

# Imagerie scientifique

pour la conservation et la restauration  
du patrimoine



**Clotilde Boust**, ingénieure de recherche, département Recherche, C2RMF ([clotilde.boust@culture.gouv.fr](mailto:clotilde.boust@culture.gouv.fr)).

**Avec la collaboration de :**

**Nicolas Mélard**, conservateur du patrimoine, département Recherche, C2RMF ([nicolas.melard@culture.gouv.fr](mailto:nicolas.melard@culture.gouv.fr)).

**Elsa Lambert**, ingénieure d'étude, département Recherche, C2RMF ([elsa.lambert@culture.gouv.fr](mailto:elsa.lambert@culture.gouv.fr)).

**Laurence Clivet**, photographe-radiologue, département Recherche ([laurence.clivet@culture.gouv.fr](mailto:laurence.clivet@culture.gouv.fr)).

**Anne Maigret**, technicienne d'art, département Recherche, C2RMF ([anne.maigret@culture.gouv.fr](mailto:anne.maigret@culture.gouv.fr)).

---

## Introduction

La photographie et la radiographie sont utilisées pour la compréhension des œuvres depuis l'ouverture en 1931 du laboratoire du musée du Louvre, dédié à la conservation et la restauration du patrimoine. Si les grands principes de l'époque restent utilisés aujourd'hui, les progrès des sources de lumière, des capteurs et de l'informatique graphique ont permis de développer considérablement les analyses optiques sans contact avec les œuvres d'art, pour enregistrer la surface, la forme ou l'intérieur des objets.

Le principe général de l'imagerie est d'envoyer un rayonnement électromagnétique (lumière visible, UV, IR, rayons X...) sur un objet et d'enregistrer ce rayonnement modifié par son interaction avec la matière de l'objet. Cet enregistrement se fait simultanément en plusieurs points de l'objet via des capteurs couvrant tout ou partie de la surface de l'objet. On obtient une image, ou un tableau de mesures, qui représente visuellement le rayonnement enregistré.

D'un point de vue des informations utiles à la conservation des œuvres, l'imagerie est utilisée pour deux raisons principales : le constat d'état et l'analyse des matériaux.

– En premier lieu, ces images permettent de faire un constat d'état d'une œuvre à un instant donné, c'est-à-dire un enregistrement précis des couleurs, surfaces et volumes d'une œuvre, complétant ainsi le traditionnel constat d'état visuel et la description par des mots.

– La deuxième fonction des images scientifiques est l'analyse des constituants de l'œuvre, c'est-

à-dire la détection des matériaux constitutifs. En effet, certains matériaux réagissent de façon spécifique sous certaines radiations (absorbent ou réfléchissent des longueurs d'ondes particulières), ce qui permet de les repérer et de les identifier.

Toutes ces captures optiques (photographie, radiographie, numérisation 3D) s'effectuent sans contact avec les objets et sont donc sans danger pour les œuvres. De ce fait, ces techniques sont utilisées en priorité pour l'étude des objets patrimoniaux<sup>1</sup>.

Cet article décrit plus en détail les principales techniques d'imagerie actuelles et leurs applications pour la conservation des œuvres d'art.

## La photographie

### *Photographie couleur : constat d'état de l'apparence*

C'est la photographie classique que tout le monde connaît. Les photographies enregistrent la réflexion par l'objet de la lumière visible (380-780 nm). Elles reproduisent le plus fidèlement possible l'œuvre et sont donc employées comme constat d'état de l'apparence à un moment donné de la vie de l'œuvre.

En pratique, un appareil photographique moyen format est généralement utilisé (60 millions de pixels) avec 4 lampes flash ayant une température de couleur constante de 5 500 °K.

Les images réalisées pour le patrimoine ont la particularité de suivre un protocole de prise de vue particulier et rigoureux, qui est le plus répétable possible en terme de géométrie de lumières (la plus uniforme possible sur l'objet) et de calibrage couleur. Un calibrage strict à l'aide de chartes et

de systèmes numériques de gestion de la couleur garantit la fidélité et la reproductibilité des couleurs enregistrées.

**Photographie en lumière rasante :  
constat d'état de surface**

En utilisant la lumière visible, les photographies rasantes cherchent à enregistrer le relief de surface d'un objet. Les photographies rasantes sont réalisées de manière systématique sur les peintures de chevalet. Elles sont faites sous deux angles d'éclairage au moyen d'un faisceau lumineux dirigé formant un angle d'environ 10 degrés avec la surface, et permettent de localiser les moindres reliefs de la couche picturale (craquelures, soulèvements, cloques), ainsi que les déformations du support et les accidents (déchirures, rayures, enfoncements). La lumière rasante permet aussi d'apprécier l'écriture du peintre, caractérisée par le sens du relief de la touche, les empâtements ou certains gestes techniques (fig. 1). On réalise aussi parfois des images rasantes pour enregistrer le relief de surface de certains objets.

