléaire : les instruments d'analyse développés par le CEA

Les chercheurs du groupe Archéomatériaux et Prévision de l'Altération du Laboratoire Pierre Süe sont compétents dès le chantier archéologique, sur lequel il faut prélever les objets avec de grandes précautions afin de ne pas perturber les conditions dans lesquels ils se sont altérés (ou conservés) pendant des siècles. Ensuite, l'objet doit être soigneusement préparé afin de le transformer en échantillon laissant apparaître en coupe les couches de corrosion.

Le laboratoire Pierre Süe dispose de deux outils d'analyses très performants : la microsonde nucléaire et la microsonde photonique. Ces sondes envoyant respectivement des rayons X et des particules

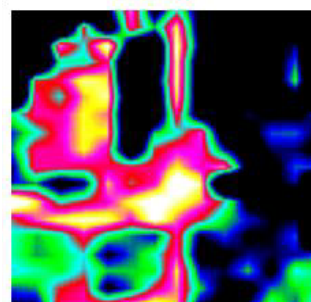
sur l'échantillon vont permettre de comprendre sa composition et sa structure. Il sera alors possible de procéder à des expériences utilisant les rayons X sur des surfaces microscopiques. Cette plateforme analytique est à ce jour unique en France et est dédiée principalement à l'étude des objets archéologiques.

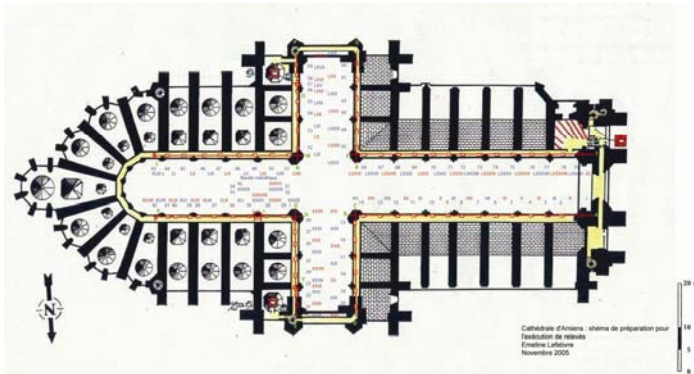
Les chercheurs vont même jusqu'à remettre l'objet en conditions contrôlées de corrosion. Ainsi, par exemple en remplaçant l'oxygène 16, isotope le plus répandu de cet élément dans l'air que l'on respire, par de l'oxygène 18, il est alors possible de repérer avec la microsonde nucléaire, l'endroit, dans les couches de rouilles où cet oxygène est à l'origine de la corrosion. Ces expériences sont les seules à même de valider les mécanismes de corrosion proposés par les autres laboratoires qui simulent numériquement ces processus.



### Du passé lointain aux générations futures : le fer des cathédrales

Les chercheurs ont montré que de grandes quantités de tirants en alliages ferreux ont été employées dès la construction ou pour le renfort des cathédrales. Par exemple, à Amiens, un chaînage est mis en place en 1498. Il mesure plus de 300 m de long et ceinture entièrement le monument. Ces matériaux constituent pour les chercheurs l'équipe APA des éprouvettes uniques. En effet, elles ont subi la corrosion atmosphérique sous abris depuis leur mise en place. Ce sont les seuls témoins de processus physico-chimiques sur des durées aussi longues. Ainsi, l'étude de leurs produits de corrosion a permis de comprendre les mécanismes en déterminant les phases les plus réactives de la couche de rouilles. Celles-ci n'étaient pas seulement constituées des phases déjà identifiées par d'autres chercheurs pour des temps plus courts mais également par d'autres phases que nous avons découvertes. De plus nous avons prouvé que la présence de certains éléments dans les fers anciens pouvaient contribuer à ralentir la corrosion. C'est le cas notamment du phosphore.





L'ensemble de ces résultats permet de confronter les observations sur des échantillons très anciens avec les hypothèses faites par les modélisateurs pour prévoir le comportement des matériaux du futur. Par exemple les aciers employés dans les centres d'entrepôts de surface des déchets radioactifs. On voit ici l'apport crucial des études sur des matériaux construits par nos ancêtres à l'aide de moyens à la pointe de la science des matériaux actuels.

Ces résultats sont maintenant également employés par le Laboratoire de Recherches des Monuments Historiques pour diagnostiquer l'état de corrosion des Monuments contenant beaucoup de fer.

