

L'imagerie scientifique pour la conservation-restauration des œuvres des musées: quels besoins en traitement d'images ?

CLOTILDE BOUST¹, ELSA LAMBERT¹, JEAN-LOUIS BELLEC¹,
NICOLAS MELARD¹, RUVEN PILLAY¹, MARIEM EL AFRIT², YANN LE DU²

¹ Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France, Palais du Louvre, 14 quai François Mitterrand, 75001 Paris

² PSL Research University, Chimie ParisTech-CNRS, Institut de Recherche Chimie Paris, UMR8247, 75005 Paris, France
clotilde.boust@culture.gouv.fr

Résumé – Cet article présente les différents procédés d'imagerie scientifique mis en œuvre au Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France, le C2RMF. Ce centre analyse par méthodes physiques et chimiques les œuvres d'art des musées afin d'en connaître leur constitution matérielle. Ces dossiers servent principalement à la restauration des œuvres mais aussi à l'histoire de l'art et des techniques.

Abstract – This article presents imaging technics used by the Center for research and conservation of French museums. This centre analyses museum art works with physical and chemical methods in order to find their constitutive materials. The analyses are used for conservation-restoration but also art history.

Introduction

Cet article présente différents procédés d'imagerie scientifique mis en œuvre au Centre de Recherche et de Restauration des musées de France. Ce centre analyse par méthodes physiques et chimiques les œuvres d'art des musées afin d'en connaître leur constitution matérielle et leur histoire [1]. L'imagerie étant une méthode d'examen sans contact ni prélèvement, elle est donc privilégiée en première intention pour les analyses en conservation-restauration. La photographie sous UV, visible et IR ainsi que la radiographie sont les méthodes historiques. A celles-là viennent s'ajouter de nouvelles techniques, issues des importantes avancées en matière d'enregistrement et de calculs numériques : 3D de surface, tomographie X, imagerie hyperspectrale. Elles permettent de répondre de plus en plus précisément à des problématiques de conservation-restauration toujours plus diverses. Les images scientifiques des œuvres servent bien sûr à documenter un état de conservation à un moment donné, mais servent surtout avant restauration à l'analyse et au repérage des matériaux constitutifs des œuvres. En effet, un nombre important de matériaux, comme les vernis, pigments [2], pierres, métaux, plâtres etc. répondent à l'imagerie spectrale et aux rayons X ce qui permet de les distinguer. Les matériaux constitutifs des œuvres du patrimoine étant très nombreux et de natures diverses, le travail du groupe imagerie est d'améliorer d'une part les technologies de production d'image et d'autre part les méthodes d'identification des divers matériaux. Cela permet de donner aux conservateurs et restaurateurs une réponse fiable puis si besoin de passer la main à d'autres analyses physiques ou chimiques.

Systèmes de production des images

Photographies scientifiques

1.1.1 Photographie

La photographie directe en lumière visible est la

photographie classique que tout le monde connaît. Produite dans certaines conditions, ces images permettent d'enregistrer fidèlement l'apparence des objets et donc servir de constat d'état. Une attention particulière est ainsi portée à la neutralité des éclairages et du cadrage ainsi qu'à la reproduction des couleurs. La chaîne graphique, de la prise de vue aux impressions, est calibrée avec des chartes colorimétriques et un spectrocolorimètre et l'image fournie peut ainsi servir de référence. Les prises de vues sont réalisées avec un boîtier Hasselblad équipé d'un dos numérique Imacon de 60 millions de pixels (4000 x 5300 pixels). La vue d'ensemble est généralement faite en plein cadrage. Pour certains tableaux le justifiant, un enregistrement plus détaillé peut être réalisé avec plusieurs prises de vues à fort grossissement, juxtaposées pour couvrir tout le tableau. On augmente ainsi la finesse des détails du tableau enregistrés, jusqu'à 50 microns (0,05mm).