## L'imagerie sous ultraviolets ou infrarouges

**L'imagerie de réflexion UV : repérage des pigments**

L'imagerie de réflexion sous ultraviolets UV est réalisée grâce à des sources UV et un appareil photographique qui enregistre dans le domaine des UV. Elle est utilisée principalement pour la reconnaissance de pigments. Les sources employées dans les laboratoires de musées sont des lampes fluorescentes émettant à 365 nm en pic à  $\pm 10$  nm, domaine des UVA (320-380 nm). On se sert du même appareil photographique que pour la prise de vue dans le visible, mais du fait de sa faible sensibilité aux UV, un filtre anti-visible ne laissant passer que les UV et un temps de pose long (30 secondes) sont nécessaires.

**L'imagerie de réflexion IR :**

**repérage des pigments dont le carbone**

L'imagerie de réflexion sous infrarouges (IR) emploie des sources de rayonnements infrarouges et des capteurs enregistrant dans le domaine de l'IR. Un filtre est placé devant l'objectif pour



**Fig. 1.** Photographie visible (gauche) et rasante (droite) révélant le réseau de craquelures.  
Portrait de Joséphine, Andréa Appiani, château de Malmaison (Inv. M.M.2003.2.1). Image C2RMF/Elsa Lambert.



**Fig. 2.** Image visible (gauche), en infrarouge fausse couleur (centre) et en ultraviolet fausse couleur (droite). *L'Automne, Portrait de Méry Laurent*, Édouard Manet, musée des Beaux-Arts de Nancy (Inv. 1071). Images C2RMF/Jean-Louis Bellec.

éliminer la lumière visible et ne laisser passer que les radiations IR. Cet examen est effectué pour le repérage des dessins sous-jacents, des tracés effacés ou recouverts, des mises aux carreaux et des repentirs lorsqu'ils sont réalisés avec un matériau à base de carbone. En effet, les IR pénètrent la couche picturale qui peut devenir partiellement transparente, mais sont arrêtés par les composés au carbone. Le carbone a ainsi un rendu très foncé sur les images IR et est donc facilement repérable. D'autre part, cette technique permet de différencier des encres d'aspect semblable en lumière blanche : ainsi, certaines encres deviennent transparentes sous infrarouge tandis que les autres restent opaques.

Deux domaines de longueurs d'ondes IR sont utilisés : 780-1 000 nm et 900-1 600 nm, ce dernier étant particulièrement indiqué pour la localisation du carbone.

– Le domaine 780-1 000 nm est enregistrable avec un appareil photographique du commerce dont on a retiré le filtre anti-IR présent devant le capteur CCD. Ce défiltrage est à faire soi-même ou à demander au constructeur. Il est également possible d'acheter des appareils déjà défiltrés dans les magasins spécialisés en astronomie. Les lampes flash ou halogènes émettent jusqu'à 1 000 nm.

– Les IR moyens sont enregistrables avec un capteur spécifique et le C2RMF emploie une caméra Osiris et un capteur InGas. L'éclairage

est assuré par une lampe halogène qui émet naturellement dans l'infrarouge jusqu'à 2 000 nm.

#### *Les images fausses couleurs pour la lisibilité des images UV et IR*

Les images en réflexion UV comme IR sont des images en niveaux de gris difficiles à lire concernant le repérage des pigments. C'est pourquoi, à l'instar de ce qui se faisait avec les pellicules couleurs infrarouges argentiques, ces images numériques sont mélangées avec l'image en lumière visible et sont transformées en images composites fausses couleurs. Ces fausses couleurs permettent de distinguer plus facilement les informations en les colorisant. Elles permettent ainsi une cartographie des matériaux et l'identification des pigments.

Pour fabriquer une image infrarouge fausse couleur (IRFC) dans l'espace de travail RVB (rouge, vert, bleu), on supprime la couche bleue de l'image dans le domaine du visible. En décalant la couche verte et la rouge et en remplaçant la rouge par l'image infrarouge, on obtient une image avec des couleurs artificielles qui rend lisibles les nuances de gris de l'image d'origine. On procède de même pour les images de réflexion UV (mais en remplaçant la couche bleue) afin de créer des images en UV fausses couleurs (UVFC).