### Une révolution au Moyen Age pour la production du fer et des aciers



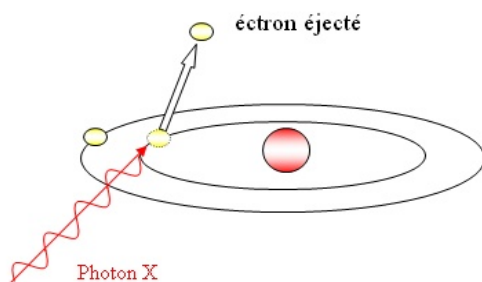
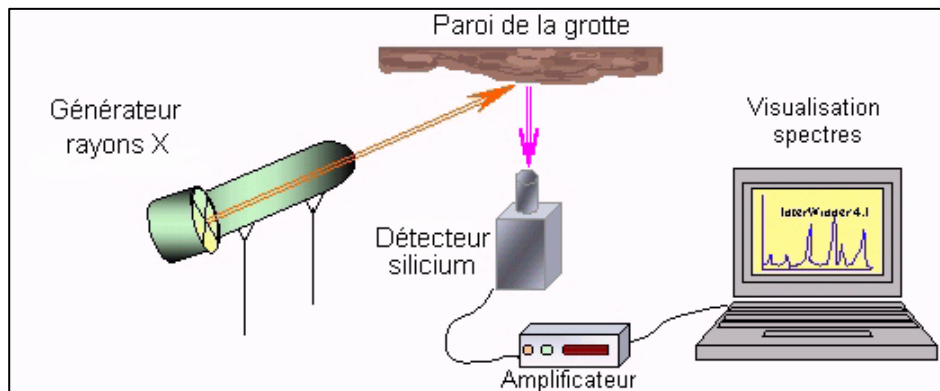
« L'eau des romains n'était pas aussi intelligente que celle du Moyen Age ». C'est l'expression qu'emploient les historiens des techniques pour souligner la révolution apportée par la maîtrise de l'hydraulique à cette période. Cette maîtrise va également amener une révolution dans les procédés à l'origine de la transformation du minerai en métal : on passe d'un procédé à basse température qui se fait dans de petits fourneaux à la filière fonte, dans des hauts fourneaux, encore utilisée aujourd'hui. L'étude de l'apparition et de la diffusion de ce nouveau procédé, produisant des alliages ferreux moins chers et en grande quantité est donc primordiale pour la compréhension technique et économique des sociétés du Moyen Age. Or, il est uniquement possible de distinguer les fers issus de l'un ou l'autre des procédés en étudiant la composition et la structure des impuretés microscopiques qu'ils contiennent : les inclusions. Ceci se fait au Laboratoire Pierre Süe en utilisant, ici encore, les microsondes électroniques, photoniques et nucléaires. Cette approche a permis de mettre au point un moyen de distinction unique au monde de ces procédés. Rappelons également, qu'avec les accélérateurs actuels, les alliages ferreux contiennent des quantités trop faibles de carbone et ne sont donc pas datables par les techniques du type  $^{14}\text{C}$ . La distinction des procédés est donc le seul moyen qui permette à ce jour de replacer les alliages ferreux dans leur contexte historico technologique, constituant ainsi un moyen de datation relative. Par exemple des tirants en fer du bras sud du transept de la Cathédrale de Soissons ont pu être liés au procédé direct, validant leur mise en place lors de la construction de cette partie de la Cathédrale, à la fin du XIII<sup>e</sup> siècle. Ces tirants sont à ce jour une des premières évidences de l'utilisation massive de fer pour renforcer les Cathédrales et renouvellent la compréhension des techniques de construction des bâtisseurs du Moyen Age. Leur étude a mis fin à une polémique entre historiens qui durait depuis plus de 20 ans.

## L'analyse de peintures rupestres par fluorescence X

La fluorescence X, largement utilisée par le CEA pour l'industrie nucléaire (analyse du combustible en fabrication, montage et retraitement), a trouvé depuis quelques années de nouveaux champs d'applications, tels que l'analyse des fonds en océanographie ou des nanoparticules aériennes en environnement. Cette technique, particulièrement maniable, s'est avérée bien adaptée à l'analyse d'œuvres d'art *in situ*, notamment sur le site paléolithique de Rouffignac.

