

Physique et culture

L'année de la physique, à la croisée des sciences et des arts

L'espace-temps et le « grain » de lumière

L'ensemble des physiciens fêtent en 2005 le centième anniversaire de cette année particulière, parfois dénommée *l'année miraculeuse*, qui a vu Albert Einstein révolutionner la physique moderne. Avec ses considérations sur la propagation de la lumière, et la nouvelle théorie de la relativité qui en résulte, c'est à la nature même de notre espace qu'il s'attaque, remplaçant le théâtre habituel où l'homme semble s'ébattre (avec un temps qui s'écoule de façon indifférente aux trois dimensions d'espace) par un couple espace-temps aux propriétés subtiles, mais seulement sensibles aux très grandes vitesses.

Einstein propose aussi de redonner à la lumière des propriétés corpusculaires, après un XIX^e siècle où l'approche ondulatoire avait semblé triompher. C'est d'ailleurs pour son grain de lumière (le photon), qu'il obtiendra le prix Nobel en 1922. Depuis lors, les physiciens doivent composer avec cette dualité entre nature ondulatoire et corpusculaire de la lumière, étendue quelques années plus tard à la matière. Enfin, moins connue, son analyse de ce que l'on appelle le mouvement brownien, qui installe en particulier un pont entre les mondes microscopiques et macroscopiques, et permettra par exemple à Jean Perrin une mesure expérimentale du nombre d'Avogadro, qui témoigne de cet écart.

Les sciences pour construire l'avenir

Au-delà de cet aspect commémoratif, c'est une communauté scientifique bien mobilisée qui entend faire de cette année un événement largement tourné vers l'avenir afin de relever un triple défi :

- défi intellectuel et culturel, pour faire savoir que des territoires entiers restent à découvrir, au cœur de la physique comme dans ses rapports avec d'autres disciplines, telles les sciences du vivant ou l'environnement ;
- défi économique, car nos espoirs majeurs de développement sont à rechercher du côté de l'innovation. Il faut alors former, en nombre suffisant, des jeunes tournés vers les carrières scientifiques ;
- défi citoyen enfin, au vu des choix importants que nous sommes amenés à faire, directement ou par l'intermédiaire de nos élus. Une condition de l'exercice démocratique est alors qu'aux arguments et débats d'experts fasse écho, dans la société, une culture scientifique plus développée.

2005, année mondiale de la physique

À l'initiative de la Société européenne de physique, alors présidée par le Français Martial Ducloy, cette année mondiale de la physique est devenue « année internationale » après un vote de l'Assemblée générale des Nations unies au printemps 2004 (pour autant on continue à la dénommer AMP). En France, la Société française de physique a confié la responsabilité de l'AMP à la physicienne Michèle Leduc et a formé, avec le ministère chargé de la recherche et les grands organismes de recherche, un comité de pilotage dont la première tâche a été de lancer un appel à projets afin de susciter des initiatives et de les labelliser. Le résultat a dépassé les espérances puisque plus de 200 projets ont été déposés dans un délai très court, émanant tant des habitués de la diffusion de la culture scientifique que de chercheurs moins rompus à cet exercice.

À titre d'exemple, citons l'opération « Paris Ville-Lumières », clin d'œil à l'image emblématique de la capitale, synonyme pour les uns

du siècle du même nom, pour d'autres des nuits agitées de la Belle Époque. Mais pour les historiens, ce nom rappelle également 1881, lorsque la capitale accueillait l'exposition internationale d'électricité. Thomas Edison, qui venait d'inventer une lampe à incandescence révolutionnaire, illuminait la ville de mille ampoules, et faisait rêver les Parisiens. Illuminer Paris, faire encore rêver les Parisiens, mais en les informant, telle est donc l'ambition affichée ! En 2005, l'attention se portera ainsi, entre autres, sur un arc-en-ciel artificiel, de jour comme de nuit, sur un faisceau laser vert tiré entre l'Observatoire de Paris et Montmartre pour mesurer la vitesse de la lumière, ou bien encore sur la mesure de la pollution à l'aide du laser franco-allemand Teramobile.

Arts et sciences : demandez le programme !

Le comité de pilotage a relevé un grand nombre de projets associant arts et sciences, dont nous évoquerons ici quelques-uns.

Exposition

Un premier groupe pourrait relever des « sciences au service des arts », comme l'exposition « Lumière, couleur, dialogues Arts et Sciences », fruit d'une collaboration entre le groupement de recherche « Couleur » du CNRS, le Centre de recherche et de restauration des musées de France (C2RMF), et le Centre de recherche sur la conservation des documents graphiques (CRCDG). Rendez-vous à partir de mi-juin, et pour un mois, au cloître des Cordeliers à Paris 6^e.

Cinéma

La technologie peut certes contribuer puissamment à l'étude des œuvres d'arts ; mais elle peut parfois inviter les artistes sur des sentiers inhabituels ! Les acteurs de « Chaud devant » sauront-ils, sous la direction d'Alain Monclin, exprimer leurs sentiments à travers des gradients de température, dans ce court-métrage de fiction entièrement filmé avec l'une des caméras infrarouge les plus performantes du moment ? Ce projet original résulte d'une collaboration entre la société Thalès et l'université Paris 7 Denis-Diderot ; vampires au menu, le scénario a été écrit par des étudiants, et le DVD, qui présentera également les propriétés du rayonnement thermique, sera largement diffusé dans les lycées d'Ile-de-France à l'automne 2005.

Théâtre

Également largement présente, l'utilisation de diverses formes artistiques, souvent théâtrales, pour faire « passer » un discours scientifique. Les plus jeunes se laisseront bercer par le spectacle « d'astronomie poétique » de Luc Crochez, qui leur fera connaître de façon ludique le cycle de vie des étoiles. Toujours les grands espaces, à partir du lycée, le texte vif de Mohamed Kacimi « big bang.com », petite pièce pour deux acteurs, qui nous emmène du Big Bang à l'avènement de l'homme, puis à la mort programmée du soleil. Encore l'inspiration cosmologique avec la nouvelle pièce de Norbert Aboudharam, qui délaisse le « chat de Schrödinger » pour les « pigeons de Penzias et Wilson », acteurs involontaires de la découverte du « fond cosmologique », rayonnement qui remplit tout l'univers et témoigne de son histoire initiale. L'univers encore et toujours, mais raconté cette fois à la manière d'une recette de cuisine par Jean-François Toulouse et la compagnie « Tombés du

« Doisneau chez les Joliot-Curie » au musée des Arts et Métiers

Dans le cadre des manifestations de l'année mondiale de la physique, le musée des Arts et Métiers, à Paris, a souhaité organiser une exposition consacrée aux recherches des Joliot-Curie et à l'émergence de la « *big science* ».

Le projet est né de la redécouverte de plusieurs reportages photographiques encore méconnus de Robert Doisneau.

Entre 1942 et 1955, le jeune photographe s'est rendu dans les différents laboratoires du célèbre couple de physiciens, à Ivry-sur-Seine, au Collège de France et à l'Institut du radium. C'est un témoignage exceptionnel sur l'instrumentation scientifique développée par ces deux lauréats du prix Nobel de chimie de 1935.

L'exposition *Doisneau chez les Joliot-Curie*, en mettant en parallèle les appareils de physique de l'époque, vestiges d'une science aujourd'hui révolue, avec des photographies d'une qualité remarquable, proposera aux visiteurs une plongée dans un univers alliant le gigantisme des installations avec la fragilité des instruments de mesure. On pourra ainsi découvrir le cyclotron construit à l'initiative de Frédéric Joliot, et qui a été pendant près de 20 ans l'un des fleurons de la science atomique française au Collège de France. De même, le générateur d'impulsions, appareil monumental dont trois étages seront exceptionnellement remontés pour l'occasion, donnera une idée de l'échelle des instruments de physique de l'époque. Enfin, pour la première fois, la technique de Robert Doisneau sera révélée, montrant les secrets du célèbre photographe.



© Atelier Robert Doisneau

Le laboratoire de synthèse atomique d'Ivry (1942).

Doisneau chez les Joliot-Curie : un photographe au pays des physiciens, à partir du 30 mai 2005, au musée des Arts et Métiers, 60 rue Réaumur, Paris 3^e.

Renseignements : 01 53 01 82 00.

<http://www.arts-et-metiers.net>

ciel ». Le « grand artisan », ou le « grand horloger » serait-il donc en vérité un grand cuisinier ? À Toulouse enfin, c'est « Oxygène », pièce de Carl Djerassi et Roald Hoffman, prix Nobel de chimie, où le Français Lavoisier, l'Anglais Priestley et le Suédois Scheele redoublent de virtuosité pour faire reconnaître leur antériorité pour la découverte du précieux gaz. Ce spectacle, à destination d'un public de collégiens et lycéens, s'inscrit dans un parcours de rencontres entre chercheurs et scolaires.

Le théâtre est également l'occasion d'une réflexion sur le milieu scientifique et ses rapports avec les questions de sociétés. À l'honneur, « Les physiciens » de Friedrich Durrenmatt, qui a ouvert l'AMP pour le Sud-Est à Aix-en-Provence, pièce où le grand dramaturge helvétique développe un de ses thèmes favoris : la responsabilité humaine, le sens et les limites de la liberté. Qui sont ces personnages qui se font appeler Newton, Einstein, Moebius ? des criminels, des fous, ou bien des physiciens ? Le spectateur se trouve plongé dans un monde bien étrange, où le plus manipulateur n'est pas forcément celui qu'on croit.

Citons encore deux très intéressants projets de création théâtrale. À Strasbourg, avec « Un physicien disparaît » J.-M. Mercier souhaite évoquer la figure énigmatique d'Ettore Majorana, physicien italien de génie, disparu mystérieusement en 1938. L'occasion de plonger dans le monde de la physique nucléaire d'avant-guerre, et de s'interroger sur la responsabilité des hommes de sciences. Même thème pour « Farmhall », qui met en scène ces physiciens allemands (dont Werner Heisenberg que l'on avait vu superbement mis en scène il y a peu dans « Copenhague 42 ») détenus en 1945 dans une ferme anglaise isolée truffée de micros, et seulement reliés à l'extérieur par l'écoute de la radio. L'annonce du bombardement d'Hiroshima provoque un débat sur les causes qui ont conduit les Allemands à échouer dans la fabrication de la bombe nucléaire.

Danse, musique, etc.

On trouve également plusieurs projets où les sciences apparaissent comme source d'inspiration. Ainsi « Ultra-relativistic e-motion », création d'une pièce vidéo-graphique avec le ballet Preljocaj, où les danseurs, ballottés comme les particules soumises au mouvement brownien, sont des arpenteurs déboussolés de l'espace-temps. Ou bien encore « La preuve par quatre », présenté à la Cité de la musique de Marseille, où plusieurs compositeurs, dont Jean-Claude Risset (médaille d'or du CNRS) présentent des œuvres originales sur le thème du temps. Plus difficile à classer car multiforme, l'ambitieux projet « Physique et art » qui devrait se mettre en place au Parlement de Bretagne à Rennes : expositions à l'intérieur de l'enceinte, mise en éclairage de la façade commandée par les bruits de la ville... À Paris enfin, l'Atelier Z propose, du 19 avril au 6 mai, « Art et science : Bogue 1 », où œuvres d'art et photographies scientifiques essaieront de se mettre en « résonance ». Quatre tables rondes compléteront l'événement.

Voilà donc un survol partiel des événements suscités par l'année mondiale de la physique, couplant plus particulièrement les arts et les sciences. Il est encore possible d'en proposer de nouveaux, les comités régionaux de l'AMP sont à l'écoute de tous les projets.

Rémy Mosseri

Directeur de recherche au CNRS,
enseignant à l'École polytechnique

Responsable de l'année mondiale de la physique pour Paris
<http://www.physique2005-idf.com>

Pour en savoir plus :

www.physique2005.org (site national)

Voir aussi le site consacré à Marie Curie :

<http://mariecurie.science.gouv.fr>

Conserver, exposer :

une gestion de la lumière dans les salles d'exposition

Parmi les nombreux domaines de recherche qui intéressent la conservation préventive des biens patrimoniaux et qui se sont considérablement enrichis ces dernières années – poussière, vibrations, compatibilité des matériaux... –, la lumière a une place à part.

Il s'agit d'abord d'un facteur de dégradation identifié de longue date, au même titre que le climat, ne serait-ce que par la lisibilité et la visibilité de ses effets sur les collections. Tout un chacun peut observer les incidences du soleil sur des rideaux, des photographies... L'infrarouge comme les ultraviolets provoquent des dégradations de la matière, des décolorations dont certaines irréversibles, telle la photo-oxydation.

Mais la particularité de la lumière tient surtout à la contradiction qu'elle suscite auprès de tout responsable patrimonial : l'objet patrimonial devrait en effet en être protégé pour des raisons conservatoires, mais pour répondre à sa mission publique, il doit aussi être exposé, montré ou communiqué et donc obligatoirement confronté à une source lumineuse, naturelle ou artificielle. Résoudre ce paradoxe revient à gérer les différentes interactions entre lumière et objet et à réduire au maximum les impacts néfastes.

Il est d'usage de considérer qu'une exposition de documents graphiques ou photographiques ne doit pas dépasser une intensité lumineuse de 50 lux et ne doit pas se prolonger plus de 3 mois. Cette « norme » peut se révéler peu confortable pour certains types de public – personnes âgées ou mal voyantes – et peut entraîner d'importantes contraintes lorsqu'il ne s'agit pas d'exposition temporaire et que sont en cause des documents essentiels dans le parcours de visite.

On peut aborder différemment cette problématique du temps d'exposition et de ses effets néfastes grâce à la mise en place de dispositifs d'éclairage adaptés, en définissant une sorte d'économie et de gestion de la lumière. Trois paramètres entrent en jeu : les caractéristiques de l'objet patrimonial, le temps d'exposition, la source lumineuse.

Les spécialistes ont identifié trois catégories d'objets en fonction de leur réaction à la lumière, et ont déterminé un quota de lumière au-delà duquel l'intégrité de l'objet est en danger :

- les objets insensibles : pierres, métaux, verres, céramiques... ;
- les objets sensibles : cornes, os, bois polychromes, peintures à l'huile, vernis, laques, photographies noir et blanc... ;
- les objets très et extrêmement sensibles : textiles, papiers, aquarelles, pastels, photos couleurs, poils, plumes...

La quantité de lumière admise est 600 000 lux.heures pour les objets sensibles, 150 000 lux.heures pour les objets très sensibles, 12 500 lux.heures pour les objets extrêmement sensibles.

