Chapitre 3

Méthodes d'examen et d'imagerie scientifique

Introduction

Fondées sur des interactions entre un rayonnement et la matière, les méthodes d'examen permettent d'enregistrer des images qui nous informent sur l'histoire des objets patrimoniaux.

Les systèmes d'imagerie reposent sur l'utilisation de rayonnements électromagnétiques allant de l'infrarouge aux rayons X ou γ, en passant par les longueurs d'onde du visible ($400<\lambda<780$ nm ; figure 1.8). Certains systèmes exploitent les propriétés ondulatoires d'autres rayonnements tels que les électrons. Photographie en lumière naturelle ou blanche, sous ultraviolets ou rayonnement infrarouge, radiographie, tomographie et émissiographie font partie des méthodes couramment employées pour les examens macroscopiques. Gammagraphie [62-64] et neutronographie, moins répandues car lourdes et coûteuses, peuvent aussi être sollicitées pour des cas spécifiques (matériaux épais, constitués d'éléments lourds, etc.).

En jouant à la fois sur le *type de rayonnement*, sa *longueur d'onde* et son *angle d'incidence*, il est possible de révéler des détails sur la morphologie et la topographie de la surface d'une œuvre et de pénétrer en son cœur pour appréhender sa genèse mais aussi pour orienter les choix analytiques ultérieurs.

À l'échelle microscopique, loupes binoculaires ou microscopes optiques, en transmission ou en réflexion*, fournissent des images qui peuvent être obtenues avec différentes sources lumineuses, dans le visible ou dans l'ultraviolet. Les microscopes électroniques, en particulier le microscope électronique à balayage (MEB), dont le principe repose sur une interaction « électrons – matière », sont également largement utilisés. Cette technique, lorsqu'elle est couplée à un système de détection de rayons X, présente l'avantage de pouvoir associer imagerie et analyse élémentaire (MEB-EDS). Cette possibilité alliée à la facilité d'utilisation du microscope électronique à balayage fait que cet appareil est devenu un des piliers des études en sciences archéologiques et muséales.

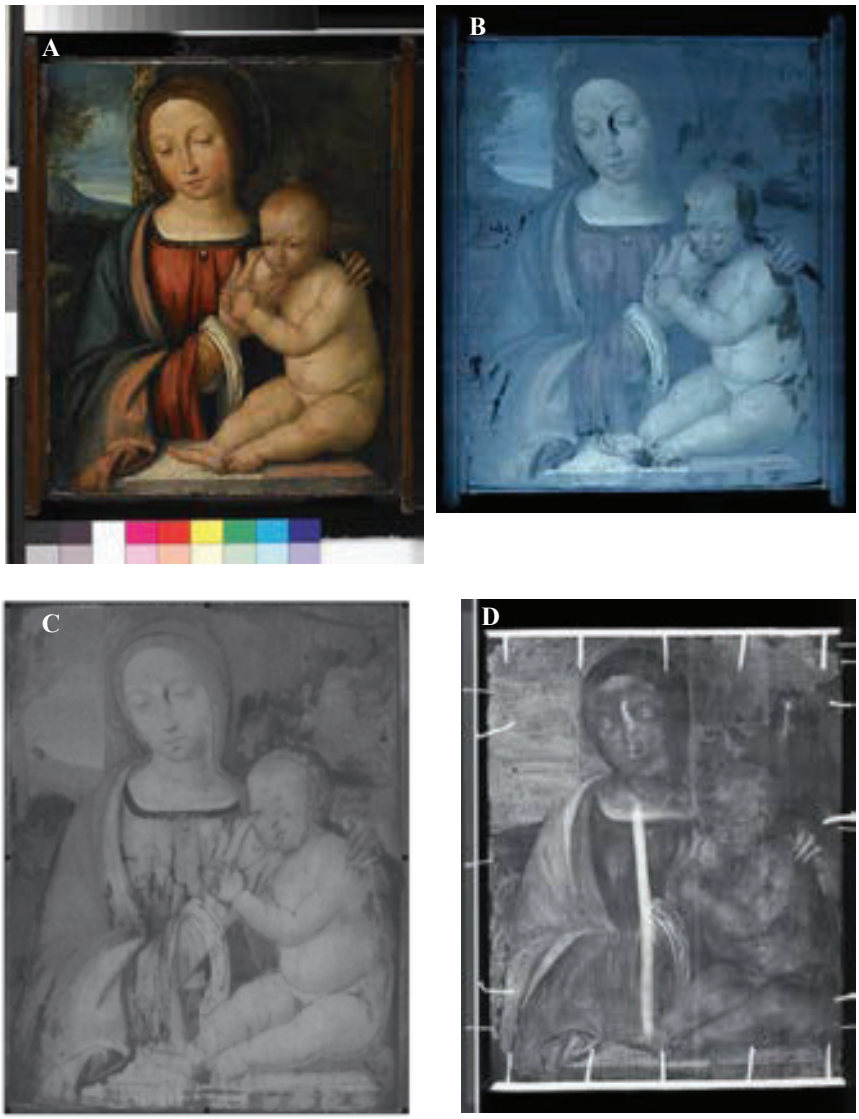


FIGURE 3.1 – *Vierge allaitant son enfant*, artiste inconnu, École de Ferrarese, début du XVI^{e} siècle, musées nationaux de Liverpool. Photographies sous lumière blanche directe en couleur (A), sous ultraviolets (B), en infrarouge (C) et radiographie (D). Photos © Courtesy National Museums Liverpool. `http://www.liverpoolmuseums.org.uk/conservation/objects/highlights/paintings/madonna-child.aspx`.

Enfin, les méthodes de caractérisation géométrique des surfaces, le plus souvent totalement non invasives, permettent de visualiser l'état d'une surface à l'échelle microscopique et fournissent un ensemble de documents qui viennent compléter la panoplie d'images fournies par les autres méthodes.

C'est à l'ensemble des méthodes d'examen et d'imagerie mises en œuvre en archéologie et dans les musées que ce chapitre est consacré. Pour chacune des méthodes abordées, nous précisons les principes mis en jeu et les résultats que l'on peut en attendre pour une meilleure connaissance de la fabrication des objets et de la genèse des œuvres, de leur usage et utilisation, des restaurations auxquelles elles ont été soumises et de leur état de conservation.

1 Les différentes méthodes d'examen macroscopique

1.1 Photographies en lumière blanche

Le premier examen auquel on soumet une œuvre est une observation à l'aide d'une source de lumière blanche émettant dans le visible [65]. Cette observation est matérialisée par une photographie, qui représente en 2D un objet ou un détail d'un objet, ou par des prises de vue photogrammétriques qui permettent d'obtenir un modèle en 3D.

1.1.1 Photographie classique en 2D

L'œuvre est tout d'abord éclairée en lumière blanche avec une incidence perpendiculaire à sa surface afin d'obtenir des clichés en couleur et en noir et blanc (éclairage direct, [66], figure 3.1). L'avantage des clichés noir et blanc est de permettre à l'œil de s'abstraire de la couleur, ce qui conduit parfois à déceler des détails difficilement perceptibles autrement, et de fournir des images qui seront facilement comparables avec d'autres documents obtenus en niveaux de gris (cas des réflectographies infrarouges, des radiographies et des émissiographies). Des photographies de détail (macrophotographies), à une échelle supérieure à un, pouvant atteindre 50 :1, peuvent aussi être réalisées pour mettre en évidence certains éléments remarquables.

Ces documents représentent de réels outils de travail qui permettent de dresser l'inventaire de la palette de couleurs d'un peintre, de révéler des altérations particulières, d'appréhender des traces d'outils liées à des techniques de fabrication, ou encore de mettre en évidence des traces d'usure ou d'usage [67]. Ces images constituent également une aide précieuse pour choisir les régions de prélèvement [68].

Afin d'améliorer la lisibilité de l'état de surface, des photographies en lumière rasante (incidence du rayonnement à environ 10° par rapport à la surface à photographier) sont couramment réalisées. Un jeu d'ombres lié aux irrégularités de surface se crée alors permettant de révéler certains détails sur des peintures, des objets, des monnaies (figure 3.2), voire des œuvres pariétales. Pour les peintures de chevalet, déformations du support, soulèvements de la matière picturale, lacunes et réseau de craquelures deviennent ainsi parfaitement visibles. En outre, la touche du peintre et l'épaisseur de la matière avec laquelle il a pu jouer, sont plus facilement perceptibles.

Dans le cas des objets, l'utilisation de cet éclairage rasant se fait plutôt sous loupe binoculaire pour mettre en évidence certains détails de fabrication et d'usure. Ce type d'éclairage est aussi souvent utilisé dans les grottes ornées pour mettre en évidence de fines gravures difficilement perceptibles autrement.



FIGURE 3.2 – Photographies en lumière rasante sous loupe binoculaire d'une bague d'argent produite au XIX^{e} siècle en Amérique à partir d'une monnaie soudée à un anneau. La mise en évidence sur le revers de la monnaie des détails du motif du coin a permis de donner un *terminus ante quem* à sa fabrication. C'est une monnaie de 10 centavos (« patacón ») avec un coin réalisé par le Français Eugène-André Oudiné (graveur) pour une émission de l'atelier de Buenos Aires entre 1881 et 1883 [69]. Photographies © M. F. Guerra, CNRS.

1.1.2 Les représentations 3D

Des modèles numériques en trois dimensions (prototypes) se sont très tôt répandus en ingénierie grâce à l'utilisation de la technique de stéréolithographie qui permet d'obtenir un objet par reconstruction de « sections ». Cette technique a commencé à être exploitée dans le domaine du patrimoine culturel dès le début des années 1990 dans le cadre des études menées sur « l'homme des glaces » Ötzi [70, 71]. Depuis, un grand nombre de techniques de reconstruction 3D, avec et sans contact, sont devenues accessibles et sont appliquées en contexte archéologique ou patrimonial.