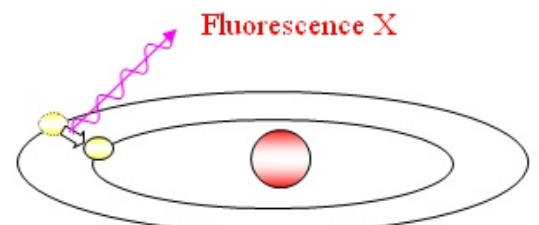
### Principe de la technique

Schéma du dispositif :



Les rayons X issus du générateur excitent les atomes de l'échantillon. Du fait de leur énergie importante, les photons X vont arracher des électrons situés au cœur des atomes, près du noyau, l'atome se retrouve donc ionisé.

Un électron d'une couche périphérique va venir combler la place de l'électron éjecté. Cet électron va perdre de l'énergie, qui va être émise sous la forme de photon (rayons X) d'une énergie caractéristique de l'élément chimique dont il est issu. C'est le phénomène de « fluorescence ».



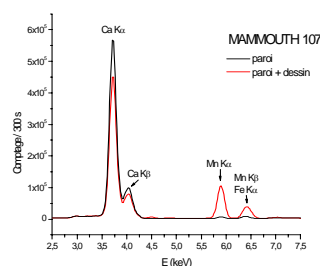
## Mesures sur les peintures rupestres de la grotte de Rouffignac

La grotte de Rouffignac (Dordogne) est un site d'art paléolithique qui renferme, entre autre, un patrimoine important d'œuvres pariétales (mammouths, bisons, rhinocéros laineux, chevaux, bouquetins...). Bien qu'aucune datation n'ait pu à ce jour être réalisée, les œuvres de cette caverne sont en général rattachées, par comparaison avec d'autres sites voisins présentant des similitudes, à l'époque du Magdalénien moyen à supérieur (15000 à 13000 ans av J.C).

Le CEA-LIST a répondu à une demande d'analyse *in situ* émanant de la Grotte de Rouffignac. Aucune mesure non destructive, c'est-à-dire qui ne nécessite pas de prélèvement, *in situ* de peintures rupestres n'avait été réalisée jusqu'à ce jour. L'intervention du CEA à Rouffignac se trouve donc être une première. Dans le cas précis des peintures rupestres, une difficulté liée à l'impossibilité de déplacer les œuvres impose une mesure *in situ* incompatible avec l'utilisation des instruments habituels de fluorescence X. Pour cette application, il a donc été conçu un système portable de terrain.



Une des caractéristiques de l'art pariétal dessiné de Rouffignac est le recours quasi exclusif au dessin noir, dont le pigment utilisé n'a été que peu étudié. Seules des analyses sommaires de prélèvements réalisés sur des figures du "Grand Plafond" et sur la « Frise aux dix mammouths » peu après la découverte scientifique des œuvres (1956) ont mis en évidence la présence de manganèse. Bien plus tard, les plaquettes noires présentes sur le sol de la grotte seront identifiées comme des crayons, résultant d'un mélange d'argile et de manganèse. L'analyse de ces plaquettes n'ayant finalement révélé que la présence d'éléments tels que le fer, le cuivre, le titane, le zinc, l'arsenic, le rubidium et l'antimoine, la nature exacte des pigments était restée indéterminée ; or leur connaissance permet de préciser la provenance des matériaux employés ainsi que leur éventuelle préparation avant emploi. Par ailleurs, les analyses effectuées en 1956 sur un échantillonnage destructif très réduit avaient révélé la présence de manganèse ; la confirmation de la composition des pigments utilisés à Rouffignac par les artistes du paléolithique était donc un objectif prioritaire.



Une vingtaine de mesures ont été effectuées *in situ*, sur la « Frise des trois rhinocéros », le « Cheval au rognon de silex », la « Frise des dix mammouths » et quelques animaux du « Grand Plafond ». L'analyse qualitative a montré la présence systématique de manganèse.

Une modélisation de type *Monte Carlo* a ensuite permis de mener une approche quantitative de l'analyse de ces pigments. Celle-ci a nécessité de faire plusieurs hypothèses sur la nature des composés pressentis, associant les éléments déjà détectés à ceux dont la présence était naturellement plausible au sein de la paroi calcaire. Après exploitation des résultats expérimentaux, l'équipe du CEA-LIST a pu affirmer que le minerai de manganèse utilisé à Rouffignac par les artistes du paléolithique ne provient pas d'une source unique, car les pigments noirs analysés contiennent fréquemment du fer et du baryum, dans des proportions très variables. D'une manière générale, la composition (massique en oxyde) typique des dessins de Rouffignac est de 75 % de manganèse, 20 % de fer et 5 % de baryum.

