



## Technè

La science au service de l'histoire de l'art et de la préservation des biens culturels

43 | 2016

Une Europe de la recherche en sciences du patrimoine

---

# Développement d'un appareil portable de diffraction et fluorescence des rayons X pour l'analyse non-destructive des œuvres d'art

*Development of a portable X-ray diffraction/X-ray fluorescence device for non-destructive analysis of works of art*

Jacques Castaing, Michel Dubus, Alessandra Gianoncelli, Brice Moignard et Philippe Walter

---



### Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/techne/737>

DOI : [10.4000/techne.737](https://doi.org/10.4000/techne.737)

ISSN : 2534-5168

### Éditeur

C2RMF

### Édition imprimée

Date de publication : 1 août 2016

Pagination : 79-83

ISBN : 978-2-7118-6338-9

ISSN : 1254-7867

### Référence électronique

Jacques Castaing, Michel Dubus, Alessandra Gianoncelli, Brice Moignard et Philippe Walter, « Développement d'un appareil portable de diffraction et fluorescence des rayons X pour l'analyse non-destructive des œuvres d'art », *Technè* [En ligne], 43 | 2016, mis en ligne le 19 décembre 2019, consulté le 22 juillet 2020. URL : <http://journals.openedition.org/techne/737> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/techne.737>

---



La revue *Technè. La science au service de l'histoire de l'art et de la préservation des biens culturels* est mise à disposition selon les termes de la Licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.

Jacques Castaing  
 Michel Dubus  
 Alessandra Gianoncelli  
 Brice Moignard  
 Philippe Walter

## Développement d'un appareil portable de diffraction et fluorescence des rayons X pour l'analyse non-destructive des œuvres d'art

Development of a portable X-ray diffraction/X-ray fluorescence device for non-destructive analysis of works of art

**Résumé.** Au début des années 2000, l'impulsion de contrats européens a entraîné le C2RMF dans la conception et la construction d'un appareil portable de fluorescence et diffraction des rayons X (FRX-DRX). Les choix techniques concernant la source et les détecteurs ont conduit à un appareil robuste, qui a été utilisé dans de nombreux pays d'Europe, à la source d'une trentaine de publications dans des revues scientifiques.

**Mots-clés.** Analyse non-destructive, éléments chimiques, composés cristallins, analyse par fluorescence X (AFX ou FRX), diffraction X (DRX), écran photostimulable ou « imaging plate » (IP), appareil portable.

**Abstract.** In the early 2000s, the stimulus of European contracts led the C2RMF teams to design and build a portable X-ray diffraction/X-ray fluorescence (XRD/XRF) device. The technical choices made concerning the source and detectors resulted in a robust device, which has been used in several European countries and produced about thirty or so articles published in scientific journals.

**Keywords.** Non-destructive analysis, chemical elements, crystalline components, X-ray fluorescence (AFX or XRF), X-ray diffraction (XRD), photostimulable phosphor plate (PSP) or imaging plate (IP), portable device.

### Introduction

L'analyse physico-chimique *non-destructive* des objets du patrimoine ne présente pas seulement l'avantage d'éviter l'endommagement par la prise d'échantillons ; il permet aussi des analyses rapides de la surface des œuvres d'art qui est leur zone la plus chargée de sens. Le développement d'appareillage portable a ouvert la possibilité de réaliser ces analyses *in situ* dans les musées ou les monuments sans déplacer les œuvres d'art. Le C2RMF-CNRS UMR 171 a une longue expérience dans l'analyse élémentaire (Si, K, Fe, Cu, Pb...) à l'aide de la fluorescence des rayons X (FRX). En pratique, la FRX portable ne détecte pas les éléments légers (B, C, N, O, F). Elle ne permet pas d'identifier de nombreux composés chimiques. Ainsi, le plomb (Pb) donne en FRX le même signal s'il est dû à des oxydes de Pb (jaune, rouge, brun) ou des blancs de Pb (carbonates ou sulfates de Pb). Une technique complémentaire d'analyse est nécessaire. La diffraction des rayons (DRX) est le prolongement naturel de la FRX puisqu'elle donne accès à la structure cristalline des matériaux. La DRX est employée depuis un siècle pour la détermination des structures cristallines et elle a bénéficié récemment de progrès techniques liés à la mise en œuvre d'instruments utilisant le rayonnement synchrotron (LURE, ESRF, SOLEIL, etc.).