Vers une nouvelle démarche

À partir de ce constat, et en notant l'effet cumulatif de la lumière (5 000 lux.heures absorbés par un objet sur 100 heures avec un éclairage de 50 lux, sont équivalents à une exposition de 20 heures avec un éclairage de 250 lux), on peut soit offrir un confort plus grand aux visiteurs en éclairant plus mais en exposant moins longtemps, soit restreindre les moments où l'objet est à la lumière, ce qui permet de prolonger son exposition et de limiter la rotation des œuvres, souvent complexe à organiser. Ainsi, un objet sensible (600 000 lux.heures), pourra être « occasionnellement à la lumière » : éclairage par cellule activée par la présence de visiteurs, occultation (tiroir, rideaux...) ou, d'une manière plus actuelle, éclairage dynamique (intensité et durée de l'éclairage modulable). Exposé 2 heures par jour à 100 lux, un objet très sensible peut demeurer accessible au public pendant 750 jours.

Cette nouvelle manière d'aborder la gestion de la lumière en terme de conservation engendre une autre approche de la part des responsables de collections. Il ne s'agit plus seulement de spécifier l'objet concerné mais aussi de préciser, en plus de sa nature, sa place dans le dispositif du discours muséal ou patrimonial, d'examiner les possibilités de rotation – objets en plusieurs exemplaires, dispositif technique facilitant ces rotations – les moyens techniques et humains, la politique du public : quantité, rythme de fréquentation. Elle incite à l'élaboration de nouveaux outils notamment pour la lumière naturelle, comme l'élaboration d'une cartographie lumière, identifiant les endroits plus ou moins adaptés à la présentation de tel ou tel objet du patrimoine.

L'adéquation entre lumière et conservation du patrimoine passe ainsi par une meilleure connaissance physique des collections et de leur tolérance, et par l'intégration de la lumière dans la définition même du projet culturel, dans le double objectif de la préservation du patrimoine et de la délectation du visiteur.

Roland May

Jean-Jacques Ezrati

Centre de recherche et de restauration des musées de France (C2RMF)

<http://www.c2rmf.fr>

Le nettoyage de la pierre au laser

Historique

Le laser (acronyme de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) est une technique qui a vu le jour au milieu du XX^e siècle. Einstein avait en 1921 énoncé la théorie de l'émission stimulée de radiation qui constitue le principe de base du laser. Mais le premier laser ne fut construit qu'en 1959 par un physicien américain du nom de Maiman. D'abord outil de recherche dans les laboratoires de physique fondamentale, les appareils laser ont à partir des années 1970 été utilisés dans le domaine militaire puis dans le monde industriel comme outil et arme pour percer, souder, guider, nettoyer... Vers la fin des années 1980, les scientifiques de la conservation du patrimoine ont envisagé le développement d'une machine laser pour le nettoyage de la pierre.

Le Laboratoire de recherche des monuments historiques a été précurseur en France et en Europe puisque dès 1987, l'un de ses ingénieurs s'associait avec une société fabricante (BMI) pour développer un laser de nettoyage de chantier, mobile, utilisable sur échafaudage, dans la poussière, le froid, le chaud, avec fiabilité et pour un coût raisonnable. Après divers essais, un type de laser fut sélectionné, puis un prototype fabriqué.

Les résultats du nettoyage laser furent comparés avec ceux d'autres méthodes (microsablage, application de compresses...) et ses performances s'avèrent supérieures dans bien des cas. En particulier, il parvenait à éliminer les salissures sans altérer les patines sous-jacentes, même les plus fragiles. Le laser de nettoyage fut introduit dès 1993 dans un premier grand chantier de restauration, à la cathé-

Principe et propriétés du laser

Le laser repose sur le principe de l'amplification par stimulation de radiations ou pompage optique. Un photon stimulateur excite un ion dont le niveau d'énergie augmente. Ce niveau est instable et l'ion revient à un niveau d'énergie stable, en émettant un nouveau photon, équivalent à une onde (dualité onde/particule de la lumière) qui va se propager en phase, selon la même longueur d'onde et la même direction que le photon stimulateur initial. Les deux photons vont à leur tour exciter deux autres ions... on obtient ainsi dans la cavité de résonance entre deux miroirs dont l'un est partiellement réfléchissant, un grand nombre de photons ou ondes se propageant en phase, à la même longueur d'onde et dans la même direction. La somme de ces émissions stimulées produit une lumière dite cohérente (une seule longueur d'onde [lumière monochromatique], en phase et directionnelle) de très forte énergie, très différente de la lumière « naturelle » émise par une ampoule (filament chauffé) diffuse, de faible énergie et incohérente car constituée d'un grand nombre d'ondes différentes qui se propagent dans toutes les directions.



Cl. Thomas Vieweger, Groux/Quélin s.a.

*Essai de nettoyage laser sur un claveau sculpté
(étude préalable à la restauration du portail nord de l'église
Saint-Michel de Bordeaux).*

drale d'Amiens. Depuis, de nombreux portails sculptés prestigieux ont été nettoyés ainsi. En 1995 se tenait à Héraklion, en Crète, le premier congrès international sur le laser dans la conservation des œuvres d'art : LACONA I (*Laser in the Conservation of Artworks*). Un congrès LACONA se tient depuis, tous les deux ans, dans un pays différent (1997, Liverpool ; 1999, Florence ; 2001, Paris ; 2003, Osnabrück en Allemagne ; 2005, Vienne en Autriche¹).

Principes du nettoyage au laser

Le laser comme toute lumière est une onde électromagnétique, mais monochromatique. Chaque laser se caractérise par une longueur d'onde. Le laser de nettoyage des sculptures émet dans le domaine du proche infrarouge au-delà du spectre des ondes visibles, à une longueur d'onde de 1064 nanomètres. D'autres lasers destinés à d'autres applications émettent dans le domaine des ultraviolets ou des rayonnements visibles.

Le laser de nettoyage n'est pas un laser à émission continue de faible énergie comme ceux qui servent à lire les codes barres aux caisses des supermarchés, mais un laser pulsé déclenché très énergétique : les photons (ou ondes) produits dans une « chambre de pompage » (cf. encadré) sont conservés et accumulés jusqu'à un seuil élevé puis libérés sous la forme d'impulsions ou pulses très rapides de l'ordre de 6 à 15 nanosecondes (10^{-9} secondes). L'énergie libérée par chaque pulse est très élevée et la puissance délivrée atteint plusieurs centaines de milliers de watts. Selon les machines, le laser est capable de libérer de 1 à 60 pulses ou tirs par seconde. Cette fréquence de tir relativement rapide permet d'utiliser le laser comme un faisceau continu que l'on déplace sur la surface à nettoyer.

La matière que l'on cherche à éliminer au cours d'un nettoyage est constituée d'un dépôt de microparticules diverses (cendres volantes et microsuires d'origine automobile ou industrielle, pollens, spores, grains éoliens naturels) cimentées par du sulfate de calcium. Ces salissures communément appelées croûtes noires à cause de leur couleur noirâtre, sont caractéristiques des milieux industriels ou urbains pollués.

Le nettoyage consiste à éliminer de la surface de la pierre ces salissures minérales en faisant interagir le rayon laser et la croûte noire. Le rayonnement laser est fortement absorbé par ces salissures superficielles sombres (alors que le support pierre, généralement clair, blanc à jaunâtre, aura plutôt tendance à le réfléchir). Le processus de nettoyage correspond à une photoablation. Les mécanismes qui

interviennent, d'une durée totale de quelques milliardièmes de seconde, ne sont pas encore totalement connus. Cependant, on sait que l'ablation des salissures résulte d'une combinaison d'interactions thermiques et mécaniques entre le rayonnement absorbé et la matière.

Cette interaction provoque à la surface du matériau une rapide élévation de température très localisée et très brève qui conduit à sa fusion et à sa vaporisation pour aboutir finalement à la création d'un plasma (gaz ionisé neutre) dans lequel la température atteint plusieurs milliers de degrés au-dessus de la surface. Les modèles physiques et les tentatives de mesure indiquent que le support ne subit pas d'échauffement notable.

La formation puis la détente brutale du plasma formé sous l'effet du tir laser produisent des ondes de choc mécaniques et des ondes acoustiques qui se propagent dans le matériau, le fragmentent et provoquent l'éjection de particules de tailles variées. L'impact du rayon laser sur la salissure produit en effet un crépitement caractéristique.

Les différences de propriétés (optiques, mécaniques, thermiques...) entre les salissures et leur support constituent un paramètre fondamental pour l'efficacité et la qualité du processus d'ablation. Les réglages qui permettent d'éliminer les salissures sont, au-dessous d'un certain seuil, inopérants sur le support pierre ainsi que sur les patines, beaucoup plus compacts et réfléchissants. On parle ainsi du caractère sélectif et autolimitatif du nettoyage laser. Néanmoins, dans certains cas, par exemple pour éliminer certains traitements anciens, clairs et denses, les conditions d'un nettoyage autolimitatif ne sont pas réunies et comme pour d'autres méthodes (microsablage...) c'est alors le restaurateur qui, grâce à son expérience et à son adresse, parvient à enlever la couche indésirable sans altérer la pierre support. Enfin, les effets mécaniques sont intensifiés si les salissures contiennent de l'eau. En effet, la vaporisation explosive de l'eau sous l'effet du laser augmente le taux d'éjection de particules. C'est la raison pour laquelle généralement les restaurateurs humectent les salissures en pulvérisant de l'eau lorsqu'ils utilisent un laser de nettoyage.

Avantages et limites du nettoyage laser

Le laser présente, par rapport aux autres méthodes, l'avantage de n'utiliser que de l'énergie lumineuse, sans produits chimiques (bases, acides, complexants...), sans particules abrasives (micro-abrasion) et sans pression.

Sur des surfaces fragiles, écaillées, pulvérulentes, prêtes à tomber, il est possible de nettoyer des croûtes noires indurées sans aucun risque. C'est une méthode très sélective, capable d'éliminer une couche très fine suffisamment différente de son support. Le résultat peut être examiné au fur et à mesure de l'opération et le nettoyage peut être arrêté à tout moment.

Cette technique est toutefois inapte à enlever les recouvrements biologiques (mousses, lichens, algues), les dépôts de poussières meubles, et les taches d'imprégnation (encre graffiti...).

Le nettoyage laser est cantonné aux sculptures, en particulier à la statuaire. C'est un nettoyage de très grande qualité mais lent et coûteux. Sur les portails sculptés, il n'est pas rare que soient utilisés plusieurs lasers simultanément (jusqu'à 4). Par ailleurs, le laser modifie la couleur de certains pigments et ne peut être utilisé, à l'heure actuelle, sur les œuvres polychromes.

Malgré son succès, le laser a ses opposants. On l'accuse d'un nettoyage trop uniforme, « trop propre », trop parfait. Certains ont dénoncé le jaunissement de la pierre qu'il entraîne. Les expériences semblent confirmer ce jaunissement, dont la cause reste à déterminer. Cependant, les patines des pierres anciennes sous les croûtes noires sont généralement jaunes ou ocre. Le laser ne ferait donc qu'intensifier une teinte jaune préexistante dont la préservation est un gage de la qualité du nettoyage réalisé. Des procédures de nettoyage complexes, associant laser et compresse, ont été mises au point afin d'éliminer partiellement le « jaune laser ». Les recherches les plus récentes montrent que le couplage d'un laser infrarouge avec un laser ultraviolet permet de nettoyer la pierre sans aucun jaunissement.

Le laser de nettoyage est un des lasers les plus dangereux. Il a un niveau d'émission maximal de 10^{10} W/cm², soit un milliard de fois plus élevé que ce que l'œil reçoit lors d'un éblouissement solaire ! Des règles de sécurité sont donc imposées sur les chantiers. Le restaurateur qui manie le laser ainsi que toutes les personnes qui travaillent dans le chantier portent des lunettes spéciales. Aucun objet réfléchissant n'est présent sur l'aire de nettoyage, qui est fermée, et le fonctionnement du laser est signalé par des lampes clignotantes rouges. Par ailleurs, comme pour toute opération de nettoyage, le restaurateur porte un masque antipoussière et un aspirateur puissant est souvent braqué vers la zone en cours de nettoyage. Enfin, comme

la plupart des autres techniques, le nettoyage laser ne peut se pratiquer en période de grand froid ou de forte chaleur.

Situation actuelle et perspectives

Le laser de nettoyage de la pierre est principalement utilisé en Europe. La France, où une vingtaine de machines fonctionnent et circulent, fait figure de pionnière et rares sont les pays qui ont adopté la technique avec autant de facilité.

Des essais ont été faits pour développer des lasers capables de nettoyer de grandes surfaces (façades en pierre de taille et leur décor). On a songé notamment à utiliser un laser pour décaper certains traitements anciens comme les silicates alcalins qui ont été appliqués en protection ou en peinture sur les façades depuis le XIX^e siècle et qui se révèlent très difficiles à éliminer maintenant que l'on veut retrouver la pierre originelle. Si les possibilités techniques existent, le coût de la recherche et des machines est actuellement rédhibitoire. Il faut néanmoins signaler que le bâtiment de l'hôtel de ville de Rotterdam a été nettoyé avec deux machines emportées sur nacelle.

Le laser serait l'outil idéal pour nettoyer les polychromies, les peintures murales... s'il ne modifiait la couleur de nombreux pigments anciens. Des recherches sont en cours pour comprendre les mécanismes de ces décolorations et d'autres lasers sont testés, à des longueurs d'onde différentes dans l'ultraviolet ou dans le visible, ou avec des impulsions de durée plus courte, de l'ordre de la femtoseconde (10^{-15} s). Par ailleurs, cet outil de nettoyage est maintenant testé sur une grande variété de matériaux et d'objets du patrimoine : textiles, photographies, peintures de chevalet, dorures, ivoires sculptés, papiers, plumes... là aussi, d'autres types de laser pourront s'avérer mieux adaptés et plus performants.

Philippe Bromblet

Centre interrégional de conservation et de restauration du patrimoine (CICRP), Marseille

1. <http://www.lacona6.at>

Cet article est extrait du texte de Philippe Bromblet et Thomas Vieweger : « Le laser de nettoyage de la pierre et la restauration des sculptures », disponible sur le site du Laboratoire de recherche des monuments historiques (format pdf, 10 p.) : <http://www.lrmh.fr>, rubrique « articles scientifiques ».

Identifier les matériaux du patrimoine

La microspectrométrie Raman

Parmi les nombreuses techniques analytiques adaptées à l'étude du patrimoine, la microspectrométrie Raman occupe une position dont l'importance ne cesse de croître. Cette technique, utilisée notamment au sein de laboratoires associés à des musées¹, permet d'identifier à une échelle micrométrique les composés d'un matériau sans le détruire ni l'altérer.

