



HAL
open science

Voir à travers le métal. Les techniques d'imagerie appliquées à l'étude des épées de l'âge du Bronze

Léonard Dumont, Tim de Kock, Guy de Mulder, Stefan Wirth

► To cite this version:

Léonard Dumont, Tim de Kock, Guy de Mulder, Stefan Wirth. Voir à travers le métal. Les techniques d'imagerie appliquées à l'étude des épées de l'âge du Bronze. Les Nouvelles de l'archéologie, 2020, Tomographie en archéologie. Introspection d'artefacts et de micro-sites, 159, pp.51-56. 10.4000/nda.9387 . hal-02912522

HAL Id: hal-02912522

<https://u-bourgogne.hal.science/hal-02912522v1>

Submitted on 6 Aug 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Voir à travers le métal

Les techniques d'imagerie appliquées à l'étude des épées de l'âge du Bronze

Léonard Dumont

DOCTORANT

GHENT UNIVERSITY (UGENT), DEPARTMENT OF ARCHEOLOGY

UNIVERSITÉ BOURGOGNE-FRANCHE-COMTÉ, UMR 6298 ARTEHIS

«ARCHÉOLOGIE, TERRE, HISTOIRE, SOCIÉTÉS»

leonard.dumont@ugent.be

Tim De Kock

ASSOCIATE PROFESSOR

UNIVERSITY OF ANTWERP, ANTWERP CULTURAL HERITAGE SCIENCES (ARCHES)

tim.dekock@uantwerpen.be

Guy De Mulder

PROFESSEUR

GHENT UNIVERSITY (UGENT), DEPARTMENT OF GEOLOGY

guy.demulder@ugent.be

Stefan Wirth

PROFESSEUR

UNIVERSITÉ DE BOURGOGNE-FRANCHE-COMTÉ,

UMR 6298 ARTEHIS «ARCHÉOLOGIE, TERRE, HISTOIRE, SOCIÉTÉS»

stefan.wirth@u-bourgogne.fr

Introduction

En archéologie, le mobilier métallique a été l'un des premiers étudiés grâce à la radiographie. Dès la fin des années 1950 en Allemagne, le Römisch-Germanisches Zentralmuseum (RGZM) de Mayence et le Rheinisches Landesmuseum de Bonn se sont dotés d'appareils prévus à cet effet (Hundt 1962: 20; Driehaus 1968: 22-23). Les épées figuraient en bonne place parmi les objets étudiés grâce à cette nouvelle technique (Driehaus 1959, 1961; Hundt 1962, 1965; Ankner 1977; etc.). Ces intenses recherches outre-Rhin ont malheureusement trouvé peu d'échos au niveau européen. En France, l'intérêt pour la radiographie appliquée à l'étude du mobilier est plus tardif et remonte aux années 1970 et 1980 (Mohen 1971, 1973; Vuailat 1976, 1987), tout comme en Suisse (Rychner 1977, 1987). Par la suite, l'engouement pour ces techniques d'imagerie dans le cadre d'interrogations sur les techniques de fabrication du mobilier métallique de l'âge du Bronze a diminué, à l'exception de rares publications, par exemple de la part de H. Wüstemann (1999).

Elles ont néanmoins trouvé un second souffle depuis une dizaine d'années avec le développement de nouvelles techniques comme la tomographie (Mödlinger 2008; Bunnefeld & Schwenzer 2011). Il n'est désormais plus seulement question de déterminer les techniques de fabrication d'objets de manière individuelle: à l'instar de certains travaux fondateurs (Ankner 1977), on cherche alors à étudier de manière systématique un corpus d'objets afin d'en dégager des tendances techniques permettant

de documenter leurs contextes de production (Schwenzer 2004: 141-176; Wüstemann 2004: 259-330; Mödlinger 2011: 21-50; Bunnefeld 2016: 31-38). C'est dans la continuité de ces études qu'en 2018, en partenariat avec les universités de Gand et de Bourgogne, a débuté une thèse traitant notamment des techniques de fabrication des épées à poignée métallique de l'âge du Bronze en Europe occidentale.

Dans un premier temps, nous présenterons brièvement les différentes techniques d'imagerie utilisées pour l'étude de ces armes et leur apport, pour donner ensuite un aperçu des possibilités offertes par une étude à l'échelle supra-régionale des techniques de production des objets en alliage cuivreux.