1.1.2 Photographies sous rayonnements UV

La photographie sous rayonnements ultraviolets (de 350 à 380 nm) enregistre la réflexion dans l'UV des radiations par les matériaux constitutifs de l'œuvre et permet d'identifier certains pigments de peinture de chevalet. Une autre image sous UV est faite en enregistrant dans le visible (380-780 nm), et capte la fluorescence des matériaux (un matériau fluorescent a la propriété d'absorber certaines longueurs d'ondes, ici UV, pour les restituer à d'autre longueur d'ondes, ici visible). Cet examen est très utilisé, en particulier pour les vernis car ceux-ci ont la particularité de fluorescer, et cela suivant deux paramètres, l'épaisseur et l'ancienneté. On peut ainsi juger de l'importance des vernis, leur homogénéité ou inégalité, leur ancienneté et de localiser l'étendue des restaurations déjà effectuées en surface. Les repeints récents posés sur le vernis apparaissent sous forme de tâches noires contrastant avec la fluorescence du vernis. Pour les œuvres peu ou pas vernies (peintures pariétales, dessins, encres, fresques), on peut observer sous UV des fluorescences

colorées caractéristiques des pigments utilisés.

1.1.3 Photographies sous rayonnements IR

Les radiations infrarouges s'étendent au-delà du spectre visible de 780 nm à 20000 nm. Elles sont réfléchies ou absorbées en fonction de la nature et de l'épaisseur des matériaux, les pigments en particulier. Ainsi, la couche picturale, réfléchissante en lumière directe peut devenir partiellement transparente offrant la possibilité d'explorer les couches sous jacentes à la surface. Deux méthodes d'examen utilisent les radiations IR et donnent des résultats complémentaires.

La photographie en proche infrarouge est faite avec le même appareil photographique que pour le visible, tirant parti du fait que les capteurs CCD sont sensibles jusqu'à 1000 nm, une fois défiltré. La photographie IR en réflexion dans la zone 800-1000 nm permet la reconnaissance des pigments : cet examen met en évidence certains repentirs ou transformations apportées par l'artiste en cours d'élaboration. Des pigments de natures différentes mais d'aspects semblables en lumière visible, réfléchissent inégalement le rayonnement IR permettant ainsi de mesurer l'importance et la profondeur des altérations et restaurations subies. Cet examen permet également sous certaines conditions la détection de dessin sous jacent situé entre l'enduit de préparation et la couche picturale.

La réflectographie IR est basée sur le même principe que la photo IR mais utilise un système de détection différent : une caméra infrarouge Osiris équipée d'un détecteur InGaAs (indium gallium arsenide), sensible de 900 à 1700 nm et d'une résolution de 4096 x 4096 pixels. Un objectif 150 mm, optimisé pour l'imagerie infrarouge est monté sur la caméra. Les images sont faites en mosaïque et assemblées ensuite. Cet examen est essentiel pour l'étude du dessin sous jacent et peut donner des informations sur les matériaux utilisés (substances sèches ou fluide), les instruments employés, les techniques de report (poncif, carton), l'élaboration du dessin (recherche graphique, changement, abandon de composition) et apporter des arguments lors de questions d'attributions. Cette technique est par ailleurs utilisée pour rendre visible des signatures, dates ou inscriptions partiellement effacées par le temps ou volontairement dissimulées.

Radiographies 2D et 3D

La radiographie est présente au centre depuis ses débuts et son utilité dans la connaissance des œuvres n'est plus à démontrer [3, 4]. Elle est aujourd'hui utilisée pour comprendre la structure des peintures (repentir de composition, indice de conservation du support, changement de support, de formats...) et des objets (support technique à la restauration, connaissance du procédé de fabrication, interprétation du geste et de la technique de l'artiste...). Sont utilisés des générateurs de puissances différentes (100 à 420kV), avec des détecteurs argentique ou numérique. Bien que les conditions de mise en œuvre soient connues depuis

longtemps, il reste encore aujourd'hui un travail important à faire sur les paramètres optimaux à appliquer en fonction des matériaux très variés du patrimoine, et en particulier lors de leur présence mixte (bois, toiles, pigments, plâtre, fonte, plâtre, ivoire, verres...).