Aucune DRX portable n'existant sur le marché en 2003, les conditions étaient réunies pour la construction et la mise en œuvre d'un tel appareil qui sont incluses dans Eu-ARTECH (2004-2009). Le programme s'est déroulé au sein de l'équipe AGLAE du C2RMF-CNRS UMR 171 en collaboration étroite avec le Laboratoire de Cristallographie de Grenoble (CNRS UPR 5031). La DRX portable, associée à la FRX, a ensuite été intégrée à MOLAB dans le cadre de CHARISMA (2010-2014).

L'article est basé principalement sur le rapport final<sup>1</sup> et les rapports annuels du projet Eu-ARTECH. Nous présentons dans la suite les faits les plus importants concernant la FRX-DRX portable. On trouvera de nombreux résultats dans les publications et des détails sur l'appareil dans celles de Gianoncelli (2008 a et b) et Eveno (2010 et 2011).

Cet article est dédié à la mémoire de nos deux collègues prématurément disparus, Joseph Salomon et Hélène Rousselière, qui ont contribué aux diverses phases du projet dans le cadre de Eu-ARTECH et CHARISMA.

Jacques Castaing, directeur de recherche honoraire au CNRS (jacques.castaing@upmc.fr). Michel Dubus, ingénieur d'études au C2RMF (michel.dubus@culture.gouv.fr). Alessandra Gianoncelli, Principal beamline scientist, Elettra Sincrotrone Trieste, Italie (alessandra.gianoncelli@elettra.eu). Brice Moignard, ingénieur d'études au C2RMF (brice.moignard@culture.gouv.fr). Philippe Walter, directeur de recherche au CNRS, Sorbonne Université, Université Paris 06, LAMS UPMC CNRS UMR 8220 (philippe.walter@upmc.fr).

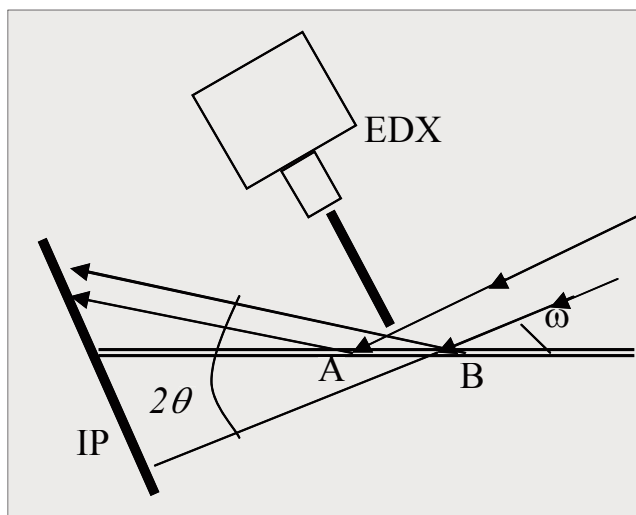


Fig 1. Schéma de la FRX-DRX portable. Le faisceau incident irradie la surface de l'objet sur la zone AB et est perpendiculaire à la détection 2D (IP). Le détecteur (EDX) pour la FRX est placé à 1 cm en face de AB. La distance entre la source (non représentée) et l'IP est de 40 cm. Le faisceau diffracté, qui fait un angle  $2\theta$  avec le faisceau incident, ne peut émerger de l'objet que si  $2\theta$  est supérieur à  $\omega$ . Avec  $\omega \approx 10^\circ$ , on ne détecte que des diffractions avec  $2\theta$  supérieur à 10-15°.