La numérisation tridimensionnelle permet d'établir une documentation complète qui réduit les manipulations et qui fournit une image exacte des objets et vestiges étudiés. La représentation 3D peut être utilisée pour une mise en valeur des collections et des découvertes archéologiques en espace virtuel (animation web, films, etc., voire de la réalité augmentée) mais aussi, grâce aux simulations, comme une aide à l'étude et / ou à la restauration d'objets par assemblage virtuel de fragments. Grâce aux images 3D, il est possible d'effectuer (en volume) des superpositions d'objets, des déroulements de décors, de comparer des marques d'outils, enfin d'accéder à une meilleure compréhension des techniques de fabrication des objets et de contribuer à l'identification d'ateliers de production. Opérations d'authentification, aide à la gestion des réserves, aux scénographies d'exposition et à la structuration des vitrines, sont autant de domaines qui trouvent d'intéressantes application pour les modèles en 3 dimensions.

Parmi les techniques de reconstruction 3D, celles sans contact sont privilégiées. La photogrammétrie, par exemple, permet un relevé géométrique tridimensionnel d'un objet même en milieu sous-marin ; elle ouvre aussi la possibilité d'intégrer des données sur sa couleur, sa texture, etc. Cette méthode repose sur des prises de vue effectuées sous divers angles pour une couverture totale de l'objet, ce qui permet de passer d'images bidimensionnelles à un modèle tridimensionnel. Le nombre de photographies réalisées, en général numériques convergentes orientées, dépend de la précision souhaitée et des détails recherchés, voire de la texture.

Les images sont obtenues avec un appareil photographique, en général numérique et calibré (notamment pour les indices de réfraction des milieux traversés) ; la résolution et les autres caractéristiques dépendent du résultat souhaité et doivent être adaptées à chaque objet (en particulier à la nature des matériaux constituant l'objet). Des points de référence identifiés sur les images permettent leur assemblage pour la production d'un modèle 3D de l'objet : les photographies numériques prises sur l'objet sont rectifiées (mise à l'échelle, redressage, recalage, etc.) pour être ensuite assemblées par un logiciel dont le choix dépend du résultat attendu et de la nature de l'objet.

Outre la photogrammétrie, il existe d'autres techniques permettant d'aboutir à des représentations ou reconstitutions en 3D. Les scanners 3D se divisent en deux grandes familles : avec et sans contact. Les premiers, peu envisageables dans le cas du patrimoine culturel, utilisent un palpeur pour l'acquisition des coordonnées de chaque point mesuré ; les seconds utilisent pour l'acquisition de ces coordonnées la réflexion de la source de rayonnement sur la surface de l'objet.

Différents types de scanners sont aujourd'hui disponibles sur le marché et il importe de tenir compte de différents facteurs limitatifs afin de choisir l'outil adapté aux objectifs fixés. Parmi les paramètres à considérer, citons les résolutions atteintes, qui empêchent souvent l'obtention d'images avec une précision élevée, la taille des objets à numériser, le coût et la portabilité des équipements, la complexité des mesures et du traitement de données, et la nature de certains matériaux, soit transparents (par exemple le verre) soit de forte réflectivité (comme certains métaux). L'application de produits matifiants à la surface des objets peut pallier cette difficulté, mais cette solution est difficilement envisageable sur des œuvres ou des objets uniques.

1.2 Photographies sous rayonnement ultraviolet

Les examens sous éclairage ultraviolet permettent d'observer la fluorescence que les matériaux présents à la surface d'un tableau ou d'un objet émettent dans le visible (figure 3.3). Les fluorescences observées, qui présentent des couleurs et des contrastes différents en fonction de la nature des matériaux, peuvent être photographiées en couleur ou en noir et blanc. Il s'agit d'un *examen de surface* qui ne fournit généralement pas d'information sur la stratigraphie d'une œuvre ou sa structure interne [72].

Tous les matériaux ne fluorescent pas sous rayonnement ultraviolet. Résines et colorants organiques sont particulièrement propices à ce phénomène en raison de la présence de noyaux aromatiques et de systèmes de doubles liaisons conjuguées.

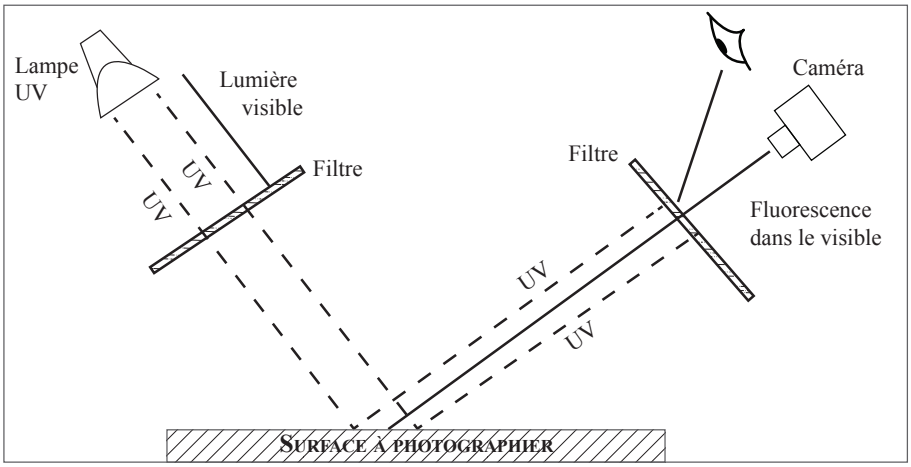


FIGURE 3.3 – Principe de fonctionnement de la photographie de fluorescence X sous rayonnement ultraviolet. D'après [65].

Les peintures de chevalet, souvent protégées par un vernis à base de résine naturelle au moment de leur réalisation, présentent une fluorescence plus ou moins intense et colorée en fonction de leur composition et de leur état d'altération [73]. Lorsque la couche de vernis est altérée et présente des lacunes, ou, au contraire lorsqu'elle a été recouverte par endroits de matériaux plus récents que le vernis originel, il va s'en suivre une absence ou une faible fluorescence sur les zones altérées et / ou modifiées. Ainsi les réseaux de craquelure de la couche picturale, les fissures, les régions ayant subi un nettoyage, ou les zones lacunaires apparaîtront en noir lors de l'examen sous UV (figure 3.1b), permettant de dresser un constat d'état détaillé de la surface de l'œuvre. De même, les zones liées à des repeints ou des retouches, recouvertes de matière qui ne fluoresce pas, ou ne fluoresce que très légèrement, se matérialiseront par des zones sombres.

Sculptures et objets peuvent aussi faire l'objet d'examens sous éclairage ultraviolet [74]. Dans le cas de sculptures en pierre, les différences de patine entre les surfaces anciennes et récentes, les accidents de surface et les zones de restauration pourront produire des fluorescences différentes permettant de mettre en évidence ou de souligner certains détails parfois difficiles à repérer sous lumière visible. Qu'il s'agisse de sculptures en bois ou en pierre, d'objets en céramique, métal ou verre, les examens sous ultraviolets sont particulièrement efficaces pour révéler des épisodes de restauration, tels que des repeints ou des assemblages de fragments issus d'un objet brisé. En particulier, certains adhésifs utilisés pour recoller des morceaux entre eux apparaîtront avec une fluorescence notable le long des lignes de fracture. Il peut aussi être possible de distinguer les matériaux originaux de ceux qui ont été utilisés pour combler une lacune.

1.3 Photographie et réflectographie infrarouges

L'observation des œuvres sous rayonnement infrarouge permet de visualiser de façon non destructive les inscriptions et dessins sous-jacents dans les peintures de chevalet.

Lorsqu'une radiation électromagnétique émise dans le proche infrarouge arrive sur une œuvre peinte, elle subit une série d'interactions avec la matière comprenant des phénomènes d'absorption, de réflexion, de diffusion et de réfraction (figure 3.4).

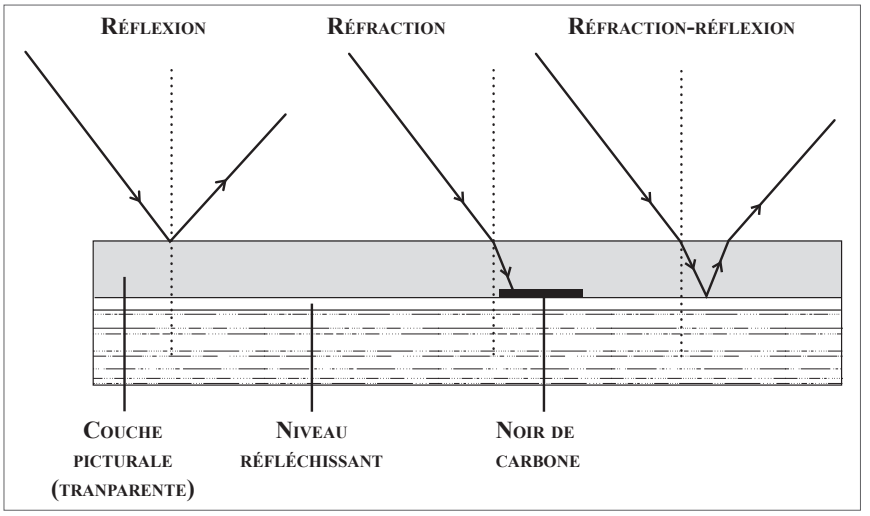


FIGURE 3.4 – Schématisation des interactions rayonnement infrarouge – couches picturales. D'après [65].

Dans la plupart des cas, les différentes couches picturales sont traversées par le rayonnement infrarouge qui est ensuite plus ou moins réfléchi par la couche de préparation en fonction de sa composition. Si un dessin a été réalisé sur une couche de préparation diffusante avec un matériau qui absorbe les rayonnements infrarouges (noir de carbone par exemple), un contraste est visible dans l'infrarouge. Afin d'accéder aux indications qui ont précédé la mise en couleur, certaines conditions sont nécessaires :

- la matière picturale doit être « transparente » aux infrarouges, c'est-à-dire qu'elle ne doit ni trop absorber, ni trop diffuser le rayonnement incident. Cela est rendu possible par la baisse du pouvoir de diffusion des pigments quand la longueur d'onde augmente, ce qui diminue l'opacité de la matière picturale ;
- la couche de préparation, au contraire, doit réfléchir le rayonnement incident, ce qui est par exemple le cas des préparations blanches à base de craie ou de gypse (*gesso*) et de colle animale ;
- les éléments sous-jacents doivent absorber le rayonnement incident.

