

La tomographie, un atout majeur dans la chaîne opératoire analytique de l'objet archéologique

Retour d'expérience d'une archéologue et d'un conservateur-restaurateur, spécialistes du mobilier métallique

Émilie Millet

INRAP GRAND-EST

UMR 8546 AOROC « ARCHÉOLOGIE ET PHILOGIE D'ORIENT ET D'OCCIDENT »

emilie.millet@inrap.fr

Renaud Bernadet

CONSERVATEUR-RESTAURATEUR INDÉPENDANT SPÉCIALISÉ DANS LE TRAITEMENT

DES OBJETS ARCHÉOLOGIQUES MÉTALLIQUES - MODÈNE (ITALIE)

rbernadet@hotmail.com

www.restaurobernadet.com

L'archéologue et le conservateur-restaurateur, spécialistes du mobilier métallique, sont amenés à travailler conjointement sur des objets généralement corrodés. La corrosion qui, au fil du temps, les a transformés jusqu'à les rendre méconnaissables, induit un problème de lisibilité immédiate et, par conséquent, de compréhension. Pour contourner cette difficulté, un des premiers gestes effectués en laboratoire consistait jusqu'alors à réaliser une couverture radiographique des objets prélevés. La radiographie (RX)¹ constituait ainsi la méthode par excellence pour les examiner et les diagnostiquer; elle représentait la seule ressource disponible pour évaluer l'état de conservation et la morphologie générale d'objets corrodés, estimer leur mode de fabrication et déterminer l'existence éventuelle de décors.

Or, depuis quelques années, le développement des techniques d'imageries numériques 3D est progressivement venu toucher notre discipline, notamment dans le cadre de l'archéologie préventive, à travers l'étude d'ensembles funéraires exceptionnels et complexes comme, par exemple, les mobiliers funéraires de Warcq (Ardennes, milieu II^e s. av. J.-C., Millet *et al.* 2019) ou de Lavau (Aube, début V^e s. av. J.-C., Dubuis 2016). Parmi ces techniques d'imagerie, la tomographie² axiale calculée par ordinateur (TACO), dite aussi tomodynamométrie ou scanographie (CT-Scan),

a eu un impact non négligeable dans nos spécialités respectives. Son utilisation dans des cas bien spécifiques a modifié notre manière de comprendre un objet, complétant et prolongeant à travers son caractère tridimensionnel l'approche traditionnelle fondée en premier lieu sur l'examen radiographique (RX). Son efficacité et sa pertinence ont conduit à l'inscrire, en fonction des cas, au sein de la chaîne opératoire analytique du mobilier métallique, qui passe généralement de la micro-fouille en laboratoire d'un ensemble prélevé aux interventions de conservation-restauration (nettoyage pour étude ou restauration), à son analyse puis à sa valorisation.

Cette technique de diagnostic non destructif est en constante évolution, les appareils gagnent en puissance, leur distance focale augmente ainsi que leurs résolutions. Encore onéreuse, on ne peut y faire systématiquement appel pour l'étude du mobilier métallique comme c'est aujourd'hui le cas avec la radiographie (RX). L'emploi de la tomographie doit être un choix réfléchi qui s'inscrit dans une problématique de recherche. Sa systématisation tous azimuts n'aurait d'ailleurs que peu d'intérêt, surtout dans le cas d'objets métalliques morphologiquement très simples.

En proposant un retour d'expérience fondé sur plusieurs exemples concrets, l'objectif de cet article est de présenter en quoi la tomographie constitue aujourd'hui un support fondamental dans nos disciplines respectives et comment elle conditionne et oriente nos travaux d'analyse et de recherche sur le mobilier métallique.

1. Pour rappel, la radiographie (RX) reproduit une ombre en deux dimensions d'un objet 3D éclairé par un faisceau de rayons X qui vont pénétrer dans la matière et former une image en deux dimensions par transmission. Les différents niveaux de gris de cette image correspondent alors à l'atténuation du faisceau de rayons X par les différents matériaux qu'il traverse. Cette absorption des RX dépend de l'épaisseur, de la densité et de la composition chimique des parties de l'objet traversés. Le cône du faisceau peut aussi entraîner une légère distorsion de l'image en fonction de l'épaisseur de l'objet.

2. La tomographie à rayons X est une technologie de contrôle non destructif rendant possible l'analyse de pièces aux géométries complexes.

Elle autorise la reconstruction d'un objet et de son contenu en 3D ainsi que la distinction des différents matériaux qui le composent. Ses performances dépendent notamment de la densité des matériaux et de l'épaisseur de la pièce à analyser.



Fig. 1. Vue zénithale du prélèvement en motte du crâne de la défunte provenant de la tombe 62 de Spilamberto (Italie). Différents fils d'or sont visibles sur le pourtour du crâne.
© SABAP-Bo / R. Bernadet.

Le support archéologique privilégié : de l'importance des prélèvements archéologiques pour la tomographie

L'intervention de l'archéologue ou du conservateur-restaurateur, spécialistes du mobilier métallique, doit se faire dès l'étape de la fouille. Une première expertise sur le terrain permet une identification sommaire ou globale d'un objet ou d'un ensemble ainsi qu'une évaluation de son état de conservation général. Dès lors, la décision de mettre en place un prélèvement en bloc ou en motte³ peut être prise. Cette intervention se situe à la base du processus scientifique dans l'analyse des mobiliers métalliques généralement complexes. Ainsi, en limitant la dissociation des objets de leur micro-contextes, le prélèvement rend possible un maintien optimal des informations. Il est de ce fait un support tout à fait adapté à l'emploi de techniques d'imagerie RX, comme la tomographie.

Les investigations tomographiques peuvent être réalisées sur des artefacts variés, simples ou complexes et multiples. Elles deviennent essentielles dès lors que la complexité d'un objet ou d'un ensemble est révélée : dans ce cas, il peut s'agir d'un objet composé de divers matériaux métalliques et/ou organiques (*objet composite*), d'un assemblage de plusieurs pièces constituant un même objet (*objet complexe*), d'un ensemble cohérent d'objets, combinant par exemple ossements et objets portés (*assemblage cohérent d'objets*), d'une superposition hétérogène d'objets (*complexité du dépôt*). La complexité apparente d'un

3. Le prélèvement en bloc consiste à solidariser le ou les vestiges présentant des altérations mécaniques par la mise en place d'interventions de consolidation afin de pouvoir les soulever d'un seul tenant et maintenir les connexions. La technique du prélèvement en motte prévoit, après consolidation, d'effectuer une découpe de la terre entourant l'objet afin de prélever le tout pour le soustraire à toute contrainte mécanique. Dans les deux cas, un choix adéquat des matériaux employés pour réaliser le prélèvement est primordial car ils ont une incidence déterminante, selon leur densité, sur la qualité des analyses tomographiques à venir.

objet ou d'un ensemble, mais aussi sa fragilité et son état de conservation médiocre, ou encore, son intérêt scientifique ou son caractère exceptionnel, constituent autant de critères présidant au choix d'un prélèvement. Parfois, les délais d'intervention courts sur le terrain peuvent également justifier cette décision.