L'image en fausse couleur permet de mieux localiser la répartition des matériaux sur l'œuvre en distinguant notamment des zones de repeints

ou de restauration invisibles à l'œil nu. Les matériaux de restauration ayant des caractéristiques chimiques différentes de l'original, leurs réponses dans l'IR ou l'UV sont elles aussi généralement différentes, donc visibles dans ces zones de longueurs d'ondes alors qu'ils ne sont pas distinguables en lumière visible.

De plus, en faisant référence à un catalogue de pigments et matériaux connus passés en images fausses couleurs IR et UV<sup>2</sup>, il est parfois possible de repérer directement certains matériaux ou du moins d'affiner une hypothèse. Soit le pigment a une réponse caractéristique sous UV ou IR, soit c'est l'ensemble des réponses sous différentes radiations qui oriente la détermination (fig. 2). Sans réponse caractéristique, des analyses élémentaires ou chimiques sont effectuées par la suite.

Par exemple, parmi les pigments classiques, l'image infrarouge fausses couleurs permet de discriminer l'azurite naturelle (violette en IRFC) des bleus lapis-lazuli, smalt et indigo (roses ou orangés en IRFC). On peut distinguer les verts au cuivre (malachite, vert-de-gris) de la terre verte (respectivement en IRFC bleus et gris). Cependant, l'IRFC seule ne permet pas de discerner les différents jaunes ou les rouges qui ne montrent pas de réponses spécifiques dans cette gamme de longueurs d'ondes. L'UVFC permet, lui, de distinguer par exemple le minium des autres rouges (respectivement violet et brun), mais les bleus et les verts sont mal discriminés<sup>3</sup>.

## L'imagerie de fluorescence

La fluorescence est la propriété d'un matériau qui, lorsqu'il reçoit une radiation dans un domaine de longueur d'onde donné, la restitue modulée dans un autre endroit du spectre (toujours vers les longueurs d'ondes supérieures en nm). Cette propriété est très utilisée en imagerie pour la conservation et la restauration, car elle permet de localiser des matériaux et parfois d'identifier un composé spécifique.

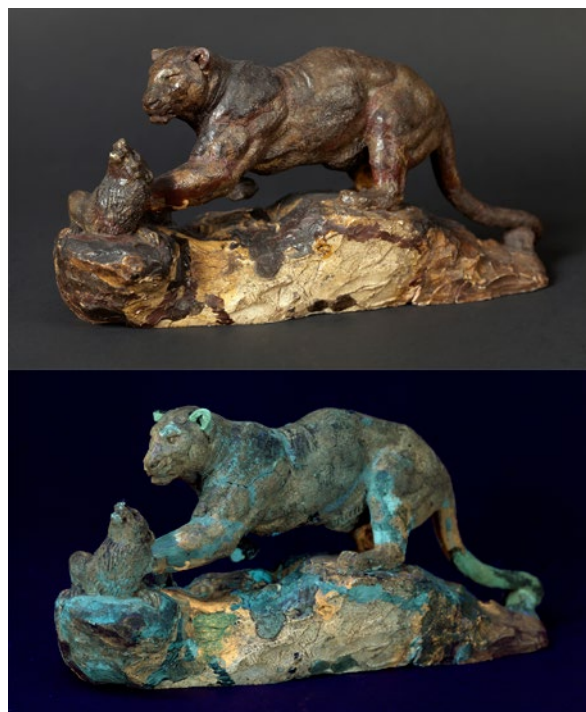
### *Fluorescence de l'UV vers le visible : repérage des matières organiques*

La photographie de la fluorescence sous UV dans le visible (envoi d'UV à 365 nm en pic à +/- 10 nm

et enregistrement dans le visible) est très utile pour repérer les matériaux organiques comme les vernis, les colles ou certains pigments et colorants (blanc de zinc, carmin, garance...) qui ont la propriété de fluorescer sous UV.

Ces images permettent d'analyser les peintures. En effet, les vernis classiques en peinture ont la propriété de fluorescer suivant deux paramètres : l'épaisseur et le temps. Plus le vernis est ancien, plus il fluoresce sous UV et plus il est épais, plus il fluoresce également. Comme ces deux paramètres augmentent la fluorescence, il n'est pas possible de relier l'ancienneté à l'intensité de la fluorescence. Ainsi, des différences de fluorescence de vernis sur un tableau permettent de repérer des interventions antérieures invisibles à l'œil nu, qui signent généralement des emplacements d'anciennes restaurations.

