

## La radiographie des peintures de chevalet

158

**Résumé.** La radiographie conventionnelle est restée l'un des éléments-clefs de l'investigation scientifique des peintures mais plus que l'amélioration technique de l'obtention de l'image, c'est dans l'interprétation de celle-ci que résident ses apports les plus récents. Quelques exemples illustrent l'intérêt de la mise en place de cette sémiologie minutieuse. Les perspectives orientent le travail vers la gestion informatique de mots-clefs indexés. En parallèle, de nouveaux champs de recherche utilisant les rayonnements (émissiographie, micro-foyer X, autoradiographie, radiographie neutronique, etc...) doivent être expérimentés pour en définir la place dans l'exploration scientifique des œuvres d'art.

**Mots-clés.** Couche picturale, radiographie, rayonnement, sémiologie, support.

**Abstract.** Traditional X-ray methods remain one of the key elements of the scientific examination of paintings. Their most recent contributions, however, lie more in the interpretation of the images obtained than in technical improvements in the way of obtaining them. Some examples illustrate the interest of establishing this precise semiology. Future trends are towards the computerised management of indexed key words. At the same time, new fields of research using radiation (emission radiography, micro-source radiography, autoradiography, neutron radiography, etc.) must be experimented with in order to define their role in the scientific exploration of works of art.

La radiologie conventionnelle est restée l'un des éléments-clefs de l'investigation scientifique des peintures pendant ces quinze dernières années et plus de 8 500 dossiers radiographiques de tableaux ont été réalisés au Laboratoire de recherche des musées de France depuis son origine.

Les conditions d'exécution mises au point depuis longtemps donnant satisfaction, les progrès techniques eux-mêmes n'ont pas été spectaculaires bien qu'il y ait eu élévation de la puissance des générateurs, diminution de taille des foyers et augmentation de la sensibilité des films radiographiques. Ces progrès, non négligeables, ont amélioré sensiblement la qualité des images obtenues par M. de Drée, J. Marsac, G. de Puniet et M. Solier, tant au laboratoire du Louvre qu'à l'antenne de Versailles. A l'occasion de l'étude des *Noces de Cana* de Véronèse, M. Solier a introduit un nouveau format de films en longue bande pour faciliter la réalisation de cette radiographie, exceptionnelle par ses dimensions et son intérêt<sup>1</sup>. Depuis, de nombreuses radiographies de grands tableaux du Louvre et des musées de province ont été exécutées avec ces bandes qui présentent des avantages en diminuant le nombre d'expositions et de raccords nécessaires

lors de l'assemblage radiographique. J. Marsac et G. de Puniet les ont employées récemment pour radiographier l'imposant *Repas chez Simon* de Véronèse au château de Versailles. Ces films ont nécessité l'installation de machines à développement automatique qui sont utilisées maintenant quotidiennement.

### A ce jour...

La contribution de la radiographie à l'étude des œuvres d'art n'est plus à démontrer aussi peut-on se permettre un propos rétrospectif à caractère plus paradoxal que didactique.

Aux années pionnières où l'on privilégiait l'aspect esthétique d'une radiographie qui met en valeur le métier du peintre, a succédé une période moins exaltante, mais plus stimulante, où l'on cherche à découvrir des indices, parfois triviaux, qui concernent davantage le support de l'œuvre. Ce propos sera développé à travers trois exemples qui permettent de jeter un regard nouveau sur les œuvres examinées.



Figure 1. Portrait de femme âgée.  
Hans Memling. Paris, Musée du Louvre.  
© LRMF, photo M. de Drée

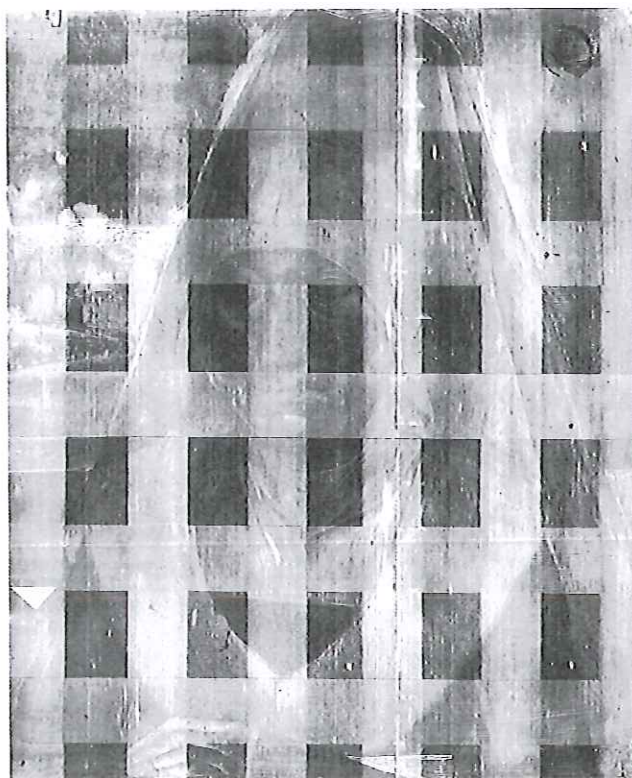


Figure 2. Radiographie de Portrait de femme âgée  
© LRMF, photo M. de Drée  
X-ray photograph.



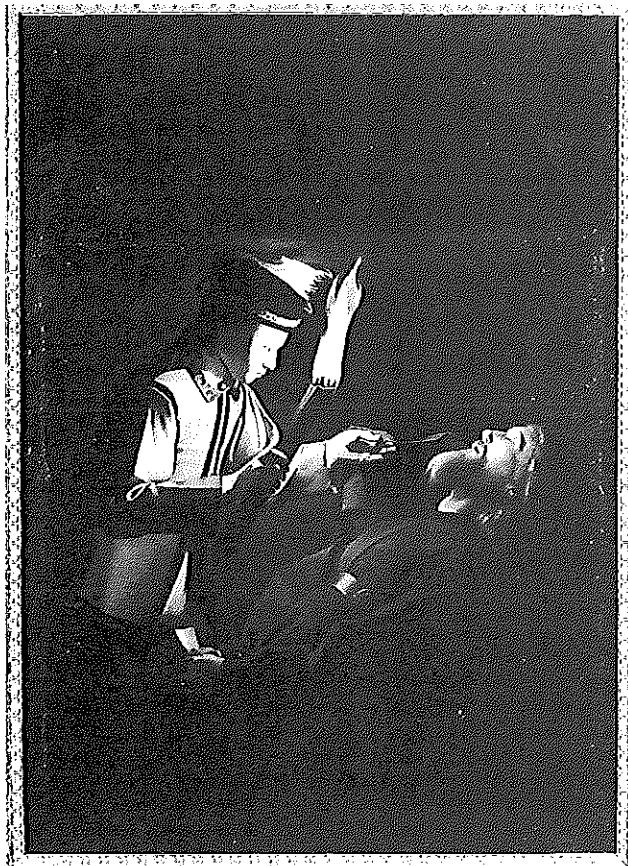
Figure 3. Radiographie du Portrait d'homme de Hans Memling.  
© Staatliche Museen zu Berlin, Gemäldegalerie.  
X-ray photograph.

Ainsi la localisation de banales cavités où étaient logées à l'origine des chevilles de bois servant à l'assemblage des planches d'un panneau, constitue un élément d'orientation pour la reconstitution de diptyques ou de polyptyques. Le *Portrait de femme âgée* (figure 1), peint par Memling au *xv<sup>e</sup>* siècle et conservé au Louvre, présente sur sa droite une zone évidée, décelée par la radiographie (figure 2). La même cavité est repérable en vis-à-vis sur l'image aux rayons X du *Portrait d'homme* (figure 3) de mêmes dimensions de la Gemäldegalerie à Berlin. Cela confirme que les deux œuvres constituaient un ensemble qui a été désolidarisé ultérieurement comme la continuité du paysage le suggérait déjà<sup>2</sup>.

Les traces que le châssis d'origine a laissées dans la matière picturale sont aussi sources d'information sur la vie des œuvres comme l'illustre *La Découverte du corps de saint Alexis* de Georges de La Tour, tableau conservé au Musée historique lorrain à Nancy (figure 4). Les vulgaires mastics, visibles en radiographie, (figure 5), posés aux emplacements des quatre traverses d'angles après l'enlèvement du châssis primitif, démontrent que la toile,



Figure 4. La Découverte du Corps de saint Alexis. Georges de La Tour. Nancy, Musée historique lorrain.  
© LRMF, photo J. Marsac



160

Figure 6. La Découverte du corps de saint Alexis, Georges de la Tour. Dublin, National Gallery.  
© LRMF

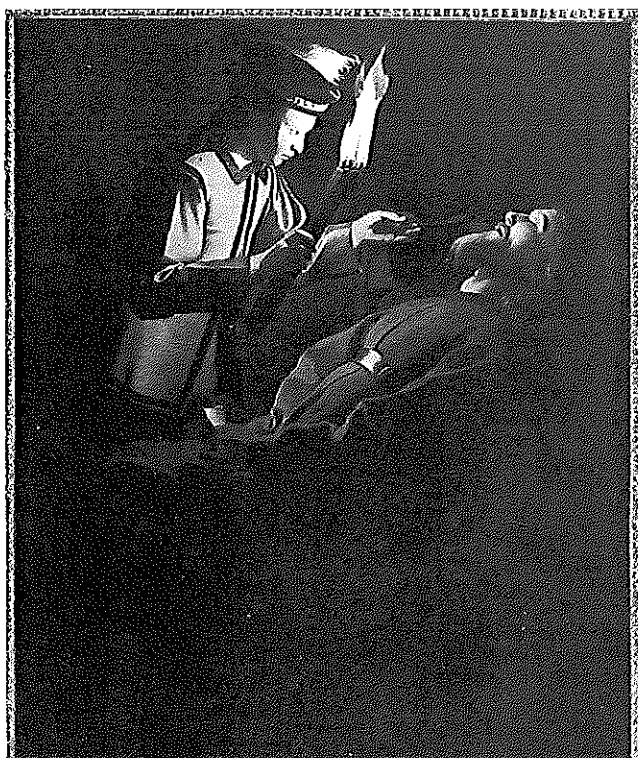


Figure 5. Radiographie de La Découverte du Corps de saint Alexis. Georges de la Tour  
© LRMF, photo J. Marsac

X-ray photograph.



agrandie dans la partie supérieure, n'a pas été gravement mutilée dans la partie inférieure, comme on le croyait. Dès sa conception, cette composition représentant les personnages à mi-corps est donc différente d'une autre version du même thème conservée à la National Gallery de Dublin, où les personnages sont en pied (figure 6). Cela suggère qu'il s'agit de deux œuvres autonomes et éventuellement autographes, plutôt que d'un original avec sa copie<sup>3</sup>.