Quand ces conditions sont réunies, on obtient des images en niveaux de gris sur lesquelles les zones les plus sombres correspondent aux matériaux qui ont absorbé le

rayonnement infrarouge incident (figure 3.1c). Les dessins sous-jacents, les indications de couleur ou les ombres, autrement dit, l'ensemble des éléments préparatoires à la peinture, apparaissent donc en noir ou en gris plus ou moins foncé. Le contraste obtenu dépend de la nature des éléments chimiques constituant la matière picturale et de son épaisseur, mais aussi de la gamme spectrale du rayonnement infrarouge détecté.

C'est la réflectographie infrarouge, développée dans le courant des années 1960 par J. R. J. van Asperen de Boer, qui a permis d'améliorer la détection des dessins sous-jacents en ouvrant la possibilité de détecter les rayonnements infrarouges réfléchis par l'œuvre sur une plage spectrale différente de ce que permettait la photographie [75]. Pour chaque œuvre, afin de disposer d'images de bonne résolution, plusieurs réflectogrammes sont obtenus sur des dimensions plus ou moins grandes en fonction de la résolution désirée. Les documents obtenus sont ensuite numérisés et assemblés grâce à des logiciels adaptés pour obtenir une image complète de l'œuvre [76].



FIGURE 3.5 – Détail du tableau *Les Époux Arnolfini*, peinture sur bois (82,2 × 60 cm), du peintre primitif flamand Jan Van Eyck, 1434, National Gallery (Londres). À gauche : détail photographié en lumière directe blanche. À droite : réflectographie infrarouge numérique mettant en évidence le détail du dessin sous-jacent ; à noter en particulier le changement de position des yeux entre le dessin initial et la peinture finale. Photographies © The National Gallery, London. `http://www.nationalgallery.org.uk/paintings/research/the-restoration-of-margaret-the-artists-wife/the-underdrawing`.

Les documents ainsi obtenus (figure 3.5) permettent de repérer, localiser et déterminer les caractéristiques des dessins sous-jacents, de mettre en évidence des repentirs et de déceler des inscriptions (signature, indication de couleur, de date, de lieu, etc.).

Bien que les méthodes d'examen fondées sur le rayonnement infrarouge soient impuissantes à révéler la composition du matériau ayant servi à réaliser le dessin sous-jacent, elles permettent néanmoins d'en détailler les caractéristiques. Un dessin réalisé

au pinceau avec une substance fluide apparaîtra continu, plus ou moins épais, avec un tracé plus ou moins ondulé, tandis que l'utilisation d'une matière sèche, pierre noire, crayon, matériau carboné, voire pointe métallique donnera naissance à un tracé discontinu plus difficile à déceler [77].

Au-delà des informations liées à la genèse et au vécu d'une œuvre, une bonne connaissance des dessins sous-jacents d'un artiste ou d'une école, la présence de signatures ou d'indications diverses sont autant d'indices qui peuvent être utilisés dans la perspective de l'authentification d'une œuvre.

1.4 Examens sous rayons X (radiographie, émissiographie et tomographie)

Les méthodes d'examen qui viennent d'être présentées fournissent des informations sur la surface ou sur une partie de l'épaisseur, généralement très fine, sous la surface de l'objet. Ainsi, dans le cas des peintures de chevalet, les photographies sous lumière visible ou sous UV documentent des phénomènes de surface tandis que les examens infrarouges permettent de pénétrer la couche picturale et de révéler les dessins sous-jacents, c'est-à-dire des informations à l'interface « couche de préparation / matière picturale ».

Pour obtenir des informations sur le cœur d'une œuvre, il est nécessaire de recourir à d'autres gammes énergétiques [78-81].

1.4.1 La radiographie

La radiographie est une méthode fondée sur l'exposition d'un objet ou d'une peinture à un faisceau de rayons X. Ces rayonnements électromagnétiques sont très pénétrants. Ils traversent l'œuvre en étant plus ou moins atténués en fonction des caractéristiques et de l'épaisseur des matériaux constituant les objets étudiés. La radiographie fournit donc en général, pour la majorité des œuvres, des informations sur la totalité de l'épaisseur d'un objet. L'image obtenue peut être considérée comme un palimpseste des différentes épaisseurs des matériaux constituant les objets. Il en résulte parfois des documents relativement complexes dont l'interprétation est délicate. Cette difficulté peut être minimisée en modulant l'énergie des rayons X incidents en fonction de ce que l'on souhaite mettre en évidence et en modifiant leur angle d'incidence par rapport à l'objet étudié, soit en inclinant le tube soit en inclinant l'objet.

Pour obtenir une radiographie, il faut disposer d'une source de rayons X. Un générateur de rayons X comprend généralement, dans un tube en verre sous vide, un filament métallique (cathode) qui, chauffé et soumis à un courant électrique, émet des électrons. Les électrons sont accélérés grâce à une différence de potentiel entre la cathode et l'anode. Le bombardement de l'anode par les électrons provoque l'émission de rayons X. L'énergie des rayons X obtenus dépend de la nature de l'anode, souvent en tungstène, mais aussi de la tension d'accélération des électrons. Le spectre de rayons X émis peut être considéré comme la résultante de deux spectres (figure 3.6) :

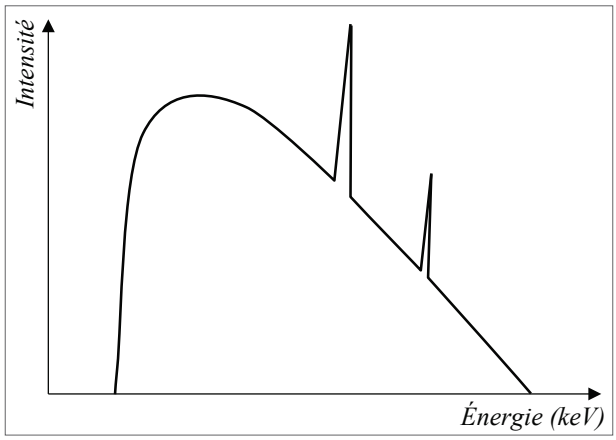


Figure 3.6 – Graphique montrant l'intensité des rayons X émis en fonction de leur énergie. La courbe continue est liée au rayonnement de freinage (*cf.* encart 5.1) des rayons X dans la matière tandis que les deux pics sont produits par le réarrangement du cortège électronique des éléments excités. D'après [81].

- un spectre d'énergie discontinue spécifique à chaque matériau. Ce spectre est lié à l'excitation des atomes constitutifs de la matière puis à la réorganisation de leur cortège électronique lors de leur retour à l'état fondamental ; ce phénomène, utilisé en analyse élémentaire, ne nous intéresse pas ici ;

- un spectre d'énergie continue correspondant au rayonnement de freinage (*Bremsstrahlung*, *cf.* encart 5.1) provoqué par la déviation de l'électron de sa trajectoire à proximité d'un atome. Ce sont les rayons X à l'origine de ce spectre qui sont utilisés en radiographie.

D'un point de vue pratique, pour obtenir une radiographie, on place l'objet entre le générateur de rayons X et un support sensible qui sera impressionné par les rayons X ayant traversé l'objet (figure 3.7). Ce support est un film argentique pour la méthode classique. Dans le cas de la radiographie numérique, il s'agit de plaques photoluminescentes ou de capteurs numériques directs de type CCD (*Charged Coupled Device*) en français appelés dispositifs à transfert de charge (DTC).

La radiographie est une technique qui repose sur la transmission de l'énergie à travers un matériau. L'atténuation des rayons X lorsqu'ils traversent l'objet est liée à deux paramètres principaux : les éléments chimiques constitutifs du matériau et l'épaisseur de l'objet. Ainsi, d'une façon générale, plus le numéro atomique des éléments chimiques est élevé, plus les rayons X sont atténués ; pour un même matériau, plus l'épaisseur à traverser est grande, plus les rayons X sont atténués. Sur la radiographie, les zones impressionnées par les rayons X ayant traversé l'objet apparaissent en noir ou en niveau de gris en fonction du degré d'atténuation après le passage à travers la matière. Au contraire, les zones ayant arrêté les rayons X fournissent des plages blanches correspondant à un film non impressionné (figure 3.1d).

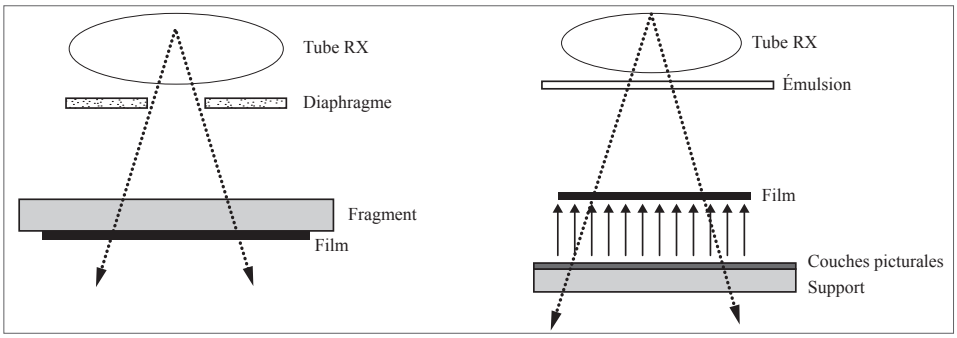


FIGURE 3.7 – Principe de la radiographie (à gauche) et de l'émissiographie (à droite). D'après [65].

Lors des opérations de radiographie dites conventionnelles, il s'agit de projeter un objet en trois dimensions sur un espace à deux dimensions (le film radiographique). De ce fait, une partie des informations est perdue. Afin de pallier cet inconvénient, plusieurs radiographies d'un même objet sont généralement réalisées suivant des angles différents.

Radiographier des œuvres d'art et des objets du patrimoine est souvent une opération longue et délicate qui nécessite un calcul des conditions expérimentales en fonction des caractéristiques de l'objet et qui demande un savoir-faire spécifique [78, 79]. Les objets sont généralement composites et comprennent des matériaux qui laissent plus ou moins passer les rayons X. Leur épaisseur peut être très variable, un même objet pouvant présenter des parties très fines, ou, au contraire, épaisses. Enfin, les dimensions des objets sont variables et l'on peut avoir à faire aux œuvres les plus petites comme à de très grands formats (une boucle d'oreille ou une momie).