## La gammagraphie : étude de la structure interne d'œuvres d'art

Les techniques de gammagraphie permettent d'étudier la structure interne d'une œuvre en cas de démontage ou de transport. La première opération connue en 1964 portait sur un marbre de prestige la Piéta de Michel-Ange (Gilardoni, 1977).

En France, les travaux poursuivis depuis 1989 sur les statuaires antiques sont le fruit d'une collaboration interdisciplinaire entre les responsables de collections de musée, le Service de Restauration des Musées de France et le CEA LIST. L'objectif vise à la fois le court terme (résoudre, pour une œuvre donnée, une problématique précise d'histoire de l'art ou de conservation-restauration) et le long terme (rassembler peu à peu un corpus d'informations représentatif des techniques d'assemblage anciennes et modernes).

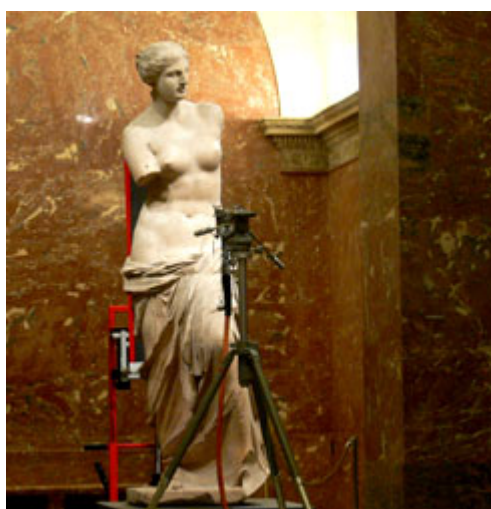
Plusieurs analyses ont déjà été réalisées pour le compte de différents musées : le Gladiateur Borghèse, Silène portant Dionysos enfant, Vénus d'Arles, Diane de Gabies, deux métopes d'Olympie, Aphrodite accroupie, la Koré de Lyon, des statues Khmères, la Nature se dévoilant à la science et enfin, la Vénus de Milo.

### Principe de la technique

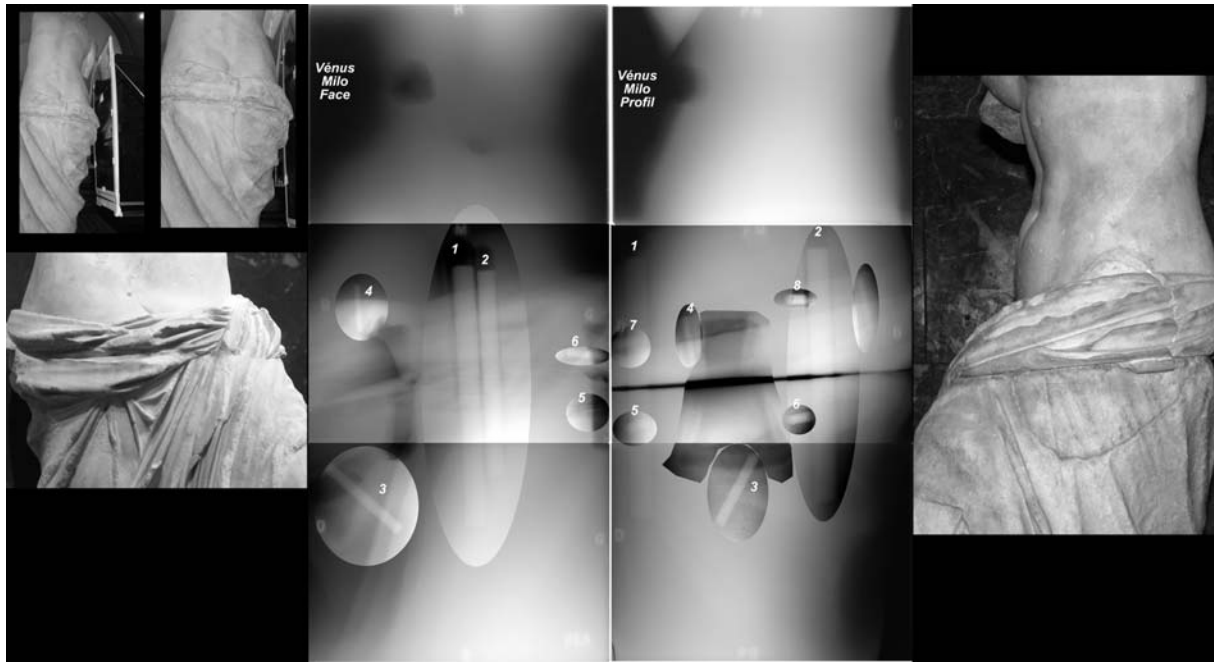
Une source, émettrice de rayonnement ionisant, éclaire l'objet à contrôler. Le rayonnement incident traverse l'objet, en subissant une atténuation plus ou moins importante selon les caractéristiques du matériau traversé : composition chimique, épaisseur, et masse volumique. Un détecteur, le plus souvent une émulsion radiographique argentique, enregistre l'ombre projetée transmise et permet donc d'obtenir une image de la structure interne de l'objet.