A défaut d'illustrer joliment le propos, la radiographie du portrait de *Melchior von Brauweiler* (figure 7) met en évidence certains détails significatifs de la couche picturale qui, bien que peu spectaculaires, permettent de retracer les vicissitudes dont ce tableau a été victime. L'œuvre (figure 8), conservée au Louvre, a été peinte à Venise en 1540 par Johann Stephan Calcar, disciple du Titien. L'image radiographique ne présente guère d'attrait en raison d'un enduit opaque aux rayons X passé au revers de la toile qui atténue le contraste, mais elle indique clairement cependant que le peintre a représenté son sujet sur un support agrandi par la suite sur les quatre côtés par des bandes de toile de texture différente et,

pour l'une d'entre elles, déjà peinte<sup>4</sup>. On peut en conclure que le format original presque carré était à peu près le même que celui de la copie ancienne qui en a été faite quelques décennies plus tard et qui se trouve actuellement dans une collection privée (figure 8). De plus, une zone de forme vaguement rectangulaire, assez opaque aux rayons X, est discernable dans l'angle supérieur droit et ne correspond pas à un détail de la composition. La comparaison de cette radiographie avec la copie ancienne du tableau suggère que l'artiste avait peint le personnage avec une ouverture sur un paysage portuaire comme la copie le reproduit. Des analyses en fluorescence de rayons X, effectuées directement sur le tableau à l'emplacement du rectangle dissimulé<sup>5</sup>, ont renforcé cette hypothèse en décelant du cuivre en quantité notable en raison de la présence très probable d'un ciel original sous-jacent en azurite, pigment fréquemment utilisé dans ce but au xvi<sup>e</sup> siècle. À partir de faibles indices perceptibles en radiographie, on voit tout l'intérêt d'une telle découverte pour situer les sources stylistiques variées que s'est appropriées Calcar, peintre d'origine allemande, très influencé par l'art vénitien sans être insensible aux apports toscans, comme le montre J. Habert dans un récent article<sup>6</sup>. Recouvrir plus tardivement un paysage par une couche à base de terre d'ombre n'est pas innocent. Serait-ce pour favoriser une attribution plus flatteuse au Titien, célèbre pour ces portraits sur fond sombre comme *l'Homme au gant*, conservé au Musée du Louvre? Des attributions au Maître de Cadore et au Tintoret sont fréquentes dans les archives à propos de ce tableau, et c'est le nom de Tintoret qui figure pour une copie sur porcelaine du xix<sup>e</sup> siècle conservée au musée de Sèvres<sup>7</sup>.

Tous ces exemples démontrent la nécessité d'une attention à tous les aspects signifiants de l'image, car plus que dans l'amélioration technique de l'obtention d'un document, c'est dans l'interprétation de celui-ci que résident les apports actuels de la radiographie au laboratoire.

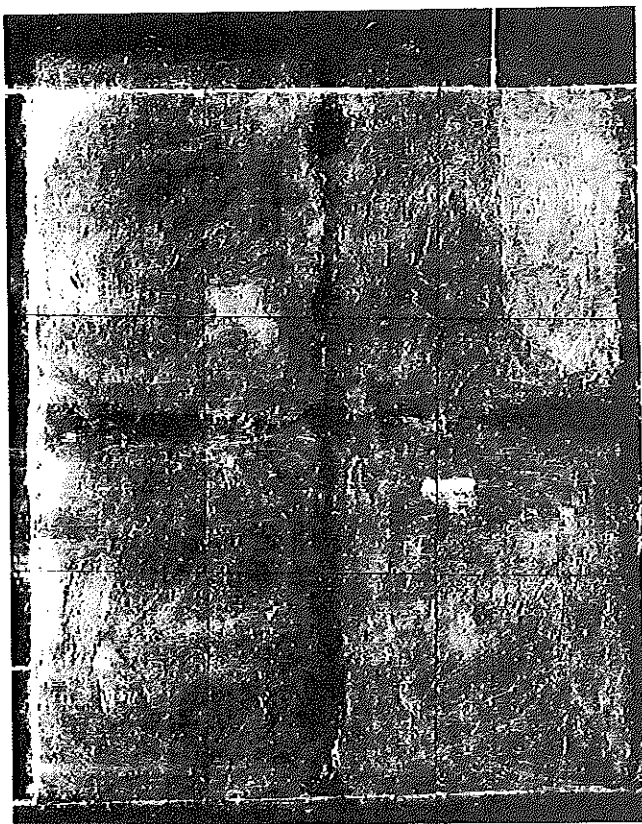
Très souvent la radiographie a une fonction de mémoire, car elle révèle ce que l'histoire a laissé inscrit dans la matière, tels qu'agrandissements, accidents et repeints. Le portrait de *Melchior von Brauweiler* illustre aussi cet aspect ainsi que le rôle prémonitoire de la radiographie qui souvent disparaît quand la couche de surface apocryphe est éliminée par la restauration. Un tableau sur bois examiné en 1973, mais encore actuellement dans les services de restauration des musées de France, servira d'exemple à ce propos. La radiographie de *La Vierge de l'Annonciation* (figure 9) du Musée du Petit Palais en Avignon révélait une figure tout à fait compatible avec un tableau du xv<sup>e</sup> siècle attribuable à Giovanni di Paolo, alors que l'œuvre elle-même était d'un style mièvre beaucoup plus tardif (figure 10). Après une délicate intervention contrôlée par l'image radiographique, a surgi en 1988 (figure 11) la représentation attendue d'une Vierge ancienne<sup>8</sup>. La restauration se poursuit et bientôt les derniers repeints locaux qui surchargent encore le visage auront

Figure 7. Portrait de Melchior von Brauweiler par Calcar.

Radiographie

© LRMF, M. Solier

X-ray photograph.



161

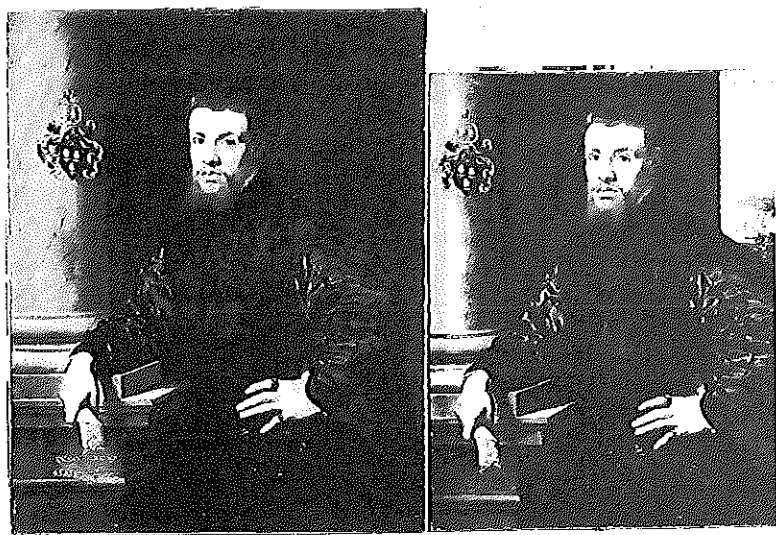


Figure 8. Les deux représentations du Portrait de Melchior von Brauweiler. À gauche, le tableau peint par Calcar. Paris, Musée du Louvre; à droite, la copie. Collection particulière.

© LRMF, photo G. Vanneste

The two versions of Portrait de Melchior von Brauweiler. On the left, the painting by Calcar, Paris, Louvre; on the right, the copy belonging to a private collection.

disparu. L'image radiographique, très excitante en 1973, en devient moins signifiante, car elle montre désormais ce que l'on voit à l'œil nu. De nombreux autres cas<sup>9</sup> pourraient témoigner de ce que la radiographie est menacée d'oubli quand l'intérêt qu'elle avait suscité disparaît.

## Prospective

Dans le cadre du projet européen NARCISSE<sup>10</sup> un vocabulaire descriptif et normatif, directement en rapport avec les images radiographiques et plus largement avec l'imagerie scientifique, a été défini par les institutions spécialisées. Les mots-clefs, répartis en trois groupes, décrivent les aspects relatifs aux éléments constitutifs d'origine (le support, la mise en place de la composition et la matière picturale), les altérations dont les œuvres ont été victimes et les interventions ultérieures à leur exécution. La description systématique des œuvres avec ce thésaurus, en cours sur les documents récents, doit aussi être faite sur tous les anciens dossiers. Cet effort considérable devra mobiliser les forces de toute l'équipe concernée par les peintures de chevalet. L'indexation par mots-clefs des fiches techniques de chaque œuvre permettra des comparaisons plus systématiques. Cette gestion informatique des résultats de l'étude des images scientifiques ouvrira de nouvelles perspectives d'exploitation du fonds accumulé.

Enfin, la numérisation des images dans un avenir proche permettra de retravailler l'image afin d'optimiser la visualisation des zones d'intérêt par une modification du contraste, des grossissements, des possibilités de soustraction d'une image par rapport à une image de référence comme le développe Henri Maître dans cette revue.

Hormis la radiologie conventionnelle, d'autres techniques utilisant la propagation de rayonnements sont testées et restent à ce jour au laboratoire encore à l'état expérimental, comme l'émissiographie, les micro-foyers à rayons X, l'autoradiographie, la radiographie neutronique dont les principes et les indications sont développés brièvement.

L'émissiographie est une technique utilisée au laboratoire quand la radiographie simple ne donne pas de résultats satisfaisants en raison de l'existence d'un parquetage serré ou épais renforçant le support, d'un enduit opaque aux rayons X posé au revers d'un tableau ou d'un support complètement opaque à ce rayonnement, comme une plaque de cuivre. L'émissiographie permet en effet d'obtenir, à partir d'un rayonnement X très énergétique, une image par la distribution spatiale de l'émission secondaire d'électrons. Celle-ci est produite par effet photo-électrique et issue de la surface de l'œuvre. Cette émission est d'intensité proportionnelle au numéro atomique des éléments émetteurs. L'atténuation de cette

Figure 9. La Vierge de l'Annonciation, attribué à Giovanni di Paolo. Radiographie (1973). Avignon, Musée du Petit Palais.  
© LRMF

X-ray photograph (1973).



Figure 10. La Vierge de l'Annonciation. Anonyme. Avignon, Musée du Petit Palais.  
© LRMF



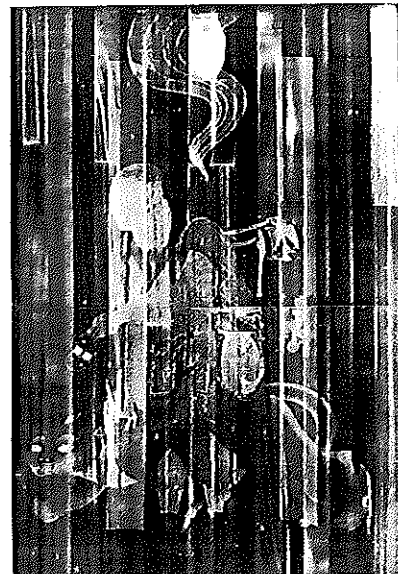
Figure 11. La Vierge de l'Annonciation, Giovanni di Paolo (1988). Avignon, Musée du Petit Palais.  
© LRMF



Figure 12. Le Pèlerin et le tigre, *peinture asiatique du XI<sup>e</sup> siècle*. (Musée national des Arts asiatiques Guimet). Emissiographie  
© LRMF, F. Drilhon

The pilgrim and the tiger, *Asian painting of the 9th century*. Emission radiography.