Principe de la technique

La spectrométrie Raman porte le nom du physicien indien auteur de la première publication sur un effet de diffusion de la lumière avec changement de longueur d'onde. Elle analyse les modifications de la lumière diffusée par un objet lorsque celui-ci est éclairé par une lumière monochromatique, maintenant fournie par un laser. Ces changements de longueur d'onde résultent d'une interaction de la lumière laser avec les vibrations entre les atomes dans l'échantillon, qui sont fonction de la structure, donc de la nature des matériaux. Le spectre Raman est un ensemble de bandes dont les positions et, à un degré moindre, les intensités relatives sont caractéristiques de chaque composé². C'est une véritable empreinte digitale, spécifique de chaque composé et qui permet son identification.

L'objet à étudier est placé tel quel, sans aucune préparation, devant le laser, puis l'analyse est faite sans qu'il y ait contact entre l'objet et l'appareil. L'intégrité de l'objet est ainsi assurée.

Quand l'objet est éclairé en utilisant un microscope, la zone analysée a un diamètre de l'ordre du micromètre, bien adapté à l'étude de grains de pigments dans une couche picturale. Lorsque la couleur est obtenue par un mélange de pigments, il est possible d'analyser de façon sélective chaque constituant. Ce mode opératoire permet, en outre, d'étudier des micro-échantillons dont les très faibles dimensions, de l'ordre d'une dizaine de micromètres, rendent le prélèvement acceptable.

Les applications

La spectrométrie Raman a permis de nombreuses études de pigments, notamment sur des fragments de peintures murales gallo-romaines ou sur des manuscrits (cf. encadré).

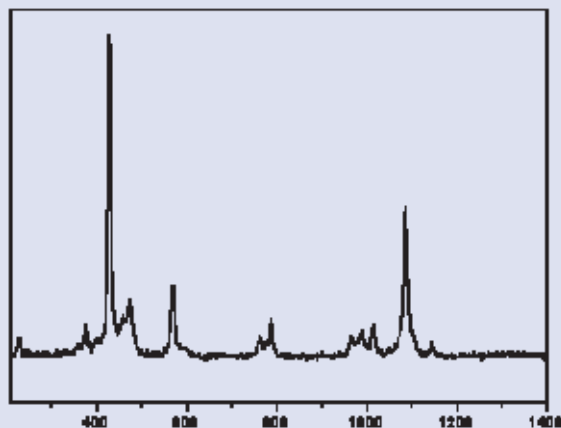
Les développements technologiques de cette technique, en particulier pour améliorer la sensibilité des détecteurs, ont élargi considérablement la gamme des matériaux analysés : colorants, résines et liants, matières plastiques, céramiques, verres, supports de différents

Raman et pigments

La microspectrométrie Raman est une technique bien adaptée à l'identification des pigments. Les objets sont étudiés directement chaque fois que leur sécurité le permettait. C'est le cas, par exemple, des fragments de peinture murale dégagés lors de fouilles de sites gallo-romains. Une grande similitude a été observée pour les pigments utilisés, de Narbonne à Reims. Les ocres jaunes et

obtenue avec du bleu égyptien, identifié dans des sites bretons comme au pied des Pyrénées. La palette des verts est composée à partir de terres dont l'éclat est avivé par l'ajout de particules de bleu égyptien aisément identifié.

Les pigments de manuscrits ont été analysés à partir de microprélèvements réalisés sur leur lieu de conservation. Là



Spectre obtenu avec un microspectromètre Raman sur les particules bleues d'une peinture murale romaine. Le pigment correspondant est le bleu égyptien, pigment de synthèse fabriqué en Égypte dès l'époque des grandes pyramides.



CL.S/C2RMF

Étude de la polychromie d'une statuette de Tanagra conservée au musée du Louvre.

rouges, colorés par deux oxydes de fer, la goéthite ou l'hématite, identifiés par leur spectre Raman, constituent la base de la palette avec un noir de carbone, suie ou produit de calcination, associés à un pigment blanc de carbonate de calcium. L'identification d'un autre pigment rouge, le vermillon, plus onéreux, est liée à l'importance de l'édifice ou de la pièce. La teinte bleue est

encore, le pigment bleu est riche d'information. Dans un manuscrit copte du ^xe siècle conservé à la Bibliothèque nationale de France, deux composés bleus ont été identifiés : un minéral, le bleu de lapis-lazuli, tandis que l'indigo, d'origine végétale, est mélangé à un pigment minéral jaune, l'orpiment, pour donner une couleur verte.

types (plâtres, parchemins), d'où un champ plus vaste de problématiques abordées. Par exemple, les études de verres concernent tant les obsidiennes, verres naturels, pour en retracer les voies de circulation à l'époque néolithique, que les glaçures des porcelaines pour en estimer la température de cuisson et aboutir à différencier les manufactures.

Outre l'histoire de l'art ou l'histoire des techniques, la spectrométrie Raman intéresse aussi la conservation/restauration. Par exemple, l'identification Raman de produits de corrosion est un outil puissant pour comprendre les processus d'altération. Cet apport est particulièrement intéressant dans le cas d'objets ferreux archéologiques dans lesquels de nombreux oxydes de fer, aux spectres Raman bien différenciés, peuvent apparaître en fonction des conditions d'enfouissement ou de conservation. Ces produits, souvent instables et fragiles, doivent être identifiés *in situ*, afin que soient prises en compte simultanément leur nature et leur localisation dans les différentes couches d'altération repérées par ailleurs visuellement sous microscope. Une étude actuellement en cours concerne les altérations importantes que présente une collection d'objets en verre (conservée principalement au Musée national d'Écosse). Elle montre

le rôle essentiel que jouent les produits organiques émis par les matériaux des vitrines dans le processus de dégradation, par l'identification des dérivés de ces produits et la caractérisation d'une modification de la structure des verres.

La présence anachronique de certains produits est un argument de poids pour juger de l'authenticité d'une œuvre. L'essor de la chimie dans la seconde moitié du ^{XIX}e siècle a conduit à la fabrication de produits nouveaux dont les dates de production sont connues avec précision. Les dérivés du chrome, base de pigments jaunes et verts, les colorants d'aniline qui sont à la base d'une magnifique palette, peuvent être les témoins Raman de repeints récents ou de restaurations qui jalonnent l'histoire d'une œuvre. Enfin, la falsification d'une œuvre peut être détectée par l'identification d'un pigment : un objet décoré avec du bleu de Prusse ne peut être antérieur au ^{XVII}e siècle.

Claude Coupy

Laboratoire de dynamique, interactions et réactivité (CNRS)
<http://www.glv-cnrs.fr/ladir>

1. C2RMF, CICRP, British Museum par exemple.
2. Un composé est un corps constitué d'atomes d'espèces différentes.

Les couleurs des œuvres d'art

Une nouvelle méthodologie pour caractériser les composants des couches picturales

La notion de « couleur » semble relever de l'évidence. Pourtant, si l'on interroge des professionnels d'horizons divers, leurs définitions diffèrent selon le cadre théorique et pratique dans lequel elles s'inscrivent. La couleur du physicien formé aux expériences de Newton n'est pas celle du peintre qui se veut héritier de Goethe ; la couleur du linguiste, construction socioculturelle complexe, n'est pas celle du psycho-physiologiste, perception résultant de l'interprétation par le cerveau d'un signal nerveux. L'utilisation de la couleur en science des matériaux du patrimoine culturel nécessite l'adoption, au moins partielle, d'un regard transversal. Au Centre de recherche et de restauration des musées de France (C2RMF), a été récemment expérimentée une nouvelle méthodologie¹ de caractérisation des composants des couches picturales, qui utilise une dimension des œuvres paradoxalement souvent négligée par les scientifiques : la couleur.

Mesurer les couleurs

La physico-chimie du solide nous apprend que la couleur d'un matériau est liée à des transitions électroniques induites par l'absorption de lumière visible au sein de ce dernier. En d'autres termes, la couleur d'un matériau est le résultat de son organisation électronique donc l'une de ses signatures caractéristiques. La mesure objective de la couleur d'un matériau est possible grâce aux dispositifs appelés *spectrophotomètres*, qui mesurent son *facteur de réflectance*, c'est-à-dire sa capacité à renvoyer plus ou moins efficacement des radiations monochromatiques qui composent la lumière polychromatique qui l'éclaire. Un spectre de réflectance est ainsi obtenu.

Depuis quelques années, de rares équipes de recherche utilisent cette dimension de la couleur pour identifier les composants des couches picturales, principalement les pigments. Leur approche méthodolo-

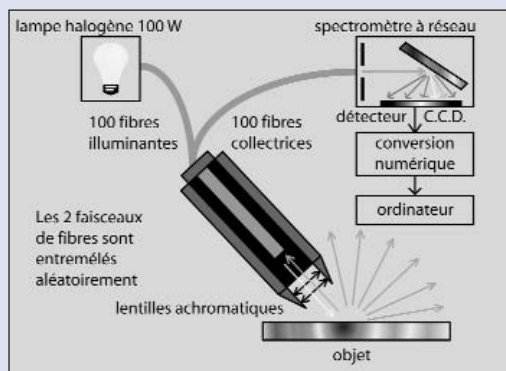


Fig. 1. Schéma de principe du gonio-spectrophotomètre à fibres optiques.

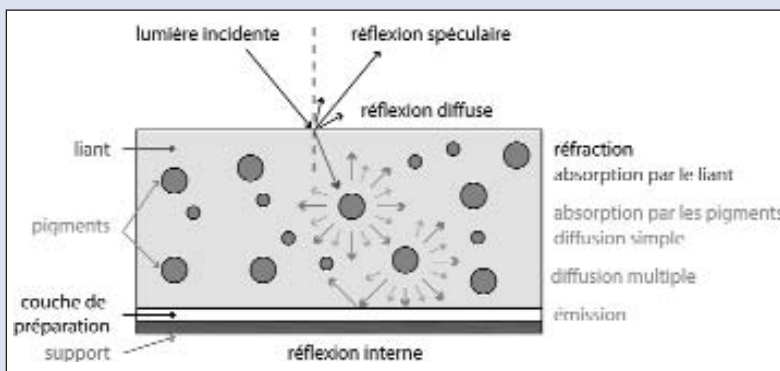


Fig. 2. Représentation schématique des interactions lumière/matière dans les couches picturales.



2001, © C2RMF Odile Guilfon

Fig. 3. Vierge de l'Annonciation, attribuée à Giovanni di Paolo. Musée du Petit Palais, Avignon.

gique repose toujours sur l'utilisation d'une base de données spectro-photométriques de référence : le spectre d'un matériau inconnu est comparé aux spectres de matériaux purs.

Une couche picturale réelle est cependant un milieu bien plus complexe que les seuls pigments purs utilisés pour constituer le référentiel : les pigments y sont mélangés et dispersés dans un liant. La prise en compte de cette caractéristique ignorée jusqu'ici par les protocoles existants, constitue le socle d'une nouvelle démarche expérimentale, visant à développer un outil d'analyse pour identifier la nature des constituants de la matière picturale et évaluer leurs proportions respectives.

Le dispositif expérimental développé au C2RMF depuis 1996 pour mesurer les couleurs est un *gonio-spectrophotomètre* à fibres optiques (fig. 1). Cet appareil est conçu pour réaliser des mesures en rétro-diffusion : la lumière est récoltée dans la même direction que la lumière incidente, mais en sens opposé. La configuration géométrique inhabituelle de ce spectrophotomètre a été choisie pour permettre des mesures non destructives, rapides et sans contact. Cet instrument est, de plus, transportable. Il est donc parfaitement adapté aux mesures, éventuellement *in situ*, sur les œuvres d'art.

La lumière collectée par le spectrophotomètre comporte une information spectrale liée aux composés rencontrés lors de son parcours dans la couche picturale. Celle-ci comporte un médium, le liant, dans lequel sont dispersées des particules colorées et diffusantes, les pigments. Elle peut être recouverte d'un vernis transparent ou légèrement absor-

bant. Elle repose sur un substrat généralement diffusant, typiquement du bois ou de la toile recouverts d'une préparation blanche. Le parcours de la lumière dans un tel milieu est complexe : réflexions, réfractions, absorption, diffusion, etc. (fig. 2). Une modélisation est nécessaire pour tenir compte de ces interactions et faire le lien entre la *grandeur physique mesurée*, le facteur de réflectance de la couche picturale, et les *caractéristiques intrinsèques des matériaux*, qui sont principalement leurs propriétés d'absorption et de diffusion.

La démarche expérimentale

Le modèle le plus adapté est celui élaboré par Paul Kubelka et Franz Munk² en 1931. Cette théorie ne s'appuie pas sur une description microscopique des couches picturales. Elle ne nécessite donc pas une connaissance *a priori* d'informations précises sur la composition de la matière picturale et se trouve particulièrement adaptée à notre problématique.

Dans un premier temps, nous avons testé la faisabilité, évalué la fiabilité et défini les limites de cette méthodologie sur des matériaux de référence : 60 mélanges de pigments purs, secs et en poudre, ainsi que 27 mélanges de gouaches commerciales. L'originalité du protocole consiste à effectuer deux mesures indépendantes par matériau de référence. Ces *deux* mesures permettent d'accéder aux deux paramètres caractéristiques du matériau : son coefficient d'absorption et son coefficient de diffusion. L'hypothèse d'une dépendance linéaire de ces paramètres avec la concentration des composants, vérifiée *a posteriori* par des expériences, introduit la dimension quantitative du traitement des mesures.

Ensuite, cette méthodologie a été appliquée à des nuanciers réalisés par un peintre contemporain, Jean-Pierre Brazs. Sur ces nuanciers, le peintre était chargé d'appliquer sur différents supports des couches translucides de peintures d'épaisseurs et de concentrations pigmentaires données. Les quantités de pigments déposées sur les différentes zones des nuanciers ont été évaluées avec succès. Les résultats ont été validés par microfluorescence X et diffraction des rayons X, avec une précision de l'ordre de 3 %.

Enfin, la démarche a été appliquée au cas concret d'une œuvre d'art : la *Vierge de l'Annonciation* attribuée à Giovanni di Paolo (fig. 3). Dans ce tableau italien du XV^e siècle, la couleur du visage est réalisée à partir d'un mélange de blanc de plomb et de vermillon. Les

variations dans les proportions de ces pigments, utilisées par l'artiste pour réaliser le modelé du visage, ont été calculées. Les résultats sont en concordance avec des évaluations réalisées par traitement d'image sur des microphotographies de coupes transversales.

Ainsi, choix théoriques et expérimentaux se sont révélés fiables et ont permis de développer une méthodologie de traitement des mesures de couleurs qui fournit la nature, les proportions relatives et la concentration absolue des pigments dans les couches picturales.

