

Fondre le bronze dans un atelier métallurgique laténien à Berloz (Hesbaye liégeoise, BE) : propriétés de la terre, mise en forme et utilisation des creusets

Eric GOEMAERE, Thomas GOOVAERTS, Thierry LEDUC,
Lise SAUSSUS & Guy DESTEXHE

1. Introduction

D'anciennes fouilles réalisées entre les années 1980 et 1994 à Berloz et Lamine en Hesbaye liégeoise attestent d'une activité métallurgique de la fin de la période laténienne. Les deux sites sont localisés sur le plateau limoneux hesbignon, au cœur du territoire aduatuque. Celui-ci a livré une importante quantité de sites de cette période attestant d'échanges avec les autres entités territoriales proches de la région de Kontich (Flandre sablonneuse), du bassin du Dommel (Campine septentrionale), du bassin mosan (Campine et Hesbaye orientale), du bassin de l'Ourthe (Ardenne centrale), du sud du Condroz namurois, de la Famenne et de la vallée du Viroin (Fagne/Entre-Sambre-et-Meuse ; Martin, 2017a, 2017b, 2021 à paraître). Au total, 200 sites protohistoriques sont identifiés en Hesbaye liégeoise, sans qu'ils ne soient tous fouillés exhaustivement. Au sein de cet important corpus, onze sites, tous laténiens, ont livré des traces de la métallurgie des alliages à base de cuivre et du fer (Destexhe & Goemaere, 2020; Fig. 1, Fig. 2). Néanmoins, dans la région et alentours, l'artisanat métallurgique de la période est encore peu connu, notamment du fait de la dispersion des vestiges existants, des quantités modestes des témoins retrouvés ou de l'absence d'études spécialisées.

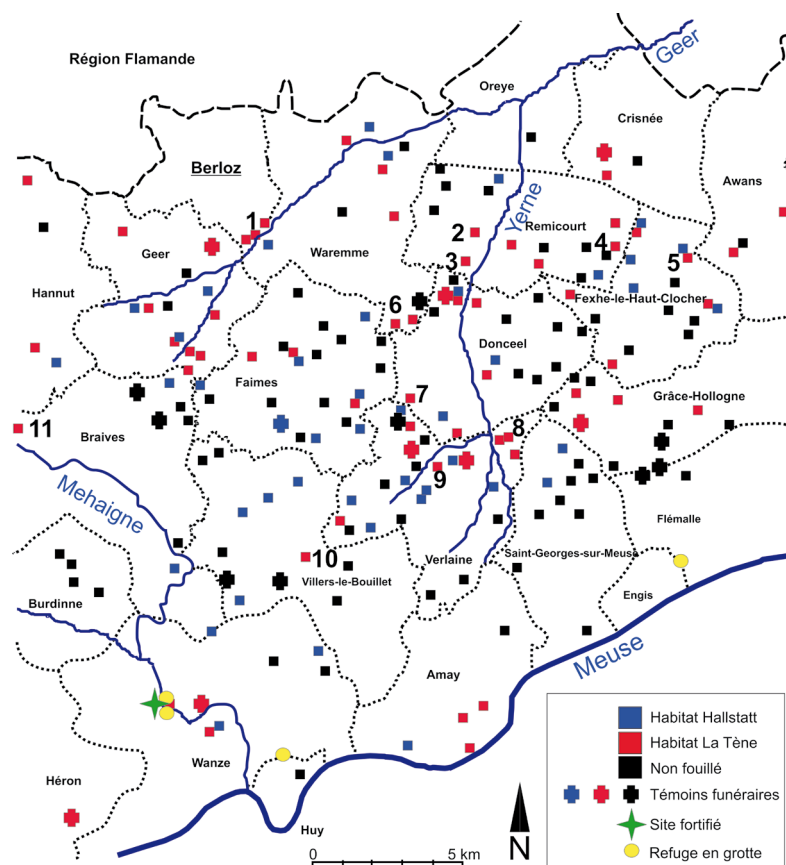
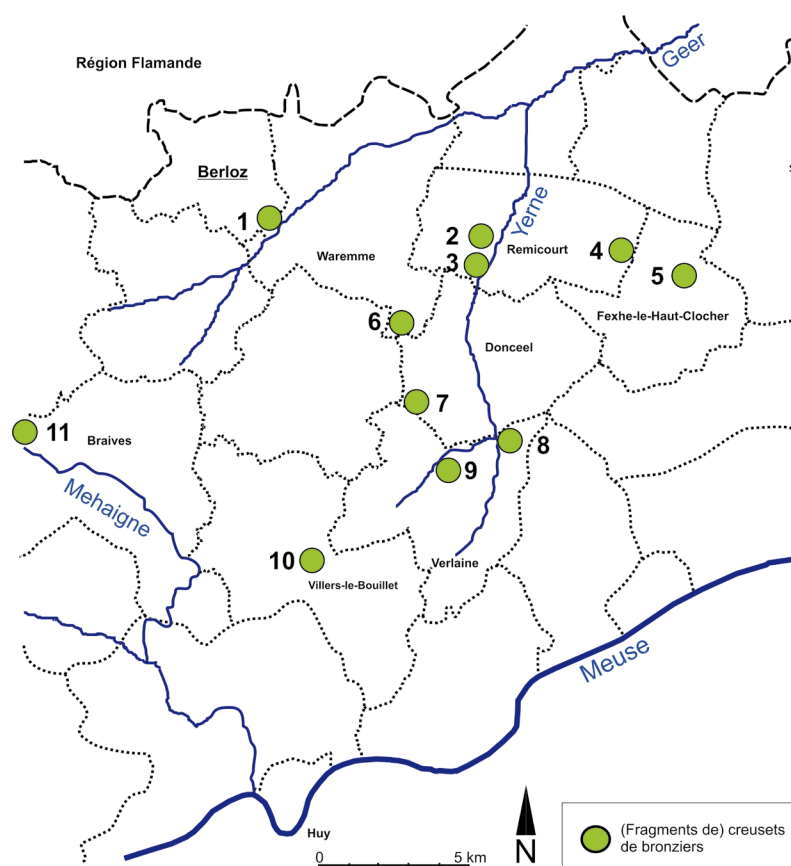


Fig. 1 – Carte localisant 200 sites protohistoriques de Hesbaye liégeoise. Les cours d'eau ainsi que les limites communales sont représentés. Les chiffres numérotés de 1 à 11 localisent les sites où des (fragments de) creusets ont été identifiés (cf. Fig. 2). Modifiée d'après la figure dessinée par G. Destexhe (Destexhe & Goemaere, 2020) et modifiée par les auteurs de cette publication.