Lorsque le radiologue cherche à révéler des détails particuliers, il peut jouer sur plusieurs paramètres [78] : l'angle d'incidence des rayons X par rapport à l'objet, comme nous l'avons déjà mentionné ; mais aussi l'intensité du courant électrique à l'origine de la production d'électrons. En effet, plus l'intensité est élevée, plus la quantité de rayons X est importante et moins le temps d'exposition est long. Enfin, en faisant varier la différence de potentiel appliquée entre la cathode et l'anode, on pourra modifier la longueur d'onde et donc l'énergie des rayons X produits. Plus cette différence de potentiel est élevée, plus la longueur d'onde des rayons X est courte, plus leur énergie est importante et donc leur pouvoir de pénétration élevé.

De même que pour les examens mentionnés précédemment, la radiographie est une méthode considérée comme totalement non invasive (sans prise d'échantillon). Il faut cependant avoir conscience que l'œuvre est soumise à un rayonnement énergétique qui va induire certaines modifications qui ne sont détectables qu'à l'échelle atomique ou infra-atomique. En particulier, l'énergie fournie à l'objet, dans le cas de céramiques par exemple, va libérer certains électrons piégés dans des défauts cristallins, phénomène à la base de la datation par thermoluminescence (*cf.* chapitre 4). Ainsi, la radiographie effectuée au préalable aura une influence sur la date obtenue par la suite. Il importe

donc, lorsque l'on réalise ces examens, de les documenter systématiquement et de bien réfléchir à l'ordre dans lequel on les réalise, certaines méthodes perturbant des paramètres qui sont mesurables et étudiables par d'autres techniques [63].

La radiographie est une méthode puissante pour étudier aussi bien les peintures que les objets. Sur les peintures de chevalet, elle fournit des informations sur la matière picturale, sur les supports en bois ou en toile, sur les repentirs ou les réutilisations ainsi que sur les procédés de restauration (figure 3.1d).

Les radiographies d'objets permettent d'appréhender les modalités de fabrication, les restaurations et l'état de conservation (figure 3.8).

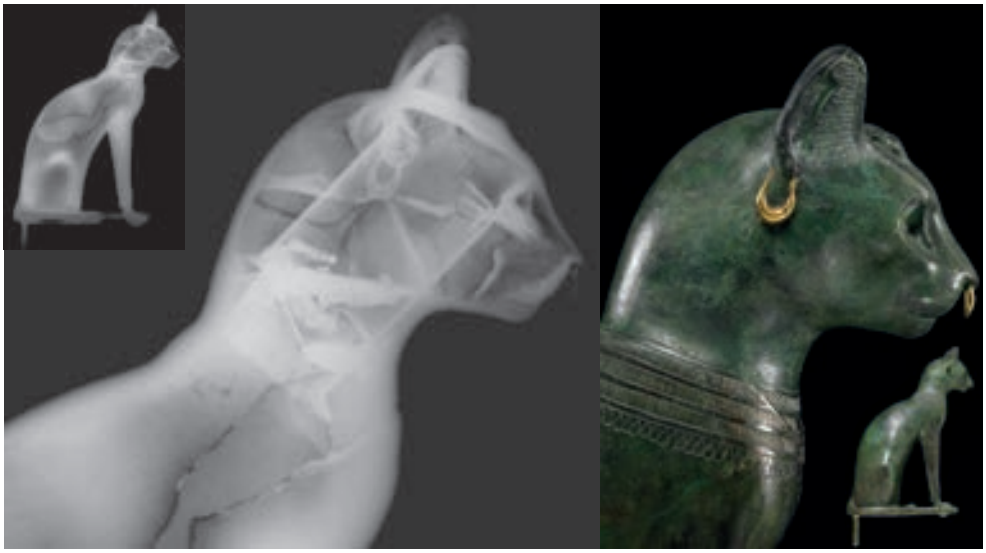


FIGURE 3.8 – Radiographie sous rayons X du chat de la collection Gayer-Anderson du *British Museum* d'après [82], montrant sur le corps les réparations effectuées avant son entrée dans la collection de ce musée et à l'intérieur de la tête un cylindre métallique relié au moyen de fils et crochets pour maintenir la tête en place. Images cédées par © The Trustees of the British Museum.

Même si la radiographie est une méthode performante pour pénétrer au cœur des œuvres, elle est inadaptée à certains cas. Il arrive alors que, toujours en utilisant des rayons X comme rayonnement incident, on travaille non pas en transmission mais en émission (émissiographie). Afin de remédier au caractère bidimensionnel de la radiographie, la tomographie est également en train de se développer dans le domaine de l'histoire de l'art et de l'archéologie. Enfin, on peut avoir recours à d'autres particules excitatrices ou rayonnements tels que des rayons β (bêtagraphie), γ (gammagraphie) ou même des neutrons.

1.4.2 L'émissiographie

Dans le cas de peintures dont les pigments contiennent beaucoup d'éléments lourds ou encore lorsque les peintures sont réalisées sur des supports métalliques (peintures sur

plaque de cuivre par exemple), la radiographie ne donne pas de résultat satisfaisant car les rayons X sont quasiment intégralement absorbés par certains éléments et on obtient un film blanc. Dans ce cas, l'émissiographie, technique qui repose également sur l'utilisation de rayons X incidents, mais ayant la particularité d'être des rayons X durs, c'est-à-dire des rayons X de faible longueur d'onde et de grande énergie, sont utilisés. Sous l'effet de ces rayons X, les métaux lourds émettent des électrons secondaires. Le film étant cette fois placé au-dessus de l'œuvre, ce sont les électrons secondaires émis par les matériaux constitutifs de l'œuvre qui vont impressionner le film (figure 3.7). Le document obtenu est relatif à la surface de l'œuvre et non plus à son cœur mais permet néanmoins parfois de révéler des détails intéressants.

1.4.3 La gammagraphie

La gammagraphie consiste à bombarder un objet avec des rayons γ, fortement énergétiques et donc très pénétrants, émis par des sources radioactives (souvent du ^{60}Co ou du ^{192}Ir). Utilisée pour l'inspection de structures métalliques, la gammagraphie a aussi permis d'accéder à des zones où les équipements de rayons X, très volumineux dans les années 50-60, ne pouvaient pas être installés ou encore dans le cas d'étude de métaux denses, ne pouvant être suffisamment pénétrés par des rayons X [83].

Rarement utilisée dans le domaine du patrimoine notamment pour des questions de sécurité, elle a néanmoins donné lieu à quelques applications intéressantes en particulier pour l'étude d'objets massifs pour lesquels les rayons X n'étaient pas assez pénétrants. Dès la fin des années 1950 par exemple, un bloc du monument néolithique de Stonehenge a été gammagraphié afin de vérifier si sa structure était assez robuste pour le replacer dans sa position initiale, comme linteau reposant sur d'autres blocs [62]. Des sculptures célèbres, telles que la *Piéta* de Michel Ange ou encore *Le Gladiateur Borghèse* du musée du Louvre, par exemple, ainsi que des statues en bronze tels le cheval grec du *Metropolitan Museum* [63] ou encore le grand Bouddha de Kamakura [64] ont également fait l'objet de gammagraphies.

1.4.4 La bêtagraphie

La bêtagraphie consiste à envoyer des particules β^- (électrons) sur une œuvre. Les électrons sont souvent émis par une source de ^{14}C. Ces particules ont un faible pouvoir de pénétration dans la matière mais elles sont efficaces pour obtenir des images de matériaux fins et peu denses comme les papiers. Cette méthode a été notamment utilisée pour mettre en évidence le filigrane de certains papiers ou encore les peintures sur verre corrodé [84].

1.4.5 La neutronographie

Les neutrons, qui sont plus fortement absorbés par les matériaux constitués d'éléments légers comme l'hydrogène, le bore ou le lithium, que par les matériaux constitués d'éléments plus lourds que le carbone, peuvent être utilisés pour obtenir des neutronographies avec un contraste en Z différent de ce qui est obtenu par radiographie. On peut ainsi par exemple visualiser l'intérieur d'un container en plomb, en laiton ou en bronze.

En ce qui concerne les peintures, la neutronographie peut révéler l'utilisation d'ébauches et de demi-teintes. Associée à l'identification des isotopes radioactifs par spectrométrie gamma, fluorescence X et MEB, la technique d'un peintre peut être étudiée, comme cela a été le cas pour les peintures de Thomas Wilmer Dewing (1851-1938) [85].

Coûteuse et lourde à mettre en œuvre, étant en outre parfois à l'origine d'une radioactivité induite de l'objet étudié, cette méthode n'est que peu utilisée en contexte patrimonial. Elle offre néanmoins la possibilité de révéler des détails concernant les matériaux organiques présents dans des fourreaux d'épée ou encore au niveau des soudures (*fittings*) sur des lames en fer [81, 86-88]. Dans le cas de statues en bronze, grâce à la plus grande pénétration des neutrons, il est possible de mettre en évidence des détails non perceptibles sous rayons X [89].

1.4.6 La tomographie par absorption

Il s'agit d'une méthode qui permet de radiographier un objet suivant différentes orientations (radiographie multidirectionnelle) afin de reconstituer avec une grande précision la surface extérieure mais aussi la structure interne des objets [90, 91].

La tomographie à rayons X avec numérisation 3D (parfois appelée tout simplement scanner) est la plus utilisée dans le domaine du patrimoine culturel. Proche de l'IRM (Imagerie par Résonance Magnétique), c'est une technique récente qui consiste à placer un objet sur un plateau équipé d'un moteur pas à pas et à le bombarder de rayons X. Il s'agit ensuite de récolter au moyen d'un détecteur fixe les rayons X atténués par le matériau traversé. La source à rayons X peut aller du simple tube à rayons X à la radiation synchrotron, cette dernière permettant d'améliorer la résolution des images obtenues [92]. Grâce à un algorithme et à des logiciels de traitement, les reconstructions en images 2D et 3D permettent de visualiser les données enregistrées.

