

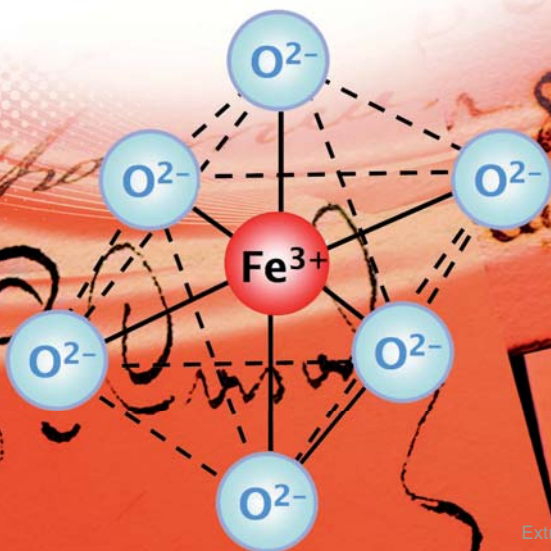


# La chimie et l'art

*Le génie au service de l'homme*

Christian Amatore  
Anne Bouquillon  
Sophie Descamps-Lequime  
Rose Agnès Jacquesy  
Koen Janssens  
Jean-Claude Lehmann  
Michel Menu  
Marc Thébault  
Bernard Valeur  
Philippe Walter

*Coordonné par  
Minh-Thu Dinh-Audouin  
Rose Agnès Jacquesy,  
Danièle Olivier et Paul Rigny*



**l'actualité  
chimique**

La chimie et l'art,  
Le génie au service de l'homme



Cet ouvrage est issu du colloque « Chimie et art, le génie au service de l'homme », qui s'est déroulé le 28 janvier 2009 à la Maison de la Chimie.



Collection dirigée par Paul Rigny

# La chimie et l'art, le génie au service de l'homme

Christian Amatore, Anne Bouquillon, Sophie Descamps-Lequime,  
Rose Agnès Jacquesy, Koen Janssens, Jean-Claude Lehmann, Michel Menu,  
M.A. THEBAULT, Bernard Valeur, Philippe Walter

Coordonné par Minh-Thu Dinh-Audouin, Rose Agnès Jacquesy,  
Danièle Olivier, Paul Rigny



Conception de la maquette intérieure et de la couverture :  
Pascal Ferrari

Conception des graphiques : Pascal Ferrari  
et Minh-Thu Dinh-Audouin

Mise en pages : Patrick Leleux PAO (Lisieux)

Imprimé en France

ISBN : 978-2-7598-0527-3

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1<sup>er</sup> de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences 2010

EDP Sciences  
17, avenue du Hoggar, P.A. de Courtabœuf, BP 112  
91944 Les Ulis Cedex A, France  
Extrait de la publication

# Ont contribué à la rédaction de cet ouvrage :

## **Christian Amatore**

*École normale supérieure,  
Département de Chimie,  
UMR 8640 ENS-CNRS-UPMC,  
Paris*

## **Anne Bouquillon**

*Centre de recherche  
et de restauration des Musées  
de France (C2RMF),  
UMR CNRS 171,  
Paris*

## **Sophie Descamps-Lequime**

*Musée du Louvre,  
Département des Antiquités  
grecques, étrusques  
et romaines,  
Paris*

## **Rose Agnès Jacquesy**

*Fédération française pour  
les sciences de la Chimie*

## **Koen Janssens**

*Université d'Anvers,  
Département de chimie*

## **Jean-Claude Lehmann**

*Académie des technologies*

## **Michel Menu**

*Centre de recherche  
et de restauration des Musées  
de France (C2RMF),  
UMR CNRS 171,  
Paris*

## **M.A. THEBAULT**

*Artiste et professeur  
en secteur art espace,  
École nationale supérieure  
des arts décoratifs (ENSAD),  
Paris*

## **Bernard Valeur**

*Conservatoire national des arts  
et métiers, Paris,  
Département Sciences et  
techniques industrielles*

## **Philippe Walter**

*Centre de recherche  
et de restauration des Musées  
de France (C2RMF),  
UMR CNRS 171,  
Paris*