### Choix techniques pour l'appareillage et l'exploitation des données

Lorsqu'un objet est soumis à une radiation ionisante (électrons ou ions de haute énergie, rayons X), il émet un rayonnement électromagnétique, en particulier des rayons X, avec des raies intenses à certaines énergies (ou longueurs d'onde  $\lambda$ ) spécifiques des éléments chimiques. On fait ainsi des analyses élémentaires en MEB-EDX, PIXE et FRX. Des spectres de FRX sont obtenus en 2 à 5 minutes grâce à la haute sensibilité des détecteurs actuels, à condition d'en placer un proche de la zone irradiée (fig. 1). Ces spectres couvrent usuellement un domaine d'énergies de 2 keV à 30 keV.

La situation est plus compliquée pour la DRX qui nécessite une géométrie de mesure fixe. Les rayons X sont diffractés par les matériaux à un angle  $2\theta$  du faisceau incident (fig. 1). Cet angle  $2\theta$  est relié à la structure cristalline par la relation de Bragg :

$$2d \sin \theta = \lambda = 1,24 / E$$

E est l'énergie (keV) des rayons X incidents de longueur d'onde  $\lambda$  (nm) et d est la distance (nm) entre les plans atomiques du cristal. Les sources produisent des rayons X multi-énergétiques et il y a de nombreuses distances d dans des cristaux ayant des orientations variables (matériaux polycristallins). La DRX requiert une simplification des conditions. Une source monochromatique (Cu-K $\alpha$  avec  $E = 8$  keV ou  $\lambda = 0,154$  nm) génère des rayons diffractés distribués sur des nappes coniques faisant des angles  $2\theta$  avec le faisceau incident (fig. 1). Les caractéristiques géométriques des cônes coaxiaux

permettent de déterminer les distances d typiques de la structure cristalline des matériaux. Cette source adaptée à la DRX n'est pas optimale pour la FRX qui nécessite une excitation multi-énergétique. Nous avons exclu l'utilisation de deux sources qui aurait alourdi l'appareillage et rendu les manipulations plus complexes. Le tube X à anticathode au cuivre fournit une raie Cu-K $\alpha$  très intense, dominant largement le fond continu multi-énergétique ; la raie Cu-K $\beta$  est éliminée (réduction d'un facteur 1000 environ) à l'aide d'un filtre de 15  $\mu$ m en nickel. Cette source permet l'analyse FRX, sauf pour le Cu qui est toujours dans les spectres FRX à cause de la source. La présence de Cu dans l'objet est révélée par la raie Cu-K $\beta$  ou bien en filtrant la source avec 750  $\mu$ m d'aluminium, ce qui élimine tous les rayons X jusqu'à l'énergie du Cu. Enfin, la source est munie d'une « lentille » polycapillaire donnant un faisceau parallèle de rayons X de 4 mm de diamètre (divergence résiduelle de 0,25° ou 4,4 mrad) ; grâce à des fentes, la surface irradiée de l'objet est réduite à environ 2 x 4 mm<sup>2</sup>.

Les rayons diffractés sont de faible intensité, ce qui rend difficile leur collecte par balayage d'un détecteur ponctuel qui est usuel pour les DRX de laboratoire ; leur temps de mesure trop long n'est pas acceptable pour des œuvres d'art dans un musée. La détection 2D permet l'enregistrement simultané de tous les rayons diffractés. Elle est réalisée, en 5 à 20 minutes, à l'aide d'un écran photostimulable ou « imaging plate » (IP) qui est placée à 90° du faisceau incident (fig. 1), aussi proche que possible de la surface de l'objet qui absorbe les rayons X. Dans ces conditions, l'IP intersecte les cônes de diffraction selon une série d'arcs de cercle, chacun correspondant à un angle  $2\theta$  (ou distance d). L'IP est un détecteur utilisé en radiographie médicale ou industrielle permettant d'obtenir des images numériques.