Des images radiographiques d'un objet prises sous plusieurs angles (360 ou 720) permettent de passer de la 2D à la 3D grâce à des algorithmes de reconstruction d'images. Le centre a acquis récemment le logiciel DigiCT qui, utilisé avec une table rotative et le détecteur Flat panel Thalès FS33, est actuellement en tests.

3D de surface

Les relevés en 3D sont utiles en recherche et conservation-restauration des objets du patrimoine car elle permet d'enregistrer précisément la forme 3D d'un objet et ceci sans contact [5, 6]. Ils permettent d'étudier la morphologie des surfaces ainsi que leurs variations, et d'effectuer des mesures non réalisables en réel (extractions de profils, lissage, coupes). La numérisation 3D de surface livre également des documents sur lesquels les interventions d'analyses ou de restauration peuvent être précisément repérés. Il est possible de concevoir des formes à imprimer en 3D utiles à la reproduction, restauration ou à la présentation des œuvres [7]. La captation de la surface d'un objet en 3D est une question d'échelle. Elle est faite au C2RMF de l'échelle microscopique (microrugosimétrie) à l'échelle macroscopique (scanner 3D laser par triangulation).

Le scanner 3D laser effectue la captation 3D d'un objet d'une taille comprise entre 5 et 80 cm. La précision maximale est de 50 microns. Il utilise la triangulation par laser pour capter un maillage 3D de l'objet. La surface de l'objet (couleur et matière) n'est pas enregistrée directement mais peut être ajoutée en repositionnant des photographies sur le maillage 3D par la suite. Il est possible de numériser intégralement des objets de petite et grande taille (5cm à 2m)

Le microrugosimètre permet de mesurer une surface sur quelques cm², en utilisant une sonde chromatique (lumière blanche défocalisée) couplée à une table de translation, avec une grande précision, de 500 à 5 microns. Il est très utilisé en archéologie, notamment en tracéologie. Les données permettent de déterminer les techniques utilisées par les Hommes et les instruments ayant servis à fabriquer et façonner les objets. Grâce aux calculs de rugosimétrie (statistiques de surfaces, filtrages, mesure des creux, pentes et bosses) la caractérisation objective et la comparaison précise de surfaces est aujourd'hui possible.

Problématiques de traitements d'images

La multiplicité des méthodes de fabrication d'images engendre un certain nombre de problématiques dont la résolution relève du traitement d'images. Nous en présentons ici quelques unes dans l'idée de trouver des interactions avec la communauté du GRETSI.

Mosaïque d'image 2D de même source

Plusieurs images fournies par le centre sont issues du recollage logiciel en mosaïque de petites images : la photographie haute définition, la réflectographie IR, les radiographies. En effet, le capteur d'enregistrement est limité en taille et les peintures peuvent être très grandes (jusqu'à 20 m²!). Entre 6 et 20 morceaux sont à assembler suivant la technologie, le fichier final pouvant aller jusqu'à 10 Giga Pixels. Plusieurs logiciels payants (Photoshop Photomerge) ou open source (Hugin, Henblend) proposent un mosaïquage automatique mais malheureusement aucun n'atteint la qualité requise pour nos travaux. Soit le logiciel restitue des erreurs principalement sur les bords des images, soit il échoue au recollage devant de grandes étendues sans détails (assez fréquent en photographies scientifiques des peintures, très fréquent en radio).

Pour la photographie, la source de ces difficultés réside vraisemblablement dans le fait qu'un tableau n'est jamais vraiment plan, que les appareils photographiques ne sont pas toujours parfaitement parallèles, que même les meilleurs objectifs ont une légère déformation géométrique, en particulier lorsque l'on s'éloigne du centre de l'objectif ou lorsque l'on utilise des radiations UV et IR qui ont un comportement optique différent des radiations visibles pour lesquelles sont optimisés les objectifs.