## Équipe éditoriale

**Minh-Thu Dinh-Audouin,  
Rose Agnès Jacquesy,  
Danièle Olivier  
et Paul Rigny**

**Vj ku'r ci g'kpvgpvkqpcmf 'ighv'dic pm**

# Sommaire

<b>Avant-propos</b> : par <b>Paul Rigny</b> .....	9
<b>Préface</b> : par <b>Bernard Bigot</b> .....	11
<b>Chapitre 1</b> : Aglaé, ou la Beauté vue par la Science ; un accélérateur de particules au Louvre depuis 20 ans par <b>Philippe Walter</b> .....	13
<b>Chapitre 2</b> : Trésors de la mémoire et mode opératoire des œuvres par <b>Michel Menu</b> et <b>Rose Agnès Jacquesy</b> , d'après la présentation de <b>Sarkis</b> .....	41
<b>Chapitre 3</b> : Chimie analytique, art et patrimoine, vers une vision commune par <b>Christian Amatore</b> .....	59
<b>Chapitre 4</b> : Matériaux du patrimoine et altération. Analyses par rayonnement synchrotron par <b>Koen Janssens</b> .....	97
<b>Chapitre 5</b> : Couleurs originelles des bronzes grecs et romains. Analyse de laboratoire et patines intentionnelles antiques par <b>Sophie Descamps-Lequime</b> .....	115
<b>Chapitre 6</b> : La chimie crée sa couleur... sur la palette du peintre par <b>Bernard Valeur</b> .....	129
<b>Chapitre 7</b> : Ateliers et athanors par <b>M.A. THEBAULT</b> .....	169



<b>Chapitre 8</b> : Faience et verre, de la protohistoire à l'histoire ancienne par <b>Anne Bouquillon</b> et <b>Rose Agnès Jacquesy</b> , d'après la conférence de <b>Jean-Pierre Mohen</b>	187
<b>Chapitre 9</b> : L'art du verrier : des nanotechnologies depuis l'Antiquité ! par <b>Jean-Claude Lehmann</b> .....	207
<b>Glossaire</b> .....	221
<b>Crédits photographiques</b> .....	227

# Avant- propos

*L'Actualité Chimique* veut contribuer à faire connaître à un large public l'impact qu'ont, par leurs résultats, les Sciences Chimiques pour leur vie quotidienne. Dans le même objectif, la Fondation de la Maison de la Chimie organise des colloques et autres manifestations scientifiques qui traitent chaque fois d'un domaine d'application particulier (la mer, la santé, l'art et le patrimoine, l'alimentation... et beaucoup d'autres champs qui concernent la vie en société). La rencontre entre ces deux initiatives donne naissance aux ouvrages, confiés à l'éditeur EDP Sciences pour l'édition et la diffusion, « La chimie et... », qui veulent pérenniser les enseignements des colloques. Après les premiers volumes, « La chimie et la mer », puis « La chimie et la santé », c'est aujourd'hui « La chimie et l'art » que vous présente la collection *L'Actualité Chimique - Livres*. Même s'ils veulent faire connaître les apports multiples et souvent insoupçonnés des Sciences Chimiques à un vaste auditoire, ces ouvrages demandent à leurs lecteurs de disposer d'une certaine

base de culture scientifique, au-delà de la curiosité qui les a conduits à s'en approcher.

S'ils ne sont pas, *stricto sensu*, les comptes rendus des colloques de la Fondation, ces ouvrages en présentent néanmoins les contenus d'une façon fidèle. Les divers chapitres s'appuient sur les conférences qui y ont été présentées. Un soigneux travail de rédaction, concerté avec les auteurs des conférences, en reprend les messages, en y ajoutant, parfois, des contenus pédagogiques permettant leur accès au plus grand nombre et harmonisant les niveaux de formation nécessaires pour aborder les différents chapitres. Ce travail est l'œuvre d'une équipe éditoriale de quatre scientifiques, qui a travaillé en contact étroit avec les conférenciers du colloque, et parfois, avec leur accord, en se substituant à eux.

« La chimie et l'art, le génie au service de l'homme » place résolument le débat en faveur de la chimie là où on ne l'attendrait pas. L'art est le lieu de l'émotion, du loisir et du rêve ; la chimie en regard n'apparaît que comme austère :

une science dont il faut apprendre le langage et les concepts, une technique qui se fait trop souvent accuser d'être cause de dommages à l'environnement. Pourtant, ce livre montre l'artiste et le chimiste comme complices, tous deux « transformeurs de matière » : nouvelles matières signifie nouvelles expressions pour le sculpteur, l'architecte, le plasticien. Et si l'œuvre d'art est souvent (toujours ?) dépendante de la matière dans laquelle elle s'exprime, le chimiste est le détective rêvé pour aider l'artiste du futur et comprendre celui du passé.