La détermination des valeurs de  $2\theta$  se fait dans le triangle rectangle défini par l'IP et les faisceaux incidents et diffractés (fig. 1). Le traitement se fait à l'aide d'un logiciel (fit-2D) permettant de simuler l'image portée par l'IP en ajustant 5 paramètres : distance Z entre la zone AB et l'IP (fig. 1), défaut d'orthogonalité du faisceau par rapport à l'IP (2 angles TR et DT), centre des arcs de cercle ou position de l'intersection virtuelle du faisceau incident et de l'IP (2 coordonnées X et Y). Ces 5 paramètres décrivant la géométrie de la DRX sont déterminés à l'aide d'un étalon (alumine Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, quartz SiO<sub>2</sub>) et employés pour la DRX sur les objets étudiés (fig. 2), la qualité des résultats dépendant de leur maîtrise au cours des mesures successives. Les résultats sont présentés sous la forme de courbes d'intensité des rayons diffractés en fonction de  $2\theta$  (voir la liste des publications). La comparaison de ces diagrammes de DRX avec des bases de données permet l'identification des constituants cristallisés des objets.

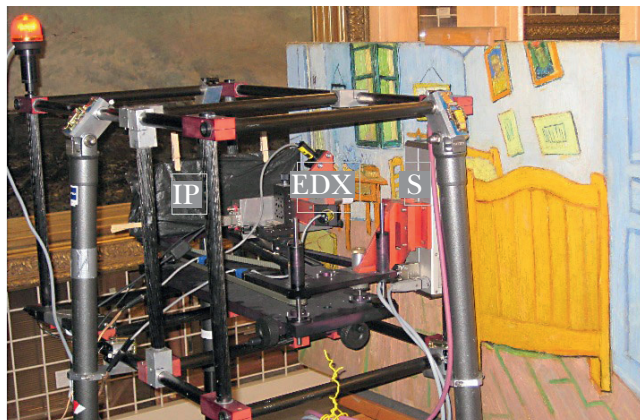


Fig. 2. Appareil FRX-DRX en position de travail sur une peinture : S source de rayons X ; IP détection 2D sous une protection en plastique noir ; EDX détecteur de FRX à proximité de la peinture. © Marie-Françoise Castaing.

## Performances de l'appareil

L'équipement complet pour la FRX-DRX portable (fig. 2) pèse environ 40 kg. La faible puissance de la source de rayons X (30 W) la rend sans danger pour ses utilisateurs. En effet, le faisceau incident est absorbé par l'objet et l'IP (fig. 1) ; l'intensité de la raie Cu-K $\alpha$  est divisée par 3 dans 80  $\mu$ m de Al ou dans 20  $\mu$ m de verre au plomb. Ces chiffres donnent aussi l'ordre de grandeur des volumes de DRX sous la surface de l'objet (fig. 1) en fonction de sa composition chimique.

La maîtrise des paramètres géométriques est plus facile à obtenir pour des œuvres planes (peinture, mur) que pour des surfaces courbes (statue, voûte) et des structures instables (échafaudage). Par construction, l'angle  $\omega$  est de 10° (fig. 1). Il n'est pas prévu de le mesurer, ses variations n'ayant pas d'incidence, en dehors de l'élargissement des pics pour  $\omega$  faible. L'opérateur de la FRX-DRX peut choisir la distance Z entre l'IP et AB (fig. 1). L'exploitation des diagrammes de DRX exige des pics fins qui s'obtiennent en plaçant l'IP à une distance Z assez grande ( $Z \sim 200$  mm). Dans ce cas, les largeurs de pics (0,3-0,4°) sont proches de celles obtenues avec une DRX de laboratoire<sup>2</sup>. La réduction de la zone irradiée (AB, fig. 1) ne diminue pas la largeur des pics à cause de la divergence résiduelle du faisceau. Outre Z, le logiciel fit-2D permet de déterminer les 4 autres paramètres. Les coordonnées X et Y du centre des arcs de cercle sur l'IP sont invariables (fig. 1). Une étude statistique sur un grand nombre de DRX sur les étalons Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et SiC a montré que les dispersions sur les valeurs de X et Y sont analogues, et de l'ordre de 0,2 à 0,5 mm<sup>1</sup>. L'origine de ces dispersions provient de la fluctuation du positionnement de l'IP dans le scanner de numérisation des images. On estime qu'à chaque DRX, la reproductibilité sur la position de l'objet (distance Z) est de 2 à 3 mm. Cette variation se retrouve dans la dispersion d'une série de DRX sur Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> où on a employé des valeurs fixes pour X, Y TR et DT (TR = DT = 0 est la meilleure valeur, c'est-à-dire pas d'écart à 90°). Ces dispersions sur Z et X (c'est-à-dire sur le rayon des