Figure 13. Le Pèlerin et le tigre.  
Radiographie  
© LRMF, F. Drilhon



émission est très importante, ce qui explique la nécessité de placer la face d'émulsion sensible du film radiographique vers la couche peinte, en contact le plus étroit possible, voire idéalement sous-vide. D'autre part seuls les électrons issus de la strate superficielle de la couche picturale sont enregistrés, donc le support ne participe pas à l'image obtenue (figure 14). Cela signifie que cette technique ne peut, comme la radiographie, révéler des compositions sous-jacentes.

Une autre méthode utilisant toujours le rayonnement X sera prochainement testée au laboratoire, il s'agit de la *radiographie à micro-foyer*. La taille du foyer de rayons X, mesurant quelques millimètres de côté en radiologie conventionnelle, est réduite à quelques microns de côté.

Figure 14. Principe de l'émissiographie. Cette technique relativement simple n'est encore que rarement utilisée et sa potentialité pour les diagnostics devrait être approfondie par des essais au laboratoire.

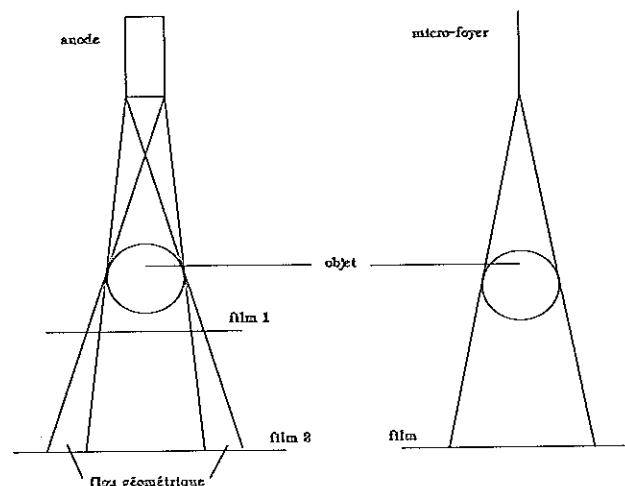
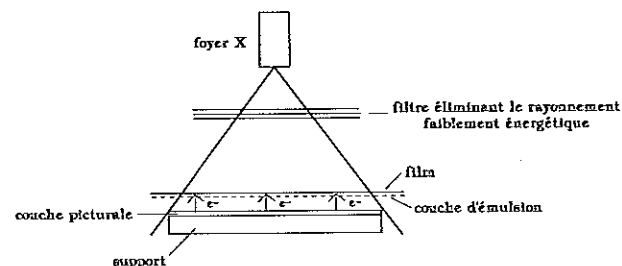
The principles of emission radiography. This relatively simple technique is still only rarely used and its potential with regard to diagnoses has to be more deeply examined through laboratory trials.

Grâce à la finesse de la source, le flou géométrique induit par la surface de l'anode devient négligeable et on peut ainsi obtenir des agrandissements de certains détails de l'image en éloignant le film de l'objet sans déperdition d'information, contrairement à ce qui se passe lorsqu'on fait un agrandissement photographique (figure 15).

D'autres techniques utilisent des rayonnements de nature différente, les faisceaux de neutrons thermiques en sont un exemple. Pour ces techniques, il faut d'emblée souligner la nécessité d'une infra-structure lourde pour la production du faisceau de neutrons, il ne s'agit donc pas là de techniques amenées à être effectuées en routine, cependant elles peuvent donner de précieux renseignements dans les cas où la radiographie est insuffisante ou peuvent la compléter.

Figure 15. Principe du micro-foyer X

The principles of micro-source radiography





L'autoradiographie est basée sur l'émission de particules  $\beta$  par les différents pigments de la couche picturale après que la peinture ait été activée par un faisceau de neutrons thermiques. En plaçant un film photographique au contact de la surface peinte au bout de temps différents après l'irradiation, on recueille les émissions de chaque constituant dans un ordre chronologique proportionnel à la durée de la vie de ces éléments. Seuls peuvent être étudiés les éléments formant des isotopes émettant des rayonnements utilisables. Ce sont le manganèse (présent dans les terres et les ocres foncés), le cuivre (présent dans la malachite, l'azurite et le vert de gris), le sodium (présent dans le lapis-lazuli, les liants, la colle), l'arsenic (présent dans le smalt), le phosphore (présent dans le noir d'os), le mercure (présent dans le vermillon), et le cobalt (présent dans le smalt). Par contre, cette méthode n'est pas performante pour les éléments organiques comme l'hydrogène, l'oxygène et le carbone, ni pour le fer et le plomb, qui ne s'activent pas sous faisceau neutronique.

L'autoradiographie permet par une seule procédure d'avoir des informations sur la méthode de travail du peintre, l'exécution d'un dessin sous-jacent au noir d'os ou d'une esquisse au lavis avec des terres ou des ocres

refermant du manganèse, et l'application de différentes couches de peinture.

La radiographie neutronique est une radiographie de transmission, analogue à la radiographie aux rayons X mais utilisant un faisceau de neutrons thermiques. Parce que les caractéristiques d'absorption des neutrons par la matière obéissent à des lois différentes de celles qui régissent l'absorption des rayons X, on obtient une cartographie différente de celle obtenue par les rayons X.

## Conclusion

La radiologie conventionnelle garde en 1995 une place prépondérante dans l'investigation scientifique des peintures, et sa richesse réside dans une interprétation sémiologique rigoureuse et systématique. Elle bénéficiera en outre très prochainement des possibilités offertes par la numérisation.

En parallèle, d'autres techniques employant les rayons X ou les rayonnements neutroniques doivent faire l'objet de protocoles afin d'en évaluer les potentialités, les limites et les meilleures applications.

## Notes

1. Faillant Dumas L. «La plus grande radiographie réalisée au Louvre» p. 110-130, in Catalogue de l'exposition *Les Noces de Cana de Véronèse. Une œuvre et sa restauration*. Paris, Louvre, 16 nov. 1992-29 mars 1993. Nous remercions la société Kodak pour son aide lors du développement des bandes.

2. L'hypothèse du rapprochement avec le tableau de Berlin avait déjà été faite par Lorne Campbell dans son article *A Double Portrait by Memling* dans *The Connoisseur*, mars 1977, pp 187-189. Le rapprochement des deux radiographies a été fait dans le cadre de la préparation du second volume du *Corpus de la peinture des Anciens Pays-Bas méridionaux*, consacré aux collections du Louvre (ouvrage auquel le laboratoire a collaboré avec le centre de recherches «Primitifs Flamands» de Bruxelles. Nous remercions le Dr Rainald Grosshans, conservateur au musée de Berlin, d'avoir eu l'amabilité de nous autoriser à publier le document et P. Lorentz de nous y avoir rendu attentifs. P. Le Chanu a également participé à la réalisation de ce dossier.

3. A. Reinbold, «Examens en laboratoire et histoire de l'art» in *Actes du colloque, Georges de La Tour ou La nuit traversée*, Vic-sur-Seille, 1993. Éditions Serpenoises. Metz, 1994.

4. L'étude du support a été faite en collaboration avec B. Chantelard. Il est à remarquer que contrairement au cas général, l'image radiographique ne révèle pas le tissage de la toile originale.

5. Analyses effectuées par M. Eveno qui n'a pas décelé de cuivre dans le reste du fond du tableau.

6. J. Habert, «Calcar au Louvre» In *Hommage à Michel Lacotte. Etudes sur la peinture du Moyen-Âge et de la Renaissance* sous la direction de P. Rosenberg, C. Scaillierez, D. Thiébaud. Milan - Paris, 1994, p. 357, 373. Nous remercions H. Kisters de nous avoir autorisé à reproduire le tableau d'après Calcar.

7. Information recueillie auprès de M. Dubus. cf. également J. Habert, op. cit.

8. La radiographie a été publiée dans le catalogue de l'exposition *Au-delà du visible*, Avignon, musée du Petit Palais, avril-octobre 1980. La première phase de la restauration a été faite par G. Mondorf sous l'autorité de S. Bergeon puis de N. Volle au Service de restauration des musées de France. Le manteau de la Vierge n'a pas encore été purifié.

9. Le manteau de l'intendant des *Noces de Cana de Véronèse* (op. cit. p. 114-115), apparu d'abord sur la radiographie, est maintenant remis au jour. De même les décors autour de l'Ange peint par Raphaël, découverts par l'image radiographique, sont désormais visibles. Ils étaient auparavant masqués, pour donner à la peinture un statut d'œuvre autonome (S. Beghin, «Un nouveau Raphaël : un ange du retable de saint Nicolas de Tolentino» in *Revue du Louvre* 2-1982, p. 99-113, etc.

10. cf. article dans le présent volume.

## Bibliographie

- Ainsworth, M.W. *Art and Autoradiography: Insights into the Genesis of Paintings by Rembrandt, Van Dyck and Vermeer*, Metropolitan Museum of Art, New York, 1982.
- Barton, J.P. *Radiology Using Neutrons, Studies in Conservation*, 1965, 10, n° 4, p. 135-140.
- Boutaine, J.L. *Etat de la radiographie X et des techniques connexes, Revue pratique de contrôle industriel*, Octobre 1991 - n° 170 bis - p 41-47.
- Bridgman, C.F. *The Radiography of Panel Paintings by Electrons Emission, Studies in Conservation*, 1958, 3, n° 4, p 175-182.
- Drilhon, F. *L'apport de l'émissiographie dans l'étude des peintures et des émaux, ICOM Committee for Conservation, 7th Triennial Meeting, Copenhagen, 10-14/9/1984. Radiography in Modern industry*, Kodak, Rochester, New-York, 1969.
- Rant, J.J., Milic, Z. *Neutron and X-Ray Radiography in the Conservation of a Roman Dagger and Sheath, 4th International Conference on Non-Destructive Testing of Work of Art* 3-8/10/1994.
- Wainwright, I.N.M., *Etudes des tableaux par les méthodes physiques et chimiques, Colloque Responsabilité partagée*, Musée des Beaux-Arts du Canada, Ottawa, 1990.

**Résumé.** Une réflexion sur l'interprétation des radiographies, liée au mode de fabrication des objets, suivie d'un rappel des contraintes de la technique radiographique, s'appuie sur quelques études radiographiques du LRMF.

**Mots-clés.** bronze, défaut, fonderie, interprétation, martelage, métal, objet archéologique, objet d'art, radiographie, rayon X

**Abstract.** Some thoughts on the interpretation of X-ray photographs in connection with techniques used for manufacturing objects, followed by a reminder of the limitations of X-ray techniques are based on various examples of the use of X-rays in the LRMF.