Cette proximité entre artistes et chimistes, pas toujours consciente mais primordiale, nous avons souhaité, avec la Fondation de la Maison de la Chimie, en amener l'évidence en réunissant des auteurs des deux communautés. Les avantages de fait que les uns et les autres retirent de leurs interactions révèlent l'importance des sciences chimiques aussi dans ce domaine culturel où le public peut-être ne l'avait pas perçue. Affectée à l'étude, au moyen des outils et des concepts les plus avancés, de

la matière – ses transformations, l'analyse de ses caractéristiques – la chimie, comme malgré elle, se trouve convoquée auprès des artistes. Dans ce domaine, éloigné des procès, trop souvent mal instruits mais bien réels, qu'elles peuvent rencontrer dans d'autres secteurs, les sciences chimiques peuvent ici être évaluées en toute sérénité. Le lecteur de cet ouvrage appréciera sans nul doute l'étendue de leurs performances et l'efficacité avec laquelle la recherche les fait progresser.

**Paul Rigny**

**Rédacteur en chef**  
*L'Actualité Chimique*

**Directeur de la collection**  
*L'Actualité Chimique - Livres*

**Équipe éditoriale :**

**Minh-Thu Dinh-Audouin,**  
*L'Actualité Chimique - Livres*

**Rose Agnès Jacquesy,**  
Fédération Française pour les sciences de la Chimie (FFC)

**Danièle Olivier,** Fondation de la Maison de la Chimie

**Paul Rigny,**  
*L'Actualité Chimique - Livres*

# Préface

Parce que la fascinante créativité de l'homme s'exprime aussi bien dans les réalisations chimiques que dans les diverses expressions artistiques, parce que les outils d'analyse et les concepts de la Chimie contribuent de manière croissante à l'expertise et à la préservation des matériaux et des œuvres de notre patrimoine culturel, de tous les domaines de l'Art et de toutes les époques, parce que l'apport des techniques chimiques les plus élaborées éclaire désormais le processus de création artistique, qu'il relève du passé le plus lointain ou du présent le plus actuel, et éveille l'intérêt des meilleurs chimistes de la recherche publique comme de l'industrie pour qu'ils y contribuent à leur tour, nous avons souhaité faire dialoguer chimistes et créateurs d'art en permettant à ces derniers d'exprimer leur vision du monde et leurs interrogations vis-à-vis de la matière et des technologies de sa transformation ou de sa préservation. Le dialogue entre l'artiste et le chimiste apporte au premier la maîtrise de la matière lui permettant d'accroître sa liberté d'action et d'aug-

menter les facettes de sa créativité, et pose au second des défis inhabituels qui exaltent sa propre créativité scientifique.

Cette continuité de regard entre la Science et l'Art, et la richesse des applications qui en résultent, sont mal connues du public et même parfois insuffisamment du scientifique comme de l'artiste. À l'occasion du vingtième anniversaire de l'installation de l'accélérateur de particules Aglaé au Musée du Louvre, il nous a été particulièrement agréable de nous associer à nos collègues et amis du Centre de recherches et de restauration des musées de France pour montrer au public, et aux jeunes en particulier, combien la Chimie et l'Art s'enrichissent mutuellement et cela depuis très longtemps. La Fondation de la Maison de la Chimie et le CNRS sont heureux d'avoir pu organiser un colloque ouvert au grand public qui a réuni pour la première fois des conférenciers très divers : artistes de renom, scientifiques internationalement reconnus, conservateurs de l'Art et du Patrimoine, industriels : tous unis par la passion

Extrait de la publication

de la création au service de l'homme et par l'amour du Beau. Leur rencontre et leurs échanges mutuels, mais aussi avec les participants du colloque, sont retranscrits dans les chapitres de cet ouvrage, dans lesquels sciences, art et culture sont intimement mêlés. Je tiens à tous les remercier pour avoir accepté notre invitation et y avoir répondu si généreusement par de superbes contributions, avec une mention particulière pour les artistes qui ont accepté de se plier au jeu inhabituel pour eux de coopérer étroitement avec les scientifiques à la rédaction d'un ouvrage destiné à des lecteurs non spécialisés.

La Fondation de la Maison de la Chimie a l'objectif et la volonté d'apporter à un large public, et aux jeunes en particulier, une image aussi exacte que possible du rôle des sciences de la chimie dans

notre société, en expliquant notamment toujours mieux les apports souvent mal connus de ses applications dans la qualité de notre vie. C'est l'objectif de cet ouvrage qui appartient à la collection « Chimie et... », qui, sur des thèmes transdisciplinaires et d'intérêt sociétal majeur, réunit les meilleurs spécialistes des domaines choisis pour débattre sur ce que les concepts, méthodes et applications de la chimie leur apportent ou pourront leur apporter.