Fig. 2 – Localisation des sites protohistoriques du centre de la Hesbaye ayant livré des vestiges de creusets métallurgiques. 1. Berloz ; 2. Lamine (commune de Remicourt) ; 3. Remicourt ‘Dessus les Prés’, fragments de creusets au sein des fosses 1, 2, 3 datées de La Tène A-B (Destexhe, 1984) ; 4. Momalle ‘Moulin à Vent’ (commune de Remicourt), fragments dans la fosse 2 datée de La Tène A-B (Destexhe, 2021 à paraître : figs 9-15) ; 5. Fexhe-le-Haut-Clocher, fragments dans la fosse 1 datée de La Tène C (Destexhe, 1984a, 1984b) ; 6. Bovenistier (commune de Waremme), fragments dans la fosse 1, La Tène D1a-D1b (Destexhe, 1982 ; Martin, 2017a : 79, fig. 63) ; 7. Haneffe ‘Tirtiaux’ (commune de Donceel), fragments dans une grande fosse datée La Tène D1a-D2a (Destexhe, 2016) ; 8. Oudoumont ‘Thier de la Vigne’ (commune de Verlainne), fragments dans la fosse 7 de La Tène C2 (Destexhe, 1990) ; 9. Verlainne ‘Buttiens’, fragments dans une fosse de La Tène B2-C1 (Destexhe & Goemaere, 2018 : fig. 6) ; 10. Warnant ‘Aux Six Voies’ (commune de Villers-le-Bouillet), fragments dans les fosses 3 et 4, datées de La Tène C ; 11. Moxhe ‘Limite d’Avennes’ (commune de Hannut) où le contexte est mélangé (La Tène A-LT D2), deux creusets quasi complets ont été trouvés (Destexhe-Jamotte, 1950 ; Destexhe, 1987 : 72). Carte dressée par G. Destexhe (Destexhe 2012 : 131 ; Destexhe & Goemaere, 2020) et modifiée par les auteurs de cette publication.



Cette contribution vise à caractériser l'ensemble cohérent de déchets métallurgiques découverts à Berloz, de le comparer à ceux de Lamine et d'autres vestiges de la période. Après une brève description des artefacts retrouvés, cet article se concentre sur les creusets de fonderie (Fig. 3). Il s'agit de s'interroger sur les propriétés réfractaires de la terre utilisée, sur leur mode de fabrication et d'utilisation. À cette fin, l'analyse archéologique des déchets est complétée par plusieurs examens archéométriques.

Fig. 3 – Creuset complet de Berloz à gauche, creuset complet de Lamine au centre et, à droite, creuset fragmentaire dont il manque la partie supérieure provenant de Berloz. Photographie : L. Saussus.



2. Contexte archéologique et géologique de Berloz et Lamine

2.1. Le contexte archéologique du site de Berloz

Au nord de la province de Liège, le site archéologique de Berloz (Fig. 1, Fig. 2) a été découvert en 1994 à la suite de travaux d'irrigation (Destexhe & Goemaere, 2020). Il est localisé au sud-est de la commune, au lieu-dit « Campagne de la Tondale », à 300 m de la rive gauche du Geer, 10 m au-dessus du niveau du cours d'eau ($X_{\text{Lambert72}} : 210970$; $Y_{\text{Lambert72}} : 153840$, $Z : 125$ m)¹. Sur une aire de 40 par 80 m, onze structures ont été identifiées, dont trois ont fait l'objet de fouilles, à savoir deux cuvettes (l'une ovale et l'autre circulaire) et un fossé peu profond (deux sections). Outre les déchets de l'activité métallurgique, le matériel archéologique est essentiellement composé de fragments de céramiques provenant de coupes, de jattes et de pots-tonnelets. Une trentaine d'individus sont représentés, auxquels s'ajoute trois balles de fronde en terre cuite. Selon les profils et les décors, les comparaisons établies avec de nombreux sites régionaux et quelques autres du Nord et de l'Est de la France, ainsi que du Sud des Pays-Bas permettent de dater l'ensemble de la Tène C-D1, entre 250 et 100 avant notre ère. Une description complète du matériel céramique et métallique est donnée par Destexhe & Goemaere (2020). Le territoire de la commune rurale de Berloz est riche en vestiges rubanés (Destexhe, 1968 : 489 ; Cahen *et al.*, 1988, 1990 ; Tocki *et al.*, 1988 ; Jadin, 2003 : site 141), protohistoriques (Destexhe, 1986 : 65-66 et pl. X ; Bosquet *et al.*, 2007) et mérovingiens (Fock *et al.*, 2008 : 124).

2.2. Le contexte archéologique du site de Lamine

L'habitat protohistorique de Lamine (commune de Remicourt) est localisé à 6,5 km à l'est de Berloz. Fouillé entre 1972 et 1977, il compte 41 fosses réparties sur une aire de 70 m sur 150 m, dont 20 de l'âge du Fer (de la période Hallstatt D3 à La Tène B2), 15 omaliennes (Rubané) et cinq non datées du fait de l'absence de matériel (Destexhe, 1982, 1987 : pl. 129, 646 ; 2012 : fig. 201 ; 2021 à paraître : figs 52-62). Le site livre aussi 65 trous de poteaux de différents diamètres ne dessinant aucun plan de maison mais certains supportant peut-être un silo hors sol. D'étroits fossés difficilement interprétables correspondent peut-être à des ornières des XIX^e et XX^e siècles. Trois fosses ont livré des petits creusets fragmentaires et un exemplaire complet servant ici de comparaison aux creusets de Berloz : la fosse 23 (La Tène A) de laquelle provient le creuset entier, la fosse 31 où sont trouvés 10 fragments (Hallstatt final – La Tène A) et enfin, la fosse 38 où l'on en compte deux (Hallstatt D3 – La Tène A1 ; Destexhe, 2021 à paraître : figs 55 & 62). En sus, les niveaux des fosses de rejet ont livré un abondant matériel céramique fragmentaire comprenant des éléments de vaisselle, de cuisson et de stockage dont des assiettes et des gobelets carénés de style marnien, ainsi que des fragments de pot à sel, de coupes à bord festonné, des fusaïoles et des pesons. Le matériel lithique, principalement en silex, comporte des remplois comme des lames du Néolithique ancien dont l'habitat occupe le même espace, un couteau à quatre coches du Néolithique récent et d'autres éclats probablement débités sur place.

2.3. Le contexte géologique des sites de Berloz et de Lamine

Berloz se trouve en Hesbaye liégeoise, une région caractérisée par une couverture souvent épaisse de limons éoliens, dont les cartes pédologiques donnent les caractéristiques

¹ Ce sont deux cuvettes, l'une ovale (170 cm pour 260 cm) et l'autre circulaire (D : 110 cm) de 15 à 30 cm de profondeur maximum sous les 30 à 35 cm de couche arable, comblées de rejets et deux sections d'étroits fossés peu profond (largeur : 50 cm, prof. : 30 à 40 cm sous la couche arable).

principales². L'épaisseur de cette couverture n'est pas constante, d'un mètre comme au nord de la vallée du Geer entre Abolens, Poncia (Geer) et le lieu-dit « Champignotte », à plus de 20 m au sud-sud-est de Hannut. Ces limons sont formés d'un matériel silteux brun à gris, voire jaunâtre, parfois carbonaté, renfermant jusqu'à 30 % de feldspaths. Pendant l'Holocène, le limon se décalcifie sur une épaisseur moyenne de 2,50 m et la partie supérieure s'enrichit en argile jusqu'à 30 % (Pingot, 2015). La carte géologique ne tient pas compte de ces dépôts superficiels et représente un écorché des formations méso-cénozoïques présentes sous la couverture limoneuse. La région hesbignonne présente une surface faiblement ondulée, entamée par l'érosion de quelques cours d'eau et par les « xhavées » (chemins creux). La couverture quaternaire est complétée par les alluvions du Geer et de ses affluents. Sous les limons, la formation paléocène (Cénozoïque) de Heers se divise en deux membres avec, à la base, les sables verts à gris clair glauconieux (et micro-éclats de silex) du Membre d'Orp, surmontés des marnes du Membre de Gelinden. La Formation de Heers affleure à Maret. Localement, entre les limons et la Formation de Heers, on observe en sondages des placages de sables glauconifères, parfois argileux de la Formation de Sint-Huibrechts-Hern (Rupélien, Oligocène). Les vallons secs ont vu des colluvions s'accumuler par suite de l'érosion de parcelles agricoles situées à une altitude supérieure. Les plus grandes vallées possédant des ruisseaux pérennes sont tapissées d'alluvions complexes formées de couches de textures différentes. À leur base, des lits de cailloutis et de galets divers, surmontés de limons argileux, voire de tourbe. La partie supérieure de ces dépôts est constituée de plusieurs mètres de limon humifère résultant de l'érosion due à la mise en culture.