Les techniques mises en œuvre

Radiographie conventionnelle

La technique la plus répandue en archéologie est la radiographie dite conventionnelle, qui utilise un support argentique. L'image formée sur le film rend compte de la structure interne de l'objet traversé par les rayons X par contraste entre les zones fortement exposées, correspondant à celles absorbant peu le rayonnement, et d'autres qui le sont moins, en lien avec des régions absorbant une plus grande partie. Cette technique demeure très utilisée en raison de la relative facilité de sa mise en œuvre et de son coût raisonnable. Les résultats peuvent être remar-

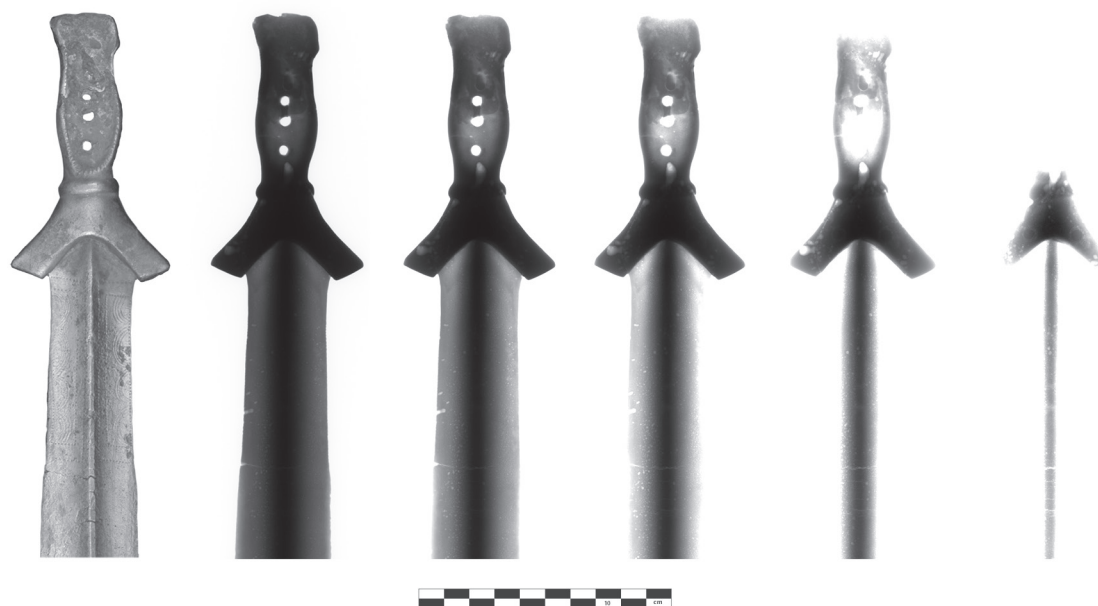


Fig. 1. L'épée d'Asper - Gavere, province de Flandre orientale, Belgique (Bruxelles, musées royaux d'art et d'histoire, n° PHN 581) et sa radiographie. © Léonard Dumont et Tim De Kock/UGCT.



Fig. 2. Réalisation d'une tomographie sur une copie d'épée de l'âge du Bronze (Stadsmuseum de la ville de Gand) à l'UGCT. © Léonard Dumont.

quables, à l'image des radiographies produites au RGZM de Mayence, qui constituent encore aujourd'hui de précieuses sources d'information tout à fait exploitables. Néanmoins, ces clichés souffrent de difficultés d'intégration aux travaux numériques, leur digitalisation se traduisant bien souvent par une perte de lisibilité de certains détails et donc d'informations.

Aujourd'hui, de nouvelles techniques plus adaptées existent en lien avec le développement des applications numériques.

Radiographie numérique

La radiographie numérique remplace le film argentique par un détecteur composé de cellules qui traduisent l'intensité du rayonnement reçu en une image en niveaux de gris. L'image produite existe ainsi immédiatement au

format digital. Ce n'est cependant pas le seul avantage de cette méthode, qui permet en outre des traitements poussés. Il est en effet possible de produire des images avec 65 536 niveaux de gris, bien au-delà des nuances qu'est capable de percevoir l'œil humain. Ces clichés contiennent ainsi des informations « cachées » que seul un traitement informatique peut révéler. L'exemple de l'épée d'Asper (Belgique) illustre bien ce phénomène : à partir d'une seule radiographie numérique il est possible de produire différentes images apportant diverses informations sur la structure interne de l'objet (fig. 1). Chacune d'entre elles aurait nécessité la réalisation d'un cliché en radiographie conventionnelle.