J'espère que cet ouvrage sur *La Chimie et l'Art* sera pour chacun de ses lecteurs tout à la fois agréable et enrichissant, et qu'il illustrera l'intérêt et la richesse du dialogue entre les disciplines.

**Bernard Bigot**  
**Président de la Fondation**  
**Internationale de**  
**La Maison de la Chimie**

# Aglaé, <sup>ou</sup> la Beauté vue <sup>par</sup> la Science

**un accélérateur  
de particules au Louvre  
depuis 20 ans**

*Ce chapitre est dédié à la mémoire  
de Joseph Salomon, physicien,  
responsable d'AGLAÉ de 1989 à 2009,  
décédé le 3 février 2009.*

La matière constituant un objet d'art ou d'archéologie recèle de nombreux indices très utiles pour leur étude. En particulier, sa composition chimique permet d'identifier le matériau, sa provenance, les recettes de fabrication et ses éventuelles altérations. L'accélérateur de particules Aglaé a été installé au Palais du Louvre à Paris (**Figure 1**) pour permettre le développement de l'analyse non invasive des

œuvres... et offrir un nouveau regard sur leur histoire.

Mais comment est-il possible d'analyser des objets de musées sans effectuer de prélèvement ? Comment a-t-on pu ainsi résoudre des énigmes cachées derrière des œuvres d'art et des objets archéologiques ? Racontons l'histoire et l'évolution d'un instrument exceptionnel, créé par les scientifiques au service de l'Art...  
Extrait de la publication



Figure 1

L'accélérateur de particules Aglaé trône dans les laboratoires souterrains du musée du Louvre et travaille pour donner vie aux œuvres d'art.

## 1 La naissance d'Aglaé et sa gestation

Depuis décembre 1987 est installé au Centre de recherche et de restauration des musées de France (C2RMF) un accélérateur d'ions qui a été baptisé Aglaé (Figure 1). C'est le nom d'une des trois Grâces de la Grèce ancienne, associée à la beauté, mais cet acronyme signifie également *Accélérateur Grand Louvre d'Analyse Élémentaire*. Un tel appareil permet de mettre à disposition des responsables des collections de musées, des scientifiques et des restaurateurs, un ensemble de techniques dites **d'analyse par faisceau d'ions** énergétiques (*Ion Beam Analysis*, IBA), couramment utilisées en physique des solides et des matériaux, et plus récemment en biologie.

Cette installation perfectionnée, complexe et performante pour analyser les matériaux a été choisie pour répondre à trois critères

essentiels dans le domaine muséologique :

- opérer d'une manière non destructive sur des œuvres ou sur des échantillons, évitant ainsi la multiplication des prélèvements ;
- présenter une grande sensibilité, augmentant considérablement le nombre d'éléments chimiques décelés simultanément, même ceux présents à l'état de traces. Car les plus infimes d'entre elles peuvent se révéler déterminantes pour fournir des critères de caractérisation de la provenance, de l'époque ou de l'authenticité des objets !
- permettre d'effectuer très rapidement l'étude de séries d'objets pour établir des rapprochements chronologiques, technologiques ou esthétiques, que l'on met en évidence simultanément grâce aux traitements des données par ordinateur.

Pour répondre à ces critères, les chercheurs du C2RMF ont développé une ligne expérimentale spécifique à Aglaé, que l'on appelle le **micro-faisceau extrait à l'air**. Ce dispositif original, dont nous allons décrire le principe (paragraphe 3), a atteint un très haut degré de sophistication. Depuis quelques années, l'intérêt de cette approche a d'ailleurs conduit des équipes européennes à demander l'accès de l'accélérateur dans le cadre de l'infrastructure intégrée Eu-ARTECH<sup>1</sup>.

1. Eu-ARTECH est un projet inscrit dans le 6<sup>e</sup> programme cadre de recherche et développement européen, et coordonné par l'université de Pérouse (Italie). Treize

**Aglaré a vingt ans aujourd'hui**, et sous son faisceau d'ions sont passés des matériaux aussi divers que des bijoux en or et en argent, des objets en alliage cuivreux, des gemmes, des objets en verre et des céramiques couvertes de glaçure, des encres et des pigments, et aussi des pierres, des os et de l'ivoire, ou encore des produits de restauration ou de corrosion, pour ne pas tout citer...