Sur les objets, les fluorescences sous UV permettent d'observer des traces de colles d'anciennes restaurations, des badigeons ou d'autres matériaux généralement organiques comme de la cire d'abeille, des résines, de la gomme laque ou des matières grasses.



**Fig. 3.** Photographie visible (haut) et photographie de la fluorescence sous ultraviolets montrant la localisation de différents matériaux organiques (bas). *Panthère surprenant un zibeth*, Antoine-Louis Barye, musée du Louvre (Inv. RF 2724). Image C2RMF/Anne Maigret.



**Fig. 4.** Photographie visible (gauche) et photographie de la fluorescence sous lumière visible dans l'infrarouge (LIR) servant à repérer le pigment Bleu égyptien (en blanc). *Cercueil de femme anonyme*, musée du Louvre (Inv. E 18840). Image C2RMF/Anne Maigret.

La **figure 3** montre plusieurs fluorescences de couleurs différentes sur un objet en plâtre et cire. Certaines couleurs orientent l'identification des matériaux (la gomme laque fluoresce en orange par exemple), mais d'autres ne sont pas significatives d'un seul composé (ici les bleues et vertes)<sup>4</sup>.

**Fluorescence du visible vers l'infrarouge : repérage du bleu égyptien**

Les pigments antiques synthétiques Bleu égyptien et Bleu de Han sont reconnaissables en imagerie grâce à leur fluorescence particulière, du visible vers l'infrarouge. En effet, leur composé principal, la cuprorivaïte, réagit à une lampe centrée sur sa longueur d'onde d'excitation à 610 nm, en réémettant par fluorescence un rayonnement dans l'infrarouge à 960 nm. Cette fluorescence est très efficace et permet même de repérer des petits grains résiduels provenant d'anciennes polychromies (**fig. 4**).

**Les technologies d'images hyperspectrales**

Depuis une dizaine d'années environ sont apparus sur le marché commercial des appareils photographiques avec des bandes de sensibilité nombreuses et étroites, qui les rapprochent des instruments de mesures spectrales ponctuels. On obtient avec une mesure spectrale le pourcentage de réflexion de la lumière par l'objet à chaque longueur d'onde, par exemple le visible de 380 à 780 nm. Ces courbes spectrales servent d'une part à calculer la couleur perçue dans une métrique universelle, comme l'espace colorimétrique CIE Lab. D'autre part, ces courbes permettent de repérer des pigments en les comparant à une base de données de spectres de pigments connus, la limite de cette dernière procédure étant que les mélanges de couleurs sont assez mal reconnus.

Aujourd'hui, les caméras hyperspectrales captent en chaque pixel cette réponse spectrale,

l'appareil enregistrant donc une image tous les nanomètres, soit 400 images dans le domaine du visible. Autrement dit, à chaque pixel de l'image, au lieu des trois valeurs RVB, on obtient toute la courbe spectrale de réflexion. Cette précision incroyable ouvre de nouveaux champs d'analyse des matériaux des œuvres, avec la possibilité d'effectuer des traitements de spectres suivant une dimension supplémentaire : la dimension spatiale sur l'œuvre.

En pratique, cet examen est coûteux et complexe (en acquisition, en post-traitement et en visualisation) et les difficultés de mise en œuvre font qu'il n'est pas encore utilisé en routine pour l'analyse des œuvres d'art. Cependant, les développements sont rapides et prometteurs : les fabricants commercialisent de nos jours des capteurs étendus à l'infrarouge et des logiciels de traitements plus intégrés.

### La 3D de surface : enregistrement des formes

L'enregistrement de la forme et du relief de surface d'un objet se fait grâce aux technologies 3D. C'est la démocratisation depuis quinze ans des appareils d'enregistrement des surfaces 3D (scanners en anglais ou numériseurs en français), tout comme l'amélioration des performances de calculs des ordinateurs, qui ont permis l'implantation de la 3D dans l'analyse des objets du patrimoine. Ces numérisations 3D fonctionnent en projetant de la lumière structurée sur un objet (point laser, franges de lumière...). Le principe de triangulation est utilisé pour calculer la distance des points de l'objet au capteur, et donc sa forme. Ces techniques sont couramment employées pour enregistrer des formes de grande échelle (sites de fouille, bâtiments) comme celles de petits objets, comme constat d'état ou d'expertise, mais aussi en tant qu'outil de mesure. Le relevé 3D des surfaces des objets (topographie), des reliefs et des traces en vue de caractériser les procédés de fabrication et l'histoire des objets en est, lui, au début de ses développements.