Dans le cadre de nos recherches, des radiographies numériques ont été réalisées avec le tomographe à rayons X du *Centre for X-Ray Tomography* de l'université de Gand ou UGCT¹. Il s'agit d'un système composé d'un tube à rayons X X-RAY WorX XWT 240-SE dont la puissance peut atteindre 280 W. Les images ont été enregistrées à l'aide d'un capteur plat PerkinElmer 1620 CN3 CS de 2024 pixels de côté, doté d'une résolution de 0,2 mm. Les réglages utilisés étaient les mêmes que pour les tomographies, réalisées avec le même appareil.

Tomographie

La tomographie est une méthode permettant une reconstitution en 3D de la structure interne de l'objet étudié. Dans le cadre de nos recherches sur les épées à poignée métallique, cet examen a été mené, comme pour les radiographies numériques, au *Centre for X-Ray Tomography* de l'université de Gand à l'aide du système HECTOR (fig. 2; Masschaele *et al.* 2013). Le tube a été réglé à 200 keV avec

1. <https://www.ugent.be/we/ugct/en> (consulté le 10/03/2020).



Fig. 3. Coupes coronale et sagittale à travers la partie supérieure d'une épée de provenance indéterminée (Bruxelles, musées royaux d'art et d'histoire, n° B 320). © Photos et traitement Léonard Dumont et Tim De Kock/Ugct.

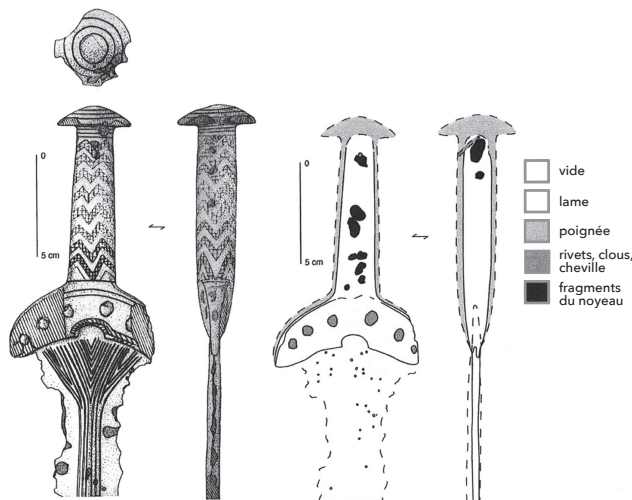


Fig. 4. Dessin et interprétation de la radiographie de l'épée de Pont-du-Château, Puy-de-Dôme (Daugas & Vuailat 2009 : 105, fig. 4).

une puissance variant de 20 W à 45 W selon l'épaisseur et la densité du métal de l'épée inspectée. La technique consiste à acquérir une série de radiographies en tournant l'objet étudié sur 360° pour reconstituer son volume en 3D, avec une résolution de 250 µm. On peut alors en visualiser l'extérieur ou l'intérieur sous différents angles, en réalisant des coupes au sein du modèle 3D (fig. 3).

Ces différentes techniques, dont les applications en archéologie sont nombreuses, rendent ainsi possible l'étude de caractères invisibles depuis la surface des objets métalliques. Elles sont donc tout à fait adaptées à l'étude des techniques de fabrication.

L'objet et sa fabrication

Fonte

L'observation des objets métalliques de l'âge du Bronze au filtre de rayons X documente en effet une partie de leur fabrication par les artisans de l'époque, à différentes étapes de la chaîne opératoire.

Dans le cas des lames d'épées, les régions présentant une forte porosité interne sont ainsi susceptibles d'indiquer la localisation du point d'introduction du métal dans le moule, les pores se concentrant à proximité du cône de coulée. Ainsi, une concentration de cavités autour de la languette traduit une fonte par le sommet de cette partie tandis qu'une forte porosité vers la pointe suggère une introduction du métal en fusion dans le moule par l'autre extrémité (Mödlinger 2008, 2011 : 33).