C'est pour fournir des informations précieuses aux chercheurs au cours de leurs études, dont les enjeux sont de taille : comprendre les techniques de fabrication, étudier les provenances des matériaux, rechercher des critères pour authentifier et dater des œuvres, comprendre le vieillissement des matériaux ou les conditions d'altération, en vue de leur conservation et parfois leur restauration. Autant de démarches qui contribuent à l'histoire de l'art, à l'histoire des techniques, à l'archéologie – en permettant de mieux comprendre les modes de vie des anciens à partir de l'étude du matériel – et à la muséologie, en contribuant à

---

structures de recherche de huit pays d'Europe, toutes concernées par la conservation et la connaissance des œuvres d'art, sont les partenaires de ce projet qui a démarré en juin 2004 pour durer cinq ans. Les institutions partenaires de Eu-ARTECH collaborent à des programmes qui réunissent physiciens, chimistes, spécialistes des matériaux, conservateurs, archéologues, historiens de l'art et restaurateurs. Ces institutions sont, dans leur pays, des références en matière d'étude et de conservation du patrimoine.

la conservation des œuvres et en les documentant, notamment à l'occasion d'expositions.

Retour sur vingt ans de vie pour Aglaré...

### 1.1. Un pari ambitieux

Le pari fait en 1980 d'installer un accélérateur de particules au Laboratoire de recherche des musées de France (LRMF, ancien nom du laboratoire du C2RMF. *Encart « Le C2RMF, un grand laboratoire dédié au Patrimoine »*), était fondé sur l'idée que les *techniques d'analyse par faisceaux d'ions*, couramment utilisées en sciences des matériaux, devaient permettre des avancées importantes dans la connaissance du Patrimoine, en répondant aux interrogations des conservateurs, historiens de l'art et archéologues. L'enjeu était de réaliser de 3 000 à 5 000 analyses par an sur des objets, des prélèvements mais également des aérosols pour des études environnementales dans les musées. L'avantage des méthodes d'analyses par faisceaux d'ions était leur facilité d'utilisation pour des analyses panoramiques non destructives, en série, quelles que soient les natures des matériaux constituant les œuvres d'art et les objets archéologiques.

### 1.2. Un projet se dessine

Un projet, nommé PIXE (*Particle Induced X-ray Emission*) dans un premier temps, fut lancé et reçut rapidement



## LE C2RMF, UN GRAND LABORATOIRE DÉDIÉ AU PATRIMOINE

L'histoire d'un grand laboratoire de musées n'aurait pas existé sans la découverte fondamentale des rayons X par Röntgen en 1895. On mesure combien l'analyse par rayons X a révolutionné le monde de la physique, puis le domaine de la santé. Mais son intérêt dans le domaine de l'art a été mis en évidence pour la première fois en 1920 par André Chéron, qui réalisa au musée du Louvre une radiographie du tableau *Enfant en prière* de Jean Hey, et montra qu'il était possible d'analyser les œuvres d'art en profondeur : mettre en évidence les dégradations, déterminer la composition des pigments utilisés, etc. La physique et la chimie allaient devenir des alliés précieux pour le patrimoine : comprendre les œuvres et objets archéologiques, les authentifier, les conserver, les restaurer...

C'est alors qu'est né en 1968 le **Laboratoire de recherche des musées de France (LRMF)**, destiné à l'étude scientifique des œuvres d'art. En 1998, il fusionna avec le Service de restauration des musées de France, pour donner naissance au **Centre de recherche et de restauration des musées de France (C2RMF)** actuel (*Figure 2*).

A



B



Figure 2

Les locaux du Centre de recherche et de restauration des musées de France (C2RMF) (A), installés au Grand Louvre (B).

le soutien de la communauté scientifique, même si les conditions initiales n'étaient pas des plus favorables. Mais l'enthousiasme de la petite équipe des origines allait compenser certaines insuffisances (taille réduite de l'équipe, budget limité, etc.).