Les mesures de couleur, grâce à ces travaux de recherche³, pourraient à présent prendre une place plus grande dans le dialogue entre physico-chimistes, historiens d'art, archéologues, conservateurs et restaurateurs, et se révéler une méthode de diagnostic performante dans l'étude des altérations. Un grand nombre d'altérations des pigments se manifestent en effet par des modifications de couleur : au cours du temps, certains verts au cuivre brunissent, le smalt bleu vire au gris... L'aspect non invasif et portable de la méthode, la caractérisation possible des pigments et des mélanges de pigments font de la spectrophotométrie un outil analytique prometteur en science de la conservation et en archéométrie.

Guillaume Dupuis

Attaché temporaire d'enseignement et de recherche,
université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines,
affecté au Centre de recherche et de restauration
des musées de France (C2RMF)
guillaume.dupuis@culture.gouv.fr

1. La spectroscopie de réflectance diffuse dans le domaine du visible.
2. Ingénieurs de l'université de Munich, Paul Kubelka et Franz Munk, respectivement tchèque et allemand, ont publié en 1931 dans la revue scientifique allemande *Zeitschrift für Technischen Physik* un article décrivant le modèle qui porte leur nom. Leur objectif était de mettre au point un traitement mathématique permettant de décrire quantitativement la capacité d'une peinture industrielle à opacifier le support sur lequel elle était étalée en fonction de sa composition (nature et concentration des pigments) et de l'épaisseur de la couche.
3. Guillaume Dupuis, *Couleur de la matière picturale : caractérisation des pigments et des mélanges de pigments, effets induits par l'adjonction de liant et de charges*, thèse de doctorat, université Paris-Sud XI, 2004.

Le brillant, un indice à mesurer

Le vieillissement des objets patrimoniaux s'accompagne de dégradations physiques et chimiques. Deux indices de l'état de conservation des objets sont disponibles pour le conservateur : la couleur et le brillant. Si la couleur et sa mesure sont entrées dans les disciplines de la conservation, le brillant (dont l'étude est déjà bien développée pour les revêtements industriels, les carrosseries automobiles, ou encore les emballages) mérite autant d'intérêt.

Le « brillant » est une grandeur photométrique qui dérive de l'analyse de la distribution géométrique de la lumière émanant d'une surface. Sa caractérisation relève de deux approches :

– selon l'approche physique, le brillant est une grandeur multidimensionnelle, qui dépend, entre autres, de la position de

l'illuminant, de la surface du matériau, et de la position du récepteur ;

– selon l'approche perceptive, le brillant est vu comme un attribut qualitatif qui englobe plusieurs sensations visuelles différentes (scintillement, éclat, lustre...) ; il est perçu et appréhendé globalement sur une échelle de matité-brillant.

Les microfissures qui se forment à la surface des peintures, des vernis ou d'autres matériaux polymères constituent un microrelief générateur de variations de brillant. L'étude du brillant des objets patrimoniaux présente plusieurs avantages :

– la mesure optique est non intrusive et non destructive ;
– le résultat de la mesure physique peut être corrélé avec la sensation visuelle de l'expert conservateur-restaurateur ;

– la mesure physique est particulièrement performante dans la fourchette de brillant moyen (lustré, semi-brillant, satiné) où le jugement visuel est malaisé ;
– on peut s'attendre à ce que la perte de lustre sur un objet précède la décoloration, parce qu'elle marque une attaque du matériau à sa surface et non en profondeur.

L'élaboration d'une méthodologie d'évaluation du brillant et d'outils appropriés aux objets muséographiques devrait se développer dans les prochaines années, afin de proposer au conservateur un protocole de contrôle et d'alerte sur la dégradation des œuvres du patrimoine.

Françoise Vienot

Centre de recherche sur la conservation
des documents graphiques (CRCDG)
<http://www.crcdg.culture.fr>

L'accélérateur de particules AGLAE irradie les objets du patrimoine

Le rayonnement électromagnétique est l'une des principales techniques utilisées au sein du Centre de recherche et de restauration des musées de France (C2RMF) : lumière visible, ultraviolet, infrarouge, rayons X rasent, excitent, transpercent les œuvres ou s'y réfléchissent pour les sonder. Depuis 1989, le laboratoire possède un instrument de mesure nommé AGLAE (accélérateur Grand Louvre pour l'analyse élémentaire) : c'est un petit accélérateur de particules conçu pour l'analyse directe des œuvres, sans prélèvements ni préparations.

Qu'est-ce qu'un accélérateur de particules ?

Lorsque l'on parle d'accélérateur de particules, on pense immédiatement à ces énormes machines du CERN (Centre européen de recherche nucléaire), au LINAC de Stanford (*Linear accelerator*), ou encore au GANIL à Caen (grand accélérateur national d'ions lourds) permettant de jeter les uns contre les autres, à des vitesses proches de celle de la lumière, les constituants ultimes de la matière. Différents types d'accélérateurs (synchrotron, cyclotron, linéaire, électrostatiques...) sont utilisés dans les centres de recherche. Cependant, il faut avoir à l'esprit que presque chacun d'entre nous possède un tel instrument chez soi. En effet, le tube vidéo de notre téléviseur n'est rien d'autre qu'un accélérateur de particules de très petite taille. Dans ce tube en verre vidé de son air se déplace à grande vitesse (environ 10 000 km/s) un fin pinceau d'électrons (le faisceau de particules), dessinant avec une rapidité vertigineuse l'image que nous voyons sur notre écran. Un filament chauffé au rouge (la source), situé au fond du tube, vaporise les électrons (thermoémission) constituant le faisceau. Une électrode portée à plusieurs milliers de volts confère aux particules leur énergie, exprimée en électron-volt (eV).

Le premier accélérateur électrostatique fut construit en 1932 par John Cockroft et Ernest Walton¹. Leur générateur de haute tension, un multiplicateur de tension en cascade (une sorte de pompe à électricité), permettait d'atteindre 750 000 volts. Réalisant ainsi le vieux

rêve des alchimistes – transmuter les éléments chimiques –, ils bombardèrent du lithium avec des protons de 750 keV et le transformèrent en béryllium après émission d'un noyau d'hélium... Aujourd'hui, les machines électrostatiques les plus grandes atteignent 25 000 000 de volts. À une tout autre échelle, l'univers constitue un gigantesque accélérateur naturel de particules. Protons, neutrons, rayons γ , rayons X... de très grande énergie baignent sans cesse la terre : c'est ce qu'on appelle le rayonnement cosmique.

Le petit accélérateur AGLAE sert à irradier avec un faisceau de particules énergétiques, de l'ordre du million d'électron-volt (MeV), l'objet à étudier. L'interaction rayonnement-matière permet d'identifier et de compter les atomes constitutifs de la cible. Les sondes utilisées (la nature du faisceau) sont des protons, des deutérons, ou encore des noyaux d'hélium. Tel un rayon de lumière qui révèle la forme, la couleur, les aspérités de surface... de l'objet qu'il éclaire, un faisceau de particules énergétiques nous renseigne sur la composition élémentaire de l'échantillon irradié. En effet le bombardement de la matière par un faisceau de particules énergétiques sonde la structure électronique et/ou nucléaire des atomes cibles. Si l'énergie du faisceau est suffisante, on perturbera les édifices atomiques qui en retour, transmettront à l'expérimentateur, par l'intermédiaire de détecteurs appropriés, une foule de renseignements les caractérisant, suivant la technique de détection utilisée : électrons, rayons X, rayons γ , particules émises par les noyaux ou particules incidentes rétrodiffusées. C'est l'analyse d'un matériau par faisceaux d'ions.

Les atouts de cette technique

Il est important de signaler que l'analyse est ponctuelle (diamètre du faisceau entre 10 et 300 micromètres) et que la profondeur de pénétration du faisceau va de quelques micromètres à quelques dizaines de micromètres selon la nature du faisceau et du matériau traversé. Des informations sur la distribution spatiale des éléments (cartographie d'une zone et profil en profondeur) peuvent aussi être obtenues.

Comment fonctionne AGLAE ?

Le fonctionnement de ce petit accélérateur électrostatique du C2RMF est relativement simple. Il faut tout d'abord ioniser les atomes (leur apporter ou leur arracher des électrons) que l'on désire accélérer et les placer dans une différence de potentielle électrique. L'énergie cinétique ainsi acquise par ces atomes est proportionnelle à la tension générée. Le principe de base d'un accélérateur électrostatique repose sur la combinaison d'un gigantesque condensateur électrique (une électrode à la haute tension séparée de la terre : la masse, par un matériau diélectrique) et d'une source d'ions. AGLAE est une machine de type « tandem » d'une tension nominale de 2 000 000 volts. Il n'accélère pas d'électrons, seuls des noyaux atomiques γ sont utilisés comme sonde, car mieux appropriés à l'analyse des objets du patrimoine (plus grande sensibilité). Une

machine de ce type accélère les particules en deux temps et permet ainsi d'accroître davantage leur énergie. Une source injecte les ions négatifs à l'intérieur d'un condensateur cylindrique. Les particules ressentent le potentiel positif de l'électrode centrale (à la haute tension), remontent le long d'un premier tube accélérateur tout en accroissant leur vitesse (accélération 1). Dans cette électrode le faisceau négatif interagit faiblement avec un gaz maintenu par pompage : il subit un échange de charge et devient positif. Finalement, les ions positifs sont expulsés hors de la machine, le long d'un second tube accélérateur (accélération 2). Pour conserver ses propriétés (taille, divergence, énergie), le faisceau se déplace dans un espace où règne un vide poussé. Des éléments électromagnétiques (déflecteurs et

lentilles) disposés le long du parcours, le façonnent, l'analysent en énergie et le guident vers la cible. Le faisceau de particules énergétiques va irradier l'objet étudié. L'interaction rayonnement-matière permet de connaître la composition élémentaire de la cible irradiée.

Quatre méthodes d'analyse par faisceau d'ions sont possibles avec AGLAE :

- le PIXE : émission X induite par des particules chargées,
- le PIGE : émission γ induite par des particules chargées,
- le RBS : spectrométrie de rétrodiffusion Rutherford,
- le NRA : analyse par réaction nucléaire.

Voir aussi la rubrique « recherche » (analyse élémentaire), sur le site du C2RMF : <http://www.c2rmf.fr/>

Le projet européen EU-ARTECH

Depuis juin 2004, le C2RMF participe, pour une durée de 5 ans, au projet EU-ARTECH (*Access, Research and Technology for the conservation of the European Cultural Heritage*). AGLAE, sélectionné comme pôle d'excellence européen, doit ainsi consacrer 20 % de son temps de fonctionnement (soit 46 jours/an) à des équipes de chercheurs européens qui désirent étudier les œuvres du patrimoine. L'adhésion à ce projet a permis d'une part de doter l'équipe d'un chercheur post-doctorant pour une durée de deux ans et de rénover l'électronique de la machine. Un nouveau système d'extraction du faisceau est également en cours de réalisation, il devrait bientôt contribuer à accroître la qualité et la quantité des mesures.

nues, avec une résolution de quelques micromètres. Les différentes techniques d'analyses (cf. encadré p. 12) sont applicables simultanément, réduisant ainsi les dommages causés à l'œuvre, et sont non ou peu destructives pour la plupart des matériaux (pas de prélèvement !). D'autre part, des objets complexes et de formes diverses peuvent être analysés aisément. Quantitatives, précises, ces analyses sont multi-élémentaires, y compris pour les éléments légers. Enfin, leur grande sensibilité permet d'identifier les éléments chimiques présents en très faible quantité (analyse des traces). Les techniques d'analyse par faisceaux d'ions se sont pratiquement étendues à tous les matériaux à l'exception toutefois des peintures de chevalet. Leur structure multicouche (support, couches de matière picturale, vernis) rend en effet l'analyse difficile, mais le laboratoire compte tout de même s'y atteler prochainement...

Quelques applications

La revue complète de toutes les applications serait fastidieuse ; nous limiterons à quelques exemples parmi les plus récents. Citons les nombreux travaux sur des papyrus, des manuscrits, des miniatures et des dessins, destinés à identifier la nature des encres, des pigments ou de pointes en métal... On peut également citer l'identification de gemmes (rubis, émeraudes, grenats, saphirs et même

pâtes de verre) décorant des objets d'orfèvrerie. Dans ce dernier cas, la question la plus souvent posée en archéométrie est celle de la provenance des matériaux, car elle aide à retrouver les routes commerciales et les relations entre les peuples. On analyse les éléments traces dans des échantillons géologiques de provenance parfaitement connue ainsi que dans l'objet archéologique en cours d'étude. Ensuite, par un traitement statistique de ces données, on identifie le ou les éléments discriminants, auxquels on attribue une provenance. De cette manière, une relation est établie entre les gisements et l'objet. Dans le très bel exemple de la déesse Ishtar (Babylone II^e s. av. J.-C.)², on a ainsi montré que les yeux (rubis incrustés) de la déesse mésopotamienne ont une composition en éléments traces semblable à celle des rubis de Birmanie et du Sri Lanka ! Des écrits de Pline confirmaient l'exploitation de ces gisements au II^e siècle avant notre ère... La composition élémentaire (majeurs ou traces) ou la répartition spatiale des éléments (profils) aident aussi à mieux comprendre les techniques de fabrication des objets du patrimoine. Ainsi, les parties originales du trésor mérovingien de Guarrazar³ ont été distinguées des parties modernes (restaurations datant du XIX^e s.)... De la même manière, de précieux indices ont été obtenus sur la fabrication du fourreau du « Sabre des Empereurs, du Saint Empire romain germanique » (sabre de Bonaparte)⁴.

Enfin, la combinaison des différentes méthodes d'analyse (PIXE, PIGE, RBS et NRA) ouvre un nouveau champ d'investigation, basé sur l'altération des œuvres d'art : citons, par exemple, l'analyse des couches superficielles naturelles (corrosions) ou artificielles (patines) d'une œuvre. Les résultats de ces analyses aideront aussi bien les restaurateurs que les conservateurs dans leur compréhension de l'état de surface de la pièce étudiée et dans leur futur choix de conservation.

Joseph Salomon

Centre de recherche et de restauration des musées de France

<http://www.c2rmf.fr>

1. John Cockroft et Ernest Walton ont reçu le prix Nobel de physique en 1951.
2. Statuette conservée au musée du Louvre.
3. Conservé pour partie au musée du Moyen Âge de Cluny, à Paris, et pour partie au Palais royal et au musée archéologique de Madrid. Ces analyses ont fait l'objet d'une collaboration entre le C2RMF et des chercheurs espagnols.
4. Conservé au musée napoléonien d'art et d'histoire militaire de Fontainebleau.