Dans le cas de la fonte d'objets creux, il arrive que les radiographies révèlent la présence d'argile à l'intérieur de la cavité interne de l'objet étudié (fig. 4). Il s'agit d'un vestige du noyau en terre utilisé pour réaliser un produit creux, peut-être dans le cadre d'une fonte à la cire perdue. Les informations livrées par les techniques d'imagerie sur les procédés de mise en forme des objets en alliage

cuivreux demeurent néanmoins limitées et doivent nécessairement être complétées par d'autres examens, par exemple métallographiques, afin d'observer la structure du métal. Les méthodes utilisant les rayons X révèlent tout leur potentiel dans l'étude d'objets complexes formés par l'assemblage de plusieurs éléments.

Assemblage

Les techniques d'imagerie sont en effet particulièrement adaptées à l'étude de l'assemblage des différentes pièces d'un même objet. Les différences d'absorption des rayons X par divers matériaux permettent d'identifier les composants d'une même pièce et de visualiser les interfaces entre ces éléments.

Ces méthodes sont régulièrement appliquées à l'étude d'objets composites tels que les poignards ou les épées ayant conservé tout ou une partie de leur poignée en bronze. Il s'agit de la manière la plus fiable de déterminer la façon dont ces deux parties sont fixées l'une à l'autre. Le manche est généralement assujéti à la lame par rivetage : la poignée est creuse et la fixation s'effectue par des tiges métalliques traversant la poignée et la lame, typiquement au niveau de la garde. Ce rivetage est souvent renforcé par le blocage de la lame à l'intérieur de la poignée, que la radiographie ou la tomographie révèlent par le contact s'effectuant entre la languette de l'épée, partie supérieure de la lame sur laquelle la poignée est fixée, et les parois internes du manche (fig. 3).

Une alternative couramment utilisée à la fin de l'âge du Bronze est la technique de la sur-coulée. Dans ce cas, au lieu de fondre une poignée creuse puis de la fixer à la lame, les deux opérations sont effectuées en une seule et même étape : le manche est directement coulé sur la languette. À la radiographie, l'emploi de cette technique se différencie sans souci d'une fixation par rivetage : la poignée est pleine et présente généralement une importante porosité

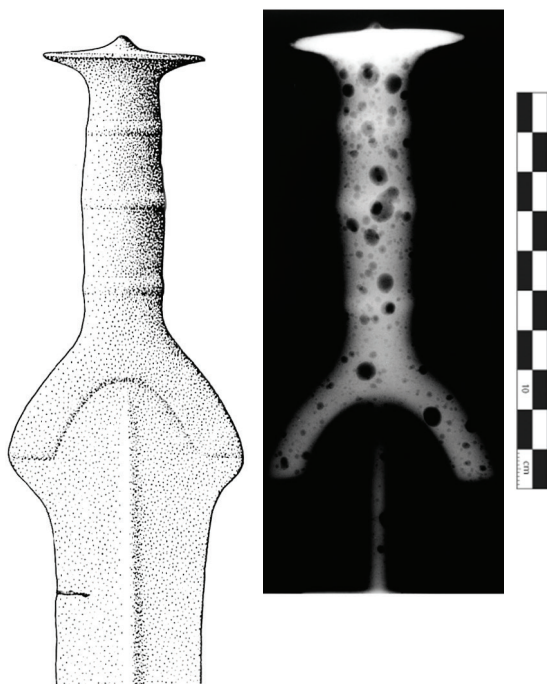


Fig. 5. L'épée de Dillingen - Sarre, Allemagne (Quillfeldt 1995 : 179, pl. 61) et sa radiographie. © J. Driehaus/RGZM, n° R 61/105. Avec l'autrisation du Römisches Museum d'Augsbourg et du Römisch-Germanisches Zentralmuseum de Mayence.

localisée à l'interface entre la languette et le manche coulé par-dessus (fig. 1; voir également Boulud-Gazo 2011 : fig. 8, p. 139). Il est enfin possible de fondre la lame et la poignée d'un poignard ou d'une épée d'un seul bloc. Cette technique demeure néanmoins extrêmement marginale, et les rares exemples documentés révèlent des fontes de médiocre qualité (fig. 5), à moins qu'ils ne correspondent à des contrefaçons ou à des copies, dont certaines ont pu passer pour d'authentiques objets archéologiques (Born 1985; Dumont *et al.* 2020 : 80-81).