### Exemple de la Vénus de Milo

La Vénus de Milo, qui attire chaque année au Louvre des milliers de visiteurs, devait être déplacée pour rénover la salle qui lui était consacrée. Pour savoir si l'assemblage des deux blocs de marbre qui la constituent est suffisamment résistant et si la statue présente des zones fragilisées en profondeur, le Département des antiquités grecques, étrusques et romaines du Louvre a fait appel au CEA pour une radiographie du bassin de la statue.



Après deux nuits consécutives passées au Musée du Louvre, les contrôles gammagraphiques ont livré les secrets de la Vénus de Milo. Les radiogrammes ainsi obtenus ont permis de dévoiler la présence de cavités, ainsi que plusieurs inserts métalliques. Deux d'entre eux auraient été placés en 1871 lors de la grande restauration de la Vénus, pour consolider l'assemblage des deux blocs de marbre. Suite aux résultats obtenus, la Vénus a pu être déplacée sans encombre dans la nouvelle salle qui lui est dédiée.



## Les neutrons percent le secret des haches Etrusques

En 1996 des archéologues italiens découvrent sur la plage Baratti, juste en dessous de l'acropole de Populonie, en Toscane (Italie), un important dépôt d'armes Etrusques, en fer et en bronze.

Cette région de Populonie, au bord de la mer Méditerranée, au sud de la Toscane, est connue pour avoir recélé d'importants gisements de métaux et a représenté un centre métallurgique très important aux périodes Etrusques (VII<sup>e</sup>-III<sup>e</sup> siècles av. J.C.) et Romaines (II<sup>e</sup> siècle av. J.C.-II<sup>e</sup> siècle après J.C.). De nombreuses découvertes archéologiques ont ainsi montré que Populonie constituait alors un centre de production de pièces en fer, cuivre, bronze et autres métaux.



Cependant de nombreuses questions relatives à ces productions restent ouvertes, à savoir quelles étaient les technologies métallurgiques utilisées, d'où provenaient les minerais bruts, quels étaient les échanges commerciaux avec les autres villes d'Etrurie et d'ailleurs, comment a évolué au cours du temps la métallurgie Etrusque.

Le trésor mis à jour en 1996 consiste en un dépôt d'armes, en fer et en bronze (haches, lances, javelots, dagues, épées, poignards, etc.), la plupart d'entre elles assemblées en bloc par les produits de corrosion.



**Bloc en place au musée de Populonie**

Plusieurs laboratoires italiens<sup>2</sup> décident alors d'entreprendre une étude complète de ces armes d'un point de vue morphologique, et de rechercher leur composition chimique et les technologies métallurgiques utilisées. Une exigence incontournable est d'utiliser pour ces analyses des techniques non destructives qui préserveront l'intégrité de ces pièces dont certaines présentent une grande valeur archéologique.

### L'apport du CEA

Au printemps 2005 ces équipes italiennes contactent ainsi le Laboratoire Léon Brillouin (CEA/CNRS) afin d'effectuer une étude de ces armes à l'aide de la diffusion des neutrons produits par le réacteur expérimental Orphée.

Le LLB est un laboratoire national au service de la communauté scientifique, qui utilise le rayonnement neutronique fourni par le réacteur Orphée, pour des études dans de nombreux domaines : biologie, chimie, physique, matériaux.