Lamine se situe aussi en Hesbaye liégeoise³. Sous la couverture limoneuse, se trouvent les craies de la Formation de Gulpen (Campanien supérieur à Maastrichtien supérieur) avec localement des placages de la Formation de Sint-Huibrechts-Hern.

3. Les déchets métallurgiques de Berloz

3.1. Présentation générale

Sur le site de Berloz, les trois structures fouillées ont livré près de 6 kg de déchets métallurgiques pour un total de 722 artefacts, en plus d'autres types de mobilier comme la céramique, la faune et un fragment de polissoir en grès. S'y ajoute également un fragment de tige en alliage à base de cuivre, objet ou demi-produit probablement obtenu par martelage. La fosse 1 est la plus riche en matériel métallurgique, avec environ 97 % des restes, en masse comme en nombre (Tab. 1). Les autres structures ne renferment que peu d'éléments mais témoignent de cette activité artisanale. L'ensemble est composé de parois de foyer, de creusets et de moules de fonderie, de différents types de scories, de la tige en alliage à base de cuivre, de fragments de fers plats, de charbon de bois et d'un élément en terre cuite non identifié⁴. Les fragments de parois de four et de creusets représentent 40 % en masse de l'ensemble, alors que plus de la moitié des déchets est constituée de scories : 58 % en masse et 61 % en nombre. Les fragments

2 Berloz est localisé sur le bord ouest de la feuille de Landen 41/1 correspondant à la carte géologique Landen – Hannut-Montenaken (feuilles n° 33/5 et 41/1-2) publiée par Pingot (2015). Elle succède à la carte géologique à 1/40 000 Hannut-Montenaken due à A. Rutot et E. Van den Broek (1893).

3 Lamine est situé à la jonction entre les feuilles 41/1 (Hannut) et 41/2 (Montenaken) sur la carte géologique Hannut-Montenaken (Pingot, 2015).

4 Les sédiments des structures n'ayant pas fait l'objet d'un tamisage ou d'un prélèvement, d'éventuelles battitures n'ont pu être trouvées.

de moules sont sous-représentés, puisqu'ils ne composent que 2 % du corpus, en masse comme en nombre. Hormis les cinq creusets complets dont la masse est comprise entre 69,5 g et 114 g, le reste des fragments pèsent individuellement moins de 30 g, et près de 80 % font moins de 10 g (Fig. 4, à gauche). Dans la fosse 1, les fragments devaient néanmoins être plus nombreux, du remontage ayant été effectué avant cette étude. Pour les fragments restants, les tentatives infructueuses de remontage de ces petits fragments suggèrent qu'ils appartiennent à d'autres creusets non conservés. Les parois de four présentent une distribution similaire des individus selon leur masse (Fig. 4, à droite). Près de 75 % des fragments pèsent moins de 10 g, avec seulement une dizaine d'individus au-dessus de 25 g. À l'exception de quelques individus bien conservés ou pour lesquels un remontage a été possible, l'ensemble de Berloz apparaît très fragmenté. Il en est de même pour les scories. Ce constat et la discrétion des fragments de moules conduisent à deux hypothèses non exclusives l'une de l'autre. Il est d'une part possible que la fosse 1 ait été fortement tronquée. Il est d'autre part probable qu'il s'agisse ici d'un dépôt secondaire de déchets, compte tenu également de l'hétérogénéité de la fosse, dans laquelle se mélangent déchets artisanaux et tessons de céramique.

En masse (g)	Fosse 1	Fosse 2	F2 fossés	Fosse 3	Total
Creusets	1 128,8				1 128,8
Parois de four	1 095,5	8		20	1 123,5
Moules	64	26		20	110
Scories type 1	1 272			34,1	1 306,1
Scories type 2	2 078,4				2 078,4
Alliage à base de cuivre	0,8				0,8
Fer	41,5		4		45,5
Charbon de bois	0	22,2			22,2
Autre terre	21				21
Total	5 702,1	56,2	4	74,1	5 836,5

En nombre de restes	Fosse 1	Fosse 2	F2 fossés	Fosse 3	Total
Creusets	113				113
Parois de four	132	5		1	138
Moules	11	1		3	15
Scories type 1	273			9	282
Scories type 2	161				161
Alliage à base de cuivre	1				1
Fer	10		2		12
Charbon de bois		ind.			ind.
Autre terre	1				1
Total	700	6	2	13	723

Tab. 1 – Répartition en masse (g) et en nombre de restes des déchets métallurgiques du site de Berloz.

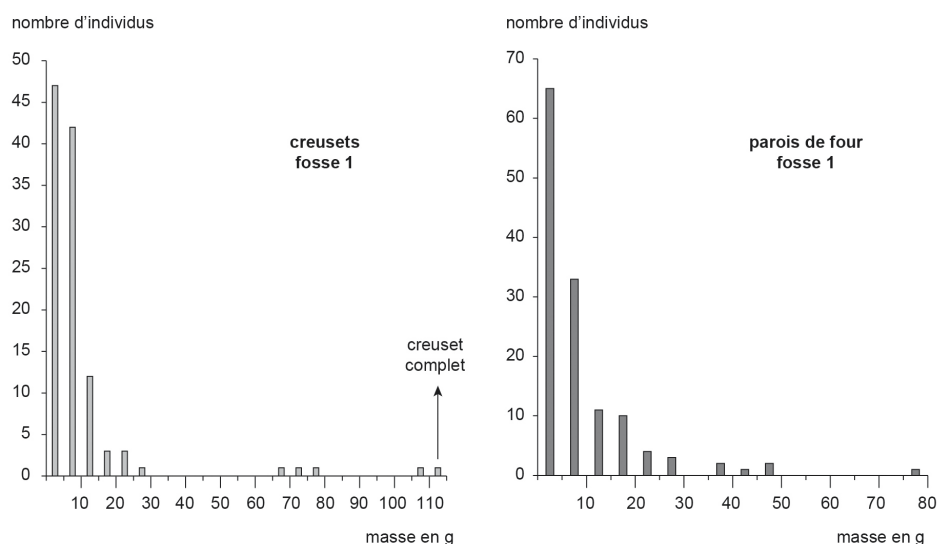


Fig. 4 – Répartition des fragments de creusets et des parois de four provenant de la fosse 1, selon leur masse, en g.