Réparation

Finalement, les techniques d'imagerie documentent également les réparations des objets en alliage cuivreux. L'épée d'Asper (Belgique) présente par exemple une réparation dans la partie supérieure de sa languette qui a probablement fait suite à une malformation de cette extrémité au moment de la coulée. Afin de corriger ce défaut, la zone défectueuse a été camouflée par une coulée secondaire venant reconstituer la partie manquante et redonner sa fonctionnalité à l'épée (fig. 1; pour d'autres exemples, voir Drescher 1958 : pl. 12).

Les techniques d'imagerie renseignent ainsi sur les choix faits par les artisans à différentes étapes de la chaîne opératoire. Au-delà de cette possibilité, elles prennent tout leur sens lorsqu'elles sont appliquées à un corpus suffisamment important pour que l'on puisse identifier des tendances techniques propres à des régions et des périodes

définies. Il est dès lors envisageable de les étudier comme des composantes culturelles propres aux artisans et, ainsi, de formuler des hypothèses quant aux échanges dont les produits finis ont fait l'objet.

Techniques et culture matérielle : l'exemple des épées du type Mörigen

L'objet d'étude

Le cas des épées à poignée métallique illustre les possibilités offertes par une étude technique menée à large échelle. L'objectif est de compléter nos connaissances des façons de faire, ce qui devrait nous permettre de décrire des traditions techniques au sein d'un groupe d'épées et de les confronter aux traditions morphologiques auxquelles ces armes appartiennent. Si on peut espérer obtenir des informations sur les préférences des commanditaires à partir de l'examen des formes et des décors, le choix des techniques de production relève quant à lui exclusivement de l'artisan.

Il est ainsi possible de mettre en évidence des disparités techniques au sein de groupes morphologiques cohérents, ce qui suggère que des épées destinées à des consommateurs ayant les mêmes attentes, et appartenant peut-être à la même sphère culturelle (nord-alpine, atlantique, scandinave, etc.), ont été fabriquées par des artisans au savoir-faire singulier, vivant peut-être dans d'autres régions. À l'inverse, l'existence d'un corpus techniquement homogène d'épées se distinguant par leur morphologie et provenant de multiples aires géographiques indique que des artisans ayant des compétences communes pouvaient exécuter des armes à l'intention de destinataires n'exprimant pas les mêmes exigences. Ces éléments conduisent à formuler des hypothèses, voire à proposer des modèles quant à la localisation des potentielles aires de production – point de départ d'une réflexion sur les réseaux de diffusion des savoir-faire techniques, des formes et des décors, sur le modèle de celle déjà conduite dans le nord de l'Allemagne (Bunnefeld & Schwenger 2011).

Pour l'Europe occidentale, les épées du type Mörigen, caractéristiques du IX^e siècle av. J.-C. et reconnaissables à leur garde à ailerons et à leur pommeau ovale légèrement arqué (fig. 6), sont particulièrement intéressantes. Une première étude menée à partir des données disponibles et ne considérant que la fixation de la poignée à la lame (*cf.* 2.2) permet de reconnaître plusieurs traditions techniques, là où la typologie fondée sur la morphologie des poignées ne donne pas de résultats satisfaisants (Dumont 2019 : 101). Ces premiers résultats suggèrent que les épées du type Mörigen étaient indifféremment fabriquées dans plusieurs régions.

Aires de production et échanges

La carte de répartition montre des limites nettes entre les épées munies d'une poignée creuse rivetée (fig. 6-2) et celles dont la poignée a été réalisée par coulée secondaire sur la lame (fig. 6-1). L'Europe centrale, des vallées