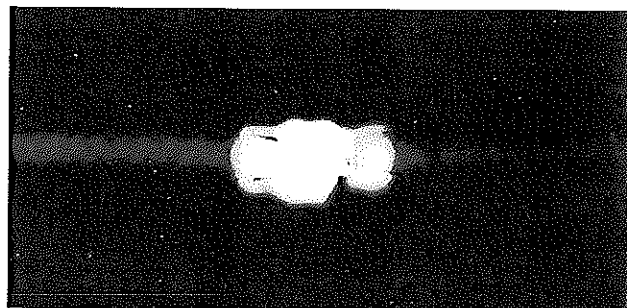
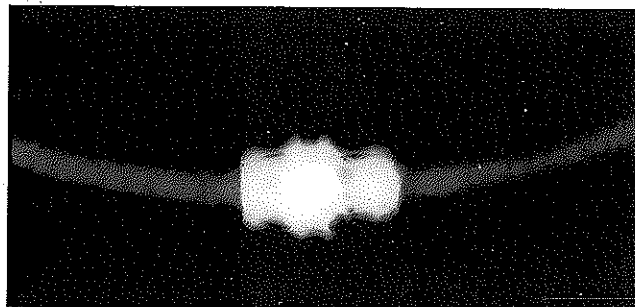
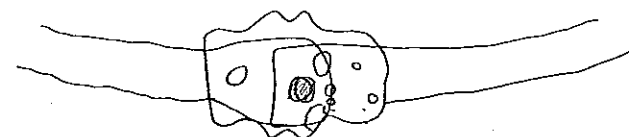


Figure 1. Torque gaulois torsadé, bronze (Musée des antiquités nationales. Inv. 39191 cfc 1)

Gallic twisted torque, bronze.

Radiographie (détail des tampons). Le problème posé au LRMF concernait les techniques de fabrication de huit torques de ce type, en particulier pour l'assemblage des tampons. On constate de nombreuses porosités de fonderie, car il s'agit ici d'un torque muni de faux tampons, les extrémités du jonc ne pouvant s'écarter pour le passage du cou. Il s'agit en fait d'une bague coulée par dessus l'assemblage par épaulement à mi-épaisseur des deux extrémités du jonc. Cet assemblage est traversé par un rivet métallique.

© LRMF, radio T. Borel

X-ray photograph (detail of the terminals). The problem the LRMF had to examine concerned manufacturing techniques for eight torques of this type, in particular regarding the assembly method used for the terminals. Numerous traces of casting porosity can be remarked, for this torque has dummy terminals; the ends of the necklace itself cannot be separated for the neck to go through. The "terminals" are in fact a ring cast over the assembly, in the half-thickness of the two ends of the necklace. This assembly is pierced by a metallic rivet.



## Pourquoi radiographier les objets ?

Les études demandées au LRMF par les conservateurs portent soit sur des objets proposés à l'acquisition par les collections publiques, soit sur l'examen de corpus d'objets de même type (figures 1 et 2), soit encore sur des objets uniques, pour des recherches relativement ponctuelles. Ces études servent souvent de support technique au travail des restaurateurs. Mais surtout la radiographie permet généralement d'interpréter le geste et la technique de l'artiste ou de l'artisan qui a créé l'œuvre d'art ou l'objet utilitaire (figure 3).

La certitude concernant le procédé de fabrication n'est toutefois pas toujours acquise. Par exemple, si l'on considère deux objets métalliques de forme proche et d'épaisseurs de paroi similaires, l'absence de traces de martelage visibles sur la radiographie peut indiquer un travail de finition parfait d'un objet martelé, tandis que l'absence de porosités et autres soufflures peut être le signe d'un objet coulé réalisé avec grand soin (figure 4). L'analyse pourra ensuite, dans certains cas, déterminer si la composition du matériau utilisé exclut totalement la fonte à cause d'un manque de coulabilité, ou interdit absolument le martelage pour des raisons de fragilité. Il ne faut pas exclure les possibilités de fabrication faisant appel à une succession d'étapes, une ébauche coulée pouvant être ensuite terminée par martelage ou par tournage (Dubos, 1989).

Un examen attentif de l'objet à l'œil nu ou sous loupe binoculaire est indispensable, et permet parfois de confirmer l'une des hypothèses probables.

Des restaurations peuvent encore être révélées par des différences de texture de la matière constituant l'objet (figure 5)

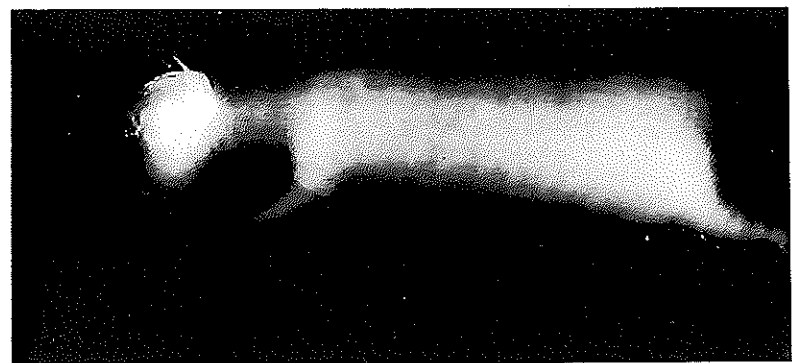
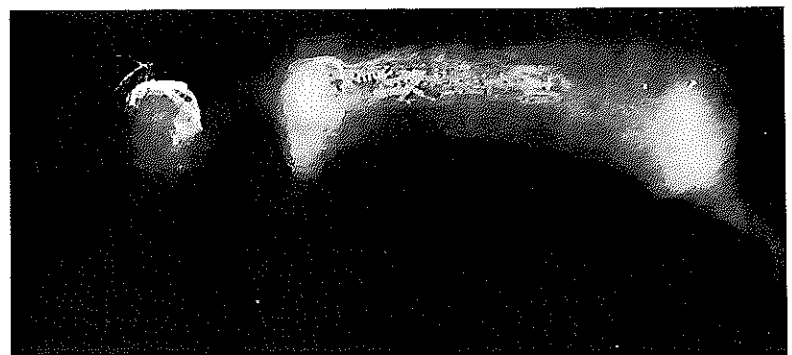
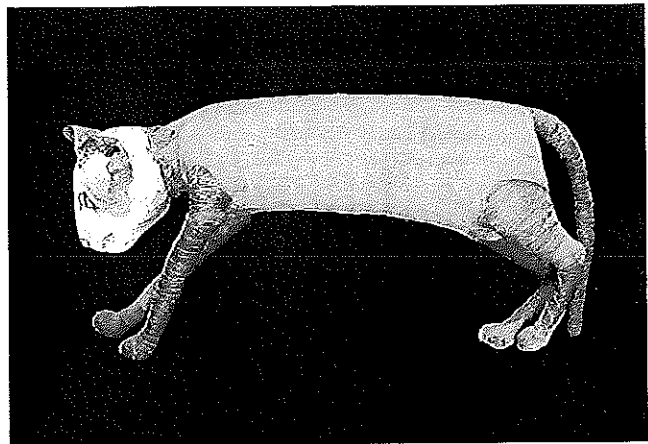
## Les limites de la radiographie

Lorsque Roentgen a découvert les rayons X grâce à l'ombre qu'ils projetaient sur un écran fluorescent puis a, aussitôt après, inventé la radiographie sur film, la curiosité générale éveillée par l'aspect invisible des êtres et des choses avait enfin trouvé un « passe-presque-partout » ! Ce « presque » est important dans la perception que l'on peut avoir des images radiographiques, car si l'on y trouve parfois ce qui n'était pas supposé pouvoir exister dans une œuvre (figures 6 et 7), il arrive tout aussi fréquemment qu'on ne puisse faire apparaître sur le cliché des particularités de l'objet, alors qu'elles sont directement visibles à l'intérieur de l'objet (figure 8). Cette « invisibilité » peut être due à une grande différence d'épaisseur relative du « défaut »<sup>1</sup> par rapport à l'objet : même un vide (fente, bulle...) de plus de 1 % de l'épaisseur totale d'un matériau pourra, dans certains cas, ne pas être perceptible en radiographie ; ou bien encore l'invisibilité peut provenir d'une trop faible différence de composition

Figure 2. Momies de chat (département des Antiquités égyptiennes, Musée du Louvre, Inv. E 2815/N 2913 A, E 2814/N 2913 B) Il existe au Louvre de nombreuses momies égyptiennes d'animaux, certaines espèces ayant été adorées par les Égyptiens au point de leur dédier des nécropoles recueillant des milliers de momies (Weingartner, 1986). Les deux momies présentées ici datent de la Basse-époque (664-332 avant J.C.) qui est encore une période importante pour ces rites (en haut). L'existence de fausses momies ne contenant pas de cadavre indique toutefois un déclin de ces pratiques (en bas).  
© LRMF, radio F. Drilhon

Mummies of cats. The Louvre collections include many Egyptian animal mummies. Some species were adored by the Egyptians to the extent that cemeteries were dedicated to them, including thousands of mummies (Weingartner, 1986). Both mummies presented here date from the Late Period (664-332 B.C.), when such rites still had a certain importance (above). The existence of fake mummies, which do not contain bodies, does however indicate a decline in these practices (below).

147



148

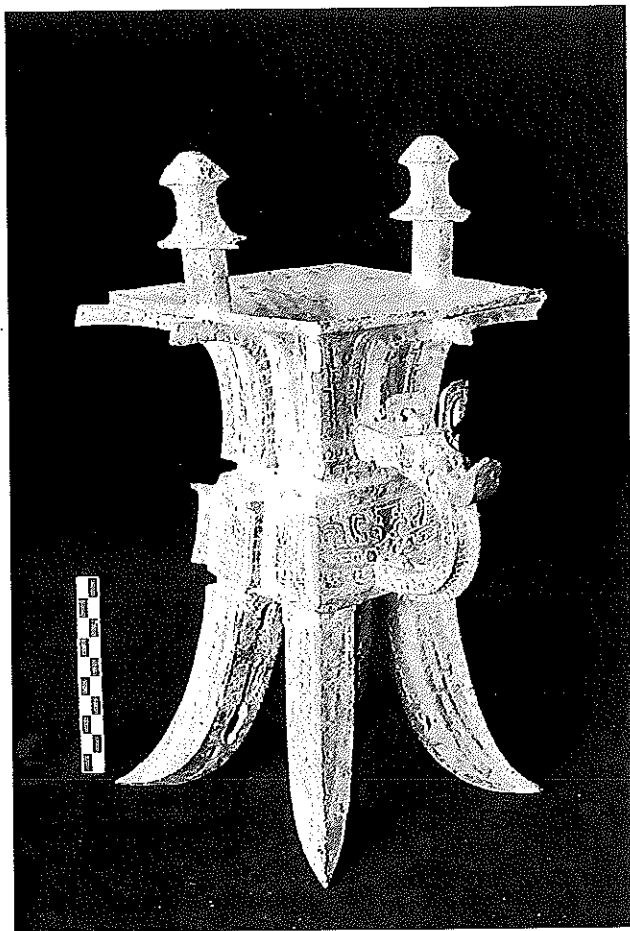


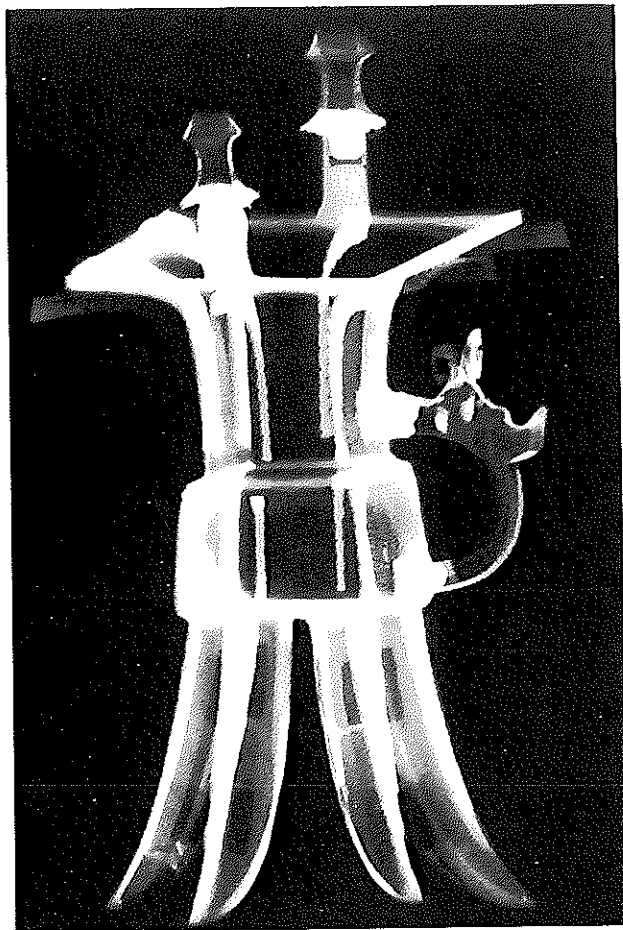
Figure 3. Vase Fang-jia, bronze, XIVe-XIII<sup>e</sup> siècle avant J.C. (Musée national des antiquités asiatiques Guimet)