3.2. Aux côtés des creusets : les autres déchets métallurgiques

Un total de 138 fragments pour plus d'1,1 kg ont été identifiés comme des éléments de la paroi d'un ou de plusieurs fours, dont 132 provenant de la fosse 1. Ils présentent tous une surface vitrifiée, exposée aux hautes températures, opposée à une autre surface non vitrifiée, orange à rouge, arrachée du sol en place (Fig. 5). Du fait de l'absence de bord identifié, il faut sans doute écarter l'hypothèse de l'utilisation de blocs-tuyères, c'est-à-dire de plaques perforées indépendantes du sol en place. Neuf de ces fragments comportent une perforation circulaire et la surface vitrifiée montre une légère concavité. Le diamètre des perfora-

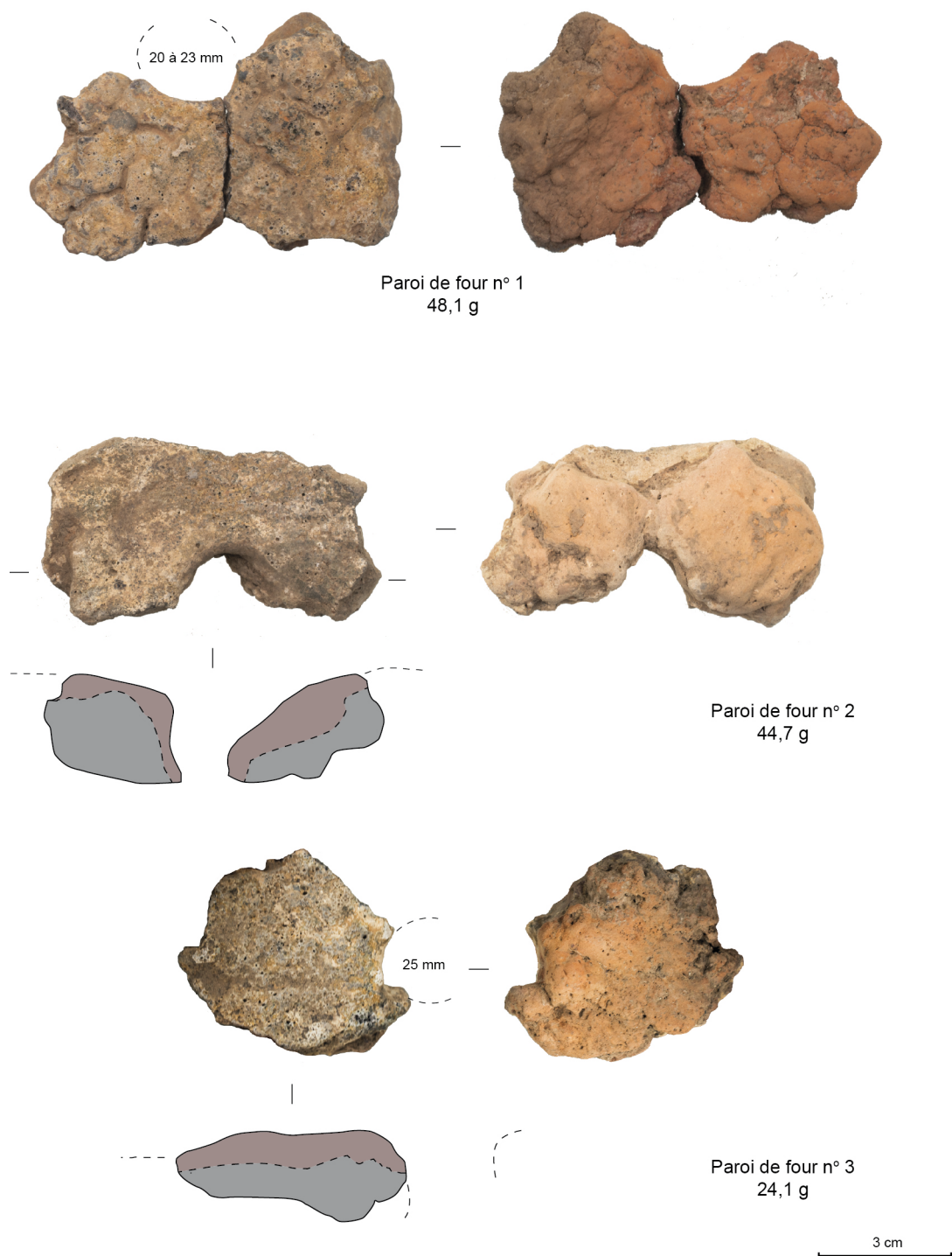


Fig. 5 – Parois de four n°s 1 à 3 découvertes dans la fosse 1 de Berloz. Photographies, dessins et DAO : L. Saussus.

tions varie de 15 à 25 mm. Ces éléments témoignent de l'utilisation d'un four à ventilation mécanique, la perforation permettant de conduire l'air vers le foyer, en y insérant une tuyère reliée à un soufflet ou un chalumeau. Rien ne permet de déterminer le nombre de perforations par foyer. La diversité des diamètres, à mettre en lien avec différentes opérations métallurgiques, pourrait suggérer l'utilisation de plusieurs foyers, ou la réfection d'un seul et même four. D'autres ateliers métallurgiques de la période ont livré ce type de vestiges, par exemple sur le site de Sévaz dans le Jura suisse (Mauvilly et *al.*, 2001 : 26, fig. 8).

Aux côtés des parois de fours, 15 fragments de moules de fonderie en terre cuite ont été reconnus, dont 11 en provenance de la fosse 1. La fonderie consiste à couler un métal liquide, en fusion, dans un moule possédant en creux la forme à produire. Pour un poids total de 110 g, les fragments ici conservés sont de petite taille, avec une masse moyenne de 7 g. Seuls deux individus présentent l'empreinte de l'objet produit (Fig. 6). Pour l'un, le négatif de l'objet comporte au moins deux surfaces planes formant un angle d'environ 130° . Le moule lui-même se présente comme une plaque en forme de pavé droit, d'au moins 48 mm pour la plus grande longueur, de minimum 25 mm pour la largeur et enfin de 14 mm pour la hauteur. Pour l'autre moule, les empreintes forment deux petites cavités sphériques de diamètre semblable, sans lien entre elles. Il s'agit peut-être des négatifs de deux oves, pouvant correspondre à des éléments de bracelets ou d'anneaux