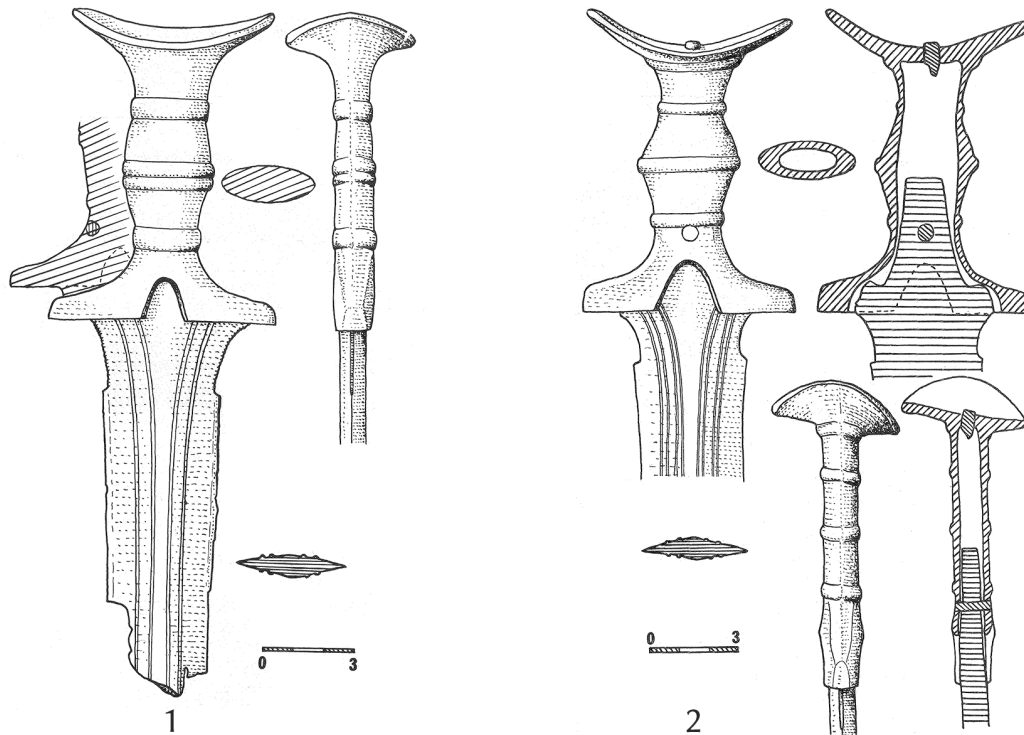


Fig. 6. Les épées du type Mörigen de Vaudrevange/Wallerfangen, Allemagne (Mohen 1971 : 40, fig. 7) et du lac de Neuchâtel, Suisse (Mohen 1971 : 38, fig. 6).

du Rhin et du Danube jusqu'à l'Oder, se caractérise par une nette prédominance des poignées rivetées, tandis que l'usage de la sur-coulée est fréquemment attesté dans l'est de la France, notamment dans la vallée de la Saône et la haute vallée du Rhône (fig. 7).

Les épées du type Mörigen découvertes en France et réalisées à l'aide de la technique de la sur-coulée ne sortiraient donc pas des mêmes ateliers que celles découvertes à l'est de l'axe rhénan. Au IX^e siècle av. J.-C., les échanges auraient emprunté un axe sud-ouest/nord-est, entraînant par la même occasion la diffusion de la forme de la poignée de type Mörigen, qui a visiblement été adoptée en dehors de sa zone de production originelle. En l'absence d'une chronologie précise de ces épées, qui permettrait de proposer un « berceau » où cette forme serait apparue et d'où elle aurait rayonné, il est malheureusement difficile de déterminer le sens de ces transferts. On relève toutefois la présence, dans l'est de la France, d'épées aux caractères hybrides, mêlant des traits Mörigen à des éléments typiques de l'Europe centrale et de la sphère culturelle atlantique. Ce constat laisse penser qu'auraient pu exister en France orientale des ateliers pratiquant la sur-coulée pour imiter les armes produites en Europe centrale (Dumont 2019). Cette hypothèse doit cependant encore être étouffée par une étude technologique et morphologique systématique des épées découvertes en France et de leurs cousines du centre de l'Europe.

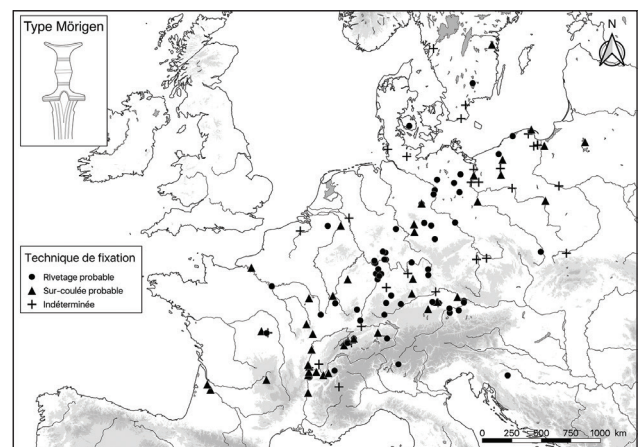


Fig. 7. Répartition des épées du type Mörigen selon la technique de fixation de la poignée (Dumont 2019 : 102, fig. 3), déterminée grâce aux examens radiographiques quand ceux-ci ont été réalisés ou supposée d'après l'état de surface de la poignée.