**Lumière directe :** cette étude d'un unique objet, un vase chinois rituel en bronze, a été facilitée par l'existence d'ouvrages consacrés aux vases rituels chinois, dans lesquels ils sont étudiés de façon exhaustive, autant par analyse métallographique que par la radiographie. Le remarquable processus de leur fabrication fait appel, non à la fonte à cire-perdue, mais à une succession complexe de moules à pièces avec tirage d'épaisseur (Chase, 1991).

© LRMF, photo G. Koatz

**Radiographie d'ensemble :** l'épaisseur très régulière des parois indique la grande qualité de la coulée du métal qui a seulement emprisonné quelques minuscules bulles de gaz. L'écartement du moule et du noyau est assuré par les excroissances de terre visibles dans les trous allongés du métal des pieds (il était capital d'analyser par thermoluminescence le noyau en argile contenu dans les pieds, préalablement à la radiographie, de fortes expositions aux rayons X troublant la datation ultérieure en vidant les pièges électroniques qui révèlent la date de la dernière cuisson). Un noyau en argile existe également derrière l'anse rapportée. Les appendices fungiformes creux avec noyau, fabriqués à part, ont été rapportés par soudure sur les tiges verticales. Les extrémités des noyaux contenus dans les tiges et dans les éléments rapportés, ont été creusées pour admettre le métal en fusion destiné à les joindre. Les pieds et l'anse ont été fabriqués auparavant par coulée, puis rapportés dans le moule du vase lui-même. Les excroissances de métal que l'on peut voir aux extrémités de l'anse correspondent à la suppression partielle du noyau, afin que le métal en fusion assure solidement la fixation de l'anse sur le corps du vase.

© LRMF, radio T. Borel



Fang-jia vase, bronze, 14th-13th century B.C.

**Normal light:** the examination of this unique object, a Chinese ritual bronze vase, was facilitated by the existence of publications devoted to Chinese ritual vases in which they are studied extensively, both by metallographic analysis and X-ray photography. Their remarkable manufacturing process calls not on the lost-wax process, but on a complex sequence of piece-moulds (Chase, 1991)

**Overall X-ray photograph:** the very regular thickness of the metal indicates the high quality of the casting which has only imprisoned some tiny gas bubbles. The gap between the mould and the core was ensured by the clay protuberances visible in the long holes in the metal of the feet (it was very important to carry out the thermoluminescence analysis of the clay core contained in the feet prior to X-ray examination, since high levels of exposure to X-rays perturb later dating by releasing the trapped electrons which reveal when the object was last heated). A clay core also exists behind the handle, which was added to the main section. The hollow fungiform appendices, containing a core, were made separately and soldered to the vertical rods. The ends of the cores contained in the rods and the added elements were hollowed out to admit the molten metal which was to join them together. The feet and the handle were made previously by casting, then added in the mould of the vase itself. The metal protuberances which can be seen in the ends of the handle correspond to the partial removal of the core in order to enable the molten metal to fix the handle firmly onto the body of the vase.

Photo et radiographie du fond : l'inscription en creux dans le fond, à l'intérieur du vase, était difficilement lisible sous une couche de corrosion; la radiographie a permis une lecture parfaite du texte. La lisibilité des caractères donne par endroit une image plus claire, indice d'une épaisseur légèrement supérieure par rapport à la matière environnante. Cela indique une inscription réalisée dans un matériau souple (l'argile du moule, sans doute, ou bien un modèle intermédiaire en terre, qui correspondrait mieux à la création d'une inscription en creux). Pour assurer une épaisseur régulière des parois en métal, des supports du moule ont été disposés dans le fond : ces supports donnent une image radio plus sombre, ce qui pourrait indiquer une épaisseur de matière plus faible (ce qui n'est pas le cas ici), ou bien une matière moins radio-opaque, ce que suggère la littérature : des supports de noyau analysés (Gettens, 1969) se sont avérés être en cuivre pur, donc légèrement plus transparent aux rayons X qu'un alliage contenant du zinc, de l'étain, à fortiori du plomb. Les chapelets de bulles tout autour des supports sont causés par le refroidissement plus rapide dû à la présence dans le métal en fusion de ce corps étranger d'une température plus basse.

© LRMF, photo G. Koatz

Photograph and X-ray of the bottom: the sunk inscription on the inside bottom of the vase was difficult to decipher under a layer of corrosion; the X-ray photograph enabled the text to be read perfectly. The edges of the characters give a lighter image in some places, a sign of slightly greater thickness compared with the surrounding metal. This indicates that the inscription was made in some pliant material (the clay of the mould, probably, or an intermediate clay model, which would correspond better to the creation of a sunk inscription). In order to ensure regular thickness for the metal, mould supports were placed in the bottom: these supports give a darker image on the X-ray photograph, which could indicate a lesser thickness of the metal (which is not the case here), or a less radiopaque material, which is suggested by literary sources: core supports which have been analysed (Gettens, 1969), have proved to be in pure copper, thus slightly more transparent to X-rays than an alloy containing zinc, tin or, a fortiori, lead. The streams of bubbles all around the supports are caused by the more rapid cooling there of the molten metal due to the presence of this foreign body with a lower temperature.



chimique (le contraste radiographique entre deux éléments est d'autant plus fort qu'une grande différence de numéro atomique les sépare).

A l'inverse, en raison d'une trop grande disparité des matériaux en présence, une peinture sur cuivre (ou même un émail peint, un émail champlevé, ou une fresque) peut ne pas donner d'image lisible de la couche picturale en radiographie conventionnelle si les pigments utilisés ne contiennent pas d'éléments lourds. L'épaisseur du support étant de beaucoup supérieure à celle de la peinture, la tension élevée nécessaire pour traverser le cuivre rend négligeable le contraste de l'image de la couche picturale beaucoup plus mince; dans ce cas, on peut heureusement s'affranchir de l'obstacle que représente le support de l'image en recourant à l'émissiographie (encore appelée électrographie par émission) : il s'agit d'impressionner le film grâce aux électrons réémis par les éléments lourds (de nombre atomique élevé) présents à la surface de l'objet en réponse à des rayons X de tension élevée (figure 9).

En dépit de l'amélioration des performances des sources de rayonnement et des films radiographiques, les principes de base de la radiographie ont gardé toute leur

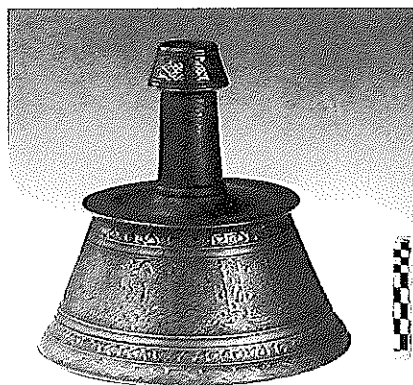
importance (on pourra comparer des ouvrages successifs sur la radiographie : Crowther, 1948, Kodak, 1970, Bou-taine, 1991).

Ainsi, on ne peut faire abstraction des contraintes qu'engendre le mode de formation des images par projection conique à partir d'une source de rayonnement non ponctuelle et divergente. La pénombre due aux bords de la source, qui projettent chacun une image du même point de l'objet sur des emplacements distincts du film, cause une altération importante de la netteté de l'image. Seule l'utilisation d'une source à microfoyer évite ces limitations, autorisant en outre un agrandissement direct des plus fins détails de l'objet en rapprochant celui-ci de la source, les autres valeurs restant inchangées. Ce flou géométrique, qui existe avec les sources habituelles de rayons X, peut être atténué le plus souvent par éloignement de la source de rayonnement, dont la dimension est ainsi fictivement diminuée, au détriment toutefois des durées d'exposition qui augmentent en fonction du carré de la distance séparant la source du film.

Beaucoup plus que la radiographie des peintures, dans laquelle les conditions opératoires sont assez peu contraignantes (le film est proche de la peinture, l'image

Figure 4. Deux chandeliers (département des antiquités orientales, Musée du Louvre)

Two candlesticks.

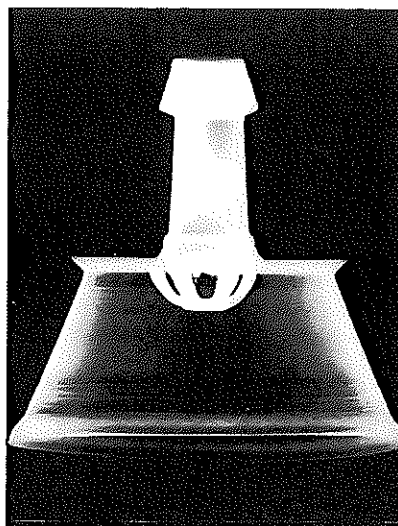


150

A. Chandelier égyptien massif (Inv. AA 101)

Lumière directe : ce chandelier égyptien massif (inv. AA 101), fait au Caire en 1307, présente des traces de tournage à l'intérieur de la base, autour de la grappe de métal située au dessous de la partie cylindrique. L'épaisseur de paroi est un peu plus importante ici que dans l'autre chandelier, ce qui lui donne un poids légèrement supérieur.

© LRMF, photo D. Bagault



A. Solid Egyptian candlestick (Inv. AA 101)

Normal light: this solid Egyptian candlestick, made in Cairo in 1307, presents traces of lathe-work inside its base, around the metal cluster situated below the cylindrical section. The metal is a little thicker here than in the other candlestick, which means it is slightly heavier.