La tomographie, une source d'informations pour la micro-fouille des prélèvements archéologiques

La première étape de l'étude en post-fouille repose sur la tomographie du prélèvement. Cette technique non invasive révèle en 3D la présence d'artefacts invisibles conservés dans le bloc de terre. En réalisant un enregistrement systématique des densités des matériaux, elle rend possible une première évaluation de l'ensemble et apporte ainsi des informations quantitatives et qualitatives sur le (ou les) artefact(s) présent(s). Elle permet ainsi d'établir, par exemple, un diagnostic précis du bloc prélevé par l'identification des divers objets ou pièces le composant, leur nature (les types de matériaux présents), leur nombre, leur emplacement et agencement, leur mode d'assemblage, leur état de conservation (degré de minéralisation, présence d'altérations mécaniques). Elle donne l'opportunité d'effectuer des mesures précises d'objets au sein même d'un prélèvement et élimine les problèmes de chevauchement bien souvent visibles avec la radiographie (RX).

Ainsi, le cas d'un *assemblage cohérent d'objets* analysé sous tomographie est illustré à travers l'exemple d'une tombe d'une fillette de haut rang, découverte dans la nécropole lombarde de Spilamberto (province de Modène, Italie)⁴. Dès la fouille, de très minces fragments de fils d'or sont apparus autour du crâne de la défunte (De Vingo 2010). Devant la complexité et la finesse du dépôt, un prélèvement en motte a été effectué afin de le fouiller ultérieurement en laboratoire (fig. 1). Une analyse par tomographie axiale a ainsi été réalisée⁵ pour un diagnostic : détermination ou précision de la nature des vestiges, quantification, localisation et évaluation de leur état de conservation. Dans le volume du prélèvement contenant le crâne de la défunte, la tomographie a révélé diverses hétérogénéités liées aux matériaux organiques (calotte crânienne, dents de la mandibule) et inorganiques (différents métaux) (fig. 2). Tout en servant de guide à la micro-fouille de

4. La fouille préventive a été réalisée en 2003 par la coopérative AR/S Archeosistemi.

5. Dans le cadre d'un projet de recherche (2008) sur la nécropole lombarde de *Ponte del Rio* à Spilamberto, coordonné par Cinzia Cavalari (Soprintendenza Archeologia, Belle Arti e Paesaggio per la città metropolitana di Bologna e le province di Modena, Reggio Emilia e Ferrara, ou SABAP-BO) et le professeur Paolo de Vingo (université de Turin), une tomographie RX a été effectuée, en collaboration avec Renaud Bernadet, auprès du laboratoire Tec Eurolab s.r.l. (système tomographique NSI X7500 CT). L'appréciation des différents matériaux a été faite sur la base des nuances de gris correspondant à des différences de densité. Images (fig.1-4) publiées avec l'autorisation du ministère du Patrimoine, des Activités culturelles et du Tourisme - Surintendance de l'archéologie, des beaux-arts et du paysage de la ville métropolitaine de Bologne et des provinces de Modène, Reggio Emilia et Ferrara. Reproduction interdite à but lucratif, même indirect.

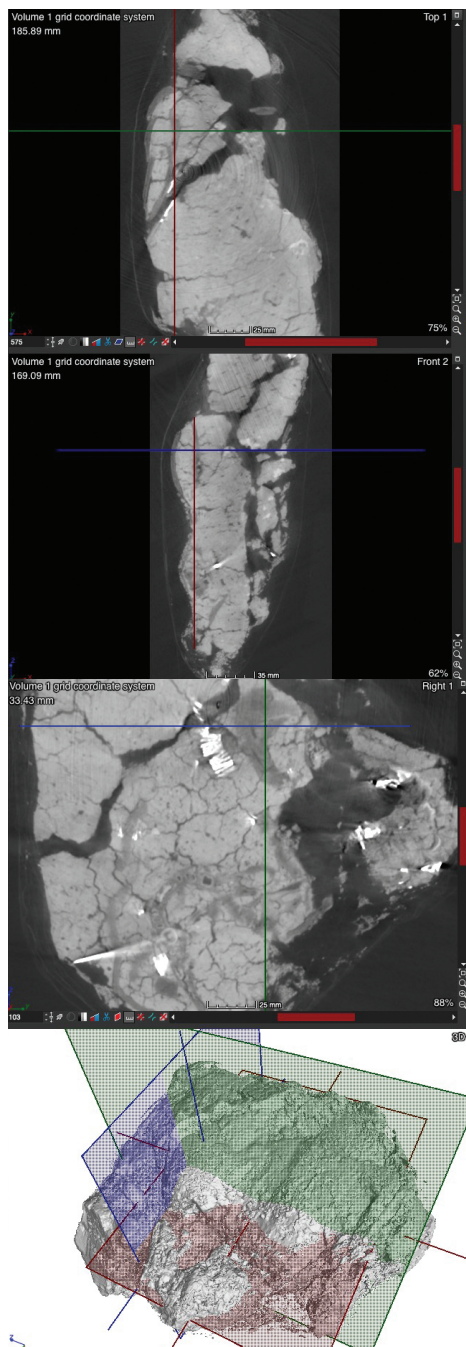


Fig. 2 (ci-contre). Capture d'écran de l'application de visualisation myVGL montrant les différents axes de coupes et leur emplacement sur la reconstruction 3D.

© SABAP-BO / R. Bernadet.

Fig. 3 (ci-dessus, en haut). Micro-fouille et prélèvement des restes osseux et des fils d'or contenus dans le bloc de terre.

© SABAP-BO / R. Bernadet.

Fig. 4 (ci-dessus, en bas). Non lisible à la tomographie, le décor du galon conservé par l'ondulation des fils d'or apparaît lors de la micro-fouille du bloc de terre.

© SABAP-BO / R. Bernadet.

l'ensemble⁶ (fig. 3), la tomographie RX est venue documenter la taphonomie du dépôt et les relations existantes entre les différents éléments, une épingle en argent et un ensemble de fils d'or. En revanche, une difficulté s'est posée pour obtenir une image claire des restes osseux en raison de leur faible densité (crâne peu minéralisé d'un enfant de moins de cinq ans) par rapport à celle du bloc de terre. Illisible à la tomographie, le motif décoratif encore conservé par les fils d'or a pu être révélé lors de la micro-fouille (fig. 4), puis au moment de la restauration. Après

analyse, sur la base de la quantification des fils et de leur localisation fournie par la tomographie, il a été néanmoins possible de restituer la présence d'une coiffe, probablement un voile fixé sur l'arrière du crâne par l'épingle et sur lequel était cousu un galon tissé d'or (*ibid.*)⁷.