Le LRMF fut donc désigné maître d'œuvre en 1983 et il commença à développer des contacts étroits avec différents laboratoires du CNRS<sup>2</sup>, de l'Université, du

2. Centre national de la recherche scientifique.

CEA<sup>3</sup> et de l'IN2P3<sup>4</sup>. C'est en Comité interministériel de la recherche scientifique et technique, fin 1982, qu'une première enveloppe budgétaire fut décidée, puis complétée en 1983 par le Ministère de la Recherche, et les années suivantes par le Ministère de la Culture (sur le budget civil de la recherche et du développement). Laurent Fabius, Jack Lang et Hubert Curien ont chacun, dans leurs ministères respectifs, joué un rôle décisif dans la décision de renforcer un champ disciplinaire, considéré prometteur pour l'étude et la conservation scientifiques des biens culturels. Les directeurs des musées de France successifs furent eux aussi convaincus de l'effet d'entraînement d'un tel système d'analyse pour un laboratoire de musées.

Il fallait donc le lancer, ce projet PIXE...

Sa mise en œuvre a réellement démarré à l'automne 1983, avec l'aide de Georges Amsel, directeur du système d'analyse par faisceau d'ions (accélérateur Van de Graaf) du Groupe de Physique des Solides de l'Université Paris VII et du CNRS au campus de Jussieu (**Encart : « Aglaré et ses pères »**). Expert international de ces méthodes, aidé par Michel Menu dès 1984, il fut désigné comme chef de projet au LRMF. Un groupe d'experts fut simultanément constitué pour préciser le

cahier des charges de l'opération, G. Amsel et M. Menu ont assuré la direction scientifique et technique du projet et constitué une équipe locale compétente en installant les premiers équipements d'Aglaré sur l'accélérateur du campus de Jussieu [1].

La décision d'aller de l'avant a définitivement été prise en 1985 à la suite de la publication par Roger Bird [2] d'une étude exhaustive sur les applications des techniques d'analyse par faisceaux d'ions à l'art et à l'archéologie, suivie d'un colloque international portant sur ce même thème, organisé par le LRMF à l'Abbaye de Pont-à-Mousson début 1985 [3], grâce au soutien de l'OTAN et du Conseil de l'Europe. Dans le même temps, l'utilisation du PIXE s'imposait pour de telles études dans d'autres laboratoires de physique et la possibilité d'étudier directement les documents était démontrée sur des œuvres aussi célèbres que la Bible de Gutenberg par Thomas Cahill et Bruce Kuzko au Crocker Nuclear Laboratory de l'Université de Californie [4].

### 1.3. L'installation, enfin...

Après quelques péripéties, l'installation d'Aglaré dans les locaux souterrains du laboratoire fut décidée ; le gros œuvre du bâtiment fut réalisé en 1987 sous l'autorité de l'établissement public du Grand Louvre, ainsi que l'aménagement d'une première tranche de locaux pour l'accélérateur Aglaré (**Figure 3**) : une salle pour l'accélérateur, d'une dimension

3. Commissariat à l'énergie atomique.

4. IN2P3 : Institut national de physique nucléaire et de physique des particules, un institut du CNRS.

## AGLAÉ ET SES PÈRES

La conception de la machine et le choix de l'accélérateur ont été réalisés en relation avec le Groupe de Physique des Solides de Jussieu, sous la direction de Georges Amsel : l'accélérateur lui-même est un modèle électrostatique tandem de 2 millions de volts Pelletron 6 SDH-2 acquis auprès de la société National Electrostatic Corp. (Middletown, Wisconsin), aux États-Unis. Il permet d'accélérer des protons jusqu'à 4 MeV, des particules alpha jusqu'à 6 MeV, ainsi que des ions plus lourds (O, N, etc.). Il a été équipé dès l'origine d'une source d'ions Alphasat qui présentait l'avantage de permettre la production de particules variées (protons, deutons,  $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$ ,  $^{15}\text{N}$ ). C'est une source à cellule d'échange de charge avec une vapeur de rubidium, dont le fonctionnement est apparu par la suite assez capricieux. Elle a été complétée par la suite, en 1995, par une source radiofréquence à haute brillance Duoplasmatron plus adaptée pour la production des protons et deutons, brillante, stable dans le temps et plus simple à mettre en œuvre [5].

Avec l'arrivée du physicien Joseph Salomon en 1985, puis de Thomas Calligaro en 1986, tous deux physiciens nucléaires formés au Centre de recherche nucléaire de Strasbourg, le cœur de l'équipe technique de l'accélérateur était en place. Cette équipe a été complétée par Jacques Moulin, ingénieur au Groupe de Physique des Solides de Jussieu. À partir de 1989, et grâce à l'action des directeurs du laboratoire, Maurice Bernard puis Jean-Pierre Mohen, et de leur adjoint Jean-Michel Dupouy, puis de Jean-Claude Dran, responsable du groupe Aglaé de 1995 à 2003, l'équipe se renforcera par l'arrivée de deux ingénieurs d'études, un pour les développements mécaniques et l'autre pour ceux liés à l'électronique et à la détection. Aujourd'hui, cette équipe est constituée de Lucile Beck (physicienne, responsable du groupe), Brice Moignard (mécanique et machine), Laurent Pichon (acquisition et électronique) et Thierry Guillou (mécanique et sécurité).