Radio : la radiographie ne révèle ni assemblage, ni soudure visible; la seule présence de trois petits défauts, en l'absence de bulles, ne permet pas d'affirmer qu'il s'agit d'une fabrication par fonderie. Seuls l'épaisseur du métal et l'aspect radiographique dévoilent un objet coulé.  
© LRMF, radio T. Borel

X-ray photograph: the X-ray reveals no assembly nor visible soldering; it cannot be stated on the basis of the mere presence of three small flaws, without any bubbles, that it was made by casting. Only the thickness of the metal and the aspect of the X-ray photograph reveal a cast object.

B. Chandelier d'Égypte ou de Syrie, datant du XIV<sup>e</sup> siècle (Inv. 5005).

B. Egyptian or Syrian candlestick, dating from the 14th century (Inv. 5005)

Lumière directe : en apparence identique au précédent, ce chandelier est réalisé à partir de feuilles martelées pour leur donner leur forme puis soudées entre elles.  
© LRMF, photo D. Bagault

Normal light: apparently identical to the preceding candlestick, this one was made from sheets of metal hammered to shape then soldered together.

Radio : l'aspect radiographique très différent de ce chandelier par rapport au précédent provient de l'épaisseur plus faible de métal qui produit une diffusion moindre. La radiographie montre que cet objet est constitué de deux éléments soudés l'un à l'autre : la base tronconique, dont le décor d'incrustations apparaît plus opaque aux rayons X, est obtenue par martelage d'un flan<sup>4</sup> (des zones diffuses sur l'image radiographique montrent de légères variations d'épaisseur du métal). Le flan est percé en son centre et l'élément suivant y est soudé. La partie supérieure, de forme cylindrique, surmontée d'un renflement, est également obtenue par martelage d'un flan. Une matière non analysée, assez opaque et

d'aspect cotonneux, est contenue dans la bobèche.

© LRMF, radio T. Borel

X-ray photograph: The very different aspect of the X-ray photograph of this candlestick compared with the preceding one is due to the less thick metal, which diffuses less. The X-ray photograph shows that this object is made of two elements soldered together: the truncated cone-shaped base, whose inlaid decoration seems more opaque to X-rays, was obtained by hammering a flank (a stamped metal sheet, generally a disc, which is given

the object's final shape by hammering and finishing operations. Diffused zones on the X-ray image show slight variations in the thickness of the metal). The centre of the flank is pierced and the following element soldered to it. The upper, cylindrical section was also obtained by hammering a flank. The socket contains a fairly opaque substance with a cottony aspect, which has not been analysed.

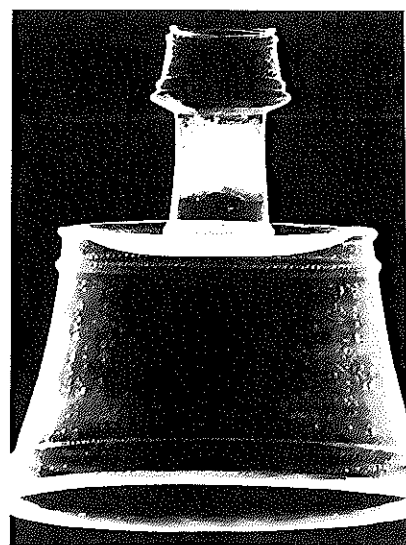




Figure 5. Casque provenant vraisemblablement du Turkestan, XIV<sup>e</sup> ou XV<sup>e</sup> siècle (département des antiquités orientales, Musée du Louvre, Inv. K 3443).

Helmet, probably from Turkestan, 14th or 15th century.

Lumière directe : des réparations, dissimulées sous la « patine », sont très peu visibles à l'œil nu.

© LRMF, photo D. Bagault

Normal light: repairs, hidden under the "patina", are barely visible to the naked eye.

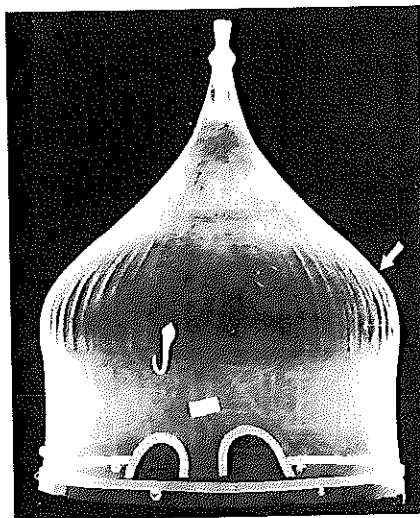
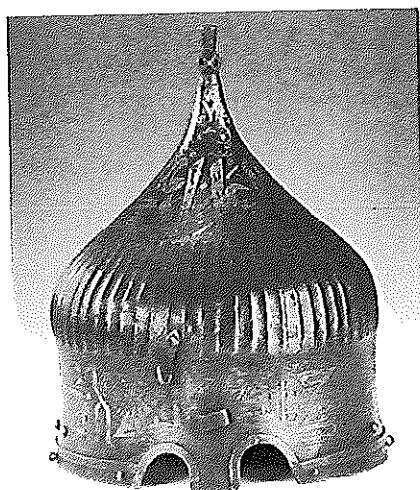
Radiographie de face : la grande réparation sur le côté sera plus visible sur la radiographie suivante. On distingue sur cette vue deux petites pièces soudées qui se situent à l'arrière du casque.

X-ray photograph taken from the front: the large repair on the side is more visible on the following X-ray. On this image, two small soldered pieces found at the back of the helmet are visible.

Radiographie de dessus : l'aspect du métal de la grande réparation, homogène et de texture unie, est très différent du métal adjacent, où les traces de martelage de la mise en forme sont très visibles.

© LRMF, radio T. Borel

X-ray photograph taken from above: the homogeneous and smooth textured aspect of the metal used for the large repair is very different from the adjacent metal, where traces of the hammering used to shape the object are clearly visible.



151

reste quasiment de la taille réelle du tableau, les tensions sont relativement basses), la radiographie d'objets en volume impose ses exigences dont il faut tenir compte (Van de Voorde, 1978) : à la déformation des parties de l'objet les plus éloignées de l'axe du rayonnement s'ajoute un agrandissement relatif des plans de l'objet les plus proches de la source des rayons X.

Il faut encore considérer les diffusions multiples que subit le rayonnement lorsqu'il traverse l'objet, se réfléchit dans son environnement immédiat, ou même interagit avec les molécules d'air séparant la source de rayonnement de l'objet et du film. On combat en partie ces diffusions par l'emploi d'écrans et de diaphragmes en plomb, qui limitent l'étendue du faisceau à la zone radiographiée et absorbent les rayonnements diffusés. Ces diffusions ont des propriétés variables (effet photoélectrique, diffusion Compton,...), qui sont fonction des tensions utilisées (on passe d'un type de diffusion à l'autre en augmentant l'énergie du rayonnement), et des matériaux traversés. On observe que le rayonnement diffusé augmente proportionnellement à l'épaisseur de la matière.

L'orientation du « défaut » influe également sur sa visibilité : ainsi on verra une fente située dans l'axe des rayons, mais elle ne sera pas détectée si elle est parallèle au film. Pour éviter cela, nous effectuons des radiographies systématiques suivant deux ou trois orientations

orthogonales (vues de face, de profil, de dessus), ce qui permet également la perception des positions relatives dans l'espace des éléments constituant l'objet.

De son côté, la radioscopie télévisée, en permettant la visualisation directe avant la réalisation des clichés, offre le choix de la meilleure orientation de l'objet posé sur un manipulateur commandé depuis le pupitre de commande.

## Evolution de la radiographie et des techniques comparables<sup>2</sup>

L'association initiale de la photographie et des rayons X a ensuite connu de nombreux développements, les uns à la portée d'un laboratoire de musée ou de petites unités spécialisées dans l'étude des œuvres d'art (par exemple la radioscopie télévisée, l'émissiographie, la stéréo-radiographie), alors que d'autres nécessitent des équipements lourds ou d'usage délicat (scanner, gammagraphie, neutronographie), pour lesquels il est nécessaire de susciter des coopérations extérieures avec des centres hospitaliers ou de gros centres de recherche, ou d'avoir recours à une société de services.

On peut citer parmi les coopérations les études menées au CEA (Commissariat à l'énergie atomique), par

Figure 6. Vierge à l'Enfant, xv<sup>e</sup> siècle (Musée national de la Renaissance, Château d'Ecouen. Inv. DS 534)

Vierge à l'Enfant, 15th century.



Radiographie : la restauration d'une cassure a transformé un bas-relief italien en stuc, en véritable «boîte à outils» avec une râpe, un compas, un crochet de toiture. On peut comparer la restauration avec celle de la Vierge à l'Enfant de l'église Saint-Gervais.

© LRMF, radio F. Drilhon

X-ray photograph: the restoration of a fracture has transformed an Italian stucco bas-relief into a veritable "tool box", containing a rasp, compasses and a roof hook. The restoration can be compared with that of the Vierge à l'Enfant from the church of Saint-Gervais.

Figure 7. Vierge à l'Enfant en pierre, xiv<sup>e</sup> siècle (Paris, provenant de l'église Saint Gervais)

Vierge à l'Enfant, stone, 14th century (Paris, from the church of Saint Gervais).

Détail de la radiographie du buste : cette restauration d'une statue (goujons métalliques cylindriques lisses ou barbelés, tiges légèrement courbées) présente un aspect habituel. On sait que des parties manquantes ont été refaites en pierre en 1866 (Enfant, tête et main gauche de la Vierge). La radiographie confirme l'ampleur des restaurations anciennes, dont les limites sont clairement apparentes.

© LRMF, radio T. Borel

Detail of the X-ray photograph of the bust: this restoration of a statue (cylindrical smooth or barbed metal gudgeons with slightly curved pins) has a normal aspect. We know that the missing parts were recarved in stone in 1866 (the Christchild, the Virgin's head and left hand). The X-ray photograph confirms the importance of the ancient restoration work, which is clearly visible.



Figure 8. Saint Jean, bois polychrome. Détail du montage de la jambe (Musée national du moyen-âge, Paris, Thermes de Cluny. Inv. CL 3269)

Saint Jean, polychrome wood.

tomodensitométrie (encore appelée scanner) sur des bulles à *calculi* mésopotamiennes (Drilhon F., Laval-Jeantet M., Tassery-Lahmi A., 1986) (figure 10), ou encore, toujours par scanner, à l'Hôpital Saint-Louis, sur un buste en cire du Musée Carnavalet (œuvre n° 122, in *Sculptures en cire de l'ancienne Égypte à l'art abstrait*, Paris, Réunion des Musées Nationaux, 1987).