La datation par le carbone 14 avec l'accélérateur ARTEMIS

En 1946, W. Libby émit l'idée d'une production continue de carbone 14 dans la nature et établit les bases théorique et pratiques de son utilisation pour la datation archéologique. Depuis ses travaux, qui lui valurent le prix de Nobel de chimie en 1960, la mesure du carbone 14 (ou ¹⁴C) a beaucoup progressé, notamment grâce à la spectrométrie de masse par accélérateur (SMA) apparue dans les années 1980.

Le principe de la datation par le carbone 14

Trois isotopes du carbone existent dans la nature : ¹²C, ¹³C et ¹⁴C. Ils diffèrent par le nombre de neutrons présents dans le noyau atomique. Le ¹²C et le ¹³C sont stables et présents respectivement dans la proportion de 98,89 % et de 1,11 %. Le ¹⁴C est radioactif c'est-à-dire que son noyau est instable. Il possède un trop plein d'énergie qu'il libère spontanément pour revenir à un état stable sous forme d'azote 14 et en émettant un électron. C'est le phénomène de désintégration. Le nombre d'atomes de ¹⁴C qui disparaît peut être mesuré à l'aide d'un compteur.

Le ¹⁴C se forme principalement dans la haute atmosphère sous l'action du rayonnement cosmique. Puis les atomes de ¹⁴C s'oxydent rapidement pour former du dioxyde de carbone (CO₂) renfermant le radio-isotope que l'on retrouve dans l'atmosphère, dans la biosphère par photosynthèse puis dans les organismes qui l'ingèrent. Il y en a aussi dans l'hydrosphère par dissolution.

La production et la destruction par désintégration du ¹⁴C sur terre sont continues et un équilibre finit par s'établir à la valeur d'un atome radioactif de ¹⁴C pour 1 000 milliards d'atomes de ¹²C non radioactif. La mort d'un organisme rompt immédiatement les échanges établis et la teneur en carbone 14 diminue régulièrement. Au bout de 5 730 ans, nombre qui définit la période radioactive du ¹⁴C, la quantité de ¹⁴C est divisée par 2.

Connaître la teneur en ¹⁴C d'un échantillon permet donc de le dater. Si on mesure aujourd'hui l'activité résiduelle du ¹⁴C (c'est-à-dire si l'on compte les désintégrations), on peut en la comparant à l'activité du carbone moderne, en déduire le temps qui s'est écoulé depuis, par exemple, la mort d'un arbre.

En comparant le rapport $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ de l'échantillon avec celui d'un échantillon standard dont l'âge est connu, on peut en déduire l'âge de l'échantillon. Il est possible de remonter ainsi jusqu'à 50 000 ans environ.

Artémis et la spectrométrie de masse par accélérateur

Artémis (accélérateur pour la recherche en sciences de la Terre, environnement, muséologie installé à Saclay) est le nouvel appareil de mesure du carbone 14 dédié, entre autres, à l'analyse des matériaux du patrimoine, installé en février 2003 au centre de Saclay du Commissariat à l'énergie atomique (CEA). Financé, par ordre décroissant de participation par le CNRS, le CEA, l'Institut de recherche et de développement (IRD), l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) et le ministère de la culture et de la communication, cette machine doit analyser en moyenne tous les ans plus de 4 500 échantillons.



L'accélérateur ARTEMIS installé au CEA à Saclay.

La « spectrométrie de masse par accélérateur » permet de compter les atomes de ^{14}C présents dans un échantillon et non plus de mesurer son activité. C'est ce que l'on peut faire avec Artémis. La spectrométrie de masse est plus sensible et permet d'effectuer des mesures sur des échantillons 1 000 fois plus petits que ceux nécessaires pour le comptage radioactif (1 milligramme de carbone au lieu de 1 gramme) et plus rapidement (moins d'une heure au lieu de plusieurs jours).

La difficulté réside dans le fait que le nombre d'atome ^{14}C est extrêmement petit. Le spectromètre de masse doit donc extraire le ^{14}C des autres atomes ou molécules de masse 14 présentes dans des quantités bien supérieures (par exemple l'azote 14 présent dans l'air).

Calibration

La production du ^{14}C n'a pas été constante dans le temps. Elle a suivi les variations de la production des rayons cosmiques ainsi que celles du champ magnétique terrestre. À ces variations naturelles viennent s'ajouter des variations anthropiques telles que les rejets dans l'atmosphère du CO_2 provenant des combustibles fossiles depuis l'ère industrielle ainsi que des essais nucléaires dans l'atmosphère.

L'âge calendaire n'est donc pas l'âge dit radiocarbone BP (*Before Present*, fixé par convention à 1950). L'établissement de courbes de calibration fiables est très important pour le calcul de l'âge calendaire.

Applications

Les domaines d'application sont très nombreux. Archéologie, climatologie, océanographie, volcanologie... Mesurer la teneur en ^{14}C de peintures préhistoriques, d'ossements, de poterie, de coraux ou de sédiments permet de déterminer leurs âges jusqu'à 50 000 ans.

Le carbone 14 peut également servir de traceur. Par exemple, mesurer la teneur de cet élément dans la biosphère est un moyen de suivre l'impact du fonctionnement des installations nucléaires sur l'environnement et sur l'homme.

Évelyne Cottureau

Laboratoire de mesure du carbone 14 (LMC 14, UMS 2572)

<http://www-lmc14.cea.fr>

Le synchrotron SOLEIL au service de l'archéologie et du patrimoine

Qu'il s'agisse d'appréhender finement la structure et la géométrie de la matière ou d'explorer les propriétés des atomes, le rayonnement synchrotron concerne un très large ensemble d'activités, tant en recherche fondamentale qu'en recherche appliquée. Actuellement en construction sur le plateau de Saclay en Essonne, la source synchrotron française SOLEIL est à la fois un instrument à la pointe des techniques expérimentales et un centre de recherche qui accueillera de 2 500 à 3 000 utilisateurs chaque année. Ce centre rassemblera des communautés scientifiques et technologiques très variées, allant de la biologie aux sciences des matériaux en passant par l'environnement, la physique, la chimie... l'archéologie et le patrimoine.

Les premiers utilisateurs bénéficieront des performances de cet outil dès l'automne 2006.

Des œuvres d'art sous les feux de Soleil

Qu'est ce qu'un synchrotron ? C'est à la fois une immense lampe et un gigantesque microscope... Comme une lampe, un synchrotron génère de la lumière. Une lumière au sens « rayonnement électromagnétique » car elle n'est pas limitée au domaine du visible auquel

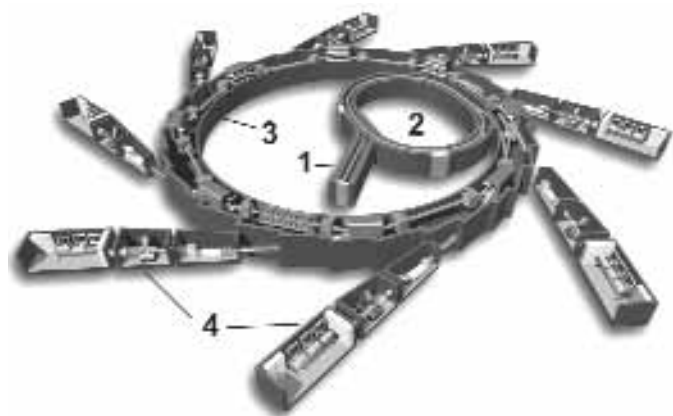
nos yeux sont sensibles, mais couvre un très large spectre de longueurs d'onde allant de l'infrarouge aux rayons X. À SOLEIL ce rayonnement, dit lui-même synchrotron, sera extrait dans des « lignes de lumière », initialement au nombre de 24. Il s'agit d'autant de laboratoires, fonctionnant en parallèle, conçus et optimisés spécifiquement pour une technique d'étude particulière : diffraction, diffusion, spectroscopie, microscopie, tomographie...

Si physiciens, chimistes et biologistes sont aujourd'hui familiers du rayonnement synchrotron qu'ils ont commencé à utiliser au début des années 1970, les laboratoires du domaine du patrimoine culturel et de l'archéologie ont, quant à eux, réellement commencé à exploiter cette lumière particulière pour l'étude de leurs échantillons il y a une dizaine d'années. L'augmentation des travaux utilisant le rayonnement synchrotron pour le patrimoine est exponentielle ! La brillance du faisceau, la possibilité de le focaliser afin de cartographier des échantillons, la complémentarité des expériences, la non-destructivité de ces méthodes sont en effet adaptées à l'hétérogénéité des matériaux du patrimoine. Microdiffraction des rayons X pour étudier la stratigraphie des pigments utilisés en peinture, spectroscopie d'absorption X pour authentifier et étudier la provenance



© Synchrotron SOLEIL

Le site de SOLEIL : vue aérienne du chantier (novembre 2004).



Les machines constituant SOLEIL : autour de l'anneau de 354 mètres de périmètre seront disposées les lignes de lumière (seules 8 ont été représentées ici pour plus de clarté).

de jades chinois ; microscopie infrarouge pour appréhender les interactions entre des emplâtres à base de plomb et la peau (dans le cadre d'une recherche sur les cosmétiques dans l'Antiquité) ; analyse par fluorescence X pour comprendre la fabrication de verres du XVI^e siècle... ce ne sont là que quelques exemples caractéristiques. Il n'est donc pas étonnant que des laboratoires français travaillant sur le patrimoine se soient organisés en un groupement de recherche (GDR) du CNRS afin de bénéficier au mieux des atouts de SOLEIL¹.

Sept lignes de lumière pour le patrimoine

Sur les 24 lignes de lumière de SOLEIL, 7 seront ouvertes aux acteurs du patrimoine et adaptées à leurs besoins.

Conscient de la demande croissante de la communauté du patrimoine, SOLEIL a développé depuis janvier 2004 une interface « archéologie et patrimoine culturel ». Le développement d'une telle interface dédiée est une première au niveau mondial. La mission de cette interface est de faciliter la mise en place de nouveaux projets de recherche et de caractérisation en adaptant SOLEIL aux besoins spécifiques de la communauté. Les aménagements nécessaires en équipements et infrastructures (lignes de faisceau, laboratoires d'analyse complémentaire) seront organisés dans le cadre d'une plateforme technique au service du patrimoine. Un service dédié (orientation, formation, expertise, analyse des données) permettra un accompagnement optimal des utilisateurs. L'interface vise également à faciliter les études de routine (restauration, authentification...) et les demandes nécessitant un accès rapide aux lignes de lumière.

Ainsi, la première école européenne de formation patrimoine culturel / synchrotron s'est tenue en décembre 2004 sur le site de SOLEIL,

Quand des électrons créent de la lumière

Les synchrotrons utilisent la lumière émise lorsque l'on accélère des particules chargées (ici, des électrons) se déplaçant à une vitesse proche de celle de la lumière. Les particules, dont on courbe la trajectoire grâce à des aimants, vont libérer une partie de leur énergie sous forme de fins pinceaux de « rayonnement synchrotron » qui sont recueillis dans les « lignes de lumière ». Ces pinceaux lumineux permettent de sonder la composition, la structure et les propriétés physiques des matériaux. L'intérêt spécifique des synchrotrons réside dans la qualité de la lumière produite, mesurée en particulier en terme de « brillance ».

Ce rayonnement, 10 000 fois plus « brillant » que la lumière solaire, permet de diminuer la taille des échantillons, mais aussi d'étudier des échantillons dilués (ex : dosage d'éléments présents à l'état de traces) et de réduire le temps d'étude (pour multiplier le nombre de mesures). Il est ainsi possible de cartographier la composition ou la structure d'un échantillon à l'échelle du millième de millimètre.

à l'initiative du réseau européen COST action G8 et de SOLEIL². L'événement a bénéficié du soutien de la Communauté d'agglomération du plateau de Saclay et du conseil général de l'Essonne. L'école a rassemblé 31 jeunes chercheurs du monde entier étudiant les matériaux anciens, auxquels ont été présentées les possibilités innovantes offertes par le rayonnement synchrotron.

Enfin, au-delà des 24 lignes programmées, la communauté est associée directement aux réflexions portant sur la mise en place de lignes complémentaires (micro-imagerie X, microdiffraction des rayons X, microscopie X-mous...).

Contribuer à authentifier et dater les œuvres, déterminer leurs modes de production et les techniques artistiques, identifier les voies commerciales et les sites de production des objets, étudier la nutrition et les pathologies anciennes, comprendre les processus de dégradation et de corrosion des œuvres afin d'améliorer leur conservation... la brillance du rayonnement synchrotron de SOLEIL permettra bientôt, avec un faisceau de quelques micromètres de diamètre, de répondre à nombre de besoins expérimentaux pour le patrimoine et l'archéologie. Rendez-vous en 2006 !

Loïc Bertrand, Isabelle Quinkal

Synchrotron SOLEIL

<http://www.synchrotron-soleil.fr/patrimoine>

1. Le GDR 2762 « Matériaux du patrimoine et synchrotron SOLEIL » est consacré au développement des méthodes d'analyse par rayonnement synchrotron appliquées au domaine du patrimoine culturel. Il rassemble des chercheurs d'une vingtaine de laboratoires du CNRS, du ministère de la culture et de la communication, et deux installations synchrotron (SOLEIL et ESRF).

2. Les cours étaient principalement assurés par des chercheurs de SOLEIL et d'autres installations synchrotrons (SRS en Grande-Bretagne ; ESRF) et des chercheurs associés au réseau COST action G8. La reconduction de l'école sur des thématiques complémentaires est programmée à court terme.

« Lumières sur le patrimoine »

Cette exposition, conçue initialement pour les journées européennes du patrimoine 2004, va circuler dans plusieurs régions françaises. C'est une réalisation commune du Centre de recherche et de restauration des musées de France (C2RMF) et du synchrotron SOLEIL.

Pour en savoir plus : <http://www.physique2005-idf.com>

L'inventaire du patrimoine astronomique

Dans un cadre interministériel (ministères chargés de la recherche et de la culture), une opération d'inventaire du patrimoine astronomique des observatoires institutionnels français est menée depuis 1995. Trois protocoles interministériels se sont succédé depuis cette date, le dernier s'achèvera en 2006. Le premier protocole précisait en préambule que cette initiative de recherche interministérielle reposait sur « *le constat qu'un riche patrimoine astronomique, scientifique et technique existait dans les observatoires* » et que les deux ministères « *attachaient un intérêt majeur à la protection, la conservation et la mise en valeur de ce patrimoine et qu'il convenait avant toute chose d'en établir un inventaire systématique* ».