L'amélioration des logiciels de post traitement d'images pour la tomodynamométrie permet aussi d'effectuer une segmentation. Cette opération consiste, par définition, à partitionner une image en zones homogènes ou régions. Dans le cas de la tomodynamométrie d'objets archéologiques, une région correspondant à un matériau est alors

6. La micro-fouille et la restauration ont été réalisées par Renaud Bernadet, conservateur-restaureur, avec la collaboration de Maurizio Marinato, archéo-anthropologue.

7. Cette intervention donnera lieu à un prochain article lors de la publication de la nécropole de Spilamberto.

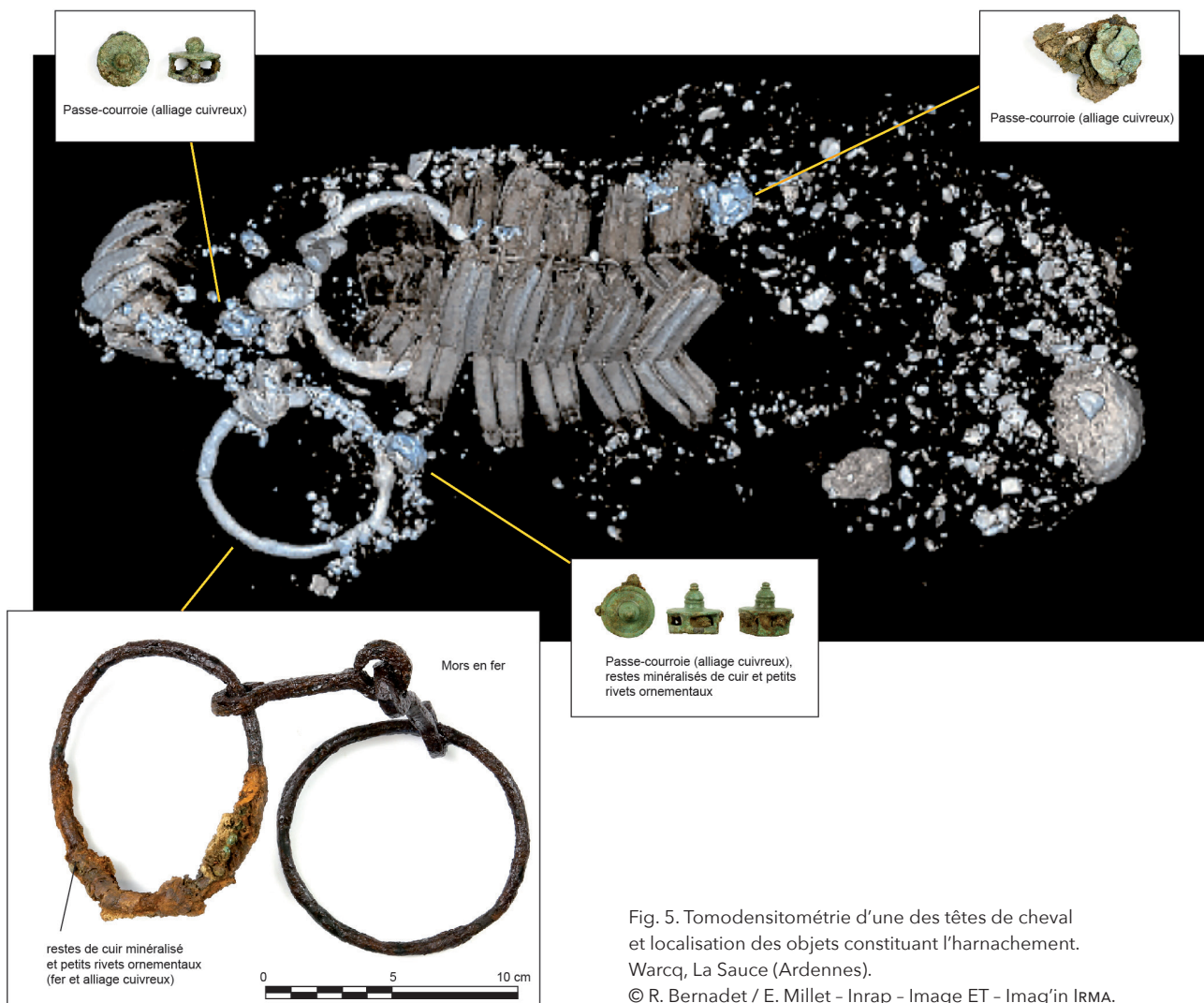


Fig. 5. Tomodensitométrie d'une des têtes de cheval et localisation des objets constituant l'harnachement. Warcq, La Sauce (Ardennes).

© R. Bernadet / E. Millet - Inrap - Image ET - Imag'in IRMA.

définie comme un ensemble de pixels qui partagent une caractéristique commune, comme par exemple une densité particulière. Cette segmentation peut-être arbitrairement définie par l'ingénieur en imagerie ou réalisée selon un procédé plus scientifique (détermination selon l'échelle de *Hounsfield* pour la tomographie). Elle permet alors, grâce à la caractérisation des matériaux, de visualiser aisément les différents types de ceux qui composent un objet ou un ensemble d'objets. À l'opposé d'une image tomographique « classique » en niveaux de gris, la segmentation donne une image parfaitement lisible et facile à appréhender : les matériaux se distinguent les uns des autres et on peut aisément cerner leurs limites. La pratique reste complexe dans le cas de matériaux possédant une densité équivalente et seule l'expérience de l'ingénieur, avec l'aide des informations fournies par le spécialiste du mobilier métallique et par le conservateur-restaurateur, permet d'obtenir des images précises et non erronées. Ainsi, par exemple, dans le cas de la tombe de Warcq⁸, la

tomodensitométrie⁹ effectuée sur l'un des crânes de cheval porteur d'un mors en fer a révélé l'existence insoupçonnée d'un harnachement composé de passe-courroies et de lanières de cuir ornées de très petits rivets en fer et alliage cuivreux (fig. 5) (Millet *et al.* 2019). La documentation tomographique, où chaque élément a été segmenté, a eu un impact considérable puisqu'elle a permis, sur la base d'une distinction des matériaux, de guider les gestes du conservateur-restaurateur lors de la micro-fouille. Bien que celle-ci ait été réalisée sous microscope stéréoscopique, les petits rivets, dont le diamètre ne dépassait pas les 2 mm, étaient à peine perceptibles ; on comprend aisément l'importance qu'a pu jouer le support tomographique dans la compréhension de cet *ensemble cohérent d'objets*. En révélant l'existence de ces petites pièces, un ciblage des zones sensibles a alors été possible et a permis de concentrer les observations et d'accroître la

8. La fouille préventive a été effectuée en 2014 par l'Inrap et le Conseil départemental des Ardennes, sous la direction de Bertrand Roseau.