Figure 3

Salle de la machine avant l'installation d'Aglaé.

de 15 x 30 mètres, sans pilier, une salle de contrôle accompagnée de pièces techniques et une salle de réunion.

La volonté de pouvoir mettre en œuvre des techniques utilisant des faisceaux de deutons<sup>5</sup> imposa alors une protection anti-neutrons et la réalisation autour de la salle (murs, sols, plafonds) d'une dalle d'une épaisseur d'un mètre de béton, ainsi qu'un accès par des chicanes anti-radiations et une porte

roulante en béton de 80 cm d'épaisseur. La distribution et la circulation des effluents firent également l'objet d'une étude particulière : extraction des gaz polluants et distribution d'eau de refroidissement déminéralisée par des échangeurs branchés sur un réseau d'eau froide. La distribution du courant électrique fut séparée en trois réseaux « accélérateur », mesure et domestique au travers de transformateurs d'isolement afin de garantir des conditions optimales de mesure des signaux émis lors des expériences.

Les éléments de l'accélérateur furent livrés en décembre

5. Un deuton est un noyau du deutérium (isotope de l'hydrogène), comprenant un proton et un neutron.

Extrait de la publication

1988 (Figure 4) et le montage de la machine réalisé en 1989. Des réglages, des tests, des améliorations techniques furent effectués par l'équipe Aglaé pendant plus de deux ans.

Aglaé était maintenant installé : les faisceaux d'ions pouvaient entrer en action. Place à la physique, place à l'analyse des œuvres d'art...

## 2 Les exploits d'Aglaé

### 2.1. L'analyse par faisceaux d'ions, ou lire dans la matière sans la détruire

Avec une pareille équipe et un tel équipement dans l'environnement du Grand Louvre, il est devenu possible de disposer de différentes méthodes de caractérisation physico-chimique de la matière. Ces méthodes s'appellent PIXE (*Particle Induced X-ray Emission*), PIGE (*Particle Induced Gamma-ray Emission*), RBS (*Rutherford Backscattering Spectroscopy*), NRA (*Nuclear Reaction Analysis*), ou encore ERDA (*Elastic Recoil Diffusion Analysis*)... Engouffrons-nous dans la matière, au cœur de ses atomes, sièges d'interactions entre les noyaux et leurs cortèges d'électrons : ***l'Encart « Les faisceaux d'ions font parler la matière »*** nous décrit les phénomènes qui ont lieu lorsque l'on expose une œuvre d'art à un faisceau d'ions.

Afin de mettre en œuvre toutes ces méthodes d'analyse approfondies, l'équipe d'Aglaé devait solidement armer l'accélérateur. L'ensemble d'analyse a été équipé dans un premier temps avec

deux lignes, une à 45° équipée d'une chambre d'analyse sous vide, une à 30° destinée à un faisceau extrait à l'air (cette technique originale sera décrite dans le paragraphe 3). L'accélérateur avait aussi été conçu pour permettre à terme une diversification, avec un microfaisceau, un **spectromètre de masse** pour la datation radiocarbone, de l'activation neutronique. Seul le microfaisceau verra le jour ; le dispositif de spectrométrie de masse pour la datation radiocarbone sera installé à Saclay en 2003, au Laboratoire de mesure du carbone 14 (LMC14, UMS 2572 du CNRS). Très récemment, ce sont des installations de rayons X pour la fluorescence 3D et la microdiffraction des rayons X que l'équipe a mis en place dans ce local pour compléter le dispositif Aglaé.

### 2.2. Quand Aglaé fait parler des œuvres

#### 2.2.1. La méthode PIXE apporte des réponses en art et en archéologie

La méthode PIXE est de loin la plus utilisée avec Aglaé pour identifier des matériaux, des techniques et rechercher les origines de l'objet étudié. Elle a, par exemple, été employée pour caractériser la nature des métaux et des incrustations de trois pectoraux égyptiens de l'époque ramesside<sup>6</sup> conservés au musée du Louvre

6. L'époque ramesside est une époque de l'Égypte ancienne s'étendant de 1295 à 1069 av. J.-C. (soit de la XIX<sup>e</sup> à la XX<sup>e</sup> dynastie), caractérisée par l'abondance des rois portant le nom de Ramsès.