Conclusion

Différentes méthodes sont ainsi à la disposition des archéologues souhaitant réaliser une étude approfondie du mobilier en alliage cuivreux. La radiographie conventionnelle sur film argentique reste la technique la plus accessible, la plus répandue et la moins coûteuse. La radiographie numérique, bien qu'encore relativement rare, autorise néanmoins un certain nombre de traitements informatiques impossibles à réaliser avec un film numérisé, ainsi qu'une meilleure intégration grâce aux outils numériques. Finalement, la tomographie permet de visualiser en trois dimensions l'intérieur de l'objet.

L'intérêt de ces techniques d'imagerie est multiple. Tout d'abord, elles révèlent des aspects de l'objet invisibles lors d'une inspection de surface et complètent ainsi sa documentation. Bien qu'elles expriment tout leur potentiel dans l'étude d'objets composites, elles sont également précieuses pour des pièces fondues d'un seul bloc, en délivrant des informations sur leur mise en forme.

Enfin, il faut également envisager leur déploiement à une autre échelle que celle de l'objet. Leur mise en œuvre sur un corpus représentatif d'une région et d'une période peut amener à l'identification de traditions techniques permettant de discuter de problématiques relatives aux aires de production et à la circulation des produits.

Bibliographie

ANKNER D. 1977. «Röntgenuntersuchungen an Riegeeschwerten. Ein Beitrag zur Typologie», *Archäologie und Naturwissenschaften*, vol. 1 : 296-459.

BORN H. 1985. «Archäologische Bronzen im Röntgenbild». In : H. Born (dir.), *Archäologische Bronzen, antike Kunst, moderne Technik*. Berlin, Dietrich Reimer Verlag : 112-125.

BOULUD-GAZO S. 2011. «The discovery of a new Tachlovice sword at Pont-sur-Seine, Aube, France». In : M. Mödlinger, M. Uckelmann & S. Matthews (dir.), *Bronze Age Warfare: Manufacture and Use of Weaponry*. Oxford, Archaeopress : 133-152 («BAR International series», 2255).

BUNNEFELD J.-H. 2016. *Älterbronzezeitliche Vollgriffschwerter in Dänemark und Schleswig-Holstein : Studien zu Form, Verzierung, Technik und Funktion*. Kiel, Wachholtz Murmann, 2 vol., 602 p.

BUNNEFELD J.-H. & SCHWENZER S. 2011. «Traditionen, Innovationen und Technologietransfer - zur Herstellungstechnik und Funktion älterbronzezeitlicher Schwerter in Niedersachsen», *Prähistorische Zeitschrift*, vol. 86 : 207-253.

DAUGAS J.-P. & VUAILLAT D. 2009. «Les épées du type Le Cheylounet : un aboutissement technologique au Bronze moyen. Hommage à Jacques-Pierre Millotte et Jacques Briard». In : A. Richard, P. Barral, A. Daubigny, G. Kaenel, C. Mordant & J.-F. Piningre (dir.), *L'isthme européen Rhin-Saône-Rhône dans la Protohistoire. Approches nouvelles en hommage à Jacques-Pierre Millotte*. Besançon, Presses universitaires de Franche-Comté : 97-128.

DRESCHER H. 1958. *Der Überfangguss*. Mayence, Verlag des Römisch-Germanisches Zentralmuseum, 192 p.

DRIEHAUS J. 1959. «Das Ergebnis der Röntgenuntersuchungen der Vollgiff-Bronzeschwerter des Rheinischen

Landesmuseum Bonn», *Bonner Jahrbücher*, vol. 159 : 12-17.

–. 1961. «Röntgenuntersuchungen an bronzenen "Vollgriffschwertern"», *Germania*, vol. 39 : 329-369.