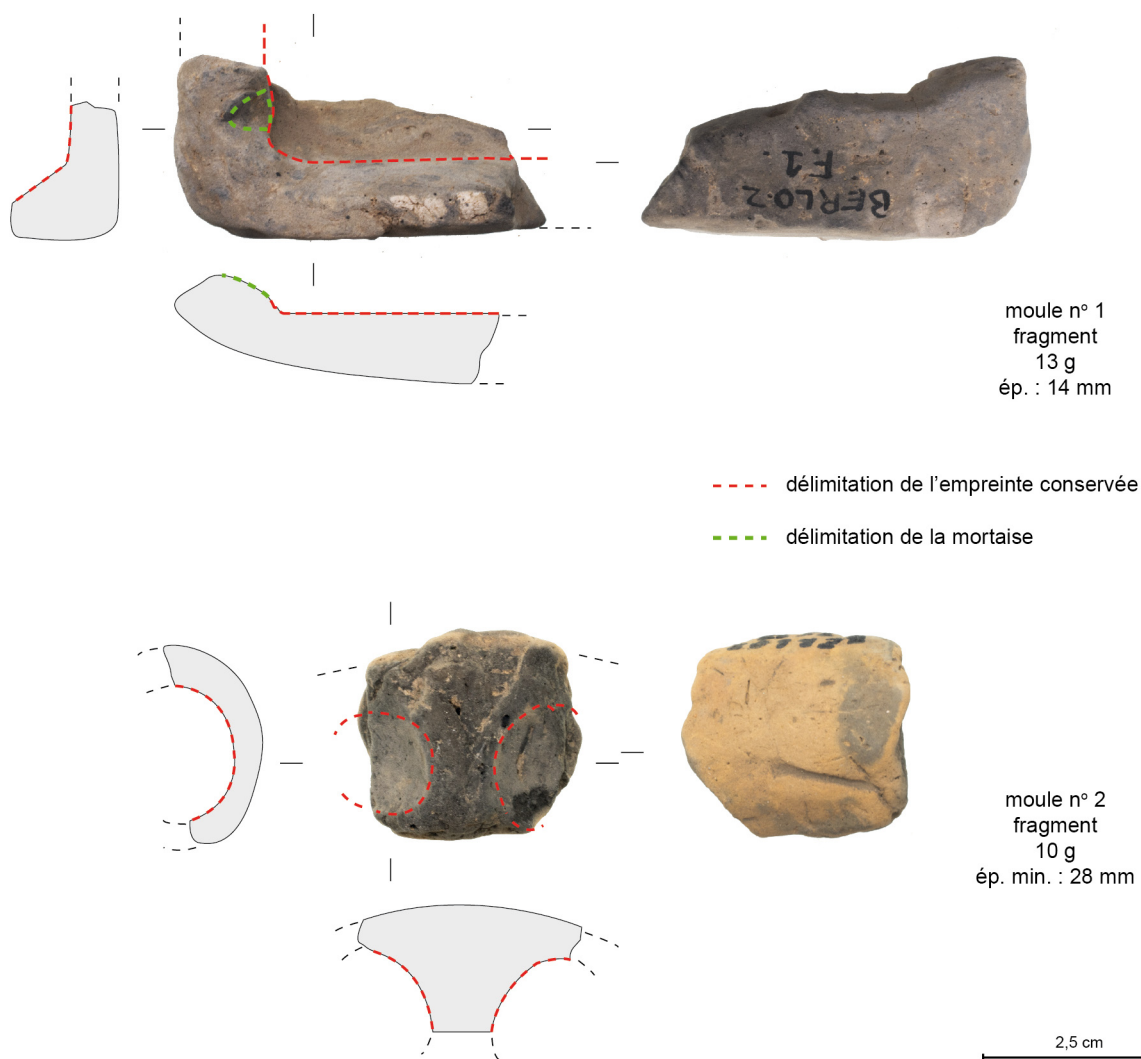


Fig. 6 – Moules de fonderie de Berloz ayant conservé l'empreinte de l'objet à produire.
Dessins : Guy Destexhe. Photographies et DAO : Lise Saussus.

de cheville, se rapprochant des fragments de moules du premier âge du Fer découverts à Varennes-Vauzelles (Pernot & Labeaune, 1999 : 39-41). Pour ce deuxième moule, seule une surface externe courbe est conservée. Pour les deux fragments, il est impossible à partir de ces seuls éléments de déterminer les objets coulés.

Le premier fragment de 13 g est une partie d'un moule composé à l'origine d'au moins deux plaques assemblées. Un plan de joint est conservé, sur lequel on peut remarquer la présence d'un artifice de centrage à une des extrémités du moule, probablement à

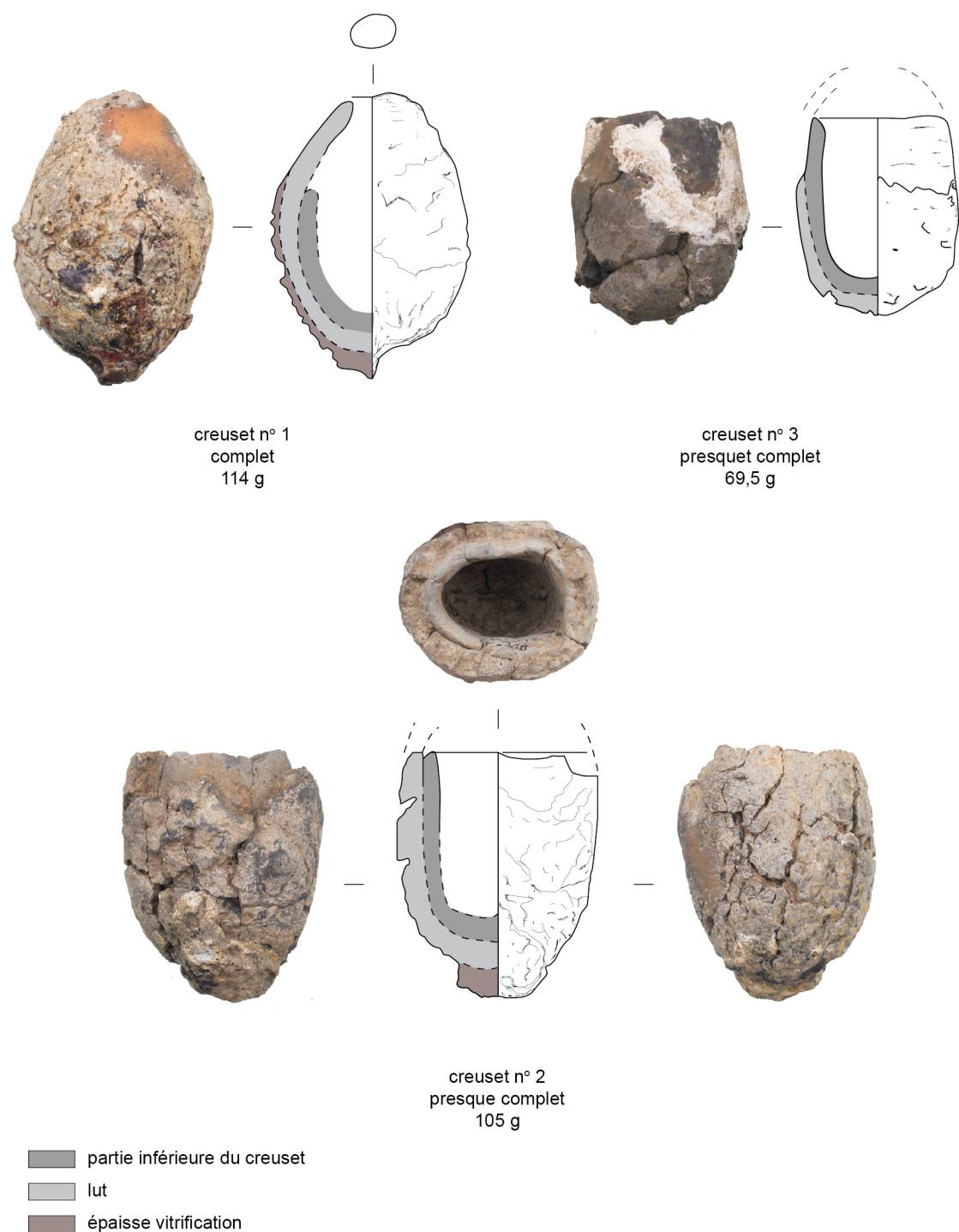


Fig. 7 – Creusets de Berloz n°s 1 à 3. Dessins : Guy Destexhe et Lise Saussus. Photographies et DAO : Lise Saussus.

l'opposé du cône de coulée. Il s'agit d'une mortaise de forme triangulaire, couplée à l'origine avec un tenon sur l'autre partie du moule non conservée. La présence d'une mortaise suggère l'utilisation d'un positif non-fusible, c'est-à-dire d'un modèle solide imprimé dans la terre pour lui donner un volume en creux (Saussus & Thomas, 2019 : 55-59). Une fois le modèle imprimé, simultanément sur chacune des faces du moule, les deux parties du moule doivent être séparées, le modèle retiré, et les parties réassemblées. La mortaise et le tenon permettent alors l'ajustement précis des plaques après le retrait du modèle. Le fragment ne montre néanmoins pas de traces de lut, dont la fonction est de sceller et de rendre étanches les deux parties du moule. Il est possible que le moule n'ait pas été utilisé. Pour le second moule, moins bien conservé, la technique de fonderie ne peut être identifiée, tant il existe un nombre important de variantes (Pernot, 2013 : 20).