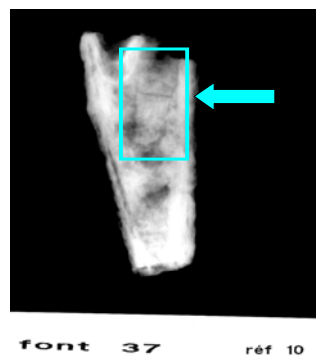
L'intérêt d'utiliser des neutrons est lié à plusieurs avantages spécifiques du rayonnement neutronique par rapport à d'autres sondes de la matière comme les rayons X. En particulier le grand pouvoir de pénétration des neutrons dans la matière permet d'étudier des pièces massives métalliques de plusieurs centimètres d'épaisseur, ce qui est souvent le cas de ces armes Etrusques. Il est également possible de réaliser une véritable cartographie de chaque pièce à l'échelle de quelques centimètres et donc d'étudier les variations de composition chimique, de morphologie interne des armes et tout ceci sans aucune atteinte à leur intégrité.

Deux techniques neutroniques complémentaires ont été mises à profit :

- la radiographie par neutrons, qui est l'équivalent avec les neutrons de la radiographie par rayons X
- la diffraction par neutrons

### Principe des techniques

La radiographie par neutrons permet de révéler, par l'étude des variations de contrastes observés sur un film, les variations de densité à l'intérieur d'une arme, mettant ainsi en évidence des détails invisibles par un examen visuel de l'extérieur de l'arme. Il va ainsi être possible de voir, comme sur la photo ci-dessous, à l'intérieur d'une arme massive le carbone du bois (dans la zone bleue) resté en place dans le pommeau d'une lance.



<sup>2</sup> Département d'Archéologie (Galerie des Offices, Florence), Département des Sciences de la terre (Université de Florence), Département de chimie, biochimie et biotechnologie pour la médecine (Université de Milan), Superintendance archéologique de la Toscane (Florence).



## Le carbone 14 et la datation de l'art préhistorique

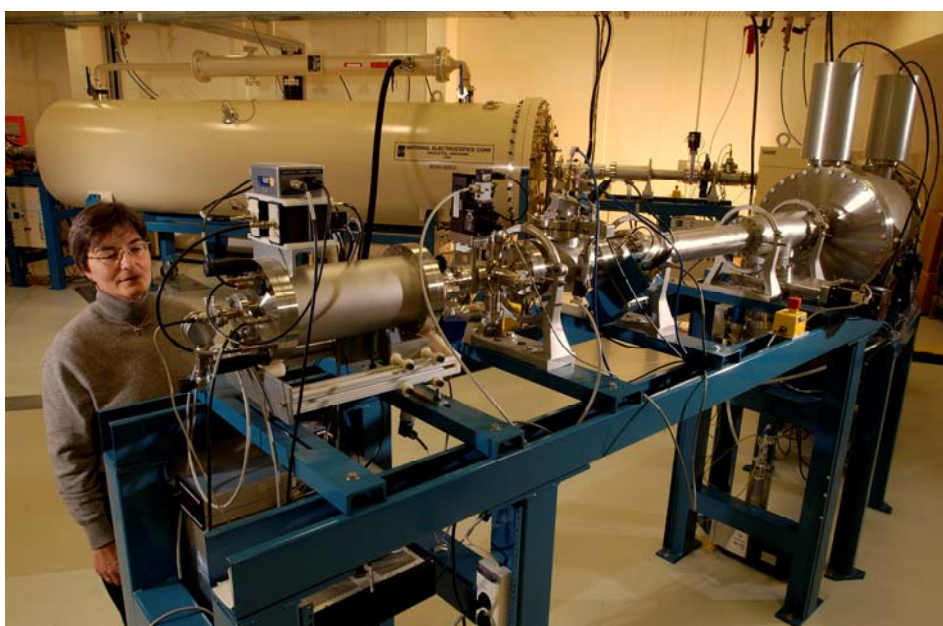
Le carbone 14 est à la base d'une des méthodes de datation les plus utilisées en archéologie. Elle est fondée sur la décroissance radioactive de cet isotope issu de la radioactivité naturelle et donc présent dans tous les vestiges organiques.

La méthode dite du carbone 14 apparaît en 1946 lorsque Willard Franck Libby émet l'idée d'une production continue de cet isotope dans la nature et établit les bases théoriques et pratiques de son utilisation en vue de datations en archéologie.