La tomographie a été utilisée pour l'étude des momies égyptiennes [93-95] et dans les domaines de la statuaire et des monuments historiques notamment [96]. Récemment, cette méthode a été exploitée pour obtenir des images de cernes d'arbre et ainsi mesurer leur largeur d'une façon non destructive, ouvrant de nouvelles perspectives en dendrochronologie [97]. Il est également possible d'appréhender l'efficacité de procédés de consolidation de matériaux poreux en pierre dans les monuments historiques par cette méthode [98, 99].

2 Les méthodes d'observation microscopique

Les méthodes d'observation microscopique ont pour vocation d'élargir la capacité de perception de l'œil et de dépasser sa résolution limitée dans le but d'ouvrir l'accès à des détails invisibles. En fonction de la résolution et de la profondeur de champ* recherchées, mais aussi des caractéristiques du sujet à observer (degrés de planimétrie et de transparence, épaisseur), des instruments différents et complémentaires sont utilisés (tableau 3.1). Deux grandes familles de microscopes existent : les microscopes de champ lointain fondés sur l'interaction entre un rayonnement et la surface du sujet à observer (microscopes optiques et électroniques) et les microscopes de champ proche

dont le fonctionnement repose sur une sonde qui explore la surface à étudier, avec ou sans contact (microscope à effet tunnel, microscope à force atomique). Bien que ces derniers aient récemment trouvé quelques applications sur des objets du patrimoine culturel, leur utilisation reste très ponctuelle dans ce domaine, ce qui nous a amenés à focaliser ce chapitre sur les seuls microscopes de champ lointain.

Techniques	Microscopie optique	MEB	MET
Analyse destructive	Non	Parfois	Oui
Type d'interaction	Transmission ou réflexion de la lumière	Diffusion des électrons	Diffraction des électrons
Source excitatrice	Lumière visible (polarisée ou non)	Électrons (5-25 kV)	Électrons (0,1-1MV)
Échantillonnage	Oui, si coupe stratigraphique	Oui, si coupe stratigraphique	Oui (1 mm²)
Préparation	Polissage si prélèvement	Polissage si prélèvement, métallisation	Poudre ou lame ultramince
Couplage imagerie/analyse	Identification par la morphologie et la couleur	Avec analyse élémentaire EDS	Avec analyse élémentaire EDS et diffraction électronique (SAED)
Durée d'analyse	15 min	1 à 12 h	2 h
Résolution spatiale	Quelques dizaines de micromètres	Quelques dizaines de nanomètres	Quelques dizaines d'Ångström

Tableau 3.1 – Comparaison des résolutions latérales des différents types de microscopes. D'après [100].

2.1 Microscopie optique

C'est généralement l'observation sous loupe binoculaire, également appelée stéréomicroscope, qui suit l'examen à l'œil nu. Permettant des grossissements généralement compris entre $\times 4$ et $\times 100$, cet instrument est adapté à l'observation en relief de petits objets ou de détails sans aucune préparation ni prélèvement préalable, avec une source de lumière qui éclaire l'objet par-dessus. Les loupes binoculaires utilisées dans le domaine du patrimoine culturel sont diversifiées et comprennent des appareils de laboratoire fixes ou mobiles ; des loupes binoculaires transportables sont également de plus en plus utilisées pour réaliser, dans les musées ou sur les sites archéologiques, les observations directement sur les objets sans les déplacer.

L'observation à travers un microscope optique succède aux examens sous loupe binoculaire. Suivant que l'image est obtenue par transmission de la lumière à travers l'objet d'étude, ou par réflexion, on distingue deux types de microscopes : à transmission et à réflexion. Les microscopes à transmission permettent d'observer des objets qui laissent

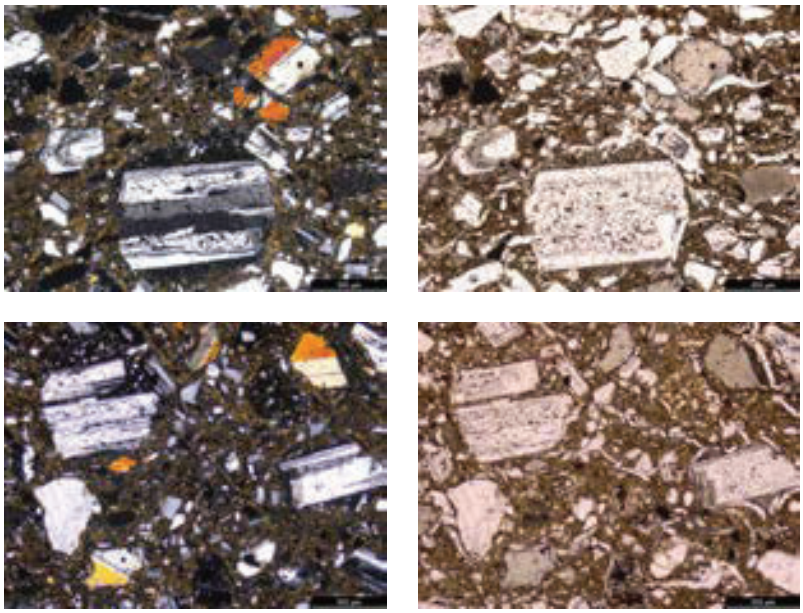


Figure 3.9 – Observation sous microscope polarisant d'une lame mince de céramique du site néolithique de Giribaldi à Nice (fouilles D. Binder). À gauche en lumière polarisée, à droite en lumière naturelle. Cette lame montre une terre d'altération peu évoluée des andésites locales. Les principaux minéraux visibles sont : feldspaths plagioclases à larges macles polysynthétiques, pyroxènes de type augite, amphiboles. D'après [101]. Photographies de Gilles Durrenmath, CEPAM, CNRS, UNS.

passer la lumière, le plus souvent des lames minces ; c'est le mode d'observation classique des micro-restes végétaux comme les grains de pollen et les phytolythes mais aussi de lames minces de divers matériaux, qu'il s'agisse de roches ou de céramiques. En pétrographie, discipline qui étudie la composition des roches et leur formation, on observe les lames minces grâce à un microscope à transmission particulier, le microscope polarisant ou microscope en lumière polarisée, qui permet d'observer les variations de polarisation de la lumière lorsqu'elle traverse l'échantillon. Ces variations sont liées au caractère biréfringeant* de certains minéraux présents dans les roches. Pratiquement, la lame mince est placée sur une platine mobile ; en tournant cette dernière, on observe des images différentes du même minéral en fonction de son orientation (figure 3.9). Les caractéristiques (couleurs, angles d'extinction) de ces différentes images permettent d'accéder aux assemblages minéralogiques (feldspaths, biotite, quartz, etc.).

Les microscopes à réflexion, ou microscopes métallographiques, sont adaptés à l'observation d'objets trop épais ou trop opaques pour se laisser traverser par la lumière. Ils sont en particulier efficaces pour l'étude de micrographies de pièces de métal (figure 3.10), l'examen de coupes stratigraphiques de peintures (figure 3.12) [102] et la caractérisation de fibres textiles [103, 104].

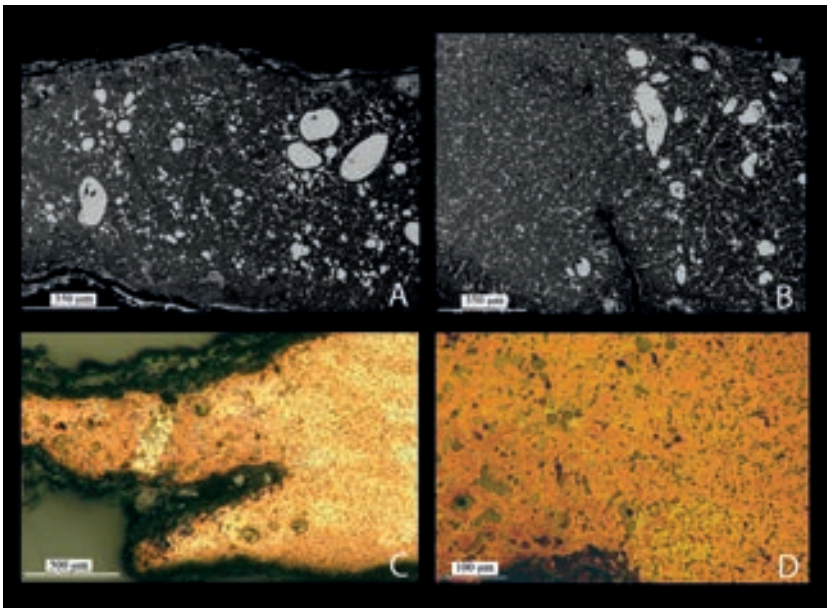


Figure 3.10 – Étude métallographique du prélèvement effectué sur l'Éphèbe d'Agde [289], dont la radiographie se trouve sur la figure 6.14. Images cédées par © Benoît Mille, C2RMF. Images SEM : (A) coulée primaire, (B) coulée secondaire. Les nodules de plomb apparaissent en blanc, les dendrites en gris foncé, les eutectoïdes en gris clair. Images sous microscope optique après attaque chimique au chlorure ferrique : (C) zone du soudage, (D) détail de la soudure. La zone du métal de base affectée thermiquement est reconnaissable par la présence de petits cristaux polygonaux qui se sont formés autour des eutectoïdes, sous l'action de la chaleur apportée par le métal de soudure.

Ce sont aussi des microscopes à réflexion qui sont utilisés en tracéologie. Ce domaine s'intéresse à l'étude fonctionnelle des assemblages archéologiques (pierres dures telles que silex, obsidienne, quartz, etc., outils en os, voire céramiques) ; il s'agit d'observer les traces laissées par l'utilisation des outils et des ustensiles, de les identifier et de les interpréter à l'aide de référentiels préalablement élaborés. Les matériaux travaillés par les outils étudiés, les gestes techniques et les modes d'utilisation sont ainsi accessibles à l'observateur [105] (figure 3.11).

Dans le champ de l'archéobotanique, charbons de bois et graines sont également étudiés en microscopie optique à réflexion. Les microscopes à réflexion peuvent être équipés d'une source de rayonnement ultra-violet permettant de visualiser la fluorescence visible émise par certains matériaux ; sur les coupes de peinture, ce mode d'éclairage permet par exemple de révéler la présence de colorants organiques ou de mettre en évidence des liants organiques (figure 3.12).