Figure 4

Livraison de l'accélérateur Aglaé au milieu du chantier du Grand Louvre.

# Crédits photographiques

## CHAPITRE 1

Fig. 5 : CNRS Photothèque/C2RMF/C. Alexis, UMR 171 – Laboratoire du centre de recherche et de restauration des musées de France – Paris.

## CHAPITRE 3

Fig. 9 : C2RMF/D. Bagault.

Fig. 10 : RMN/Les frères Chuzeville, Paris, musée du Louvre.

Fig. 11 : C2RMF/D. Vigears.

Fig. 12 : C2RMF.

Fig. 16 : Lehnert & Landrock, Le Caire.

## CHAPITRE 4

Fig. 2B : EPSIM 3D/JF Santarelli, Synchrotron Soleil.

Fig. 2C : Synchrotron Soleil.

## CHAPITRE 5

Fig. 1 : Athens, Ministry of Culture, Archaeological Receipts Fund.

Fig. 2A : RMN/H. Lewandowski.

Fig. 2B : C. Bastien.

Fig. 3 : Louvre/P. Lebaube.

Fig. 4 : M. Aucouturier.

Fig. 5 : C2RMF/D. Bagault.

Fig. 6 : C. Bastien.

## CHAPITRE 6

Fig. 4A : BPK, Berlin, Dist. RMN/Elke Estel/Hans-Peter Kluth.

Fig.4B : Musée d'Orsay, Dist. RMN/Patrice Schmidt.

Fig. 9A : CNRS Photothèque/Pages – C. Sandrine, UMR 171 – Laboratoire du centre de recherche et de restauration des musées de France – Paris.

Fig. 9B : CNRS Photothèque/Département des Antiquités Égyptiennes du Musée du Louvre, UMR 171 – Laboratoire du centre de recherche et de restauration des musées de France – Paris.

Fig. 10 : With kind permission from Springer Science + Business edia : Applied Physics A, Daniilia S. (2008) 90 (3).

Fig. 16 : ADAGP. Paris, musée national d'Art moderne – Centre Georges Pompidou, Dist. RMN/A. Rzepka.

Fig. 18 : RMN/Jean-Gilles Berizzi.

Fig. 19 et 29 : ADAGP. Paris, musée national d'Art moderne – Centre Georges Pompidou, Dist. RMN/P. Migeat.

Fig. 21 : Erich Lessing/ akg-images.

Fig. 24 : Lindenau-Museum.

Figs. 25,35 : RMN/Christian Jean.

Fig. 36 : ADAGP/photographes Kedl.

#### CHAPITRE 7

Fig. 3 : Tutti/Huet. Avec l'aimable autorisation de l'artiste et de la Galerie Daniel Templon, Paris.

Fig. 4A, 4B et 19B : Succession H. Matisse.

Fig. 16A et 16B : ADAGP, Paris 2010.

#### CHAPITRE 8

Fig. 2A : D. Descouens.

Fig. 2C, 3, 7, 8, 14B, 16, 17, 18 et 20 : C2RMF/D. Bagault.

Fig. 4 : Musée du Louvre/C. Rebière-Plé.

Fig. 5A : CNRS Photothèque/ A. Lebrun, UMR 7055 – Préhistoire et technologie – Nanterre.

Fig. 5B : CNRS Photothèque/B. Barthélémy de Saizieu, UMR 7055 – Préhistoire et technologie Nanterre.

Fig. 6A : CNRS Photothèque/G. Monthel, UMR 7055 – Préhistoire et technologie – Nanterre.

Fig. 6B : CNRS Photothèque/ M.-L. Inizan, UMR 7055 – Préhistoire et technologie – Nanterre.

Fig. 9 : C2RMF/D. Bagault, B. Barthélémy de Saizieu.

Fig. 10 : RMN/H. Lewandowski. Musée du Louvre.

Fig. 11, 12 et 19 : @ Mission de Ras Shamra/V. Matoïan.

Fig. 13 : C2RMF/D. Vigears.

Fig. 14C : C2RMF/A. Bouquillon.

#### CHAPITRE 9

Fig. 5 : The Trustees of the British Museum.

Fig. 10 : d'après *Coloration des verres par des nanoparticules*, par Jacques Lafait «Verre» vol.12, N°4 Août 2006.

Fig. 11, 12, 14 et 15 : Saint Gobain.