La mise en place au sein d'instituts de recherche scientifiques et universitaires d'une opération d'inventaire s'appuyant sur la méthodologie du service de l'inventaire général du ministère de la culture, constitue l'aboutissement d'une démarche introspective de la part des scientifiques.

Depuis le début des années 1990, un petit groupe d'astronomes réfléchissait à des questions situées à la marge de leur discipline scientifique : l'archivage des observations astronomiques et la conservation de l'instrumentation obsolète. Cette prise en compte du patrimoine les avait conduits à réaliser, dès 1992, une enquête auprès de treize établissements pour quantifier et qualifier ce patrimoine scientifique. À la suite de cette enquête commandée par l'Institut national des sciences de l'univers (INSU), la mission « musée » du ministère de la recherche avait « officialisé » le groupe de réflexions en le chargeant de faire des propositions sur la conservation et la mise en valeur de ce patrimoine. Convaincu de la nécessité de connaître son patrimoine, avant de mener des opérations de valorisation, le groupe de réflexion a logiquement commencé à s'interroger sur la méthodologie à mettre en œuvre pour procéder à un inventaire documenté. C'est sur les conseils de Bruno Jacomy, directeur adjoint du musée des Arts et Métiers du Conservatoire national des arts et métiers

Les archives de la physique en France

À proprement parler, les « archives de la physique » n'existent pas. Sans doute vaudrait-il mieux parler de « sources de l'histoire de la physique ». Celles-ci sont nombreuses et dispersées dans des lieux relevant de différents réseaux, selon qu'il s'agit de fonds d'archives personnelles de scientifiques, d'archives institutionnelles ou d'archives de laboratoires déjà classées et accessibles au public ou encore en cours de classement.

Pour le chercheur, les fonds d'archives personnelles qui comportent généralement, en dehors de documents à caractère biographique, des dossiers et notes de travail, des manuscrits d'ouvrages ou d'articles, mais aussi de la correspondance et des dossiers administratifs, constituent une source précieuse. Nombre de physiciens de renom ont déposé, donné ou légué, parfois sous forme de datation, leurs archives personnelles à l'Académie des sciences. On y trouve ainsi les papiers de Pierre Auger, d'Ampère, de Louis et de Maurice de Broglie ou de Réaumur et une partie de ceux de Marcel Brillouin, de Roberval, d'Henri et de Jean Becquerel ou d'Édouard Branly, pour ne citer que les plus illustres. La bibliothèque de l'Institut abrite également, parmi d'autres, des papiers provenant de Marcel Brillouin, d'Augustin Fresnel ou de Charles Coulomb. La Bibliothèque nationale de France conserve de nombreux fonds dont les papiers de Pierre et Marie Curie donnés par leur fille Ève Curie à l'occasion du centenaire de Marie Curie. La bibliothèque centrale du Muséum d'histoire naturelle a accueilli les archives de Haüy et la plus grande partie de celles des différents membres de la famille Becquerel : Antoine-Léon, Edmond, Henri

et Jean qui se sont succédé dans la chaire de physique du Muséum. L'École polytechnique a en sa possession quelques documents provenant d'Henri Becquerel et surtout les papiers de Louis Leprince-Ringuet. L'École normale supérieure a recueilli les archives d'Aimé Cotton et d'Alfred Kastler, l'École supérieure de physique et de chimie de la ville de Paris, celles de Paul Langevin. On trouvera les archives de Louis Néel aux archives départementales de l'Isère et une partie de celles d'Henri Poincaré à l'université de Nancy. À l'université d'Orsay, le classement des archives de Jacques Friedel est en cours.

Les archives institutionnelles peuvent apporter des éclairages sur l'organisation de l'enseignement et de la recherche en physique aux XIX^e et XX^e siècles. C'est le cas par exemple pour les archives du ministère de l'Instruction publique, puis de l'Éducation nationale, classées dans la sous-série F¹⁷ aux Archives nationales ou versées au Centre des archives contemporaines à Fontainebleau. On pourra également consulter les archives des facultés des sciences et, en particulier, celles de la faculté des sciences de Paris dans la sous-série AJ¹⁶.

Pour la seconde moitié du XX^e siècle qui a vu la naissance de grands organismes de recherche fondamentale, parmi lesquels le CNRS et le CEA ont joué un rôle important dans le développement de la recherche en physique en liaison avec l'enseignement supérieur, la collecte d'archives est encore en cours. Le service des archives du CNRS conserve ainsi les rapports d'activité d'un grand nombre de laboratoires et a permis le versement des archives du laboratoire de

physique des matériaux de Meudon. Le musée Curie abrite les archives du laboratoire Curie de l'Institut du radium. L'Institut de physique nucléaire à Orsay a commencé à regrouper et à classer les différentes catégories de documents issues de l'activité du laboratoire depuis sa création. Au CEA, les archives du comité scientifique, le fonds du département de physique des particules élémentaires qui a conçu la chambre à bulles Mirabelle et les dossiers du synchrotron Saturne sont particulièrement riches.

À Strasbourg, l'université Louis-Pasteur a entrepris le recensement et, en liaison avec les archives départementales, le classement des archives des six laboratoires de physique, y compris l'observatoire astronomique, qui recouvrent l'ensemble des recherches et de l'enseignement en physique depuis 1945. Engagés par ailleurs dans une opération d'inventaire de leur patrimoine instrumental, les observatoires, en particulier à Marseille, à Nice, à Bordeaux, à Hendaye et au Pic du Midi, se sont également mobilisés pour assurer la sauvegarde de leur patrimoine archivistique.

Loin de constituer un état exhaustif des sources de l'histoire de la physique en France, ce bref aperçu ne vise qu'à donner des pistes de recherche dans un domaine, les archives, parfois peu familier aux historiens de la physique.

Thérèse Charmasson

Conservateur en chef du patrimoine (archives)
Centre de recherche en histoire des sciences et
des techniques, UMR 2139
Cité des sciences et de l'industrie
<http://www.crhst.cnrs.fr>

(CNAM), qu'il prend contact en 1994 avec le service de l'Inventaire du ministère de la culture.

La méthodologie de l'Inventaire avait quelques années auparavant déjà montré son efficacité et sa souplesse lors de la mise en place du recensement du patrimoine industriel. La prise en compte du patrimoine scientifique a pu se faire avec les mêmes outils après l'élaboration d'un vocabulaire spécifique nécessaire à la désignation des instruments.

L'inventaire mené par les deux ministères dans le cadre des différents protocoles porte essentiellement sur le patrimoine instrumental : grands ou petits instruments obsolètes, mais également les instruments en service – parfois fort anciens –, les instruments incomplets, démontés ou transformés, ou même disparus, à la condition d'être bien documentés par les archives et l'iconographie ancienne. À cette étude de la petite et grande instrumentation (micromètres, spectrographes, grandes lunettes, télescopes...) s'ajoute celle des autres œuvres mobilières présentes dans les établissements (œuvres d'arts et meubles professionnels) et celle de l'architecture (bâtiments de services, laboratoires et abris d'instruments – coupoles), et ceci comme dans toute étude du service de l'Inventaire.

Pour l'étude du patrimoine de 14 observatoires construits entre 1667 (Paris) et 1974 (Calern), les services de l'Inventaire de 8 directions régionales des affaires culturelles ont été mis à contribution : Alsace (observatoire de Strasbourg), Aquitaine (observatoires de Bordeaux-Floirac et Hendaye), Franche-Comté (observatoire de Besançon), Île-de-France (observatoire de Paris-Meudon), Languedoc-Rousillon (observatoire de Montpellier), Midi-Pyrénées (observatoires de Toulouse-Jolimont et du Pic-du-Midi), Provence-Alpes-Côte d'Azur (observatoires de Marseille, de Nice, de Haute Provence et du Plateau de Calern) et Rhône-Alpes (observatoire de Lyon).

Tous ces sites abritent encore des activités de recherche à l'exception de Montpellier et Toulouse, où les instituts de recherche correspondants ont migré dans des locaux universitaires mieux adaptés dans l'après-guerre.

L'instrumentation étudiée date pour l'essentiel des XIX^e et XX^e siècles, à l'exception notable d'un certain nombre de pièces remarquables conservées dans les observatoires ayant une histoire scientifique institutionnelle ancienne : Paris, Marseille, Toulouse et Montpellier. L'achèvement du travail d'inventaire devrait correspondre à la fin du troisième protocole interministériel. L'importante documentation patrimoniale constituée (plus de 1 500 instruments étudiés, 5 000 clichés réalisés par les photographes des différents services d'inventaire) constitue un matériel unique de recherche pour l'histoire des sciences et des techniques, qu'il convient de valoriser. Les bases de données nationales Mérimée, Palissy et Mémoire, consultables sur le site www.culture.gouv.fr, s'enrichissent, au fur et à mesure du bouclage des opérations, des notices d'accès aux dossiers complets ; la réalisation de présentations virtuelles spécifiques viendra ensuite rendre accessible au plus grand nombre la totalité de la documentation produite.

Cette entreprise d'inventaire a déjà eu de nombreuses retombées, tant sur le terrain dans les observatoires, qu'au plan national et international.

À la demande de certains établissements, des mesures de protection au titre des Monuments historiques ont été prises ou sont en cours d'instruction à Marseille, Hendaye, Montpellier, Besançon et Lyon ; et ceci pour des collections d'instruments, comme pour des bâtiments. Dans beaucoup d'observatoires, le travail d'inventaire sert aussi de support à des opérations spécifiques de valorisation ou de restauration du patrimoine, par exemple dans le cadre de projet d'ouverture de l'établissement au public. Des travaux universitaires ont déjà vu le jour à partir ou en relation avec cette opération. L'inventaire du patrimoine astronomique a suscité d'autres inventaires d'ins-



Cl. Michel Dubau © Inventaire général, ADAGP, 2004

La lunette équatoriale photographique, dite « Carte du Ciel » de l'observatoire de Bordeaux-Floirac.

truments, dans le même cadre méthodologique, mais également avec des approches différentes comme c'est le cas de l'opération de sauvegarde du patrimoine scientifique et technique contemporain pilotée par le musée des Arts et Métiers.

L'originalité de la démarche a retenu l'attention de la communauté internationale, attestée par les nombreuses sollicitations faites aux responsables du projet, invités à présenter l'opération dans différents colloques à l'étranger.

Il convient à présent d'envisager la publication d'un ouvrage bilan de cette opération d'inventaire originale.

Jean Davoigneau

Ministère de la culture et de la communication,
direction de l'architecture et du patrimoine
jean.davoigneau@culture.gouv.fr

Françoise Le Guet Tully

Observatoire de la Côte d'Azur
francoise.leguet@obs-nice.fr

Pour en savoir plus :

Le patrimoine de l'astronomie, *La lettre de l'OCIM*, n° 84, nov.-déc. 2002.

F. Le Guet Tully, J. Davoigneau, « Le patrimoine des observatoires astronomiques : l'inventaire. Regards sur le patrimoine culturel des universités : patrimoines artistique, scientifique, ethnologique », séminaire national interministériel. Ministère de la culture et de la communication et ministère de la jeunesse, de l'éducation nationale et de la recherche, Lille 1^{er} et 2 avril 2004.

<http://ustl1.univ-lille1.fr/culture/agenda/04/patrimoine/txt/36leguettully.pdf>

Le Laboratoire d'acoustique musicale (LAM)

Si les travaux de recherche du LAM ne relèvent pas tous de la physique, puisqu'il est aussi dans sa vocation de conduire des recherches sur la perception des sons et de la musique, l'étude du fonctionnement physique des instruments de musique et les recherches concernant les techniques audio sont au cœur de ses préoccupations scientifiques.

Les études menées portent notamment sur l'émission sonore des instruments à vent (flûtes, orgue, clarinette), les cordes (guitare, violon, piano), mais concernent aussi des instruments très particuliers comme les cloches, le xylophone... Le laboratoire travaille depuis sa création en lien étroit avec les facteurs d'instruments et avec des établissements d'enseignement professionnel¹.

Autre « instrument » particulièrement complexe, la voix, parlée et chantée, fait également l'objet d'études élaborées. Plus récemment, le laboratoire s'est aussi tourné vers la création contemporaine, avec des recherches sur les instruments de musique électroniques.

Dès lors que l'on s'intéresse à la qualité sonore des sons musicaux produits, à leur perception par l'individu, les études ne peuvent s'appuyer uniquement sur les sciences physiques. L'intégration, depuis peu, d'une équipe spécialisée dans l'approche cognitive des phénomènes perceptifs (le LCPE² relevant du département SHS du CNRS) vient renforcer les thèmes de recherche qui lient les aspects physiques de la production de phénomènes sonores à leur perception.

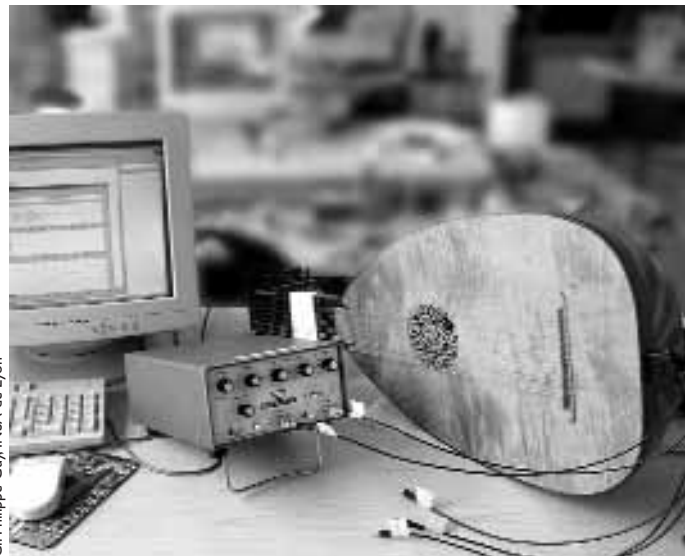
Parmi les travaux de recherche du laboratoire, certains sont liés plus directement à des problématiques patrimoniales. Ainsi, en liaison avec le Laboratoire de recherche des monuments historiques, des techniques non destructives de détection d'insectes xylophages sont mises au point. Il s'agit, par des méthodes acoustiques, de détecter la présence d'insectes et d'effectuer un suivi d'efficacité des traitements (cf. encadré p. 19).