Pour la radiographie, les petites images sont numériques ou issues des scans des radio argentiques. Dans 75% des cas, Photomerge ne réussit pas à assembler car les points de concordances ne sont pas assez identifiables (grandes plages sans contours nets ou bien noires uniformes). L'autre difficulté est que le changement de point de vue inévitable d'une radio à une autre entraîne une projection donc un positionnement relatif différent des mêmes éléments de l'objet sur les différentes images à assembler.

Le recollage automatique logiciel, quand il est utilisé, est donc actuellement corrigé à la main par les photographes. Le mosaïquage est donc une opération minutieuse extrêmement couteuse en temps.

Pour améliorer les résultats, sont actuellement à l'étude : la caractérisation géométrique fine de nos systèmes de prises de vue photographiques, des tests d'algorithmes de mosaïquage du marché, l'étude d'ajout de repères de positionnements par projection lumineuse (car rien ne peut bien sûr être positionné sur les œuvres). Une partie de ces études sont réalisées en collaboration avec l'IRCP via l'UMR 8247 PCMTH Physicochimie des Matériaux Témoins de l'Histoire créée entre le C2RMF et l'IRCP (Institut de Recherche de Chimie Paris) en 2014.

Superposition d'images 2D hétérogènes

Chaque image 2D (visible, UV, IR et radio) est actuellement regardée séparément. Or la visualisation de toutes ces données simultanément permettrait de lever certains doutes de localisation et d'aller plus loin dans le

diagnostique. La superposition est ici compliquée par l'hétérogénéité des sources : les images ont des résolutions différentes, des tailles de pixels différentes et une géométrie dépendante de l'optique des capteurs. Le recalage peut être fait à la main dans Photoshop mais le temps nécessaire est ici rédhibitoire. L'automatisation a été étudiée mais n'est pas encore arrivée à un résultat utilisable en production, les points de concordance devant toujours être affinés à la main. En effet, il y a peu de données caractéristiques communes aux différentes images. Sur les peintures, la piste du réseau de craquelure souvent visible sous tous les rayonnements, est actuellement étudiée, via un filtrage passe haut, une détection de points communs avec SIFT puis une transformation affine des images.

A très court terme, un autre type d'imagerie sera à superposer à ces images optiques et X : les images chimiques. En effet, le centre développe des analyses chimiques par balayage de point (faisceaux d'ions, fluo X...) et l'ajout de ces données promet de grandes avancées dans la compréhension des œuvres.

Intégration des images 2D sur un modèle 3D

Nous utilisons actuellement la captation 3D des formes des objets sans recoller systématiquement les images visibles, UV et IR de surface. En effet, les images 2D n'ont pas une géométrie compatible directement avec les modèles 3D, des calculs complexes de déformation sont nécessaires pour incorporer la texture. Ce procédé engendre souvent à des erreurs sur les images les objets complexes de musées (parties vides comblées, positionnements faux...). Lorsque les images doivent être positionnées sur le modèle 3D, nous prenons une multitude de vues photographiques rapprochées, découpant l'objet en vues planes ou du moins simples, pour pouvoir les plaquer semi automatiquement via les logiciels 3D du marché. Cette solution très couteuse en temps attend actuellement d'être améliorée.

Nous explorons actuellement la possibilité de remédier à ces difficultés grâce à notre équipe commune avec l'UMR PCMTH de l'IRCP. En effet, l'IRCP développe des méthodes de traitement des données acquises par Résonance Paramagnétique Électronique (RPE) en utilisant des Chebfun [8], un objet mathématique permettant d'approximer toute fonction par un assemblage particulier de polynômes de Tchebychev [9]. En appliquant la chaîne de traitement Chebfun déjà mise au point pour la RPE, nous espérons regrouper en un seul objet numérique les tomographies rayons X, RPE, les 3D de surfaces et les images scientifiques 2D (un autre article spécifiquement sur ce sujet est d'ailleurs soumis au Grets). C'est dans ce but qu'est actuellement mis en place un traitement unifié de la tomographie en utilisant les mêmes algorithmes et les mêmes structures de données pour aller des données brutes à l'image finale ; cette dernière ainsi que tous les objets préalables à son obtention sont représentés comme des Chebfun, ce qui permet de travailler avec des images aussi facilement qu'avec des polynômes ;