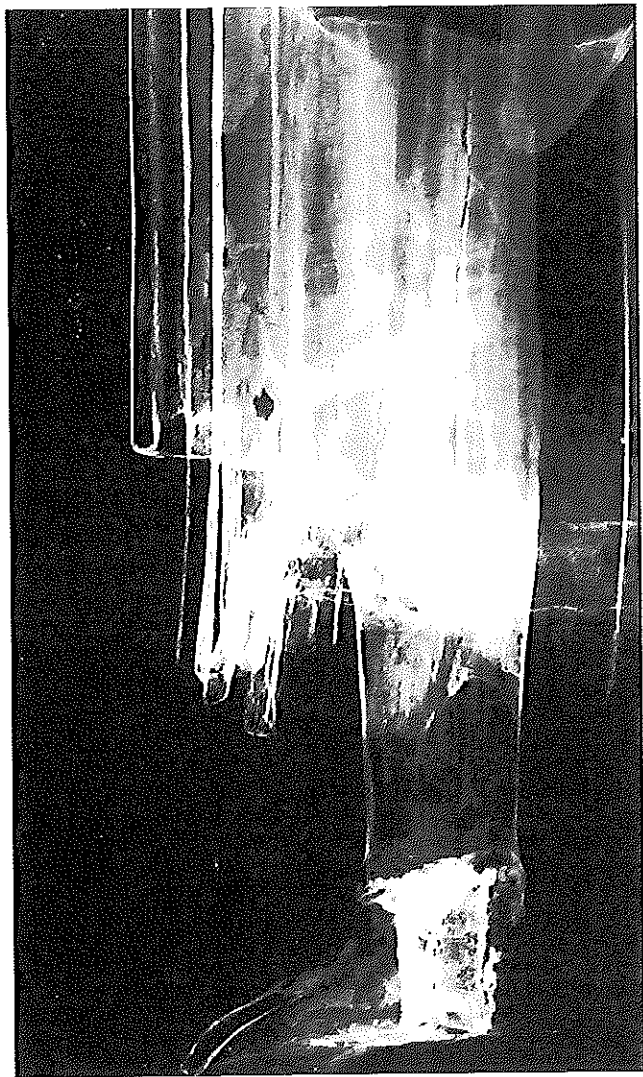
Des techniques employant d'autres sources de rayonnement (rayons gamma, neutrons) permettent également d'obtenir des images de l'intérieur des objets. Les rayons gamma, fournis par une petite source radioactive, autorisent l'étude de fortes épaisseurs de matière au moyen d'un matériel aisément mobile, au prix de précautions d'utilisation et de stockage plus contraignantes que pour les générateurs de rayons X. Les gammagraphies sont tout à fait comparables aux radiographies effectuées avec des énergies similaires, l'interaction se faisant au niveau du cortège électronique des atomes. L'opacité de la matière est sensiblement proportionnelle au numéro

atomique de l'élément considéré. Le Laboratoire a pu recourir à cette technique pour l'étude de la statue en plâtre de *Jean Bart* par David d'Angers (Drilhon, 1987) et des bronzes de plein air de Rodin (*le Penseur*, *les Bourgeois de Calais...*) en 1989 (figure 11).

Par contre, les neutrons, interagissant au niveau du noyau des atomes, apportent par la neutronographie des renseignements très différents de ceux donnés par les rayons X, l'opacité apparente étant distribuée de façon discontinue d'un élément au suivant (le Laboratoire n'a pas encore eu l'opportunité d'appliquer cette technique en raison de sa complexité de mise en œuvre).

Jusqu'à présent, au LRMF, les radiographies d'objets étaient effectuées dans une petite salle située en sous-sol du pavillon de Flore, isolée du reste du Laboratoire pour l'utilisation du puissant générateur de 420 kilovolts (appareil permettant l'étude d'objets épais, par exemple 10 ou 15 cm d'acier), mais les dimensions des objets

153



#### Saint-Jean.

Lumière directe (détail) : une toile est directement visible à l'intérieur de la statue. Le corps monobloc est évidé depuis le dessous des épaules jusqu'en bas. La partie antérieure de la robe présente, à l'intérieur, un épaississement destiné à maintenir les jambes. La jambe gauche a disparu, mais la jambe droite y est encore fixée par une grande cheville et par deux bandes de toile collées qui ne laissent pas d'image radiographique.

© LRMF, photo D. Bagault

Normal light (detail): a piece of cloth is visible inside the statue. The body, made from a single block of wood, has been hollowed out from under the shoulders down to the lower edge. The inside front part of the robe presents a thickened section intended to hold the legs in position. The left leg has disappeared but the right leg is still fixed by a large dowel-pin and two strips of glued cloth which do not show up on the X-ray photographs.

Radiographie de la zone correspondante : la toile n'est pas perceptible sur la radiographie, en raison de l'épaisseur de bois traversée par les rayons X. Par contre, l'assemblage du pied est réalisé au moyen d'un tenon cylindrique entouré d'une toile, rendue apparente par la charge dense (plâtre?) l'imprégnant, qui devait jouer le rôle d'adhésif.

© LRMF, radio T. Borel

X-ray photograph of the corresponding section: the cloth does not show up on the X-ray photograph, because of the thickness of the wood through which the X-rays have to pass. On the other hand, the assembly of the foot is revealed: a cylindrical tenon wrapped in a piece of cloth, visible because of the dense substance (plaster?) impregnating it, which must have played the role of an adhesive.

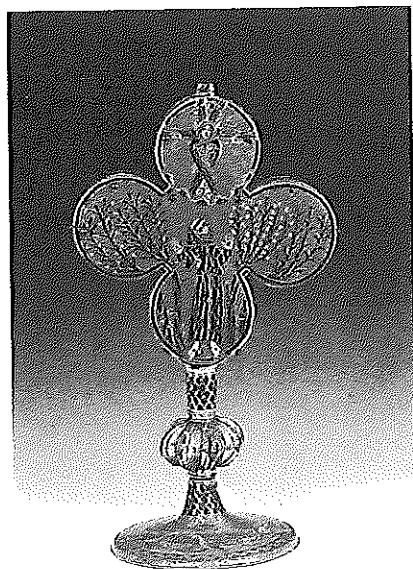


Figure 9. Reliquaire : Saint François d'Assise, Limoges, XIII<sup>e</sup> siècle (département des objets d'art, Musée du Louvre. Inv.OA 4083)

Saint François d'Assise, reliquary, Limoges, 13th century.

Lumière directe : la face du reliquaire qui nous intéresse ici est une plaque de cuivre champlevée émaillée, figurant le saint, fixée sur une âme de bois.

© LRMF, photo D. Bagault

Normal light: the front of the reliquary is a copper plaque with champlevé enamel depicting the saint, fixed on a wooden core.

Emissiographie : en raison de la faible longueur de parcours des électrons dans l'air, l'émissiographie nécessite un contact parfait entre la surface de l'objet et le film, ce qui a contraint, préalablement, à percer le film à l'emplacement des rivets saillants. En dépit de cette précaution, il subsiste sur l'image quelques zones floues dues à un contact insuffisant. L'image obtenue, sensiblement le négatif de la radiographie normale, indique en sombre la position des métaux lourds (or, plomb, argent...), comme dans le fond doré autour du saint, mais surtout montre la répartition en zones homogènes des différents éléments chimiques de la couche d'émail. On peut constater les similitudes de niveau de gris entre les mains, les pieds, et le visage du saint. Cette observation guide utilement le choix des emplacements analysés.

© LRMF, radio, émissiographie T. Borel

Emission radiograph: Because of the short distance electrons can travel in the air, this technique calls for a perfect contact between the surface of the object and the film, which meant the film first had to be pierced where rivets project from the surface. In spite of this precaution a few blurred zones remain on the image, due to insufficient contact. In the image obtained, which is more or less the negative of a normal X-ray photograph, the heavy metals (gold, lead, silver,...) show up as dark zones, as in the gilt background around the saint. Above all, however, it shows the distribution in homogeneous zones of the different chemical elements of the layer of enamel. Similarities can be noted in the greys of the saint's hands, feet and face. This observation was useful in helping to choose the spots to be analysed.

Radiographie : une seconde plaque de métal, disposée sur l'autre face du bois, gêne la lecture de l'image. La radiographie montre les perforations de cette seconde plaque, les clous qui maintiennent les feuilles métalliques des côtés, ainsi que les réceptacles des reliques creusés dans le bois.

X-ray photograph: A second metal plaque, placed on the other side of the wood, interferes with the interpretation of the image. The X-ray photograph shows the perforations of this second plaque, the nails which hold the metallic sheets on the sides, as well as the repositories for the relics carved out of the wood.

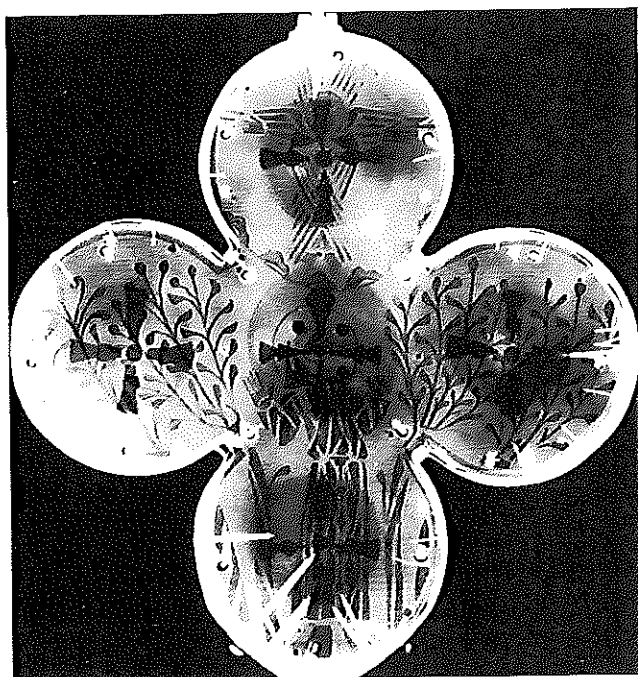




Figure 10. Bulle-enveloppe mésopotamienne, argile, IV<sup>e</sup> millénaire (département des antiquités orientales, Musée du Louvre, Inv. SB 1929)

Mesopotamian bulla, 4th millennium B.C.

Lumière directe : on souhaitait vérifier si la forme et le nombre des « calculi » (éléments géométriques en terre contenus dans les bulles) correspondaient aux entailles faites à la surface des bulles et visant peut-être à indiquer la quantité et la qualité de marchandises transportées.

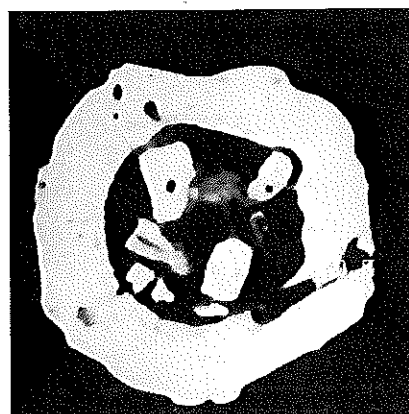
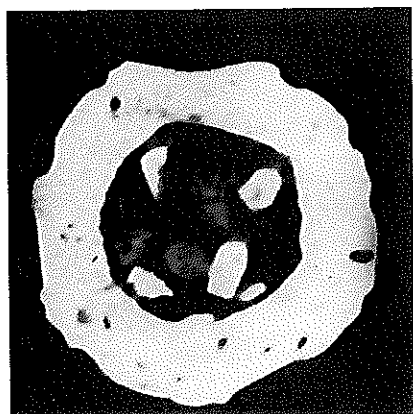
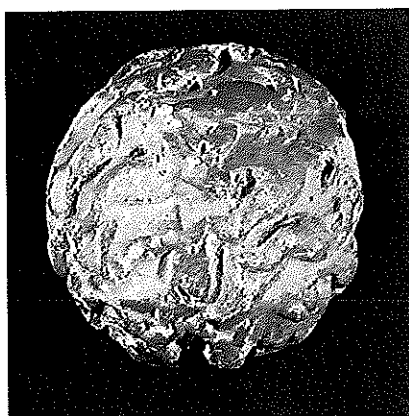
Normal light: the intention was to verify if the shape and number of "calculi" (geometric clay tokens contained in such bullae) corresponded to the marks made on the surface of the bullae and which may have indicated the quantity and type of the goods transported.