Récemment, le développement de la microscopie confocale, qui fonctionne également en réflexion, ouvre de nouvelles perspectives. Ce système permet de réaliser des images à différents niveaux de l'objet, puis de les assembler, afin de produire des images tridimensionnelles (phénomène de sectionnement optique). La profondeur de champ est inchangée et reste de l'ordre du micron comme en microscopie optique classique.

L'intérêt de la microscopie confocale se situe moins dans la résolution (gain maximal théorique d'un facteur racine carrée de deux par rapport à la microscopie classique), que dans la suppression des contributions hors focus (sectionnement optique). Pour une discussion récente des problèmes de résolution en microscopie (voir par exemple [107]).

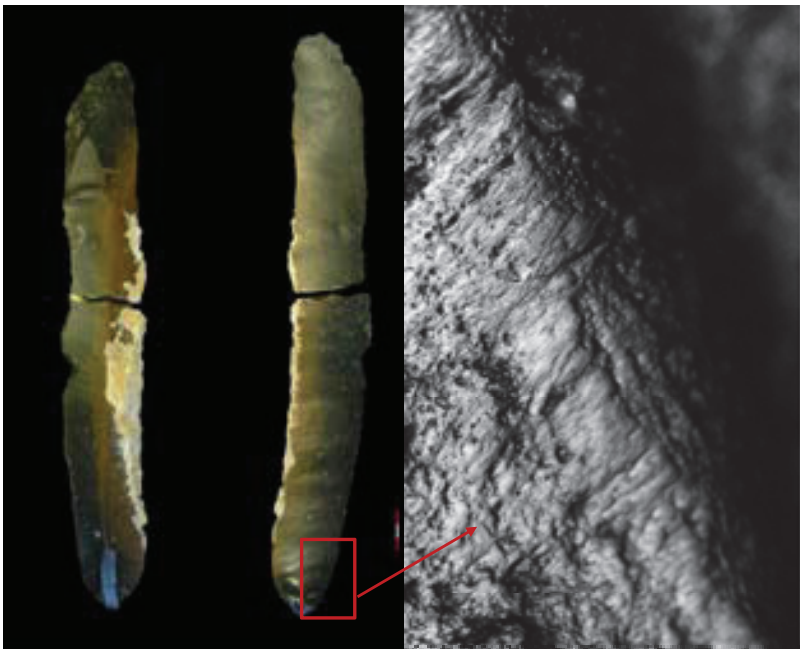


FIGURE 3.11 – Lame retouchée 172 du site du Roc-aux-sorciers (à gauche). À droite : détail sous microscope optique de la face inférieure proximale montrant des traces de travail de matière minérale. Images cédées par © S. Beyries, CEPAM, CNRS, UNS.

Malgré son grand potentiel, la microscopie optique est néanmoins limitée par sa résolution spatiale : intrinsèquement liée à la propriété de diffraction de la lumière, elle ne peut être dépassée par des moyens purement optiques. En effet, en microscopie optique, l'image d'un point source n'est pas un point mais une tache de diffraction. Cette figure de diffraction – ou tache d'Airy dans le cas d'une pupille circulaire – de chaque point source, empêche de séparer l'image de deux points très proches, c'est-à-dire de deux points dont la distance est inférieure au rayon de la tache d'Airy (figure 3.13).

Ce diamètre (d) est défini par l'équation suivante : $d = 1.22\ \lambda/2n\ \sin\theta$, λ étant la longueur d'onde de la source lumineuse, n correspondant à l'indice de réfraction du milieu d'étude et $\sin\theta$ étant lié au diamètre de l'objectif (demi-angle du cône de l'objectif). La longueur d'onde de la lumière dans le visible variant de 380 à 780 nm et l'ouverture numérique de l'objectif se situant typiquement entre 0,2 et 1,3, dans le cas le plus favorable, la résolution d'un microscope optique est de : $d = 184{,}6$ nm, ce qui est de l'ordre de $\lambda/2$. En pratique, il n'est généralement pas possible de distinguer des détails dont la taille est inférieure à environ 250 nm.

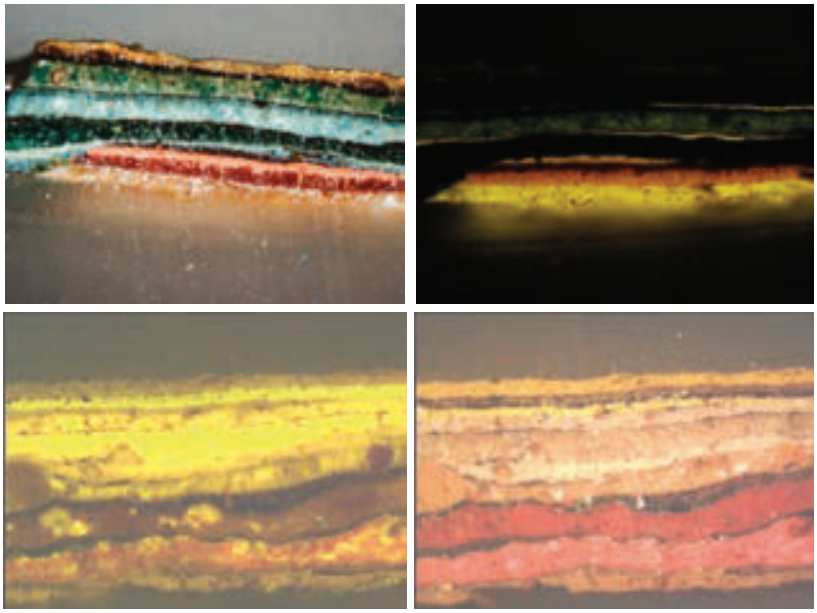


FIGURE 3.12 – Coupes stratigraphiques d'une sculpture française médiévale sur pierre. À gauche sous lumière blanche ; à droite sous lumière ultra-violette. Images cédées par © Sandrine Pagès-Camagna, C.2RMF.

Les microscopies en champ lointain, qu'elles soient optiques ou électroniques sont toutes limitées par la diffraction. La longueur d'onde associée aux électrons (de Broglie) est juste plus courte que celle associée aux photons, la résolution est donc meilleure. En revanche, les microscopies de champ proche, elles, ne sont pas limitées par la diffraction.

C'est pour dépasser cette limite intrinsèque à la lumière elle-même que la microscopie électronique s'est développée.

2.2 Microscopie électronique

La résolution latérale d'un microscope optique conventionnel ne peut pas dépasser 0,2 µm, avec un grossissement maximal de 1 500 et une profondeur de champ de 1 µm. L'avènement de la microscopie électronique dans les années 1930, fondée non plus sur l'utilisation d'une source lumineuse mais sur celle d'un faisceau d'électrons, a ouvert l'accès à des détails jusqu'alors inaccessibles [100].

Dans le domaine du patrimoine, les deux types de microscope électronique utilisés sont le MEB (Microscope Électronique à Balayage ; SEM pour *Scanning Electron Microscope* en anglais) et le MET (Microscope Électronique en Transmission ; TEM pour *Transmission Electron Microscope* en anglais). Ils se distinguent essentiellement par la longueur d'onde du faisceau d'électrons. Le MEB a permis d'atteindre une résolution latérale de 3 à 10 nm, des grossissements de 10 000 à 40 000 et une profondeur de champ de quelques micromètres. Avec une source d'électrons à émission de champ

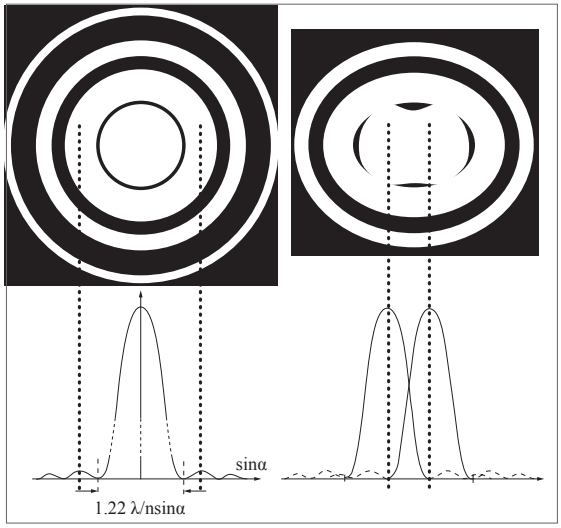


Figure 3.13 – Schéma de séparation des taches d'Airy de la diffraction de la lumière qui doit obéir au critère de Rayleigh (l'espacement des taches doit être au moins égal à leur rayon).

(*cf. infra*), on peut même atteindre une résolution latérale inférieure au nanomètre et un grossissement supérieur à 100 000. Dans le cas du MET, la longueur d'onde des électrons inférieure au nanomètre permet d'atteindre une résolution latérale d'environ 0,1 nm et des grossissements de l'ordre de 1 500 000 [108-110].

Le microscope électronique utilise les phénomènes d'interaction des électrons avec la matière pour produire une image. C'est grâce à la longueur d'onde associée aux faisceaux d'électron qu'il est possible de passer à une autre échelle de détail du point de vue de l'échantillon par rapport aux microscopes en lumière visible.

L'interaction des électrons avec la matière provoque un grand nombre de phénomènes correspondant à l'émission de divers rayonnements et particules (figure 3.14). Dans le cas du MEB, ce sont les électrons secondaires et rétrodiffusés qui sont utilisés pour obtenir des images.

Les électrons rétrodiffusés ont une énergie proche de l'énergie des électrons incidents : il s'agit des électrons ayant subi un nombre réduit de chocs élastiques proches dans le premier micromètre de l'épaisseur du matériau. Le contraste de l'image est directement lié au numéro atomique des éléments qui constituent le matériau analysé (image en contraste chimique). Les électrons secondaires ont une énergie plus faible car ils correspondent en général aux électrons émis par ionisation de l'échantillon au niveau du premier nanomètre. L'image est en contraste topographique et est donc liée au relief de la surface. Si ce relief est important, le contraste en numéro atomique est « écrasé » par le contraste topographique (figure 3.15).