En France, cette méthode de datation intéresse plusieurs disciplines : la climatologie, les sciences de l'environnement, mais aussi la muséographie et l'archéologie.

La méthode a notamment été développée au Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE), qui est une unité mixte de recherche CEA-CNRS-UVSQ (Université de Versailles – Saint-Quentin). Le LSCE travaille avec un autre laboratoire, le Laboratoire de mesure du carbone 14 (LMC14), pour l'analyse des échantillons.

Le LMC14 a été créé en 2003 autour de l'accélérateur Artemis, pour mesurer les échantillons des laboratoires du CNRS, du CEA, du ministère de la Culture et de la Communication, de l'IRSN (Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire) et de l'IRD (Institut de recherche pour le développement). Il remplace l'ancien Tandatron de Gif-sur-Yvette installé en 1980 par le CNRS et le CEA qui ne permettait plus de répondre à la demande en termes de nombre de mesures et de précision. L'objectif du LMC14 est de mesurer à terme 4 500 échantillons par an.



L'accélérateur Artemis installé en 2003

### Principe de la méthode de datation par le carbone 14

Le carbone 14 est un isotope radioactif du carbone. La période radioactive du  $^{14}\text{C}$ , qui correspond au temps au bout duquel le nombre d'atomes est divisé par 2, est de 5730 ans. Le  $^{14}\text{C}$  est formé dans la haute atmosphère soumise au bombardement des rayons cosmiques. À l'échelle planétaire, un équilibre s'établit entre la production du  $^{14}\text{C}$  et sa

disparition par désintégration. La valeur d'équilibre est d'un atome radioactif de  $^{14}\text{C}$  pour 1 000 milliards d'atomes de  $^{12}\text{C}$  non radioactif. Ce rapport se retrouve dans les organismes vivants, par la photosynthèse pour les plantes et par la chaîne alimentaire chez les animaux. A la mort de l'organisme, l'incorporation de  $^{14}\text{C}$  cesse et le nombre d'atomes  $^{14}\text{C}$  diminue par décroissance radioactive. **La méthode repose sur la comparaison du rapport  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  de l'échantillon avec celui d'un échantillon standard.** On peut ainsi en déduire l'âge de l'échantillon et remonter jusqu'à 50 000 ans environ.

La méthode « classique » de mesure de la radioactivité bêta du carbone 14 consiste à compter un par un, pendant un temps relativement long (2 à 3 jours), tous les atomes qui se désintègrent, à partir de compteurs spécifiques que l'on appelle des scintillateurs.

A la fin des années 1970, la datation par le carbone 14 a connu une évolution importante avec le développement, aux Etats-Unis, de la spectrométrie de masse par accélérateur SMA qui permet de compter les atomes de carbone 14 contenus dans l'échantillon et non plus les désintégrations. Il faut donner suffisamment d'énergie aux particules pour pouvoir analyser le faisceau et le "purifier" de façon à pouvoir compter les ions de carbone 14 dans une chambre à ionisation. Comme avec la méthode classique, il faut ensuite calculer les rapports isotopiques de l'échantillon étudié et les comparer à ceux obtenus sur un standard connu pour obtenir son âge.

C'est une méthode qui présente l'avantage d'être moins longue, puisque quelques heures suffisent alors qu'il faut avec l'autre méthode plusieurs jours de 'comptage'.

Mais l'intérêt de cette méthode pour l'archéologie est surtout de permettre la datation de très petits échantillons : un milligramme de carbone suffit pour la mesure, soit environ mille fois moins que pour la méthode dite « classique ».

Ainsi, les peintures de plusieurs grottes françaises ont pu être datées à partir d'échantillons de charbon de bois prélevés directement sur les peintures (quelques dizaines de milligrammes).

La plupart des datations ont été réalisées jusqu'ici grâce à l'accélérateur Tandatron de Gif-sur-Yvette.



Vue de l'accélérateur Tandatron de Gif-sur-Yvette

## Applications aux peintures rupestres de la préhistoire

Au-delà de son principe, la datation au carbone 14 de sites archéologiques rencontre plusieurs difficultés pratiques dont les scientifiques cherchent à s'affranchir. La méthode scientifique est indissociable de la réflexion de l'archéologue.

La datation commence lors du prélèvement des échantillons ; le pigment charbonné (10 à 100 mg) est récolté, de préférence, dans les fissures de la paroi où il est le plus épais.