Les dispositifs de numérisation 3D disponibles sur le marché couvrent une large gamme de prix et de champs d'application. Le choix du dispositif doit être guidé par les questions formulées concernant l'objet étudié : quelle est la problématique de

l'objet et en quoi la numérisation peut-elle aider (étude des traces d'outils, comparaison de copies, reconstitution virtuelle d'un objet fragmentaire, illustration de médiation...) ? La définition de protocoles adaptés est cruciale pour la garantie de la cohérence de l'utilisation de la 3D dans l'étude des objets du patrimoine.

#### *Photogrammétrie : calculs 3D*

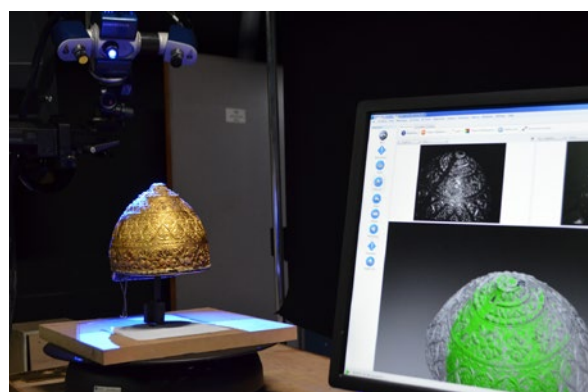
##### *à partir de photographies multi-angles*

La photogrammétrie est une technique qui permet, grâce à de multiples prises de vues photographiques d'un objet sous différents angles et d'un logiciel de traitement d'image, de recalculer la forme d'un objet. Elle produit un modèle 3D qui comprend les formes de l'objet et l'apparence des surfaces. La précision du modèle dépend du nombre d'images fournies au logiciel et de l'algorithme de reconstruction. C'est grâce à sa facilité de mise en œuvre et à l'amélioration des algorithmes de calcul que la photogrammétrie a pris un essor récent dans le domaine du patrimoine. Elle est très utilisée, notamment pour les constats et relevés de terrain lors des opérations archéologiques. La définition actuellement obtenue par photogrammétrie n'est cependant pas encore suffisante pour enregistrer finement les détails d'un objet de musée de moyenne à petite taille. C'est un moyen rapide d'obtenir une forme 3D légère et manipulable facilement à des fins d'illustration.

#### *Numériseurs à lumière structurée :*

##### *la 3D haute définition*

Les numériseurs par laser ou lumière structurée sont des appareils de moyenne à haut de gamme qui permettent d'enregistrer la forme d'objets moyen-



**Fig. 5.** Dispositif de captation 3D avec le numériseur Aicon à projection de frange. Image C2RMF/Nicolas Mélard.



**Fig. 6.** Photographie visible (gauche) et proposition de reconstitution 3D (droite). Guerrier gaulois, musée départemental de l'Oise (Inv. 85.16). Images C2RMF/ Jean-Yves Lacôte (photographie) et Charlotte Hochart (3D).

nement grands, jusqu'à 2 mètres environ (fig. 5). Ils acquièrent des modèles 3D d'une grande précision en termes de géométrie et de détails de surface. La précision varie selon la technique employée et en fonction de la taille du champ de mesure, mais elle peut atteindre 20 microns.

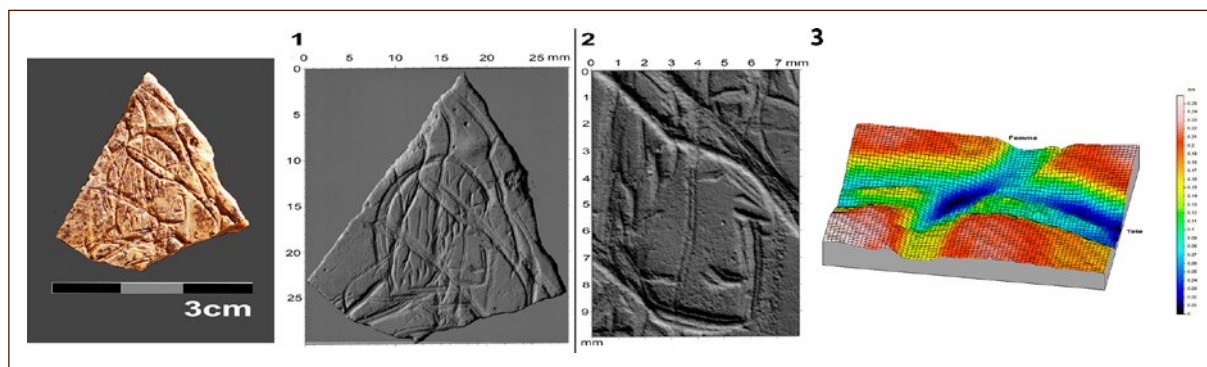
Un modèle 3D obtenu par numériseur à lumière structurée, au contraire de la photogrammétrie, inclut rarement directement la capture de l'apparence (texture, couleur). Il faut, pour pallier cela, faire également des photographies de l'objet, avec une géométrie particulière, puis les appliquer au modèle 3D via les logiciels dédiés.