Radiographie : à cause de la superposition des plans de l'objet sur une seule image, la radio rendait cette visualisation difficile pour certaines des bulles, même avec des clichés réalisés suivant des orientations perpendiculaires.

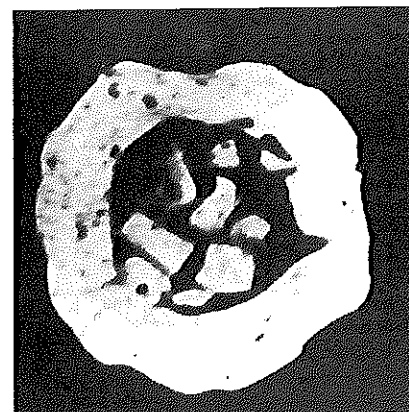
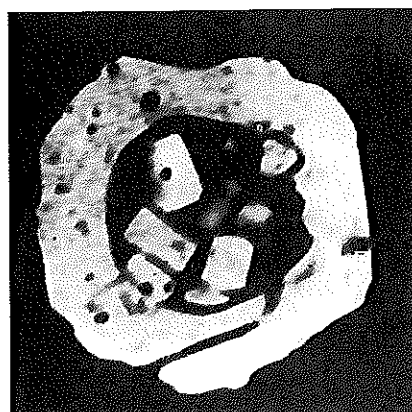
© LRMF, radio F. Drilhon

X-ray photograph: because of the superposition of the different planes of the object on a single image, it was difficult to obtain satisfactory photographs for certain of the bullae, even when taken from above.

Scanner (quatre images, même orientation, plans successifs) : la tomodesitométrie, son nom l'indique, mesure les densités des points composant l'image de chaque plan de l'objet. Ces densités, fonction de l'absorption massique ( $\mu$ ) caractéristique des éléments chimiques traversés, permettent d'identifier les matériaux présents dans un objet. On a pu voir l'exacte position des bouchons de terre fermant les bulles, ainsi que des trous d'évent. La succession de coupes montrées ici autorise la détermination de la forme de chaque calculus individuellement, ainsi que le comptage des éléments contenus. La corrélation cherchée avec les inscriptions des bulles n'a malheureusement pas pu être établie formellement (Drilhon, Laval-Jeantet, Tassery-Lahmi, 1986).



Scanner (four images, same orientation, successive planes): tomodesitometry, as its name indicates, measures the density of the points composing the image of each plane of the object. These densities, dependent upon the characteristic absorption/mass ratio ( $\mu$ ) of the chemical elements through which the radiation passes, enable the substances present in an object to be identified. The exact position of the clay plugs closing the bullae could be seen, as well as the vent-holes. The sequence of cross-sections shown here enables the form of each calculus to be determined individually and the number of tokens contained in the bullac to be counted. Unfortunately no formal correlation could be established with the inscriptions on the bullae.



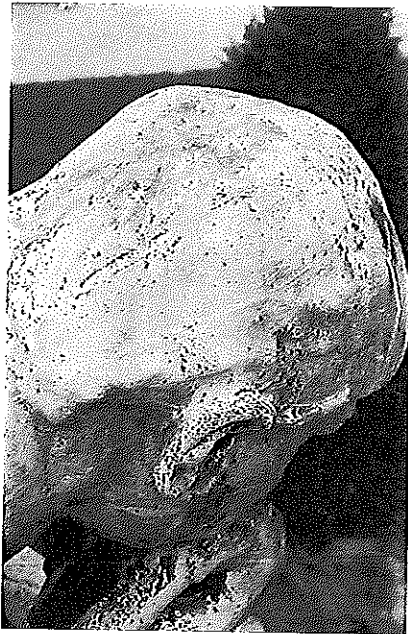


Figure 11. Rodin, *Le Penseur* (Paris, Musée Rodin et Meudon, atelier de Rodin)

Rodin, *Le Penseur* (Paris, Musée Rodin and Meudon, Rodin's studio)

Lumière directe : A. Tête de dos (Paris), B. Tête de face (Meudon). Une étude sur bronzes d'extérieur de Rodin a été menée 1989 afin de constater leur état de conservation, l'étendue de la corrosion, ainsi que les techniques de fabrication. Parmi bronzes, figurent les deux *Penseurs*, l'un Musée Rodin de Paris, le second surmontant la tombe du sculpteur au Musée Rodin à Meudon.

© LRMF, photo T. Borel

Normal light: A. Head, from the back (Paris), B. Head, from the front (Meudon). Rodin's outdoor bronzes were examined in 1989 in order to verify their state of conservation, the degree of corrosion and techniques used to make them. Among the bronzes were the two *Penseurs*, one from Musée Rodin in Paris, the other from the sculptor's tomb at the Musée Rodin in Meudon.

Radiographie : A. *Penseur* de Paris, profil : les parois sont plus minces que pour l'autre statue, irrégulières, avec des restes de noyau dans la tête; plusieurs armatures subsistent dans la tête et la main. Quelques porosités sont visibles dans la tête. La présence de restes de noyau et les parois irrégulières constituent des zones de fragilité à prendre en compte dans la conservation. B. *Penseur* de Meudon, profil : les parois sont assez épaisses, plutôt régulières, quelques armatures sont visibles dans la tête et dans la main. De nombreux défauts de coulée existent dans la tête. Gammagraphie société SGS Qualitest, interprétation F. Drilhon, LRMF

X-ray photograph: A. The Paris *Penseur*, profile: the metal is thinner than for the other statue and the thickness irregular, there are remains of the core in the head; several pieces of armature remain in the head and the hand. Some porosity is visible in the head. The presence of remains of the core and the irregular thickness constitute fragile zones which must be taken into account with regard to conservation. B. The Meudon *Penseur*, profile. The metal is fairly thick, quite regular, a few pieces of armature are visible in the head and the hand. Numerous casting defects are present in the head.



radiographiables étaient limitées par un cheminement étroit et délicat. Les nouvelles installations du LRMF sous les Jardins du Carrousel permettent désormais un accès direct des œuvres depuis la voie de distribution desservant l'ensemble du Louvre. De larges ouvertures sur des salles de radiographie spacieuses laisseront désormais entrer des œuvres qu'il aurait été indispensable d'aller radiographier dans leurs salles d'exposition ou dans les réserves, avec les contraintes de radioprotection que cela représente. La radioscopie télévisée, jusqu'alors gênée par l'encombrement des objets et du matériel, sera également pleinement opérationnelle, associée désormais à un système de traitement d'image.

## Conclusion

Contrairement à ce que supposent des gens peu avertis, la radiographie<sup>3</sup> ne fournit pas de datation par elle-même, mais elle renseigne les spécialistes des œuvres étudiées (conservateurs, historiens d'art, restaurateurs...) sur les éléments dont se composent les objets, et souvent sur leur mode de fabrication. Si elle n'apporte pas toujours de réponse aux questions posées, elle donne toujours, malgré tout, une indication sur l'état de conservation et la constitution interne des objets, constituant ainsi une étape préliminaire à des analyses de matériaux et à des recherches plus approfondies.

## Notes

1. Défaut est le terme en usage dans l'industrie, pour qui la détection de défauts dans un objet manufacturé peut entraîner son rejet, alors que nous le considérons dans le sens de particularité, de point remarquable ou de singularité de l'objet, ce qui nous fournit un indice sur l'histoire de la création de l'objet.

2. On trouvera des bases complètes pour l'approche de la radiographie d'objets d'art dans la bibliographie (Drilhon, 1985, Fountoulakis, sans date, Gilardoni, 1977, Graham, 1985, Sicardy, 1986).

3. Ainsi que la majorité des techniques d'examen ou d'analyse.

4. Feuille de métal découpée (en général un disque) à laquelle le martelage et les opérations de finition donnent la forme définitive de l'objet.

## Bibliographie

- Bourgoin C., Barker S., De Perricot M.C., *Les caractéristiques des techniques de fonderie, leur correspondance sur les images radiographiques*. Monographie de l'Ecole du Louvre, LRMF, 1989-1990
- Boutaine J.-L., Etat de la radiographie et des techniques connexes, in *Revue pratique de contrôle industriel*, n° 170 bis, octobre 1991
- Cazaux J., Despujols J., Tomographie à rayons X, *Traité d'analyse chimique et caractérisation* (P950), *Techniques de l'ingénieur*
- Chase W.T., *Ancient Chinese Bronze Art, Casting the Precious Sacred Vessel*. China House Gallery, New-York, 1991
- Crowther J.A., *Manuel de radiographie industrielle*. Dunod 1948
- Dubos J., Le travail du bronze à l'époque gallo-romaine, in *Les Bronzes antiques de Paris*. Collection du Musée Carnavalet, Paris 1989
- Drilhon F., Pernot M., Etude de quelques pièces de vaisselle en bronze in *Les Bronzes antiques de Paris*. Collection du Musée Carnavalet, Paris 1989
- Drilhon F., *Techniques radiographiques*, in *Les méthodes scientifiques dans l'étude et la conservation des œuvres d'art*. Documentation Française, Paris 1985, 2<sup>e</sup> édition
- Drilhon F., Radiographie des sculptures en plâtre, in *Moulage*, actes du colloque international 10-12 avril 1987, Documentation Française, Paris 1987
- Drilhon F., Tassery-Lahmi A., Technologie et mise en forme, in *Sculptures en cire de l'ancienne Egypte à l'art abstrait*. Paris, Réunion des Musées Nationaux, 1987
- Drilhon F., Laval-Jeantet M., Tassery-Lahmi A., Etude en laboratoire de seize bulles mésopotamiennes appartenant au département des antiquités orientales - Musée du Louvre. *Préhistoire de la Mésopotamie*, Colloque international CNRS, 17-19 décembre 1984, pp. 336-344, 1986
- Fountoulakis A., *Radiographie des objets archéologiques en métal, techniques et fabrication*, maîtrise de sciences et techniques, Paris, LRMF
- Gettens J. Rutherford, *The Freer Chinese Bronzes, volume II, Technical Studies*, Washington 1969
- Gilardoni A., Ascani Orsini R., Taccani S., *X-rays in Art : Physics, Technique, Applications*. Côme, Gilardoni SPA 1977
- Graham D., Eddie T., *X-ray Techniques in Art Galleries and Museums*. Bristol, Boston, Adam Hilger, 1985
- Kodak : *Radiographie et industrie*, 1970
- Van de Voorde, Guido, La radiographie complète des objets d'art volumineux en trois dimensions : facteurs géométriques d'exposition, in *Bulletin de l'Institut royal du patrimoine artistique. Bruxelles, 1978-1979*
- Weingartner V., *Une étude radiologique des momies de « chats » du Musée du Louvre*, thèse pour le doctorat vétérinaire, faculté de médecine de Créteil, 1986