arcs de cercle sur l'IP) peuvent être utilisées pour calculer la dispersion des pics sur les diagrammes de DRX, c'est-à-dire sur les valeurs de  $2\theta$ . On trouve 0,3° pour  $2\theta = 15^\circ$  et 0,5° pour  $2\theta$  grand (dispersion de Z et X = 3,5 mm et 0,35 mm respectivement). Ces valeurs sont du même ordre que celles pour les largeurs de pics de DRX confirmant que la FRX-DRX portable est adaptée à ses objectifs. Les performances peuvent être améliorées en agissant de façon adaptée sur l'élément qui les conditionne, principalement la reproductibilité géométrique.

Depuis le démarrage de Eu-ARTECH, plusieurs FRX-DRX portables ont été construites avec des choix techniques différents du nôtre. Une comparaison entre ces appareils a été faite dans deux articles récents<sup>3,4</sup>. Trois appareils<sup>3</sup> reprennent le système classique de goniomètre avec rotation de la source et du détecteur. La détection se fait avec une diode Si, avec sélection d'énergie pour la XRD et analyse élémentaire par FRX. Il nous semble que ces systèmes ne sont ni rapides ni performants pour l'analyse de mélanges complexes souvent rencontrés dans les objets. À noter qu'un inconvénient de ce dispositif est la variation de l'angle  $\omega$  qui entraîne une variation du volume irradié (surface et profondeur) selon les pics de DRX. Ce qui est acceptable pour une poudre homogène ne l'est pas pour la zone superficielle des œuvres d'art qui est souvent hétérogène à l'échelle de la FRX-DRX.

L'emploi d'un goniomètre a été retenu dans le cas de la DRX par dispersion en énergie (EDXRD) dans deux articles<sup>3,4</sup>. Ce goniomètre permet de faire varier l'angle entre source et détecteur, les raies de FRX restant immobiles contrairement aux pics de DRX<sup>4,5</sup>. Les pics sont distribués dans tout le domaine énergétique (2-30 keV) et ils proviennent ainsi de profondeurs différentes dans l'objet. Nous avons écarté la EDXRD dans le cadre de Eu-ARTECH<sup>1,5</sup> malgré l'attractivité



Fig. 3. FRX-DRX sur un support équipé de trois pieds télescopiques permettant une grande variation en hauteur (analyses entre 25 cm et 260 cm du sol). © Marie-Françoise Castaing.



Fig. 4. FRX-DRX sur un support mobile pour l'analyse d'œuvre de grande dimension : par exemple, les murs couverts de carreaux en céramique de l'Alcazar de Séville. © Marie-Françoise Castaing.

82

de cette solution qui pourrait cependant souffrir d'un manque d'outil éprouvé pour l'exploitation des diagrammes de DRX.

Le système Duetto, qui dérive de la DRX en service sur la planète Mars<sup>3</sup>, est très proche du nôtre, avec l'avantage d'employer un détecteur de type CCD permettant la visualisation instantanée du résultat de la DRX. Ce système, qui a été développé par la société américaine inXitu pour le compte

de la NASA, n'est plus commercialisé. Cette société a été rachetée par la société japonaise Olympus qui commercialise une FRX/DRX couplée, dénommée Terra, mais qui ne permet cette double analyse que sur des échantillons prélevés et non sans contact, directement sur les œuvres comme notre dispositif (voir site web <http://www.olympus-ims.com/fr/xrf-xrd/mobile-benchtop-xrd/terra>).