–. 1968. *Archäologische Radiographie*. Düsseldorf, Rheinland-Verlag, 112 p.

DUMONT L. 2019. «Une production locale d'épées à poignée métallique dans l'Est de la France à la fin de l'âge du Bronze?», *Bulletin de l'APRAB (Association pour la promotion des recherches sur l'âge du Bronze)*, n° 17 : 100-108.

DUMONT L., DE KOCK T., LYCKE T., TACK P. &

VANDENABEELE P. 2020. «The true and the fake: archaeometric investigations on two Bronze Age solid-hilted swords from East Flanders (Belgium)», *Lunula. Archaeologia protohistorica*, n° 28 : 79-87.

HUNDT H.-J. 1962. «Zu einigen westeuropäischen Vollgriffschwertern», *Jahrbuch des Römisch-Germanischen Zentralmuseum Mainz*, vol. 9 : 20-57.

–. 1965. «Produktionsgeschichtliche Untersuchungen über den bronzezeitlichen Schwertguss», *Jahrbuch des Römisch-Germanischen Zentralmuseum Mainz*, vol. 12 : 41-58.

MASSCHAELE B., DIERICK M., VAN LOO D., BOONE M. N., BRABANT L., PAUWELS E., CNUDE V. & VAN HOOREBEKE L. 2013. «HECTOR: A 240kV Micro-CT setup optimized for research», *Journal of Physics: Conference Series*, n° spécial 11th International Conference on X-Ray Microscopy (Xrm2012), vol. 463 : 012012.

MÖDLINGER M. 2008. «Micro-X-ray computer tomography in archaeology: analyses of a Bronze Age sword», *Insight*, vol. 50, n° 6 : 323-325.

–. 2011. *Herstellung und Verwendung bronzezeitlicher Schwerter Mitteleuropas. Eine vertiefende Studie zur mittelbronze- und urnenfelderzeitlichen Bewaffnung und Sozialstruktur*. Bonn, Rudolf Habelt Verlag, 275 p.

MOHEN J.-P. 1971. «Quelques épées à poignée métallique de l'Âge du Bronze conservées au Musée des Antiquités Nationales», *Antiquités nationales*, vol. 3 : 29-46.

–. 1973. «Qu'attendre de la radiographie des objets protohistoriques en bronze?», *Bulletin de la Société préhistorique française*, vol. 70, n° 7 : 205-210. https://www.persee.fr/doc/bspf_0249-7638_1973_num_70_7_8250.

QUILLFELDT I. 1995. *Die Vollgriffschwerter in Süddeutschland*. Stuttgart, Franz Steiner Verlag, 277 p. (coll. «Prähistorische Bronzefunde», IV, 11).

RYCHNER V. 1977. «Drei Vollgriffschwerter aus Auvernier», *Archäologisches Korrespondenzblatt*, vol. 7, n° 2 : 107-113.

–. 1987. *Auvernier 1968-1975: le mobilier métallique du Bronze final. Formes et techniques*. Lausanne, Cahiers d'archéologie romande, 198 p.

SCHWENZER S. 2004. *Frühbronzezeitliche Vollgriffdolche. Typologische, chronologische und technische Studien auf der Grundlage einer Materialaufnahme von Hans-Jürgen Hundt*. Mayence, Verlag des Römisch-Germanisches Zentralmuseum, 386 p. (coll. «Kataloge des Römisch-Germanisches Zentralmuseum», 36)

VUAILLAT D. 1976. «Élément de recherche dans l'étude des bronzes protohistoriques en Franche-Comté. La radiographie. Problèmes et résultats», *Dialogues d'histoire ancienne*, vol. 2 : 17-23.

–. 1987. *La paléoméallurgie de la Franche-Comté. Âge du Bronze et âge du Fer*. Paris, Les Belles Lettres, 171 p.

WÜSTEMANN H. 1999. «Zu einigen Ergebnissen radiographischer Untersuchungen an bronzenen Vollgriffdolchen und Vollgriffschwertern». In : W. Budenheim & H. Keiling (dir.), *Zur Bronzezeit in Norddeutschland*. Neumünster, Wachholtz Verlag : 123-144.

–. 2004. *Die Schwerter in Ostdeutschland*. Stuttgart, Franz Steiner Verlag, 356 p. (coll. «Prähistorische Bronzefunde», IV, 15).