9. Projet Imag'in IRMA «Imagerie et interactions multimodales pour l'archéologie»/UMR CNRS 6074 IRISA «Institut de recherche en informatique et systèmes aléatoires»: http://www.irisa.fr/immersia/wp-content/uploads/2016/11/Présentation_CNRS_IRMA_fev2016_web1.pdf. Système tomographique: Siemens Somatom sensation 16 ct scanner (Image ET - Mordelles, Ille-et-Vilaine).

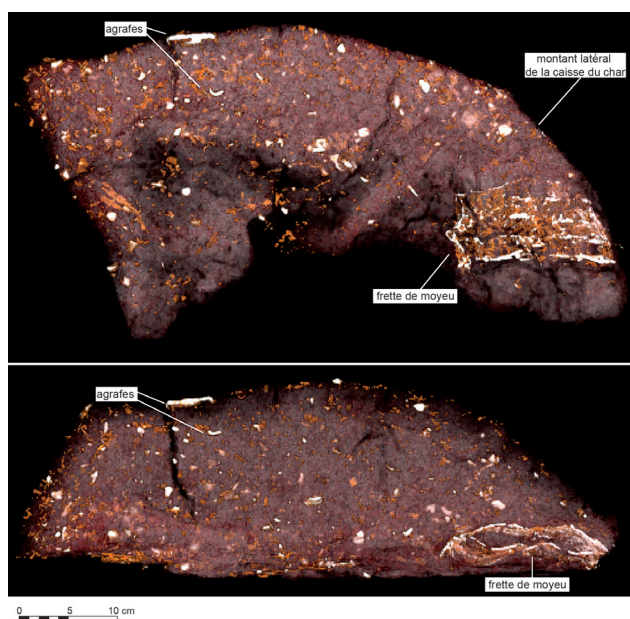


Fig. 6. Tomodensitométries, vues zénithale et de face du montant latéral de la caisse du char et des pièces masquées dans le prélèvement (frette de moyeu, agrafes).

© Inrap - Image ET - Imag'in IRMA.

précision lors de l'intervention ; le risque de détérioration, malgré les précautions prises, en a été amoindri. La micro-fouille d'un prélèvement étant nécessairement destructive, la tomographie constitue un moyen de sauvegarder en 3D de manière pérenne un instantané d'un ensemble prélevé, en « cartographiant » les artefacts (détermination de leur position relative) et en préservant virtuellement les relations et connexions existantes entre les pièces. Elle rend ainsi possible l'analyse taphonomique des artefacts et est un outil essentiel pour toute reconstitution fonctionnelle.

Nettoyage pour étude et analyse des objets : l'apport de la tomographie

Le nettoyage pour étude consiste en une intervention partielle d'abrasion des couches de corrosion recouvrant la surface de l'objet à étudier. Cette intervention peut se faire sous forme de fenêtres ponctuelles, de quelques centimètres, ouvertes sur les parties de l'objet susceptibles d'être porteuses des informations recherchées ou par le biais d'un nettoyage sommaire de toute sa surface. Le choix se fait toujours conjointement avec le spécialiste chargé de l'étude du matériel (Bernadet 2013). Dans cette réflexion, dépendante du type de l'objet (armement, parure, outil, etc.), et donc des informations recherchées, la tomographie permet un ciblage précis des zones dignes d'intérêt. Elle facilite ainsi le choix d'un nettoyage partiel sous la forme de fenêtres tests ou précise s'il est nécessaire d'effectuer un nettoyage complet.

Dans d'autres cas généralement sensibles, l'imagerie numérique 3D constitue l'outil par excellence qui aide les divers intervenants à décider de la stratégie et du protocole de



Fig. 7. Vue oblique du montant du char en cours de nettoyage pour étude. © Inrap / R. Bernadet.

dégagement, de nettoyage et de conservation. Le cas du char à deux roues de Warcq en est un bon exemple. Selon leur position dans la tombe et pour des raisons logistiques (taille, volume), différentes parties du char ont été prélevées à part : les bandages, les moyeux de la roue, le montant de la caisse recouvert de feuilles d'or, les ridelles, etc. (Millet 2019). La tomographie du montant latéral de la caisse a révélé, outre l'existence de deux agrafes en fer participant au maintien des pièces de bois, la présence inattendue de la seconde frette de moyeu de la roue¹⁰, piégée dans le sédiment du fond de la chambre, sous le montant (fig. 6). Après la micro-fouille de l'ensemble¹¹, la frette a volontairement été laissée en place. En effet, l'ensemble dégagé du montant n'est pas manipulable (fig. 7), il est maintenu en l'état grâce au sédiment argileux avec lequel il a été prélevé, conservé en milieu humide et en chambre froide afin d'éviter tout dessèchement. Du fait de son caractère instable et de son extrême fragilité, la frette de moyeu n'aurait pas pu en être extraite sans compromettre sa géométrie et sa stabilité mécanique. Outre le fait de constituer une sauvegarde documentaire virtuelle pour cet objet unique, le support tomographique est employé pour évaluer les priorités dans les actions de micro-fouille et de nettoyage, dans une démarche volontairement peu interventionniste.

Bien que la tomographie rende accessible de nombreuses informations morphologiques et techniques sur les objets, leur analyse complète ne peut généralement pas se départir d'un nettoyage pour étude. Celui-ci permet d'accéder à des données non perceptibles en imagerie 3D, comme c'est le cas pour des traitements de surface ou de fins décors. L'exemple de Spilamberto le démontre bien puisqu'il n'a pas été possible d'identifier par la tomographie le décor formé par les fils d'or (cf. supra). C'est le cas également des feuilles d'or appliquées sur le montant latéral en bois de la caisse du char de Warcq (cf. supra), dont l'épaisseur est

10. La première frette de moyeu et la clavette, en alliage cuivreux, avaient été identifiées lors de la fouille et ont fait l'objet d'un prélèvement à part par Renaud Bernadet (Millet 2019).

11. La micro-fouille a été réalisée par Floriane Hélias ; ARC-Nucléart (Grenoble).



Fig. 8. Détail du décor incisé (une grande esse) sur la plaque avers du fourreau d'épée d'Ymonville, Les Hyèbles (Eure-et-Loir).
© Inrap / R. Bernadet.