Les scories, qui représentent la majorité des déchets en nombre comme en masse, peuvent être distinguées selon deux types. Le premier reconnu correspond à des scories peu denses, bulleuses et argilo-sableuses, résultant probablement de l'altération des parois du foyer, par ramollissement et vitrification de la terre. Elles sont liées au fonctionnement du four pour les activités de fonderie, ou pour la mise en forme du fer pour des travaux particuliers. Le second type est constitué de scories très denses, riches en matériau ferreux. Ce sont des culots de forge et des fragments de culot, probablement de type scories grises denses (Serneels, 1993 : 75-77). Elles sont notamment formées par l'accumulation de pertes en oxydes lors de l'oxydation du métal à chaud. Ces culots présentent un profil plano-convexe et une forme subcirculaire à ovoïde pour les mieux conservés. Par ailleurs, certaines scories présentent un faciès mixte, avec des parties argilo-sableuses. D'autres sites laténiens attestent la coexistence du travail des alliages à base de cuivre avec celui du fer (notamment Zaour *et al.*, 2014 ; Croutsch *et al.*, 2015 : 132-33 ; Séguier *et al.*, 2019 : 77), suggérant la polyvalence des ateliers, des espaces de travail ou des artisans.

4. Les creusets

4.1. Description générale, volume et nombre minimum d'individus

Pour une masse totale de plus d'1,1 kg, 113 creusets ou fragments de creusets sont identifiés. Un seul creuset est complet, quatre sont presque complets. Il s'agit de récipients en terre cuite destinés à la fusion et à la coulée des alliages à base de cuivre. Les creusets de Berloz présentent une forme générale ovoïdes et possèdent une petite ouverture sur leur partie supérieure (Fig. 7, Fig. 8). Le creuset complet de Lamine possède la même forme mais semble avoir été écrasé lors de la coulée, alors qu'il était porté à une température proche de la température de ramollissement de la terre (Fig. 8). Cette déformation très forte lui confère un profil de haricot. La pâte est silteuse, micacée et dégraissée par de menus débris végétaux dont il ne reste que les empreintes. Sur un creuset, une empreinte de textile est observée sur une partie peu vitrifiée de la surface externe (Fig. 9, à gauche). Dans la vitrification, plusieurs individus présentent des empreintes de charbon de bois (Fig. 9, à droite). La base des creusets en particulier porte une épaisse vitrification bulleuse et scoriacée provoquée par de hautes températures ayant entraîné une fusion partielle de la matrice argilo-silteuse. Cette vitrification diminue vers le haut pour disparaître à proximité du col. On note en outre une ou deux marques en creux sur les flancs de certains creusets. Elles peuvent être attribuées à l'usage de pinces pour leur manipulation.

Ces creusets sont composés de deux éléments distincts : une partie inférieure évasée d'une part et une enveloppe de lut d'autre part. Cette enveloppe épaisse recouvre totalement la partie inférieure et forme la partie supérieure en fermant presque totale-

ment le récipient. Cette seconde couche de terre ne laisse qu'une petite ouverture au sommet pour la coulée du métal. L'épaisseur de la double paroi est plus épaisse dans la partie inférieure que dans la partie supérieure. Cette structure en deux couches est visible sur l'ensemble des fragments de parties inférieures, et est également observée sur les creusets entiers grâce à l'acquisition d'images par tomographie, voir *infra*. Le décollement observé entre le lut et la partie inférieure du creuset s'explique par le séchage préalable de la partie inférieure, avant l'application du lut. Certains fragments

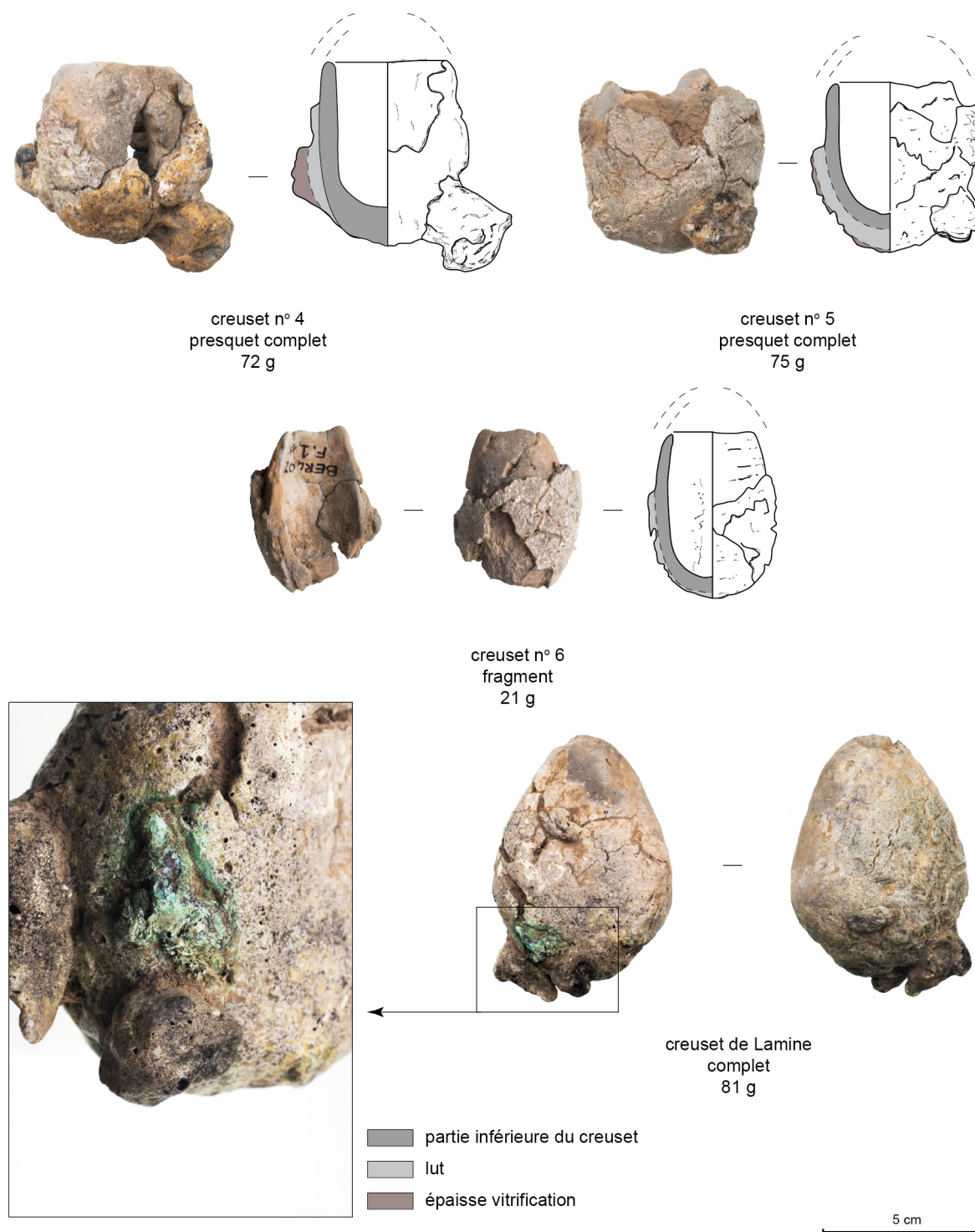


Fig. 8 – Creusets de Berloz n°s 4 à 6 et creuset de Lamine.
Dessins : Guy Destexhe et Lise Saussus. Photographies et DAO : Lise Saussus.