## Résultats

Les premières DRX dans le cadre de Eu-ARTECH ont été obtenues en 2007. La validation de la FRX-DRX (fig. 2) a été menée sur 70 objets au sein du C2RMF et des musées environnants, ainsi que dans le cadre de quelques missions (Florence, Pérouse, Séville, Amsterdam, Anvers, etc.) (figures 3 et 4). Par la suite, MOLAB CHARISMA a donné lieu à une vingtaine de missions. En gros, la moitié des analyses a concerné la peinture de chevalet, le quart les céramiques, le dixième les objets métalliques et le reste les documents graphiques et les peintures murales. Les opérations FRX-DRX menées dans le cadre de Eu-ARTECH ont produits 19 publications (+ 7 sans lien avec Eu-ARTECH) et une seule dans le cadre de CHARISMA (voir liste des publications). Cette différence de production entre les deux programmes s'explique par le calendrier, Eu-ARTECH ayant été particulièrement fécond entre 2009 et 2011, et par le fait que l'emploi des résultats de FRX-DRX appartient au responsable de la demande CHARISMA.

## Notes

1. Castaing, 2009b.
2. Duran, 2010.
3. Nakai, 2012.
4. Mendoza Cuevas, 2015.
5. Eveno, 2011.

## Bibliographie

- Castaing J., Dran J.-C., 2009a, « Contributions aux chapitres 5 (paint layers; p. 73) et 8 (non-destructive and micro-destructive techniques ; p. 207) » dans D. Pinna, M. Galeotti, R. Mazzeo (dir.), *Scientific Examination for the Investigation of Paintings: A Handbook for Conservators-restorers*, Centro Di, Firenze.
- Castaing J., Gianoncelli A., Moignard B., Ortega L., Dubus M., Dooryhée E., Richardin P., Hodeau J.-L., Duran A., Walter P., Pichon L., Guillou T., Calligaro T., Laval E., Eveno M., Pages S., Bourgarit D., Bordet P., Menu M., Salomon J., 2009b, *Development of a non-destructive method of in situ diagnosis by portable XRD and XRF*, Eu-ARTECH – J. R. A. 2 (juin 2004-mai 2009) ; task 3, final report.
- De Viguierie L., Duran A., Bouquillon A., Sole V. A., Castaing J., Walter P., 2009, "Quantitative X-ray fluorescence analysis of an Egyptian faience pendant and comparison with PIXE", *Analytical & Bioanalytical chemistry* 395, p. 2219-2225.
- Duran A., Castaing J., 2008, "Observations with a portable X-ray diffraction system of a Pb-Sn-Sb-O yellow pigment in ceramics from the 15th-16th centuries", *Macla* 9, p. 87-88.
- Duran A., Perez Rodriguez J.-L., Espejo T., Franquelo M.L., Castaing J., Walter P., 2009, "Characterization of illuminated manuscripts by laboratory-made portable XRD and micro-XRD systems", *Analytical & Bioanalytical chemistry* 395, p. 1997-2004.
- Duran A., Castaing J., Walter P., 2010, "X-ray diffraction studies of Pompeian wall paintings using synchrotron radiation and dedicated laboratory-made systems", *Appl. Phys. A* 99, p. 333-340.
- Duran A., Perez-Rodriguez J. L., Jimenez de Haro M. C., Franquelo M. L., Robador M. D., 2011, "Analytical study of Roman and Arabic wall paintings in the Patio de Banderas of Reales Alcázares' Palace using non-destructive XRD/XRF and complementary Techniques", *J. Archaeological Science* 38, p. 2366-2377.
- Duran A., Castaing J., Lehuédé P., Bouquillon A., 2011, « Les pigments jaunes des glaçures de l'atelier Della Robbia » dans A. Zucchiatti, A. Bouquillon, M. Bormand (dir.), *Della Robbia. Dieci anni di Studi – Dix ans d'études* – Sagep éditions, Gènes, p. 44-49.
- Eveno M., Duran A., Castaing J., 2010, "A portable X-ray diffraction apparatus for *in situ* analyses of masters' paintings", *Applied Physics A* 100, p. 577-584.
- Eveno M., Moignard B., Castaing J., 2011, "Portable apparatus for *in situ* X-ray diffraction and fluorescence analyses of artworks", *Microscopy and Microanalysis* 17, p. 667-673.
- Eveno M., Laval E., Rousselière H., Castaing J., 2012, « Apports de la fluorescence X et de la diffraction X à la connaissance de deux Tableaux de Rembrandt, l'Autoportrait au chevalet et les Pèlerins d'Emmaüs », *Techne* 35, p. 54-61.
- Eveno M., Duran A., Ravaud E., Laval E., Castaing J., 2009, "X-ray diffraction and fluorescence on the six Mantegna's paintings of the San Zeno altarpiece" dans M. Ciatti, P. Marini (dir.), *Andrea Mantegna: la Pala di San Zeno Studio e conservazione*; Edizioni Firenze (Edifir), p. 285-292.