évaluée entre 5 et 10 microns, et que seules la micro-fouille et le nettoyage pour étude ont pu mettre en évidence (Millet *et al.* 2019). Dans la même optique, dans le cadre du projet Imag'in IRMA, afin de déterminer les limites de l'appareil¹², un test a été effectué sur un fourreau d'épée gaulois du v^e s. av. J.-C. (fig. 8), découvert à Ymonville (Eure-et-Loir), dont la face avers, ornée de motifs incisés complexes, avait bénéficié d'un nettoyage intégral¹³ (Josset 2012). Malheureusement, en raison de la finesse des incisions et de la superposition des constituants (tôle et épée), le test n'a pas donné de résultats concluants¹⁴ – ce qui nous a conduit à développer et mettre en place d'autres procédés d'analyses et de relevés grâce à la technologie d'imagerie RTI (*Reflectance Transformation Imaging*)¹⁵.

L'utilisation de la tomographie dans le cadre de la restauration

Si le nettoyage pour étude est une stratégie d'intervention réservée en général à l'étude des objets métalliques dans le cadre de l'archéologie préventive, la restauration permet de les comprendre entièrement en leur redonnant toute leur lisibilité, par exemple lors d'une fouille programmée, d'un projet de recherches ou d'une exposition. Dans ces contextes, l'étude préalable d'un objet en vue de sa restauration peut nécessiter l'emploi de la tomographie afin d'élaborer un constat d'état précis et définir un protocole d'intervention. Le recours à l'imagerie 3D doit s'inscrire dans une problématique de recherche, comme ce

fut par exemple le cas pour l'analyse typo-chronologique et technique des casques en fer (IV^e-III^e s. av. J.-C.) de la nécropole de Montefortino à Arcevia¹⁶ en Italie (Bernadet, à paraître). Lors de l'étude préalable d'un de ces casques¹⁷ (fig. 9), un premier diagnostic de son état de conservation par radiographie (RX) avait montré la présence de matériaux hétérogènes (fig. 10), employés lors d'une précédente restauration vraisemblablement réalisée au début du xx^e siècle. L'emploi de la radiographie (RX) ne pouvant empêcher le chevauchement des parois de la calotte du casque, et afin d'obtenir une vision claire de l'ensemble, il a paru opportun d'effectuer une nouvelle analyse, cette fois par tomographie axiale calculée par ordinateur¹⁸ (fig. 11). La tomographie et le rendu 3D du casque et de ses paragnathides (fig. 12) ont mis en évidence son importante fragmentation, l'étendue des comblements précédemment réalisés et les différents matériaux employés à cette occasion, masqués sous d'épaisses couches de plâtre (tiges, plaques et grillages métalliques). Devant le caractère extrêmement lacunaire du casque et de ses paragnathides, il nous a semblé préférable de nous en tenir à une vision 3D de la structure métallique de l'objet plutôt que de tenter une nouvelle restauration. Il y a quelques années, avec le seul appui de la radiographie (RX), les travaux de restauration auraient été entrepris et auraient inévitablement conduit à un démantèlement définitif de l'objet, ce dernier ayant été reconstitué à partir de fragments ne provenant pas nécessairement de l'original. Même si le caractère factice de ce casque est incontestable, il représente un parfait exemple de l'histoire des collections du début du xx^e siècle où l'objet n'était pas une source d'étude mais un témoignage du passé qu'il fallait présenter au public.

12. Cf. note 9.

13. Les décors incisés sur les fourreaux en fer, même nettoyés, ne sont pas toujours lisibles à la radiographie RX lorsque l'épée est encore insérée dans le fourreau : en effet, il existe une grande différence de densité entre le fourreau portant le décor, souvent minéralisé, et l'épée plus épaisse, parfois encore métallique.

14. La question de l'appareillage employé se pose dans le cas d'un tel décor. Une microtomographie pourrait en révéler la présence, mais cette technique ne peut être utilisée que sur des vestiges de petites dimensions.

15. La *Reflectance Transformation Imaging* (RTI) produit une image dynamique à partir d'une série de photographies zénithales réalisée sous des éclairages artificiels disposés à intervalles réguliers mais avec des angles différents.

16. Étude réalisée par Thierry Lejars, directeur de recherche au CNRS, UMR 8546 AorOc ; travaux de restauration réalisés en 2017 par Renaud Bernadet pour le projet CAECINA «Contacts et acculturation dans l'Étrurie Classique: images, notions, artefacts», retenu par l'Agence nationale de la recherche dans le cadre de l'appel d'offre 2013 «Métamorphoses des sociétés, émergences et évolutions des cultures et des phénomènes culturels». Labex Transfers (<http://www.transfers.ens.fr/>) et Pôle muséal des Marches.