Sans l'apparence, l'enregistrement précis de la surface révèle des traces parfois invisibles à l'œil nu : les données 3D deviennent alors un outil de relevé et d'analyse tracéologique. C'est le cas notamment de l'étude des gravures sur des supports présentant une coloration gênant la lecture des détails. Les modèles 3D des objets ont, qui plus est, l'avantage de pouvoir être explorés de manière interactive (rotation sous tous les angles, changement d'éclairage...). L'éclairage présentant un angle optimal pour la lecture des gravures peut ainsi être choisi.

De plus, un modèle 3D haute définition permet de faire des traitements numériques virtuels qui ne seraient pas possibles autrement. La superposition de deux modèles 3D, ceux d'une œuvre et de son moule d'origine présumé, nous renseigne sur la véracité de cette hypothèse. Des morceaux fragmentaires d'une œuvre peuvent être remontés virtuellement et sans danger en testant les différents scénarios possibles<sup>5</sup> (fig. 6).

#### *Microtopographie : numérisation 3D microscopique*

À une échelle plus petite s'ajoutent, dans le champ des applications de la 3D, les techniques de microtopographie également appelée micro-rugosimétrie<sup>6</sup>. Il s'agit de relevés ponctuels de zones choisies, de quelques millimètres carrés, sur une surface donnée, effectués avec des instruments de mesure de très haute précision (jusqu'à 500 nm). On trouve parfois l'appellation de 2,5D pour cette 3D de surface à petite échelle. Issues de la métrologie industrielle et des domaines de contrôle-qualité de production ou encore de la tribologie (mesures d'effets micromorphologiques de frottements de deux surfaces), les



**Fig. 7.** Photographie visible de plaquette gravée du site préhistorique de La Marche (époque magdalénienne, 14 000 ans av. J.-C.), relevé 3D (1), agrandissement du relevé (2) et mesure microtopographique sur 1 millimètre carré (3). Cette dernière montre l'ordre de chronologie relative des gravures, la verticale ayant été faite après l'horizontale. Image C2RMF/Nicolas Mélard.

problématiques de mesure se situent à l'échelle infra-millimétrique, souvent invisible à l'œil nu. Ces relevés 3D permettent d'observer et de mesurer des aspects de surface qui échappent à l'observation à l'œil nu ou à la loupe binoculaire. Il est ainsi possible de réaliser des statistiques de surfaces basées sur des normes standardisées (en industrie), et ainsi de produire des référentiels et des protocoles d'analyses reproductibles pour une caractérisation objective des surfaces. Ces statistiques de surface, regroupées sous l'appellation rugosimétrie, comprennent des données comme le pic maximal observé sur la longueur analysée ou bien l'écart moyen des distances entre pics et creux successifs. Sur un objet, l'étude de ces données permet de caractériser des traces d'outils ou de comparer des techniques de fabrication (fig. 7).

## Imagerie à rayons X : structures internes des objets

### Radiographie

La radiographie est une image obtenue par transmission à travers l'ensemble de l'épaisseur de l'œuvre. Un faisceau de rayons X ionisants traverse l'œuvre dont les constituants absorbent plus ou moins le rayonnement en fonction de leur composition chimique et de leurs épaisseurs. Ces variations d'absorption sont enregistrées par un détecteur (film argentique ou capteur numérique) placé à l'arrière de l'objet étudié.

Pour l'étude des œuvres peintes (2D), la radiographie apporte des informations sur l'état de conservation du support et de la couche picturale, mais également sur les techniques d'élaboration de l'œuvre (fig. 8).

Pour ne citer que quelques exemples, les déchirures, le réseau de craquelures ou les galeries d'insectes sont visibles sur les clichés radio. Les indices de changement de format telles que les empreintes de clous anciens, les guirlandes de tension présentes dans la toile et les traces de transposition peuvent être décelés. L'étendue des lacunes de la couche peinte, tout comme les repentirs ou le réemploi de toile, apparaît grâce à cette technique<sup>7</sup>.