Fig. 9 – À gauche, empreinte de textile dans le lut du creuset n° 1 de Berloz et à droite, empreinte de charbon de bois dans la vitrification de ce même creuset. Photographies : Lise Saussus.

comportent des empreintes sur leur paroi interne, pouvant être des marques laissées par des fragments de métal dans la terre encore plastique, avant que la surface interne ne soit complètement sèche.

Les deux creusets complets étudiés, l'un de Berloz, l'autre de Lamine, mesure 5 à 6 cm de large pour près de 8 cm de haut, sans la couche épaisse de vitrification. Ce sont donc des récipients de faible capacité (Tab. 2). Le volume total du creuset entier de Berloz est d'un peu plus de 40 cm³. Le volume en métal fondu, que l'on peut estimer au quart de la capacité totale, est de l'ordre de 10 cm³, c'est-à-dire environ 90 grammes d'alliage fondu⁵. Une fibule ou un bracelet creux pèsent 5 à 10 g, un bracelet plein autour de 15 g, un torque tubulaire environ 40 g, un torque plein ou torsadé à tampons entre 50 et 75 g (Cahen-Delhay & Hurt, 2013). Le volume d'un creuset permet donc de couler plusieurs objets. À Lamine, le volume total est largement sous-estimé, du fait de l'écrasement du creuset lors de la coulée. Sa capacité initiale devait néanmoins être quelque peu inférieure à celle du creuset complet de Berloz, compte tenu de ses dimensions. Le nombre minimum d'individus dans l'atelier de Berloz peut être évalué avec la masse du creuset complet, d'environ 114 g. Sachant que l'ensemble des fragments de creusets collectés pèse près de 1 129 g, ces déchets correspondent à au moins 10 creusets, soit la coulée de près d'1 kg de métal.

	Creusets de Berloz					Creuset de Lamine
	n° 1	n° 2	n° 3	n° 4	n° 5	
Complet/partiel	Complet	Partie supérieure manquante	Partie supérieure manquante	Partie supérieure manquante	Partie supérieure manquante	Complet comprimé
Capacité totale (cm ³)	36	> 34	> 36	> 21	> 24	13 cm ³
Volume utile au quart en cm ³	± 9	> ± 8,5	> 9	> 5	> 6	> 3,5 cm ³
Volume utile en g	± 81	> 76,5	> 81	> 45	> 54	> 31,5

Tab. 2 – Capacité totale (mesurée à ras bord) des creusets de Berloz et de Lamine complets ou volume minimal (mesuré au sommet de la partie interne des creusets presque complets dont il manque la partie supérieure). Le volume utile est estimé au quart du volume total (ici exprimé en cm³ et en g).

⁵ Avec une densité de 9 g/cm³.



Fig. 10 – Coupe longitudinale passant par le centre du plus grand diamètre du creuset n°1 de Berloz observé en microtomographie aux rayons X (μ CT-Scan). De l'extérieur vers l'intérieur, le lut recouvre et débord largement la partie inférieure du creuset. Une surface de décollement du lut est observée dans le quart supérieur tandis qu'on remarque dans les autres zones la fusion des deux couches en une seule, avec une vitrification de plus en plus forte vers l'extérieur et surtout vers la base. © Image acquise et droit : Erik van de Gehuchte, Service des collections, IRSNB.

4.2. L'apport de la microtomographie

La microtomographie aux rayons X (μ -CT Scan) est une technique de tomographie non destructrice. Appliquée à la céramique, elle mesure l'absorption des rayons X par les différents constituants. Le traitement informatique des données permet de reconstituer des milliers d'images en deux dimensions (coupes transversales, longitudinales en série) puis en trois dimensions. Deux creusets de Berloz et le creuset de Lamine ont été soumis à ces examens à l'IRSNB. Les données recueillies permettent d'observer la structure interne des creusets (Fig. 10, Fig. 11, Fig. 12 et Fig. 13) et de préciser les étapes de leur fabrication. La tomographie met en évidence les parties denses ou riches en métaux. Elle montre ici que l'alliage métallique a tapissé localement la paroi interne du creuset, que des billes d'alliage se sont insérées entre le lut et le corps interne du récipient, mais aussi que l'alliage a fui par des fractures radiales internes et du fait de la déchirure du lut. La déformation des creusets due à leur manipulation à la pince, fortement amplifiée pour le creuset de Lamine, et les déchirures laissant échapper le métal liquide impliquent que ces creusets sont soit à usage unique soit ont été employés un très faible nombre de fois. L'existence d'une seule couche de lut sur les surfaces des creusets et l'absence de réparations écarterait toutefois l'hypothèse de leur réutilisation. La fusion partielle de la terre induisant la déformation du creuset montre que le matériau utilisé possède une très faible qualité réfractaire.

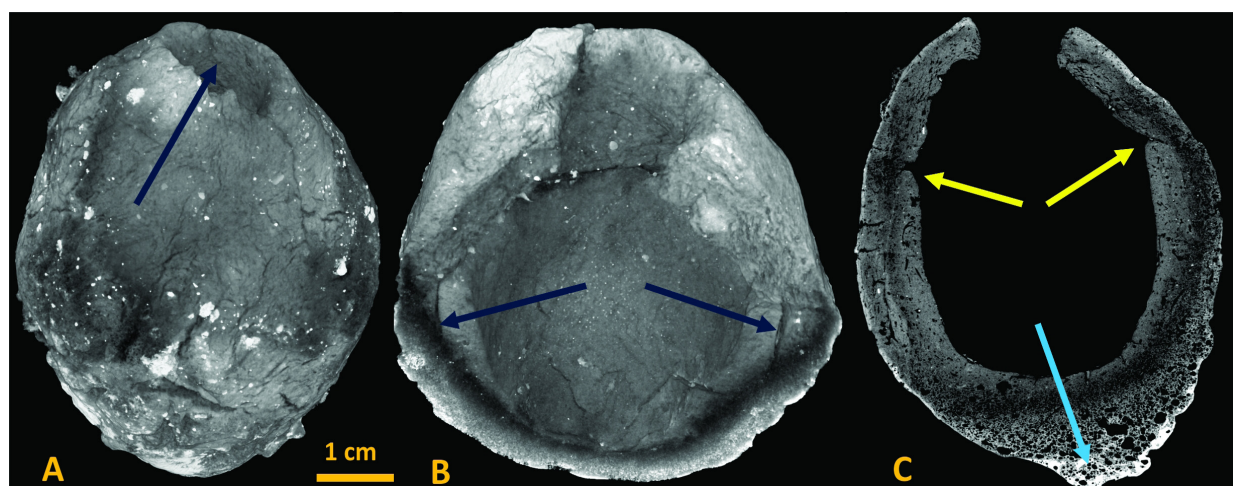


Fig. 11 – Vues reconstituées en trois dimensions (A et B) et autre coupe longitudinale (C) du creuset n°1 de Berloz observé au μ CT-Scan. A. Vue latérale : la flèche indique l'ouverture sommitale du creuset. B. Vue d'en haut : l'extrémité des flèches bleues pointent vers la discontinuité entre la partie inférieure du creuset du creuset et le lut. C. Coupe longitudinale : les extrémités des flèches jaunes montrent la forme du bord du corps interne du creuset montant jusqu'au 2/3 de la hauteur et son ouverture de 3,5 cm ; le lut recouvre et surmonte la totalité du corps en ménageant une ouverture de 1,1 cm à son sommet. La partie scoriacée et vitrifiée est très développée à la base du creuset et la protubérance basale se signale par sa plus grande densité (flèche bleue). © Images acquises et droit : Erik van de Gehuchte, Service des collections, IRSNB.