17. N° 1936 de la tombe IV-V.

18. La tomographie RX a été effectuée par le laboratoire Tec Eurolab s.r.l.

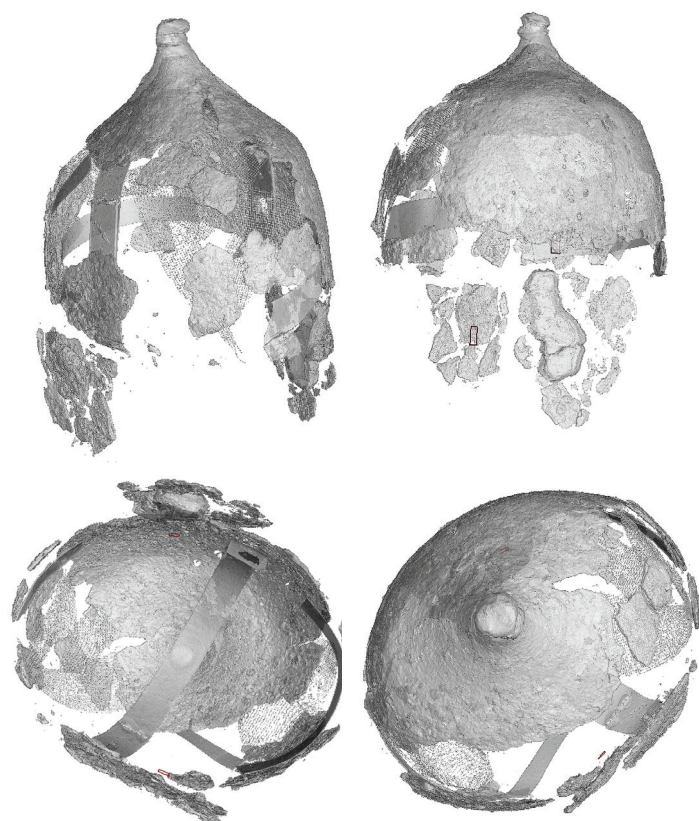
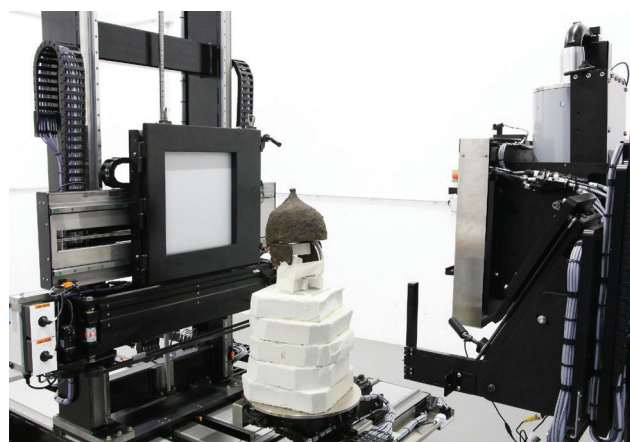
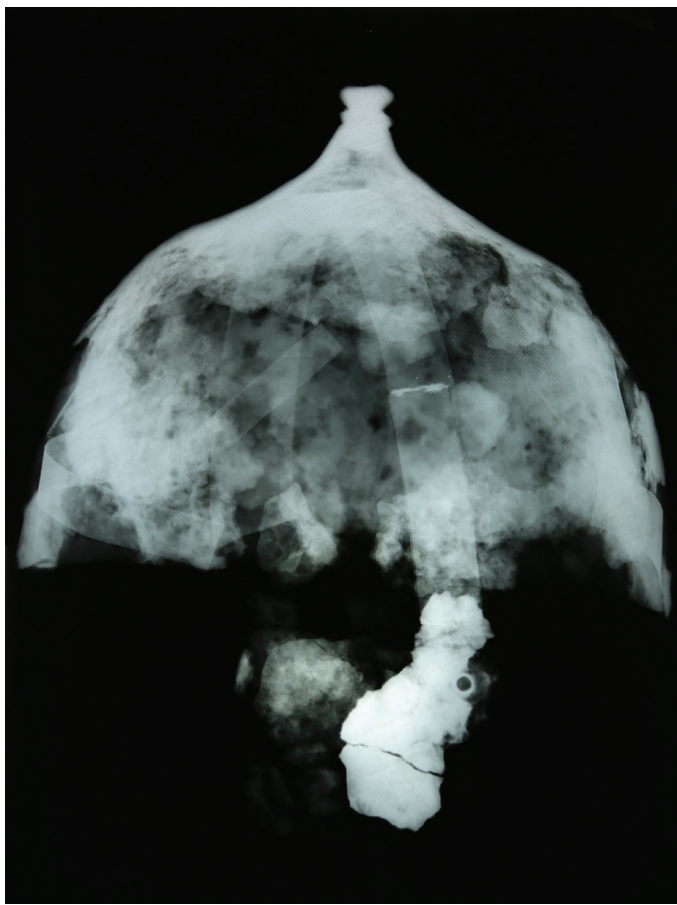


Fig. 9 (ci-dessus, en haut). Casque en fer de la tombe 4/5 de Montefortino à Arcevia (Italie) dans son état actuel.

© Pôle muséal des Marches (Italie) / R. Bernadet.

Fig. 10 (ci-contre, en haut). Sur la radiographie RX du casque de Montefortino, le chevauchement des parois de la calotte et des paragnathides n'apporte qu'une lecture sommaire des anciennes restaurations.

Fig. 11 (ci-dessus, en bas). Le casque de Montefortino placé dans l'appareil tomographique industriel (NSI X7500 CT System).

Fig. 12 (ci-contre, en bas). Différentes vues de la reconstruction 3D de la tomographie du casque. Celle-ci permet une localisation précise des fragments originaux et des matériaux de consolidation.

© CNRS UMR 8546 AORoc / R. Bernadet.



Fig. 13. Vue du joug encore en position au niveau de l'encolure des deux chevaux harnachés dans la tombe de Warcq, La Sauce (Ardennes). © Inrap /R. Bernadet.

Le rôle de la tomographie lors de l'étude du mobilier métallique

Le spécialiste chargé de l'étude du mobilier métallique intervient à chacune des étapes précédemment décrites, du terrain au laboratoire. L'analyse passe par une étroite collaboration avec le conservateur-restaurateur dans le choix du prélèvement *in situ*, sa micro-fouille et le nettoyage pour étude ou la restauration des mobiliers, puis par les moyens de conservation mis en œuvre. Dans ce déroulé, l'emploi de la tomographie permet de gagner en efficacité et précision lors des différentes interventions en laboratoire. Elle permet l'accès illimité à une sauvegarde virtuelle des connexions existantes entre diverses pièces, parfois vouées à disparaître, dans les cas complexes d'*assemblages cohérents* ou d'*objets composites*. Cette documentation tomographique facilite ainsi la compréhension des artefacts dans l'espace et favorise leur analyse fonctionnelle. Le cas du joug composite de la tombe de Warcq en est un bon exemple. Écrasé et dégradé lors de sa découverte, cet objet, formé d'un long manchon métallique obtenu par l'assemblage de différents éléments enserrant une pièce de bois et surmonté de six anneaux passe-guides (fig. 13), offrait l'opportunité de documenter pour la première fois les différentes pièces en position fonctionnelle comme leurs modes d'assemblages. La tomographie du prélèvement a permis de s'interroger en particulier sur la manière dont les anneaux passe-guide étaient disposés sur le joug. Deux types ont ainsi pu être déterminés en fonction de leur mode de fixation sur le joug : les anneaux dont le socle épousait le manchon métallique et ceux dotés d'une bélière insérée dans le bois. Jusqu'alors, on ne les connaissait que sous une forme lacunaire ou incomplète ; l'existence de ces deux socles n'avait pas trouvé d'explication concrète et leur combinaison sur un même objet n'avait pas été envisagée (Millet *et al.* 2019). L'observation virtuelle au cœur d'un artefact complète les informations morphologiques et techniques préalablement acquises. En effet, dans le cas du manchon métallique, la possibilité de « naviguer » et d'effectuer des coupes virtuelles au sein du support tomographique permet d'accéder à sa structure interne sans destruction. Le nombre de pièces nécessaires