Concernant l'étude des objets d'art et d'archéologie (3D), le principe et le dispositif sont les

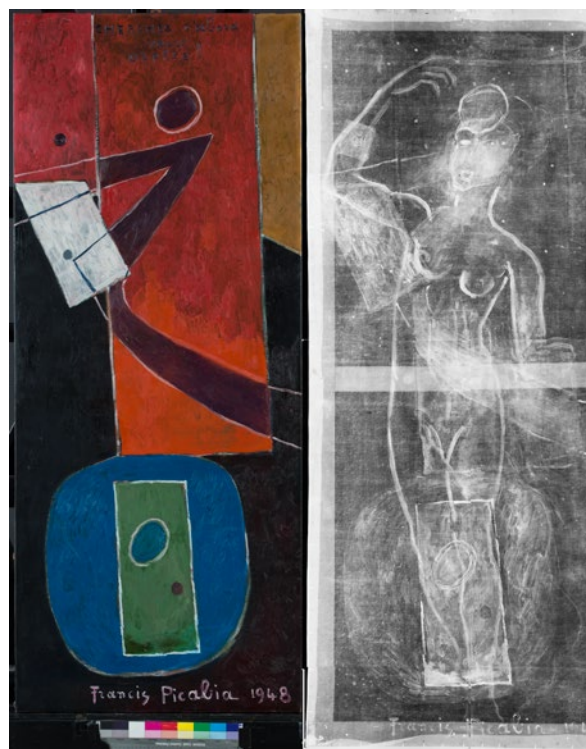


Fig. 8. Photographie (gauche) et radiographie (droite) montrant une composition sous-jacente. *Cherchez d'abord votre Orphée*, Francis Picabia, musée Pierre-André Benoit (Inv. 86.1.94). Images C2RMF/Pascal Lemaître (photographie) et Gérard de Puniet (radiographie).

mêmes que pour les peintures. Toutefois, les énergies utilisées sont bien supérieures et permettent de traverser des matériaux très denses (métal) ou de fortes épaisseurs (marbre). La lecture des clichés n'est pas toujours aisée car l'image obtenue est la projection d'un volume en 3D sur une surface en 2D. Ainsi, les informations situées dans différents plans se trouvent confondues. En pratique, pour garantir une interprétation juste des clichés radio, il est indispensable de multiplier les angles de tir, une vue de face et un profil étant le minimum lors de l'étude radiographique d'un objet.

De même, les renseignements apportés par la radiographie varient en fonction de la nature des matériaux de l'objet étudié : on ne détecte pas les mêmes informations sur une œuvre en cire, en bois, en plâtre ou en métal. Cependant, le point commun à toutes ces études est de rendre visibles des éléments qui ne sont pas accessibles à l'œil nu, car situés à l'intérieur même de l'objet.

De façon générale, cet examen permet d'étudier les techniques de fabrication, notamment



**Fig. 9.** Photographie de burette en structure métal et pâte de verre (gauche). La radiographie (centre gauche) montre la structure générale, alors que la tomographie permet de montrer précisément la surface du métal sous la pâte de verre (centre droit) et la surface intérieure de l'objet (droite).  
*Burette vers 1480*, musée du Louvre (Inv. MR 2449). Images C2RMF/Anne Maigret (photographie) et Elsa Lambert (radiographie et tomographie).

les structures internes et les assemblages, d'évaluer l'état de conservation de l'œuvre et de localiser les restaurations. Ces informations sont une aide précieuse à la restauration et à la compréhension des œuvres qui viennent au C2RMF<sup>8</sup>.

#### **Tomographie : radiographie 3D**

La tomographie RX est en quelque sorte une radiographie en 3D. L'objet à étudier est disposé sur un plateau rotatif horizontal situé entre la source de rayons X et le détecteur numérique. À chaque demi-degré de rotation, on effectue un enregistrement radiographique appelé projection. On obtient ainsi des données différentes suivant les multiples orientations. Ces données sont ensuite reconstruites mathématiquement en vue d'obtenir un volume 3D.

Une fois les étapes d'acquisition et de reconstruction terminées, le volume peut être visualisé et manipulé dans un logiciel de post-traitement 3D tel que VG Studio.

Les structures internes, les épaisseurs de paroi, les matériaux de densités différentes sont rendus visibles en 3D, ce qui facilite leur localisation précise et permet d'effectuer des mesures dimensionnelles. Il est même possible de visualiser l'aspect de surface des parois internes d'un objet, ce qui est impossible en radiographie conventionnelle.