Avec des faisceaux primaires d'énergie cent fois supérieure à celle du MEB, le MET se base sur la détection d'électrons de haute énergie (alors que les électrons secondaires

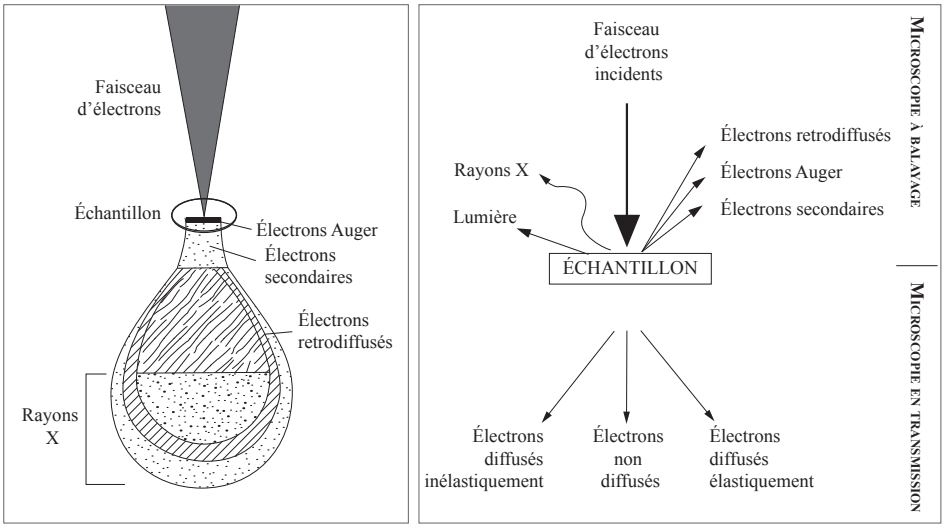


FIGURE 3.14 – Interactions entre les électrons incidents et la matière dans le cas des microscopes électroniques.

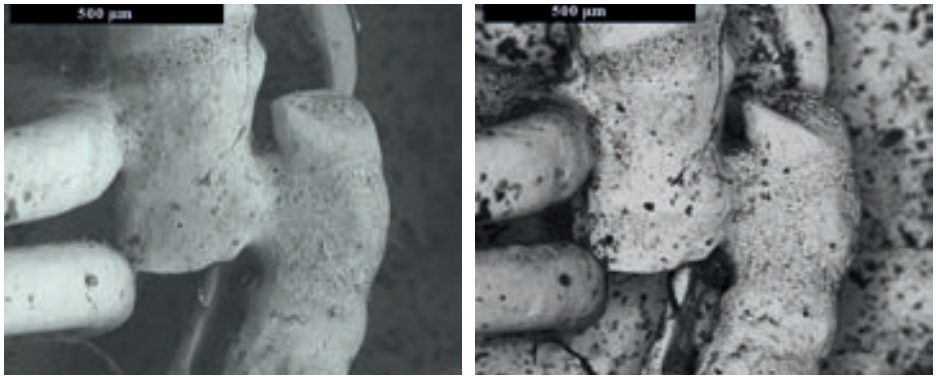


FIGURE 3.15 – Images en électrons secondaires (SE) à gauche et rétrodiffusés (BSE) à droite d'un filigrane en or de décoration d'un objet d'orfèvrerie. Images © M. F. Guerra, CNRS.

et rétrodiffusés du MEB sont de basse énergie), très peu ralentis et dispersés par l'échantillon. Le faisceau d'électrons transmis doit garder les propriétés du faisceau primaire de façon à obtenir une image de haute qualité. Les images sont observables directement sur un écran fluorescent, par enregistrement de film photographique, par détection avec camera CCD, etc. (figure 3.16). Il est aussi possible d'utiliser le mode diffraction des électrons, en visualisant la figure de diffraction dans le plan focal de l'objectif.

Un dispositif de détection de rayons X est souvent couplé au MEB de façon à réaliser de la microanalyse élémentaire (MEB-EDS). Un système équivalent peut être couplé au MET.

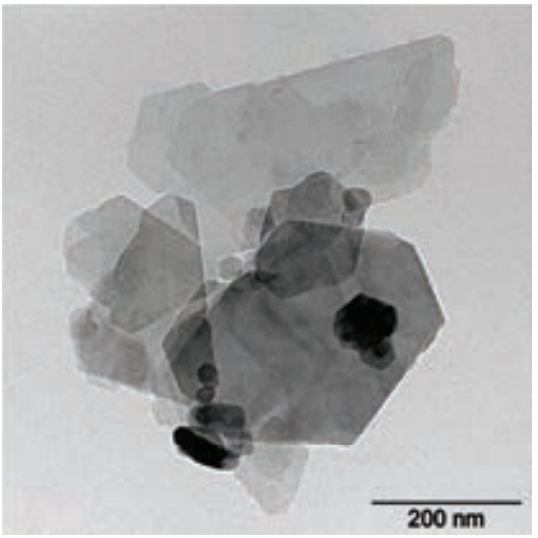


Figure 3.16 – Micrographie obtenue en microscopie électronique en transmission de cristaux hexagonaux fragmentés, constituant d'une roche composée d'hématite (oxyde de fer) et de kaolinite (aluminosilicate). Image cédée par F. Orange (CMMA, UNS) et J.-V. Pradeau (CEPAM, CNRS, UNS).

Pratiquement, les échantillons sont placés dans la chambre du microscope électronique sous vide ou sous pression partielle pour être bombardés par le faisceau d'électrons, ce qui engendre des contraintes spécifiques. Pour les objets, les contraintes sont en partie liées à leurs dimensions compatibles ou non avec la capacité de la chambre ; dans le cas d'objets volumineux, l'imagerie peut parfois être effectuée sur des moulages et l'analyse sur des prélèvements. Il importe également d'être vigilant à la fragilité des objets, *i.e.* à leur capacité de résister à une faible pression : les objets poreux tels que les ossements, certains verres ou métaux altérés, sont ainsi trop fragiles pour être étudiés par ce biais. Enfin, certaines caractéristiques (comme le dégazage naturel de certains matériaux, tels les émeraudes), empêche d'atteindre le vide nécessaire à l'analyse.

Un second jeu de contraintes est lié aux techniques de préparation des échantillons. Ainsi, la nécessité de transformer des matériaux isolants en matériaux conducteurs oblige à la réalisation de coupes et métallisation* de la surface (*cf.* chapitre 5) pour le MEB et à des opérations de broyage ou de mise en œuvre de couches ultra-minces (épaisseur de l'ordre de la dizaine de nanomètres) pour le MET qui fonctionne par transmission. L'information est obtenue par détection des électrons transmis dans toute l'épaisseur.

3 Les méthodes de topographie des surfaces

La surface d'un objet patrimonial, c'est-à-dire la partie qui correspond à la frontière entre l'objet d'étude et son environnement, comporte un grand nombre d'informations relatives à son histoire. La caractérisation de la surface d'un échantillon est de

divers ordres : analytique, géométrique ou topographique, mécanique, ou structural et textural. La caractérisation analytique correspond à la détermination de la composition chimique d'une première couche de faible épaisseur grâce à des techniques telles que le SIMS (*Second Ion Mass Spectrometry*), l'ESCA (*Electron Spectroscopy for Chemical Analysis*), l'AES (*Atomic Emission Spectroscopy*), le RBS (*Rutherford Backscattering*), etc. ; la caractérisation géométrique ou topographique permet de déterminer la topographie de la surface ; la caractérisation mécanique étudie l'état des déformations et de leur distribution (contraintes mécaniques internes ou appliquées) ; la caractérisation structurale et texturale correspond à la détermination de zones de défauts (lacunes et dislocations), de raccordement des réseaux de grains adjacents, de la taille et de l'orientation des grains.

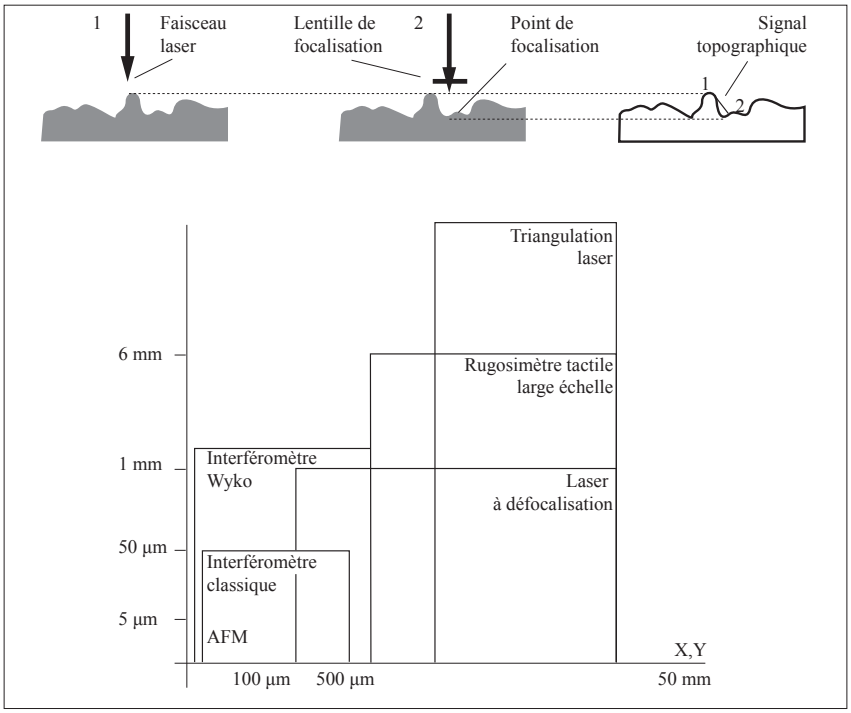


FIGURE 3.17 – (En haut) Principe de la mesure optique par rugosimètrie laser à défocalisation ; (en bas) échelles de mesures de différents rugosimètres. D'après [117].

Nous nous intéresserons dans cette partie à l'aspect géométrique, jusqu'à l'échelle microscopique, caractérisé par sa rugosité et son ondulation par rapport à une surface moyenne assimilée localement à un plan. Dans le domaine du patrimoine culturel, les méthodes de caractérisation géométrique des surfaces peuvent être assimilées à des méthodes d'examen. Les données obtenues, représentées sous forme de cartographies 3D ou de coupes 2D, relatives à la microtopographie des surfaces, viennent compléter la panoplie d'images obtenues par les autres méthodes d'imagerie précédemment décrites.