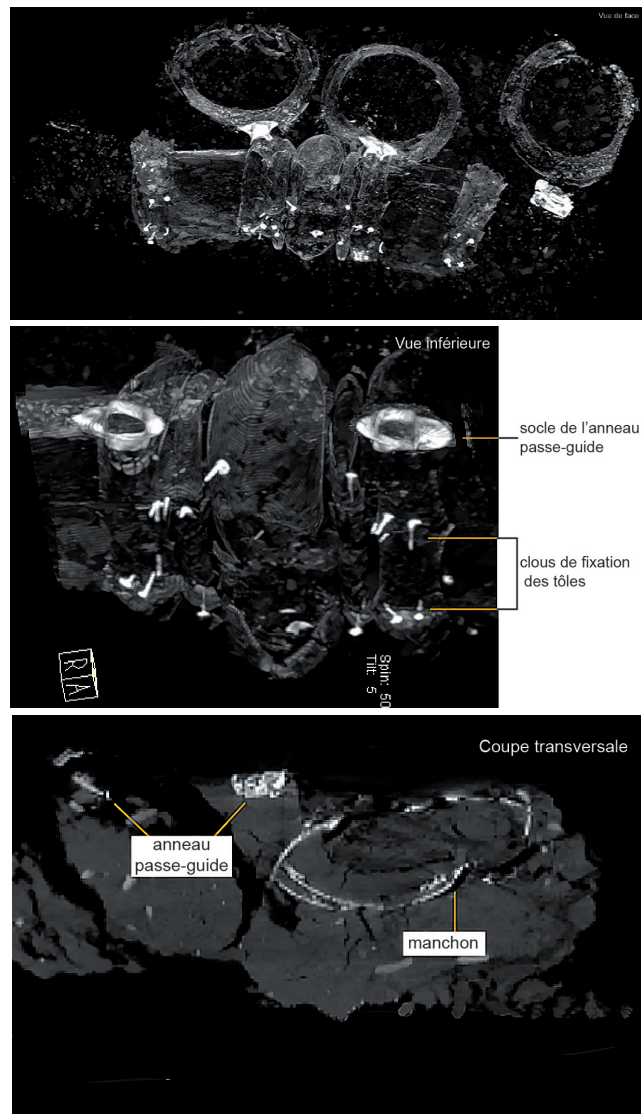


Fig. 14. Tomodensitométries réalisées sur le joug avant sa micro-fouille : vues générale, inférieure et transversale du manchon et des anneaux passe-guide.

© Inrap /E. Millet - Image ET - Imag'in IRMA.

à sa fabrication est ainsi déterminable : neuf éléments en alliage cuivreux ont été mis en forme par martelage, fixés entre eux et maintenus à la pièce de bois par de nombreux petits clous en fer (fig. 14).

La capacité à pénétrer au cœur de la matière dans une interface tridimensionnelle fait de la tomographie un outil analytique absolument performant pour l'analyse. Grâce à cette technique, l'accès à des données masquées, indécryptables à l'œil nu, est possible, comme le montre également l'exemple du lit triclinaire en bronze d'époque romaine (fig. 15), découvert en 1967 à Modène (Italie) (Bernadet *et al.* 2017). Dans le cadre d'une exposition réalisée en 2017¹⁹, un nouveau projet de restauration et d'étude des

19. L'exposition *Mutina splendidissima. La città romana e la sua eredità* au Foro Boario de Modène a été organisée par les musées municipaux de Modène et la surintendance de l'Archéologie, des Beaux-arts et du



Fig. 15 (à gauche). Reconstruction du lit triclinaire de Modène (Via Università) après sa restauration.

Fig. 16 (à droite). Vue des différents éléments métalliques composant le lit triclinaire.

© pour les deux figures : SABAP-Bo / Musée civique archéologique et ethnologique de Modène (Italie) / R. Bernadet.

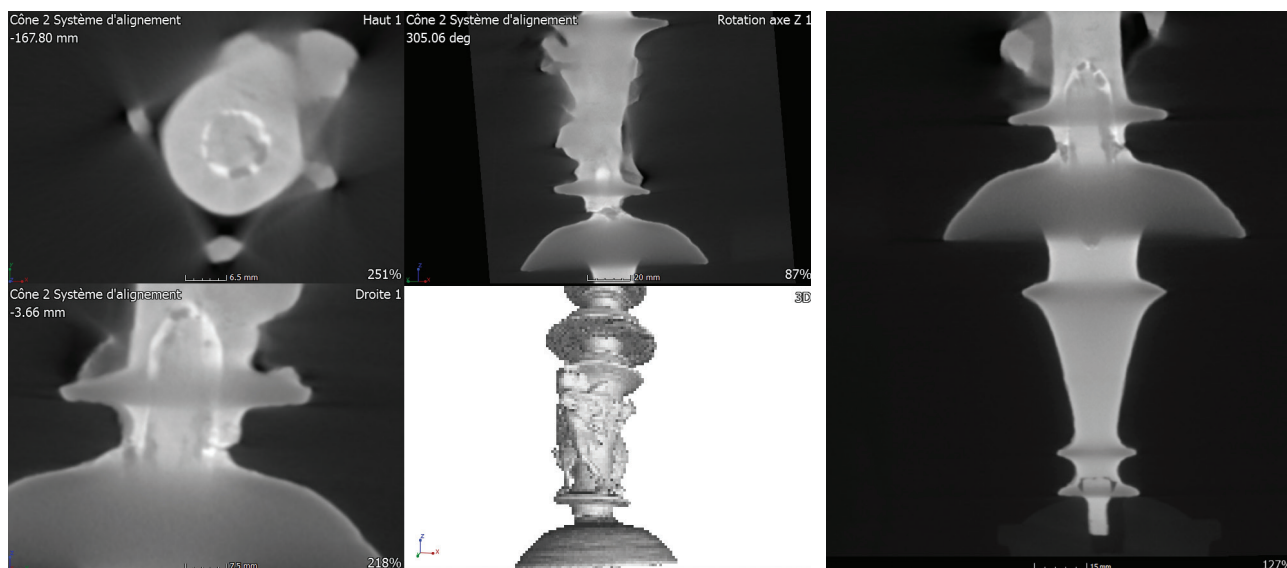


Fig. 17 (à gauche). Capture d'écran montrant les différentes coupes et la reconstruction 3D de l'un des pieds sur lesquels est visible le goujonnage antique.

Fig. 18 (à droite). La tomographie Rx du pied permet d'observer les deux réparations réalisées.

© Musée civique archéologique et ethnologique de Modène (Italie).

pieds du lit²⁰, visait à améliorer leur lisibilité en vue de leur présentation au public et à enrichir leur connaissance (fig. 16). Reposant sur la tomographie, l'analyse a ainsi montré que les pieds avaient été réalisés par un procédé indirect de fonte à la cire perdue²¹. La tomographie a également révélé l'existence de deux réparations antiques

sur l'un d'entre eux²². Au niveau du fût, il est en effet possible de constater une jonction probablement réalisée grâce à un tenon en fer et une brasure au plomb, révélée par sa forte densité (fig. 17). La seconde réparation est visible à l'extrémité du pied, par l'insertion d'une tige terminale (fig. 18). Rien ne nous indique en revanche si ces réparations ont été simultanées, mais il semble probable que la rupture est intervenue un certain laps de temps après la fabrication de l'objet.