Les différents éléments constituant l'œuvre peuvent être isolés en fonction de leur densité radiologique : c'est ce qu'on appelle la segmentation. Les matériaux (bois, bronze, plomb, marbre...) sont ainsi localisés et visualisés séparément. Enfin, l'objet peut être observé en coupe dans n'importe quel axe (fig. 9).

Ces possibilités de visualisation et de manipulations virtuelles permettent une compréhension inégalée de l'objet. Cette technique, inspirée de l'imagerie médicale, est utilisée dans l'industrie, mais est peu implantée dans les laboratoires du patrimoine : on peut citer le laboratoire dédié à la Venaria Reale à Turin<sup>9</sup>, un autre au Getty à Los Angeles. L'installation située au C2RMF, avec un générateur 420 kV puissant, est donc rare et offre de nouvelles perspectives pour l'étude des œuvres d'art et d'archéologie.

#### **Conclusion**

L'imagerie offre la possibilité d'étudier les œuvres du patrimoine à distance et sans aucun dommage. Les récents progrès des matériels et des algorithmes permettent de produire des images toujours plus lisibles et pertinentes. Cela améliore non seulement les analyses et les relevés des œuvres en vue d'une étude immédiate, mais aussi leurs connaissances et leurs transmissions à plus long terme.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- BOUST, Clotilde *et al.* *Images scientifiques pour le patrimoine*. Hypothèse EHESS CNRS, 2015-présent, <https://copa.hypotheses.org>
- BOUST, Clotilde *et al.* "Pigment image database under UV and IR radiations – Part 2 : raw materials". *Images scientifiques pour le patrimoine*, 2017, <https://copa.hypotheses.org/620>
- BOREL, Thierry. « La radiographie des objets d'art ». *Technè*, n° 2, 1995, p. 146-157.
- HAYEM, Anita *et al.* "Characterizing pigments with hyperspectral imaging variable false-color composites". *Applied Physics A*, November 2015, Volume 121, Issue 3, p. 939-947.
- KAURIN, Jenny *et al.* « Le guerrier de Saint-Maur (Oise). À la redécouverte d'une œuvre majeure de l'art gaulois ». *Technè*, n° 45, 2017, p. 125-135.
- MARTIN, Élisabeth, RAVAUD, Élisabeth. « La radiographie des peintures de chevalet ». *Technè*, n° 2, 1995, p. 158-164.
- MÉLARD, Nicolas *et al.* "Comparison of imaging techniques used in the microanalysis of Paleolithic mobiliary art". *Journal of Archaeological Science*, Volume 10, December 2016.
- MÉLARD, Nicolas. « L'étude microtopographique et la visualisation 3D dans l'analyse de gravures préhistoriques – L'exemple des pierres gravées de La Marche ». *In Situ, revue des patrimoines*, 2010, n° 13. <https://journals.openedition.org/insitu/6847>
- MOHEN, Jean-Pierre, collectif. *Au cœur de La Joconde : Léonard de Vinci décodé*. Paris : éditions Gallimard, 2006.
- RE, Alessandro *et al.*, "X-ray tomography of large wooden artworks: the case study of 'Doppio corpo' by Pietro Piffetti". *Heritage Science*, December 2014, <https://link.springer.com/article/10.1186/s40494-014-0019-9>

### Documents inédits

- BASTIAN, Gilles. L'Automne, Portrait de Méry Laurent d'Édouard Manet. Rapport d'analyse, C2RMF, n° 24641, 2011.
- VANDENBERGHE, Yannick *et al.* Panthère surprenant un zibeth, Antoine-Louis Barye – XIX<sup>e</sup> siècle, sculpture en plâtre et cire, musée du Louvre. Rapport d'étude, C2RMF, n° 26972, 2014.

## NOTES

---

- |   |                             |   |                      |   |  |
|---|-----------------------------|---|----------------------|---|--|
| 1 | Mohen, 2006 et Boust, 2015. | 4 | Vandenberghe, 2014.  | 8 | Borel, 1995 et voir article d'Elsa Lambert et Marc-André Paulin dans cette même publication, p. 105. |
| 2 | Boust, 2017.                | 5 | Kaurin, 2017.        | 9 | Re, 2014.  |
| 3 | Hayem, 2015.                | 6 | Mélar, 2010 et 2016. |   |  |
|   |                             | 7 | Martin, 1995.        |   |  |