Dans un tout autre registre, des outils de lecture optique des cylindres d'orgues mécaniques ont été mis au point en collaboration avec le LISIF³. Les cylindres d'orgues automatiques constituent un patrimoine d'une grande importance muséologique et musicologique, car donnant de précieuses indications sur l'esthétique de l'interprétation, dans un large répertoire sacré et profane couvrant l'ensemble du XIX^e siècle. De nombreux cylindres sont disponibles sans qu'il soit possible de les lire, soit parce que l'orgue correspondant a disparu, soit parce qu'il n'est pas en état de fonctionnement. On aimerait donc disposer d'un lecteur universel de cylindres qui permette de déterminer l'information musicale qu'il contient. Une méthode optique utilisant une caméra CCD, a été expérimentée. Une grande partie du travail réside dans le traitement des images obtenues : extraction de notes individuelles, correspondance avec les hauteurs, alignement temporel, etc. Ce travail est mené en collaboration avec l'université de Saint-Étienne, le musée de la Musique mécanique des Gets et le LISIF.

En matière d'archéologie musicale, des études ont été conduites sur différents instruments de musique présumés en vue d'en déterminer les caractéristiques (flûtes en os, rhombes...). Les études acoustiques pratiquées à partir de pièces originales, reconstituées ou bien encore simulées numériquement, ont montré combien la facture de ces instruments de musique (flûtes) mais aussi probablement de communication (sifflets) était maîtrisée au Paléolithique.

Des mesures pratiquées dans des grottes ornées ont apporté des connaissances inhabituelles sur la topologie acoustique de ces lieux. La grotte du Portel (Ariège), notamment, fait apparaître des phénomènes de résonances en certains endroits de la galerie qui correspondent à des emplacements choisis pour peindre, dessiner ou graver figures et signes. De telles associations ne semblent pas fortuites. Il a été montré, par ailleurs, que les lithophones constitués par des concrétions de calcite pouvaient produire des sons de belle qualité

acoustique lorsqu'on les frappe à certains endroits précis. Des cassures et des traces laissées par l'instrument en de tels emplacements attestent les pratiques de l'homme préhistorique qui a découvert ces positions et les a souvent repérées en dessinant des motifs.



Cl. Philippe Guy, INSA de Lyon

Mesure du vieillissement d'une table de luth sous contrainte.

L'innovation technologique au LAM

Des travaux récents sur les haut-parleurs ont abouti à une innovation technologique révolutionnaire : des baffles dont la forme s'inspire du profil caractéristique des réacteurs de fusées (ou tuyères) et qui réduisent la distorsion du son. Cette invention s'est traduite par un dépôt de brevet et un essaimage (création d'entreprise). Il s'agit du projet Haliaetus, récompensé dans le cadre du concours national d'aide à la création d'entreprises de technologies innovantes, et également retenu dans le cadre du 1^{er} tremplin-recherche organisé en février 2005 par le Sénat.

La conservation et la restauration des enregistrements sonores

C'est un axe majeur de la politique de recherche du LAM qui participe au volet sonore du programme de numérisation du ministère de la culture ainsi qu'à l'élaboration d'un livre blanc du CD-R. Les travaux menés au laboratoire concernent la pérennité des enregistrements sonores analogiques, et s'intéressent aux phénomènes de « sensorialité ». Ces travaux sont conduits dans le cadre d'un GIS, associant le LAM à deux laboratoires aux compétences complémentaires : le laboratoire de

photochimie moléculaire et macromoléculaire de l'université de Clermont-Ferrand (UMR CNRS 6505) et le site de Trappes du Laboratoire national d'essais.

Les archives du LAM

La numérisation des bulletins du Groupe d'acoustique musicale a été entreprise. Il s'agit d'archives retraçant plus de 40 ans d'acoustique musicale, où toutes les composantes de la discipline sont évoquées (facture instrumentale, perception, voix, environnements sonores, musiques du monde, création...).

Le LAM et l'international

Le laboratoire entretient de nombreuses collaborations internationales. Parmi celles-ci, on notera l'université de Sydney en Australie, mais aussi le Japon, le Canada, et de nombreux organismes internationaux tels que l'AES (Audio Engineering Society), l'ECPA (European Commission on Preservation and Access), en particulier à travers le programme TAPE (Training for Audiovisual Preservation in Europe), l'IASA (International Association of Sound and Audiovisual Archives), et l'EAA (European Acoustics Association), qui a confié au laboratoire la responsabilité de son programme de numérisation de la revue européenne d'acoustique.

Par ailleurs, le laboratoire est depuis longtemps associé au ministère de la culture pour tout ce qui concerne l'acoustique des orgues et des bâtiments qui les abritent, que ce soit dans le cadre de restauration d'instruments classés ou d'implantation d'instruments neufs. Des études acoustiques portent aussi sur des carillons. Par exemple, une étude a été réalisée autour de l'orgue de la Collégiale de Dole. Il s'agit d'un cas particulièrement intéressant en raison des qualités

Détection acoustique des insectes dans les bois du patrimoine

En collaboration avec le Laboratoire de recherche des monuments historiques (LRMH), le LAM développe un dispositif de détection acoustique (non destructive) d'insectes xylophages. Ce système est adapté à la détection des larves de deux espèces (lyctus et petites vrillettes), qui infestent des œuvres du patrimoine mobilier et immobilier. Le système comporte un accéléromètre qui est fixé sur la pièce de bois à diagnostiquer ; le signal est ensuite mis en forme et amplifié par une carte d'acquisition puis stocké et traité sur PC portable. Les signaux émis par les larves se caractérisent par de brèves impulsions (« clics ») dont le nombre est fonction du degré d'infestation et de l'activité des insectes. Après avoir testé avec succès le prototype expérimental dans des situations contrôlées de laboratoire, l'équipe poursuit actuellement des travaux de validation pour permettre au LRMH d'élargir les moyens de diagnostic et d'intervention sur les pièces infestées.

Laurent Daudet

Laboratoire d'acoustique musicale

acoustiques exceptionnelles de l'édifice, susceptibles d'être modifiées à l'occasion d'une restauration touchant l'intérieur du bâtiment. L'orgue de l'abbatiale Saint-Maurice (Ebersmunster) a fait l'objet de relevés acoustiques très complets avant sa restauration (relevé témoin de l'état de l'orgue) puis après remise en harmonie. L'élaboration d'un protocole d'enregistrement a été conduite sur des critères techniques et artistiques particulièrement exigeants pour permettre des comparaisons auditives.

Aujourd'hui, un nouvel axe de recherche se dessine au sein du laboratoire, plus directement lié à la création musicale. Dans ce domaine, on évoquera notamment :

- l'étude et la caractérisation des ondes Martenot (en collaboration avec le musée de la Musique et le CNSMDP⁴ ;
- un travail portant sur le geste instrumental, projet inscrit dans une collaboration avec les studios Puce-Muse, l'IRCAM⁵ et le LIMSI⁶ ;
- la mise au point d'instruments « actifs » : violon, violoncelle dont on peut modifier les caractéristiques (sonorité) par des procédés électroniques (en partenariat avec l'IRCAM).

Hugues Genevois, Jean-Marc Fontaine

Laboratoire d'acoustique musicale

UMR CNRS/ministère de la culture/univ. P.-et-M.-Curie

<http://www.lam.jussieu.fr>

1. Par ex. l'ITEMM (Institut technologique européen des métiers de la musique).
2. Language, cognitions, pratiques et ergonomie, URA CNRS 1575.
3. Laboratoire des instruments et systèmes de l'Ile-de-France, qui est une équipe de l'UFR 924 « EEA et Applications de la physique » de l'univ. Pierre-et-Marie-Curie Paris 6.
4. Conservatoire national supérieur de musique et de danse de Paris.
5. Institut de recherche et de coordination acoustique-musique.
6. Laboratoire d'informatique pour la mécanique et les sciences de l'ingénieur.

Des ultrasons pour ausculter pierres et maçonneries

Les mesures par ultrasons dans les pierres ou les maçonneries permettent de façon non destructive d'obtenir des informations sur leur compacité, leur altération, leur homogénéité, leur résistance... Cette technique d'investigation consiste à envoyer, à l'aide d'un émetteur, un train d'ondes ultrasonores longitudinales à travers un matériau à tester, et à le recueillir au niveau d'un récepteur. L'appareil de mesure, chronomètre de précision, permet de mesurer le temps de propagation du son dans le matériau, en microsecondes. La distance émetteur-récepteur rapportée au temps de transfert sert à calculer la vitesse de propagation du son dans la zone considérée. Cette caractéristique est liée à la compacité des matériaux : plus un matériau est compact, plus le son se propage rapidement (1 600 m/s pour les calcaires les plus tendres ; 6 000 m/s pour certains granits). Dans une pierre ou une maçonnerie, toute discontinuité (fissure, vide, joint, altération...) retardera la propagation des ultrasons, les arrêtant totalement dans certains cas. Les mesures en surface caractérisent le matériau près du parement ; les mesures en transparence renseignent sur les performances à cœur du matériau.

Les ultrasons ont été utilisés sur de nombreux sites et ont fourni des renseignements de différente nature :

- appréciation de l'épaisseur de l'altération des murs suite à un incendie : parlement de Bretagne à Rennes, ambassade d'Israël et siège du Crédit lyonnais à Paris ;
- estimation de la résistance mécanique de maçonneries (aile Richelieu du Louvre avant réhabilitation) permettant la détermination d'une capacité portante optimale de ces maçonneries, compte tenu de la qualité des pierres rencontrées aux différents niveaux.
- tests pour apprécier le niveau de décohésion granulaire du marbre de Carrare (Grande Arche de la Défense, Chevaux de Marly, tour

IBM de Bruxelles) ; ce phénomène engendre dans le temps une diminution de la vitesse de propagation du son ;

- appréciation de la qualité de la pierre (Sphinx de Gizeh) avec mise en évidence de l'hétérogénéité due à la stratification ;
- détection de fissures (code d'Amourabi au Louvre : stèle en basalte présentant des fissures invisibles à l'œil) ;
- estimation de la profondeur de fissures (bains d'Apollon au château de Versailles) ;
- appréciation de la qualité de maçonneries anciennes avant et après injection de consolidation (collégiale de Cerisy-la-Forêt) ;
- appréciation de l'état d'altération de la base de la stèle de Naram Sin au Louvre et contrôle de l'efficacité du traitement de consolidation ;
- appréciation de la qualité générale des pierres utilisées, de leur homogénéité et de leur altération (Arc de triomphe de l'Étoile), ou des discontinuités d'origine géologiques (revêtement en pierres agrafées de l'opéra Bastille).

Ainsi, les mesures par ultrasons dans les pierres ou les maçonneries apportent des informations essentielles sur les caractéristiques de ces matériaux dans le cadre de diagnostics. En outre, lorsque des prélèvements sont nécessaires, elles permettent d'en limiter le nombre, en orientant judicieusement le choix de leur emplacement.

Bernard Chagneaud

Centre expérimental de recherches et d'études du bâtiment et des travaux publics (CEBTP)

Service Maçonneries-Monuments historiques

Domaine de Saint-Paul BP 37

78470 St-Rémy-les-Chevreuse

Contact : b.chagneaud@cebtp.fr

Conserver, jouer...

Quels outils scientifiques pour maintenir en état de jeu les instruments de musique anciens ?

Maintenir, au sein des musées, une partie des collections des instruments de musique en état de jeu, semble éminemment justifié afin de répondre aux missions patrimoniales de conservation et de diffusion qui leur sont confiées.

Lorsqu'il entre dans les collections patrimoniales, l'instrument de musique acquiert de fait un statut d'objet d'art. Son examen attentif et les études documentaires ou historiques menées permettent souvent d'offrir au public, au travers des lectures de l'objet proposées lors des expositions, un regard vivant sur les événements musicaux dont il a pu être l'un des acteurs. Écarté du temps, protégé dans la vitrine qui assure sa pérennité, il lui arrive pourtant, lorsque cela est possible, de faire entendre sa voix à l'occasion de concerts organisés dans des conditions strictes de sécurité et d'environnement. Ainsi, les institutions en charge de sa conservation sont à même de faire revivre certaines sonorités, certains rendez-vous musicaux, éclairant de la sorte les épisodes importants de notre histoire musicale. Les conditions techniques dans lesquelles ces rendez-vous s'organisent cherchent en premier lieu à éviter tout risque d'accident pouvant mettre en péril les œuvres. Cette démarche, complexe et délicate, demande la mise en place d'investigations scientifiques accompagnant les œuvres pour assurer leur protection, à court comme à long terme.

Des violons sous les rayons X

Les violons italiens, comme ceux d'Antonio Stradivari, présentent aujourd'hui une robe de vernis faite de délicats dégradés, de couleurs subtiles et changeantes qui forcent l'admiration. Ces fines variations tant appréciées ne sont pourtant rien d'autre que l'outrage du temps. Un jeu fréquent et répété entraînerait une dégradation irréversible dénaturant à jamais cette parure irremplaçable. Préservés d'une utilisation quotidienne, les instruments des collections n'ont plus à craindre de tels risques. Pour autant, les conséquences de ces innombrables contacts, antérieurs à leur entrée dans les collections, laissent des traces que les techniques modernes d'investigations commencent à mettre au jour. Ainsi, si l'usure semble la conséquence évidente du jeu répété, les analyses de caractérisation chimique réalisées au musée de la Musique par les techniques de fluorescence X ont permis de mettre en évidence un danger latent pour la pérennité des œuvres, lié aux apports de matières consécutifs aux fréquents contacts du musicien.

Un rayonnement X émis localement sur l'instrument provoque au sein des atomes constitutifs de la matière un réarrangement des cortèges électroniques. Les électrons, excités par cet apport d'énergie, effectuent des transitions décrites par les lois de la physique quantique, afin de maintenir la matière dans un état d'équilibre dynamique. La capture et l'analyse des rayonnements, dits de fluorescence, ainsi émis, donnent une information précise sur les éléments chimiques présents au sein du vernis recouvrant l'instrument. Ainsi est-il possible de mettre en évidence la présence de chlore, de potassium ou de zinc, composants majeurs de la transpiration humaine, sur certaines zones des instruments. La présence de ces éléments « nouveaux » au regard de l'œuvre n'est pas sans conséquences sur la cinétique des dégradations éventuelles. On mesure ainsi qu'il ne

suffit pas d'isoler de tout contact ces instruments afin de garantir leur conservation. Par ailleurs, ces mêmes techniques permettent d'évaluer en partie les conséquences d'éventuels jeux des instruments, offrant ainsi un élément de mesure des risques encourus par l'œuvre suivant les conditions de conservation qui lui sont dédiées.