- La première question porte sur la relation entre l'âge du charbon de bois et celui de la peinture. Cette dernière est-elle contemporaine de la mort de l'arbre qui a fourni le charbon ou l'artiste a-t-il utilisé des charbons ramassés au sol, provenant d'occupations temporaires ? L'analyse des vestiges organiques d'une grotte et la multiplication des datations en plusieurs points d'une même figure fournit des éléments de réponse.
- Une autre difficulté, commune à toute datation au carbone 14, réside dans le fait qu'il faut s'affranchir des contaminations par du carbone étranger, parfois d'origine géologique, mais aussi résultant d'autres incursions dans la grotte, d'hommes ou d'animaux, et de la présence de multiples micro-organismes.

Le traitement des échantillons et l'élimination des sources d'erreurs participent au processus de datation. Cette phase consiste en un traitement chimique et thermique des échantillons, destiné à éliminer les contaminations. La quantité de carbone obtenue après traitement des pigments varie entre 0,4 et 1 mg, selon les échantillons : la perte de masse s'élève donc souvent à plus de 90% de l'échantillon initial.

L'expérience acquise montre que c'est la matière organique d'origine récente qui est la principale source d'erreur et non la contamination par du carbone ancien. Les contaminations en carbone récent se traduisent par un rajeunissement d'autant plus grand que leur proportion est importante et que l'échantillon est ancien : ainsi, un apport de 5% de carbone fossile induit un vieillissement de 400 ans seulement quel que soit l'âge de l'échantillon, alors que le même taux de contamination en carbone récent se traduit par un rajeunissement de 3 400 et de 8 600 ans pour des échantillons vieux de 20 000 et 30 000 ans respectivement.

## L'exemple de la grotte Chauvet

Pendant un temps, les dates « gravetiennes » (de 23 000 à 28 000 ans) obtenues notamment dans la grotte Cosquer (Bouches-du-Rhône) et dans celles de Pech Merle et Cognac (Lot) ont été les plus anciennes jamais obtenues sur des peintures paléolithiques.

Quelques années plus tard, la grotte Chauvet a renouvelé la connaissance de la genèse de l'art pariétal. Découverte en 1994 en Ardèche, la grotte Chauvet (programme interdisciplinaire coordonné par le ministère de la Culture) se compose de plusieurs salles et recèle de nombreuses peintures, comparables aux œuvres magdaléniennes les plus abouties. Une cinquantaine d'échantillons de charbon ont été datés par la méthode du carbone 14 depuis 1995. Les fragments de charbon se composent d'échantillons pariétaux prélevés sur cinq peintures et quatre mouchages de torches<sup>3</sup> et de trente-six fragments récoltés sur le sol à proximité de foyers. Les échantillons ont été analysés au LSCE, à l'exception de trois d'entre eux analysés au laboratoire de radiocarbone de Lyon et au Research Laboratory for Archeology and the History of Art d'Oxford. Les résultats publiés par les chercheurs du LSCE, portant sur six animaux, deux mouchages de torches et une dizaine d'échantillons de charbons de bois prélevés au sol, dont certains ont vraisemblablement été fabriqués spécialement pour réaliser les peintures, révèlent que les

<sup>3</sup> Résidu laissé lors de l'extinction d'une torche par frottement sur un mur

peintures étudiées datent de 30 000 à 32 000 ans. Certains mouchages de torches, en revanche, seraient plus récents, de l'ordre de 26 000 à 27 000 ans. L'excellent état des peintures, protégées en particulier de la présence de l'homme depuis la fermeture de la grotte par une chute de pierre il y a des milliers d'années, garantissent une excellente fiabilité des résultats.



**Grotte Chauvet : rhinocéros affrontés**

L'âge des peintures de la Grotte Chauvet, qui deviennent les plus anciennes œuvres picturales datées au monde, bouleversent ainsi les connaissances sur l'évolution de l'art préhistorique. Elles révèlent l'existence d'une activité picturale intense bien avant la période « magdalénienne » (grotte de Lascaux notamment).

De plus, la portée de ces résultats scientifiques ne concerne pas seulement l'histoire de l'art. En effet, les datations suggèrent l'existence de deux intrusions humaines distinctes et successives dans la grotte (il y a 30 000 - 32 000 ans puis il y a 26 000 - 27 000 ans). Les résultats renseignent donc aussi sur l'histoire des hommes.