Même si ces méthodes se sont développées dans la seconde moitié du XX^{e} siècle, leur utilisation en contexte patrimonial est restée relativement sporadique jusqu'aux années 2000. Les applications dans ce domaine se sont alors multipliées et ont permis d'appréhender des problématiques très diversifiées comme la reconstitution des régimes alimentaires de certaines espèces à partir des microtraces présentes sur les dents, l'étude des traces d'outils et des gestes des artisans, les modes d'usure et d'utilisation des outils ou encore les mécanismes d'altération affectant les surfaces. Matériaux lithiques, métaux, céramiques, os et dents sont les principaux matériaux qui ont été étudiés par ces méthodes [111-114].

La mesure de défauts, tels que les aspérités et les creux d'une surface permettant de déterminer les écarts de forme, peut être réalisée par des palpeurs mécaniques avec contact ou par des techniques optiques (réflexion de lumière par interférométrie laser, profilométrie, etc.) lorsqu'il s'agit de faibles grandeurs ou de surfaces fragiles ou « molles ». Ces outils ont été développés dans le domaine de la tribologie, discipline qui traite les phénomènes de frottement, d'usure, de lubrification et d'adhérence de matériaux, de l'échelle macroscopique à l'échelle microscopique [115, 116].

Les palpeurs mécaniques avec contact sont surtout des rugosimètres dont les relevés profilométriques suivent des lignes régulièrement espacées. Quant aux méthodes de mesure optique, elles se basent sur la profilométrie laser ou sur les microscopies interférométrique et confocale. La microscopie confocale, déjà évoquée, fournit des images tridimensionnelles avec une résolution submicronique grâce à la conjugaison simultanée de la source et du détecteur en un même point de l'échantillon. Un mécanisme de balayage (optique du faisceau ou mécanique de l'échantillon) permet une mesure successive point par point.

Les rugosimètres tactiles ou optiques permettent de mesurer des états de surface allant de l'Angström à plusieurs millimètres d'altitude. La résolution requise, l'amplitude maximale du relief, la taille et la surface sont les éléments qui déterminent le choix de l'appareil à utiliser.

Pour atteindre une résolution nanométrique, en acquérant une image volumétrique de la surface, les microscopes à effet tunnel électronique ou optique, les microscopes de champ proche et les microscopes à force atomique sont utilisés selon le paramètre caractéristique d'une surface souhaitée.

Comme souvent, c'est la combinaison de ces techniques qui permet d'étudier les surfaces de façon optimale. À titre illustratif, citons l'analyse des déformations subies par des pièces de monnaie trouvées dans une épave par un rugosimètre laser à triangulation circulaire et un rugosimètre laser à défocalisation, dont le principe et les échelles de mesure sont illustrés sur la figure 3.17. Le premier instrument a permis d'identifier et d'analyser les déformations subies par le macro-relief de la surface totale des pièces, grâce aux mesures d'amplitudes de relief jusqu'à 10 mm, avec une résolution verticale de 1 micron. Le second a été utilisé pour la mesure topographique du microrelief de la surface, grâce aux mesures d'amplitudes jusqu'à 1 mm avec une résolution verticale maximale de 10 nm [117]. Le couplage de ces deux dispositifs a mis en évidence

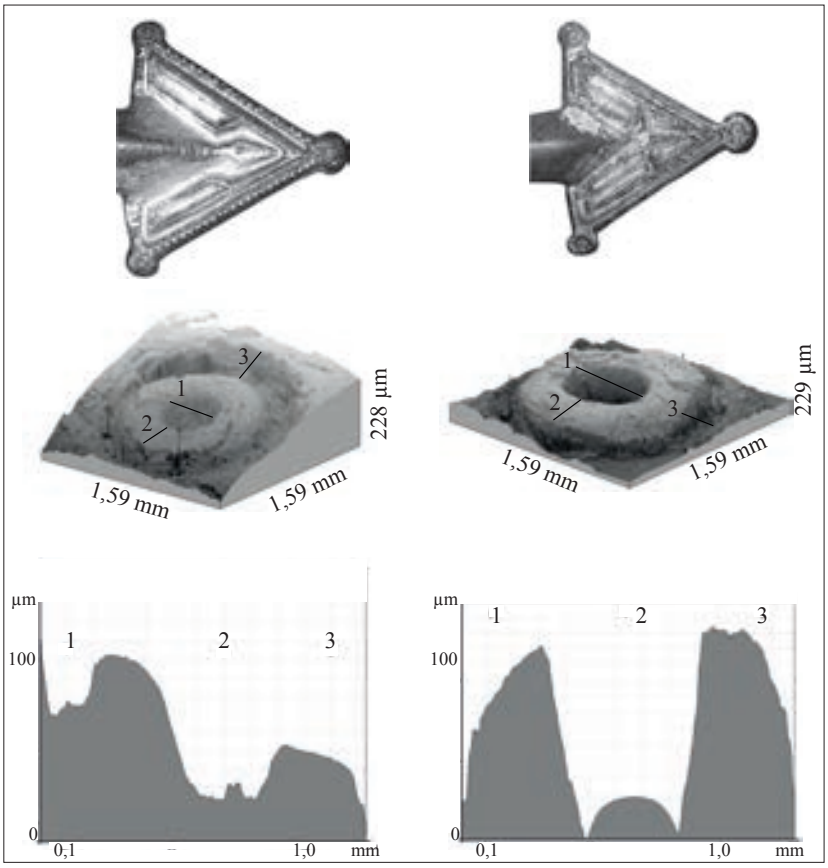


Figure 3.18 – Représentation en image 3D de synthèse de la topographie des ocelles et profils extraits sur une ligne médiane d'un ocelle de chaque élément de la paire de fibules mérovingiennes de la tombe S162 S163 du cimetière de la rue du Mûrier, Louviers (Eure), haut Moyen-Âge. Images © M. F. Guerra, CNRS. La photographie d'un élément de cette paire de fibules se trouve sur la couverture.

différents types d'altération : corrosion par piquage, corrosion par érosion et abrasion par des grains de sable.

Dans un autre domaine, l'application de techniques topographiques sans contact à l'étude des techniques de décoration sans apport de matière (gravure, repoussé, ciselure) utilisées par les Mérovingiens pour la fabrication d'objets d'orfèvrerie, a permis d'apporter des informations essentielles sur les outils et les procédés d'atelier [118]. L'identification et la quantification de traces d'outils a été réalisée par mesure topographique optique avec numérisation 3D à l'aide de capteurs optiques STIL qui se basent sur le principe de la microscopie confocale à champ étendu. Une paire de fibules en argent doré provenant des fouilles du site de Louviers [119] dans l'Eure, a été étudiée pour caractériser les marques d'outils des ocelles, motifs circulaires de décoration. La figure 3.18 montre que si les outils utilisés sont identiques, leurs dimensions ainsi

que le geste de l'artisan sont différents. Les données obtenues par microtopographie suggèrent une fabrication de la paire par des artisans distincts.

Il est possible d'obtenir d'autres représentations des données obtenues par microtopographie. La figure 3.19 illustre pour une monnaie d'or mérovingienne la représentation en échelle colorimétrique et en 3D de synthèse de la surface ainsi qu'un profil extrait sur une volute de décoration.

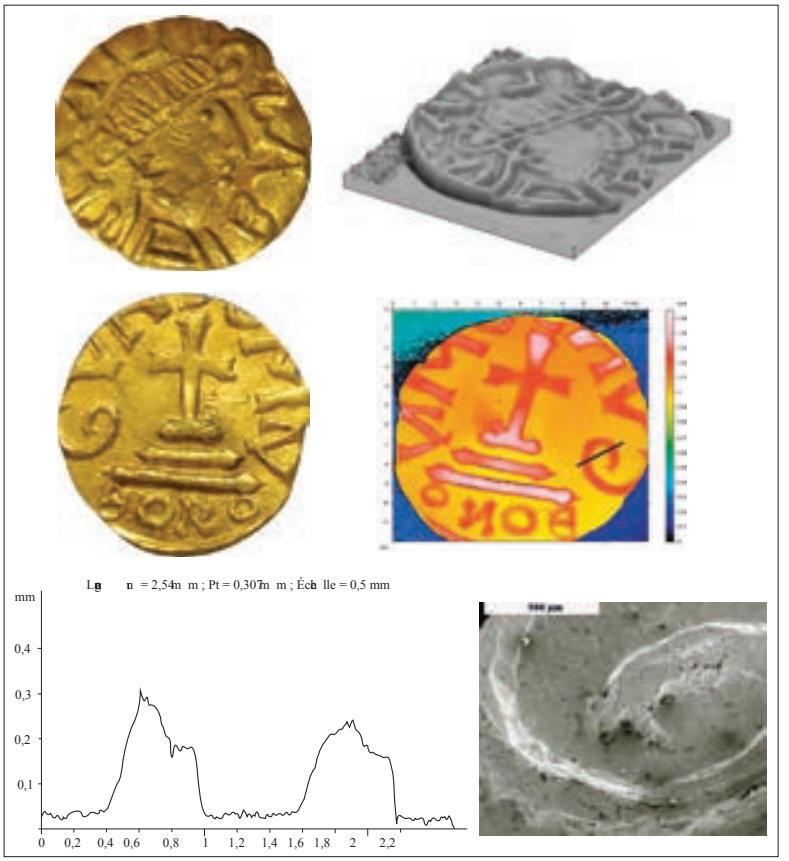


Figure 3.19 – Monnaie mérovingienne en or : (en haut) photographie et représentation en 3D de synthèse des données obtenues par microtopographie ; (au milieu) photographie et représentation en échelle colorimétrique de la surface des données obtenues par microtopographie ; (en bas) image MEB d'une volute et profil extrait montrant une épaisseur de 0,6 mm et une profondeur entre 0,20 et 0,26 mm. L'observation au MEB de cette lettre du motif explique l'aspect irrégulier de ces profils : ils sont dus à l'irrégularité de la frappe avec un coin. Images © M. F. Guerra, CNRS.