cela rend notamment possible des recalages d'images bien plus aisés qu'avec des objets discrets. Ce travail sur la tomographie se réalise grâce à une thèse CIFRE C2RMF/IRCP au travers d'une collaboration avec la société XtremViz qui développe le système de visualisation 3D Vizua3D, une référence dans le domaine médical, et dont l'équipe commune a récemment fait l'acquisition. Le recalage de la 3D de surface et des images est prévu suivant les mêmes principes dans un deuxième temps.

Fusion des données et visualisation

La fusion à terme des images hétérogènes produites par le centre est un idéal recherché. Les avancées en fouilles de données et en extraction automatique de connaissances à partir de données hétérogènes permettraient de donner une nouvelle dimension à la compréhension de la structure matérielle des œuvres et à leur fabrication. Nous espérons pouvoir explorer ces possibilités prometteuses dès que les limites précédemment exposées seront levées.

Une fois les données d'imagerie unifiées, il reste à offrir une manipulation aisée de toutes ces informations multimodales, en particulier par les non spécialistes en informatique graphique, dans notre cas les professionnels de la conservation-restauration, archéologues, étudiants... La restitution des résultats, la navigation dans des bases de données, l'annotation des objets virtuels pour étude ou repérages des analyses nécessiteraient des interfaces spécialement développées.

Dans ce domaine au centre, la thèse CIFRE précitée participe au développement du logiciel de visualisation Vizua3D pour les problématiques de musées. Parallèlement, sont à l'étude les systèmes d'informations géographiques SIG pour repérer les avancées transposables à nos métiers.

Conclusion

La conservation-restauration du patrimoine au C2RMF s'appuie largement sur les données issues de l'imagerie, optiques, X et bientôt chimiques. Le développement des techniques d'acquisition et de post production ouvre de nouvelles perspectives de diagnostic des œuvres. Seules des collaborations avec des structures de recherches spécialisées en traitement d'image permettront au centre de profiter pleinement de ces évolutions.

Bibliographie

1. « Au coeur de La Joconde : Léonard de Vinci décodé », Jean-Pierre Mohen, Abrams 2006
2. Cosentino, A., "Identification of pigments by multispectral imaging; a flowchart method", *Heritage Science*, 2:8 (2014)

3. "La radiographie des peintures de chevalet", Elisabeth Martin et Elisabeth Ravaud, Techné n°2, 1995
4. "La radiographie des objets d'art", Thierry Borel, Techné n°2, 1995
5. "Use of computer applications in the analysis of Palaeolithic mobile art", N. Mélard, C. Boust, G. Cogné and A. Maigret, *Sienna, Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology 2015*
6. Mélard, N. (2006a). Lire l'invisible : La Microtopographie. *Archéologia* n°429, janvier 2006. S. 12-13.
7. C.Boust, R.Cortopassi « Restauration de pied de meuble Boule, de la numérisation 3D à l'impression », 5e journée d'étude SFIC Bois : Restauration, reconstitution, copies... les limites des interventions en conservation-restauration, Paris 2014
8. Le Du Yann et al. "Electron Paramagnetic Resonance Imaging (EPR-I) with Chebfun", Workshop Chebfun, Oxford (2012)
9. Zachary Battles and Lloyd N. Trefethen. "An extension of MATLAB to continuous and operators". 25(5):1743–1770, 2003.



Aiguière - Louvre, DOA - MR 2448 - cuivre / émail - 3 Radiographies prises sous différents angles - C2RMF, E.Lambert / J.Marsac

Figure 1: radiographie d'Aiguière du Louvre. Image : Elsa Lambert et Jean Marsac, C2RMF



Figure 2: photographie visible et de fluorescence UV. Image : Elsa Lambert, C2RMF