Conclusion

L'emploi de la tomographie doit constituer un acte réfléchi, dépendant d'une problématique de recherche. Il s'inscrit

Paysage de Bologne (novembre 2017 - avril 2018). Images (fig. 15-18), publiées avec l'autorisation du ministère du Patrimoine, des Activités culturelles et du Tourisme - Surintendance de l'archéologie, des beaux-arts et du paysage de la ville métropolitaine de Bologne et des provinces de Modène, Reggio Emilia et Ferrara. Reproduction interdite à but lucratif, même indirect.

20. Sous la direction de Sylvia Pellegrini, Musée civique archéologique et ethnologique de Modène (Italie).

21. L'étude Tec Eurolab s.r.l. a révélé la présence de défauts d'intégrité assimilables à des retraits inter-dendritiques.

22. N° 6401.

au sein d'un protocole d'intervention ou d'une chaîne opératoire technique, définie par l'archéologue spécialisé et le conservateur-restaurateur: la bonne succession des différentes étapes se déployant de la fouille au laboratoire de restauration conditionne la qualité des analyses.

Sur les dossiers délicats et complexes, cet emploi constitue un enjeu absolument décisif. La tomographie est particulièrement performante lorsqu'elle est effectuée sur des objets prélevés peu dissociés de leur micro-contexte. La qualité des observations possibles sous tomographie est ainsi corrélée à un bon prélèvement, permettant d'accéder virtuellement aux objets conservés et de poser un premier diagnostic. Selon l'importance de la découverte archéologique (ensemble complexe et/ou exceptionnel), les prélèvements en bloc ou en motte doivent être ainsi privilégiés et effectués par un conservateur-restaurateur spécialisé, éprouvé à ces techniques; ils conditionnent en effet la chaîne opératoire de l'exploitation scientifique des

données, qui passe de la micro-fouille au nettoyage pour étude ou à la restauration ainsi qu'aux analyses archéologiques spécialisées (morphologie, technique, stylistique, typo-chronologie, matériaux, etc.). Le prélèvement des artefacts, tout en préservant leurs relations, rend ainsi accessible une documentation archéologique virtuellement analysable et exploitable par les spécialistes à travers les techniques d'imagerie numérique 3D. Le potentiel scientifique de la méthode, étroitement lié aux capacités « analytiques » de la tomographie, offre des perspectives de recherche innovantes, induisant une approche nécessairement pluridisciplinaire. L'évolution des techniques d'imagerie 3D ouvre la voie à la création de supports analytiques de plus en plus performants dont la portée est mixte, scientifique et pédagogique: l'impression 3D (Nicolas *et al.* 2018) ou encore le couplage entre la modélisation 3D et la tomomodensitométrie en constituent quelques exemples d'applications récentes.

Bibliographie

- BERNADET R., À PARAITRE.** « *Un nuovo restauro necessario per lo studio degli elmi di Montefortino di Arcevia* ». In : A. Cardarelli, M. R. Ciuccarelli, S. Finocchi, N. Frapiccini, A. Naso & M. Pacciarelli (dir.), *Atti del convegno Internazionale di Studi Piceni, 14-16 Novembre 2019, Museo archeologico Nazionale delle Marche*, Ancona.
- . 2013. « Le nettoyage pour étude du mobilier métallique de Zeugma : un compromis à la restauration ». In : N. Dieudonné-Glad, M. Feugère & M. Önal, *Zeugma V. Les objets*. Lyon, Maison de l'Orient et de la Méditerranée : 30-39.
- BERNADET R., PELLEGRINI S., PRANDI I. & Malferrari D.** 2017. « Diagnostica e nuove ricerche sul letto tricliniare con piede istoriate dalla domus di via Università ». In : L. MALNATI, S. PELLEGRINI, F. PICCININI & S. CRISTINA (dir.), *Mutina splendidissima. La città romana e la sua eredità*, catalogo della mostra (Modena, 2017). Rome, De Luca Editori d'Arte : 113-117.
- DE VINGO P.** 2010. « Spilamberto. Archeologia di una necropoli longobarda ». In : A. Breda (dir.), *Il Tesoro di Spilamberto. Signori longobardi alla frontiera, Guida della Mostra, Spilamberto (MO)*, 11 dicembre 2010-25 aprile 2011, Modena, 2010, pp. 29-67.
- DUBUIS B. (DIR.)** 2016. « Lavau, "Zac du Moutot". Un complexe funéraire monumental », rapport de fouille. Saint-Martin-sur-le-Pré, Inrap Grand Est nord, 3 tomes (t. I : 1 062 p. - t. II : 296 p. - t. III, 274 p.)
- JOSSET D. (DIR.)** 2012. « Ymonville, Les Hyèbles. Les occupations celtiques du VI^e au I^{er} avant J.C. », rapport final d'opération. St-Cyr en Val, Inrap Centre Île-de-France, 2 vol.
- MILLET E. (COORD.), avec les contributions de BERNADET R., BLET-LEMARQUANT M., GARNIER N., GRATUZE B., GUIBLAIN T., HELIAS F., NICOLAS T., NIETO-PELLETIER S., ROLLAND J. & TEGEL W.** 2019. « Le mobilier métallique », in B. Roseau (dir.), *La tombe à char de Warcq : études des spécialistes de l'Inrap et autres spécialistes extérieurs*, rapport de fouille archéologique, document intermédiaire (406 p.). Reims, Inrap Grand Est : 28-287.
- MILLET E., BERNADET R. & NICOLAS T.** 2019. « La tombe aristocratique gauloise de Warcq (Ardennes) : méthodes d'analyses des objets composites ». In : S. Eusèbe, T. Nicolas, V. Gouranton & R. Gagne (dir.), *Archéologie : imagerie numérique et 3D*, actes du 3^e séminaire scientifique et technique de l'Inrap, 26-27 juin 2018, Rennes. <<https://sstinrap.hypotheses.org/842>>
- NICOLAS T., GAUGNE R., TAVERNIER C., MILLET E. & BERNADET R.** 2018. « Lift the veil of the block samples from the Warcq chariot burial with 3D digital technologies ». In : A. C. Addison & H. Thwaites (dir.), *Proceedings of the 2018 3rd Digital Heritage International Congress (DigitalHERITAGE) held jointly with the 2018 24th International Conference on Virtual Systems & Multimedia (VSMM2018), 26-30 October 2018, San Francisco*. San Francisco, IEEE : 508-512.