La mécanique du clavecin

Protégés dans une certaine mesure des agressions par leur revêtement de vernis, ou de peinture dans le cas des clavecins, les instruments à cordes sont des structures complexes et par nature déformables, sur lesquelles s'exercent des efforts considérables dus à la tension des cordes. Un violon, ne pesant guère plus de 300 g, résiste à une tension d'environ 25 kg ; un clavecin doit contenir une tension de plusieurs centaines de kilogrammes. Les conséquences sur l'œuvre de ces conditions mécaniques inhérentes à la tension des cordes doivent être envisagées avec le plus grand soin. Les développements récents de la physique et de la mécanique, et tout particulièrement des méthodes de calculs dites par éléments finis, ouvrent aujourd'hui des perspectives. Ainsi, pour une restauration importante sur un clavecin réalisé en 1652 par le facteur Couchet, nouvellement acquis, le musée de la Musique a-t-il décidé de mettre en place ces outils d'investigations scientifiques afin de soutenir les choix de conservation. Relativement bien conservé et authentique en ce qui concerne ses éléments organologiques, ce clavecin est susceptible d'être maintenu en état de jeu. Les renforts nécessaires à réaliser pour conserver à cet instrument son potentiel musical, sans le dénaturer, entraîneront une nouvelle répartition des efforts au sein de sa structure. Ce nouvel équilibre mécanique doit être finement décrit, en amont des interventions. Il sera ainsi possible d'anticiper les conséquences pour l'œuvre des modifications envisagées dans le cadre de sa restauration. Ces études mécaniques, couplées aux récentes avancées dans la connaissance des comportements du bois, devraient permettre une surveillance constante de l'évolution de la structure. Elles sont en quelque sorte les premiers outils d'une conservation préventive appliquée aux instruments maintenus en état de jeu.

On conçoit aisément, à la lumière de ces quelques remarques, la complexité de la question que pose la conservation de la fonctionnalité des instruments de musique. Les recherches en cours au musée de la Musique tendent toutes à garantir la durée de vie des œuvres. Elles commencent seulement à apporter aux équipes scientifiques des éléments tangibles sur lesquels une politique de conservation raisonnée peut s'articuler. Loin de répondre à toutes les questions, elles doivent être approfondies pour que les collections patrimoniales puissent rester ce qu'elles sont

aujourd'hui, le formidable creuset de savoirs et d'émotions, au service des publics de demain.

Stéphane Vaiedelich

Responsable du laboratoire de recherche
et de restauration du musée de la Musique
Contact : labo@cite-musique.fr



Sur le « Davidoff » d'A. Stradivari (coll. musée de la Musique), la présence de sels minéraux apportés par la sueur a été détectée par les analyses de fluorescence X.

Voir aussi : http://www.cite-musique.fr/francais/musee/actu_recherche/index.html

Une physique contextuelle des ambiances urbaines

Depuis une trentaine d'années, la « maîtrise des ambiances » est devenue une matière d'enseignement classique dans les écoles d'architecture. Parmi les multiples qualités perceptibles de l'environnement architectural et urbain, le génie des ambiances concerne électivement le son, la lumière et le couple air-température. L'acoustique, l'éclairage et la thermo-aérolitique ont bénéficié d'un effort de recherche soutenu, motivé par la lutte contre les nuisances ou le souci d'économie d'énergie. Ainsi, un véritable savoir appliqué au bâti a été sédimenté, qui sert de base aux règlements et normes, inspire des techniques efficaces, induit, enfin, des stratégies d'aménagement du confort.

Conception du bâti et sciences appliquées : du quantitatif au qualitatif

Il s'agit donc d'un apport indéniable à l'architecture et à l'urbanisme qui peuvent s'appuyer sur des garanties d'exactitude et s'en remettre aux normes et procédés estimés fiables. Pourtant, quelque chose oppose fondamentalement la logique de conception du bâti et celle des sciences appliquées. Alors que la méthode de projet repose sur l'intégration de données, la science ne lui propose qu'une collection disparate d'ambiances, l'une thermique, l'autre acoustique, une autre d'éclairage, chacune ayant ses propres notions, grandeurs et techniques métrologiques ; rien de commun entre un décibel et un lux. Chacune, aussi, ne réussissant pas encore aujourd'hui à proposer des modèles performants d'intégration du quantitatif et du qualitatif (analyse multicritères). Ainsi, les normes de confort restent-elles évolutives et immanentes à l'aire culturelle concernée (mis à part les réactions physiologiques invariables, comme le seuil auditif de la douleur). Comment réussir une ambiance bâtie avec des morceaux de savoir hétérogènes ?

Le second problème vient d'un traitement boiteux des pratiques ordinaires et de l'usage. On ne doit jamais oublier qu'à des « problèmes » de nuisance ou d'inconfort qui engagent souvent bien d'autres dimensions que la composante quantifiable du signal ou du flux, on n'apporte presque toujours que des réponses techniques. En matière de confort, aucune norme ne garantit la satisfaction. Elle ne fait que

favoriser des conditions moyennes supposées positives. Parce qu'il est appliqué à l'architecture, le champ de recherche sur les ambiances paraît donc aujourd'hui confronté à un double problème : d'un côté, celui de l'ouverture à la complexité (caractère inhérent à la fois à l'essence du projet et au vécu), de l'autre, celui de l'unité ou, tout au moins, de la transversalité des savoirs sectoriels en jeu. Et notre difficulté particulière tient à ce que toute forme architecturée et vécue inclut d'emblée du quantitatif et du qualitatif, du physique et de l'humain, du conçu et du vécu, du théorique et du pratique.

Approche interdisciplinaire de l'espace bâti

Créé en 1979 à l'école d'architecture de Grenoble, le CRESSON (Centre de recherche sur l'espace sonore et l'environnement urbain) a précisément choisi d'aborder de manière frontale cette difficulté en travaillant d'abord sur le son, puis sur les autres composantes de l'ambiance (lumière nocturne, odeurs, tactilité) et, plus récemment, sur l'intersensorialité, la question de l'air et de la température étant traité par le CERMA (Centre de recherche méthodologique d'architecture) de l'école d'architecture de Nantes. Le CRESSON et le CERMA forment, depuis 1996, une unité mixte de recherche intitulée « Ambiances architecturales et urbaines »¹.

Pour mieux comprendre comment est perçu l'espace bâti et pour aider l'architecte à raisonner la qualité sensible de son projet, il a fallu évidemment réunir une très large pluridisciplinarité couvrant un spectre qui va des sciences de l'ingénieur aux sciences humaines et sociales, en passant par les sciences de l'espace construit. Il eut été impossible de développer de façon féconde et durable cette double transversalité (intersensorielle et interdisciplinaire) sans forger patiemment des notions et des méthodes aussi originales que solides – c'est-à-dire validées – et transitant avec cohérence de la théorie à l'application. Or, le point commun de cette fédération de connaissances contemporaines, dont certaines sont encore en plein développement (psychosociologie de l'olfaction, analyse globale de la perception piétonnière nocturne, interaction motricité/perception), a toujours été de partir de la situation donnée et vécue, de considérer les conditions concrètes de l'espace bâti. Aucune hiérarchie de



© CRESSON

Un exemple de lecture acoustique d'un « phénomène typiquement urbain : l'effet sonore de métabole ».

droit n'a fait prévaloir une préséance épistémologique ou axiologique d'une discipline sur l'autre, alors que toute la psychophysique de l'environnement commence par dire : « Au début, est le signal ». C'est plutôt la circulation et le renvoi d'un savoir à l'autre qui ont été promus, pour le plus grand intérêt de la connaissance de l'ambiance bâtie. Plus encore, nous nous sommes toujours efforcés d'incarner, de « sensibiliser » l'analyse sociologique et de naturaliser l'approche phénoménologique, mais aussi, en contrepartie de cette référence aux grandeurs et quantités, de renvoyer la physique appliquée aux conditions concrètes de propagation et de modelage circonstancié des signaux et flux.

Les mesures à l'épreuve du *in situ*

Pour préciser un peu notre position quant à la physique appliquée, voici quelques extraits d'un chapitre écrit par Jean-Jacques Deletré (acousticien et éclairagiste)² et publié dans un récent ouvrage collectif qui présente les principales positions actuelles au Cresson³.

« [...] La question de la mesure dans l'environnement humain est de plus en plus à l'ordre du jour ; les références scientifiques sur ce sujet sont nombreuses, dans des domaines d'application très variés [...]. » Le métrologue sortant du laboratoire se trouve confronté à plusieurs difficultés, qu'on peut résumer ainsi.

« 1) Dès que les unités de mesure sont créées, la référence a parfois tendance à se substituer à la mesure. Nous n'avons alors plus affaire à des faits, mais à des faits projetés sur un axe privilégié (en général celui de leur unité). [...] Ainsi, le rideau d'arbres au bord de l'autoroute ne change pas le niveau acoustique reçu en façade des bâtiments (en tout cas pas celui provenant des véhicules). Pourtant les riverains en sont généralement satisfaits !

« 2) Les unités (de mesure) étant définies, une mesure nécessite toujours deux "outils" : un appareil de mesure, qui pour une grandeur G donnera une variation V , un opérateur qui lira $V1$ ou $V2$ ou $V3$... chacun de ces "outils" entraînant des possibilités d'erreurs ; enfin le milieu dans lequel on effectue la mesure est lui aussi, naturellement, source d'erreurs. De plus pour chaque mesure il faut adapter l'appareillage à ses besoins (poids, prix, fragilité...), et adapter la précision à ses besoins (une échelle de mesure précise pour un phénomène vague nuit plus à sa précision qu'elle ne rend service). [...] l'expérience est l'élément déterminant de la définition de cette échelle. Après les premières mesures, il faudra parfois réévaluer l'estimation initiale, et modifier son matériel. [...] Par exemple, comment apprécier la gêne induite par un grand boulevard urbain ? En évaluant son niveau sonore à 4 m de hauteur, sa pollution atmosphérique (gaz et poussières) ou le sentiment d'insécurité qu'elle crée sur les parents de jeunes enfants ? Et si l'on choisit le niveau sonore, comment être sûrs que les autres paramètres n'influencent pas sur les enquêtes menées auprès des riverains ? Dans les cas (nombreux) où l'échelle est bien déterminée, la mesure sert alors parfois à assurer un "confort" de l'esprit en apportant une touche "d'objectivité".

« 3) La majorité des instruments de terrain sont des appareils dits "à lecture directe". Ils possèdent pourtant des limites d'utilisation qu'il convient de connaître : limites en température, en pression, en champ magnétique, en position... et consignes de mise en place (sonomètre loin du corps par ex.). Tous les appareils possèdent des caractéristiques physiques liées à leur qualité : une "fidélité" [...], une sensibilité "différentielle" [...], un pouvoir de résolution [...], un temps de réponse souvent variable en fonction de l'analyse demandée, une justesse ("vraie" valeur) et une précision (faible dispersion des mesures autour de cette valeur) qu'il ne faut pas confondre. L'une des plus grandes difficultés dans une opération de mesure consiste à rechercher un équilibre entre ces diverses caractéristiques et le coût de l'opération. Par exemple, la précision pour les mesures d'éclairage ou d'acoustique (dans l'environnement construit) n'est néces-

saire qu'à 20 % près ! Ce qui peut paraître énorme pour le physicien ayant l'habitude de travailler *in vitro* (qui essaye toujours de réduire l'intervalle de précision ou d'incertitude). En température, il est possible de travailler à moins de 0,5 degré près, mais que signifie cette précision par rapport à la perception des usagers ?

« 4) L'opérateur peut introduire des "erreurs de mesure" de quatre types : systématiques (sonomètre mal calibré), accidentelle (faux contact), personnelle (mauvaise formation de l'opérateur, erreur de lecture, trop grande confiance dans l'affichage automatique). Mais le "site" lui-même va introduire des "erreurs" : variation perturbatrice du paramètre mesuré (klaxon...), répartition non prévue des mesures (gaussienne...), conditions de mesure non conformes (pluie, vent...), conditions de mesure non habituelles (trafic, passants...).

« 5) La dernière phase, particulièrement importante, consiste à donner une interprétation personnelle aux résultats. "*L'expérimentateur qui ne sait pas ce qu'il cherche ne comprend pas ce qu'il trouve*" disait Claude Bernard. Mais cette interprétation est forcément "subjective", elle trie, pondère, voire oublie certaines données. » Et Jean-Jacques Deletré de conclure : « Si la mesure est souvent indispensable, elle n'est pas toujours nécessaire, et elle n'est en tout cas jamais suffisante ! *Souvent indispensable* : car sans mesure il devient rare d'être pris au sérieux. *Pas toujours nécessaire* : car le plus souvent elle ne fait que conforter les éléments que l'on a pu recueillir d'une autre façon (parfois plus rapide et moins coûteuse). *Jamais suffisante* : car le résultat des mesures seul suffit rarement à convaincre. »

Cette épreuve du *in situ* peut donner l'impression d'une sévère remise en perspective de la scientificité métrologique. En fait, c'est plutôt une représentation fantasmagorique de la vérité quantitative que le professeur de physique appliquée pourchasse et la pratique d'applications métrologiques mécaniques et coupées du reste du contexte physique et humain. Une mesure est d'autant plus intelligente et utile qu'elle est pratiquée à bon escient, c'est-à-dire en connaissance des autres composantes de la situation examinée. Et d'autant plus féconde dans la recherche que, par-delà les réponses spécifiques qu'elle peut faire, elle pose des questions auxquelles d'autres savoirs peuvent répondre. Notre longue expérience de l'investigation *in situ* montre que parfois le fait paradoxal émane de la dimension physique et que, d'autres fois, un paradoxe de l'espace bâti ou de l'usage (dimension sociale, psychologique ou culturelle) trouve son explication dans une grandeur physique.

On aura compris que notre approche n'oppose pas les savoirs, ni ne les hiérarchise. Elle les confronte ensemble à l'épreuve du contexte, aux provocations méthodologiques émanant du circonstanciel : l'architecture et l'espace urbain à l'état vif. On peut même dire que cette tyrannie du *in situ* a forcé l'éclosion des notions centrales et transdisciplinaires (effets, motifs, figures, ambiants, etc.) et des méthodes (entretien sur la perception réactivée, parcours mesuré-commenté, etc.) qui sont au cœur de nos recherches et qu'on peut ranger dans la catégorie très générale de l'analyse modale⁴.

Jean-François Augoyard

Directeur-adjoint du Cresson (UMR 1563,
Ambiances architecturales et urbaines)
École d'architecture de Grenoble
<http://www.cresson.archi.fr>

1. UMR 1563 (CNRS/ministère de la culture), forte de 90 personnes, dont une trentaine de doctorants. Site web du CERMA : <http://www.cerma.archi.fr>

2. Professeur à l'école d'architecture de Grenoble, ancien élève de l'ENSAM.

3. Amphoux P., Thibaud J.-P., Chelkoff G. (eds), *Ambiances en débat*. Bernin : Éditions À la Croisée, 2004. Collection Ambiances, Ambiance.

4. Grosjean M., Thibaud J.-P. (eds), *L'urbain en méthodes*. Marseille : Éditions Parenthèses, 2001.