- Franquelo M. L., Duran A., Castaing J., Arquillo D., Perez Rodriguez J.L., 2012, "XRF,  $\mu$ -XRD and  $\mu$ -spectroscopic techniques for revealing the composition and structure of paint layers on polychrome sculpture after multiple restorations", *Talanta* 89, p. 462-469.
- Gianoncelli A., Castaing J., Bouquillon A., Polvorinos A., Walter P., 2006, "Quantitative elemental analysis of Della Robbia glazes with a portable XRF spectrometer and its comparison to PIXE methods", *X-Ray Spectrometry* 35, p. 365-369.
- Gianoncelli A., Castaing J., Ortega L., Doorhyée E., Salomon J., Walter P., Hodeau J.-L., Bordet P., 2008a, "A portable instrument for *in situ* determination of the chemical and phase composition of cultural heritage objects", *X-Ray Spectrometry* 37, p. 418-423.
- Gianoncelli A., Castaing J., Ortega L., Doorhyée E., Eveno M., Salomon J., Bordet P., Hodeau J.-L., Walter P., 2008b, "A portable XRF-XRD instrument for *in-situ* analysis of cultural heritage objects" dans J. Townsend (dir.), *Conservation Science 2007*, Archetype Publications (UK), p. 189-194.
- Mendoza Cuevas A., Bernardini F., Gianoncelli A., Tuniz C., 2015, "Energy dispersive X-ray diffraction and fluorescence portable system for cultural heritage applications", *X-ray Spectrometry* 44, p. 105-115.
- Nakai I., Abe Y., 2012, "Portable X-ray powder diffractometer for the analysis of art and archaeological materials", *Appl. Phys. A* 106, p. 279-293.
- Padeletti G., Fermo P., Bouquillon A., Aucouturier M., Barbe F., 2010, "A new light on a first example of lustred majolica in Italy", *Appl. Phys. A* 100, p. 747-761.
- Pagès-Camagna S., Laval E., Vigears D., Duran A., 2010, "Non-destructive and *in situ* analysis of Egyptian wall paintings by X-ray diffraction and X-ray fluorescence portable systems", *Applied Physics A* 100, p. 671-681.
- Robador M. D., de Viguierie L., Perez-Rodriguez J. L., Rousselière H., Walter P., Castaing J., 2015, "Structure and chemical composition of wall paintings from the Islamic and Christian times in the Seville Alcazar", *Archaeometry* (à paraître).
- Uda M., Ishizaki A., Satoh R., Okada K., Nakajima Y., Yamashita D., Ohashi K., Sakuraba Y., Shimono A., Kojima D., 2005, "X-ray diffractometer equipped with XRF for archaeometry", *Nucl. Instr. & Meth. In Phys. Res. B* 239, p. 77-84.
- Van der Snickt G., Miliani C., Janssens K., Brunetti B. G., Romani A., Rosi F., Walter P., Castaing J., De Nolf W., Klaassen L., Labarque I., Wittermann R., 2011, "Material analyses of "Christ with singing and music-making angels", a late 15th-C panel painting attributed to Hans Memling and assistants : part I. Non-invasive *in situ* investigations", *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* 26, p. 2216-2229.
- Walter P., de Viguierie L., Castaing J., 2011, « Appareils portables pour l'analyse des œuvres d'art aux rayons X », *CNRS Images de la physique*, p. 79-85.