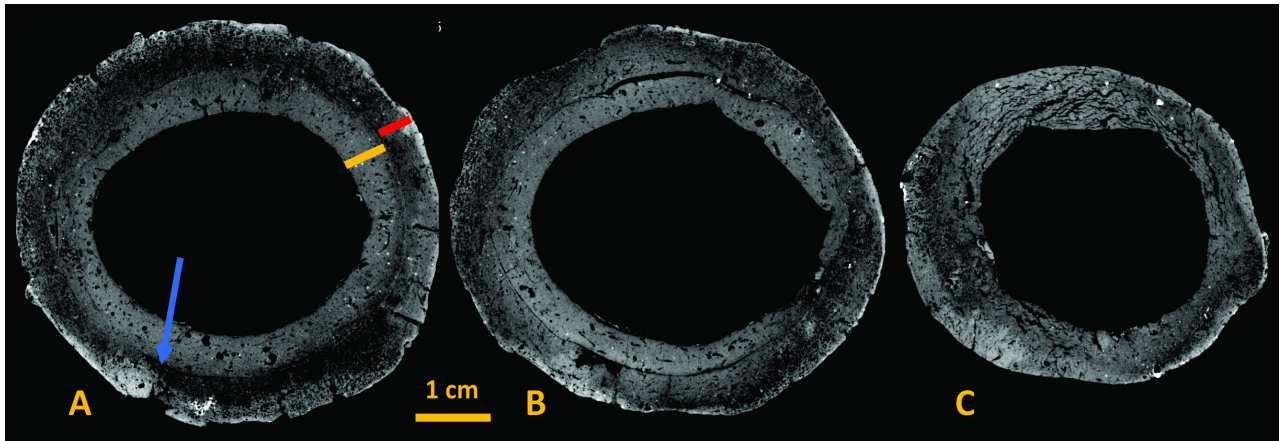


Fig. 12 – Coupes transversales à trois niveaux du creuset n°1 de Berloz réalisées au μ CT-Scan.
 A. Coupe à mi-hauteur : la première couche du creuset est indiquée par le trait jaune, et l'épaisseur du lut est matérialisée par le trait rouge. L'extrémité de la flèche bleue montre une discontinuité locale entre le corps et le lut. Des fractures radiales sont surtout observées sur la paroi externe dans le lut.
 B. Coupe dans la partie supérieure du creuset là où la discontinuité avec le lut est plus importante.
 C. Coupe dans la partie sommitale du creuset là où il n'y a plus que du lut et où se marquent des pores linéaires parallèles aux parois. © Images acquises et droit : Erik van de Gehuchte, Service des collections, IRSNB.

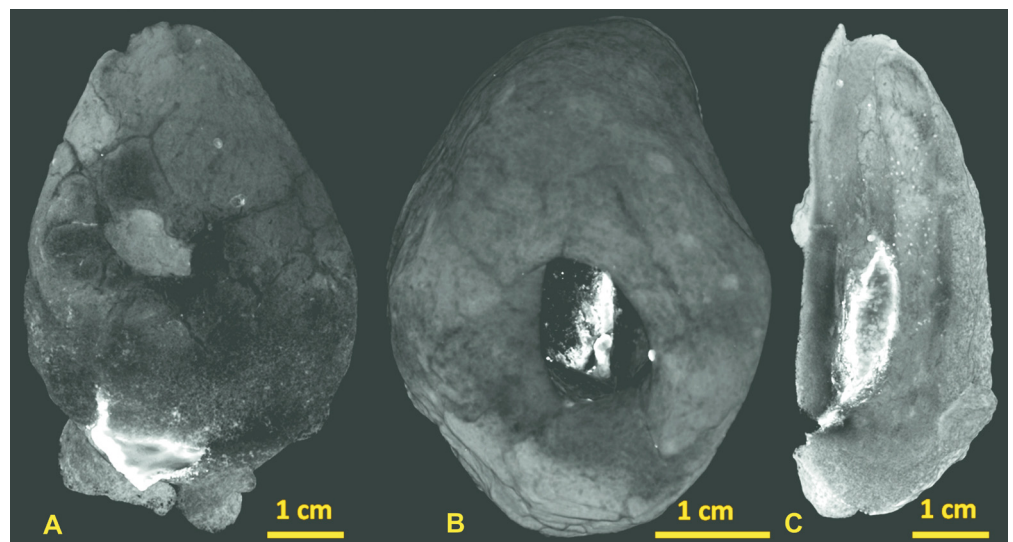


Fig. 13 – Vues du creuset de Lamine reconstituées à partir des données acquises au μ CT-Scan. A. Vue latérale montrant une partie affaissée liée à l'action de la pince au moment de la manipulation et de la coulée, mais aussi des fractures radiales dans la vitrification, des protubérances scoriacées à la base du creuset et, en blanc, l'épanchement vers l'extérieur de l'alliage à base de cuivre. B. Vue d'en haut de l'écrasement du creuset, la déformation de l'ouverture et des restes d'alliage dans le fond du creuset. C. Vue latérale du creuset montrant des restes d'alliage. © Images acquises et droit : Erik van de Gehuchte, Service des collections, IRSNB.

4.3. La fabrication des creusets : hypothèse de chaîne opératoire

L'étude des fragments de creusets et l'examen microtomographique des creusets entiers conduisent à proposer une hypothèse de chaîne opératoire pour leur fabrication. Après pétrissage d'une pâte silteuse riche en quartz additionné de menus fragments végétaux, la partie inférieure du creuset est mise en forme par modelage, jusqu'à l'obtention d'une forme ouverte à fond lenticulaire. Après modelage, le corps du creuset est mis à sécher à proximité d'un foyer. L'artisan dépose le métal à fondre dans cette partie inférieure,

vraisemblablement lorsque la surface interne du creuset n'est pas encore complètement sèche puisque les fragments métalliques ont parfois laissé leur empreinte dans la terre encore crue. La partie inférieure du creuset est ensuite entièrement recouverte de terre et ce lut se poursuit en hauteur pour former un col avec une petite ouverture. Cet espace d'environ 1 cm permet d'introduire éventuellement de menus fragments d'objets à recycler ou de petits morceaux de métal, pour abreuver le creuset en cours de fusion, dans le cas de l'élaboration d'un alliage par exemple. L'ensemble luté est mis à sécher, puis à cuire. Selon la trace observée sur le creuset n°1 de Berloz, le creuset semble enveloppé dans un textile, pour éviter un séchage trop rapide et par conséquent l'apparition précoce de fissures. Les creusets sont disposés dans le foyer, parmi des charbons de bois. La ventilation mécanique est dirigée vers le bas des creusets, et est actionnée par un soufflet ou un chalumeau jusqu'à ce que le métal soit liquide. Ce dernier est ensuite coulé dans les moules par l'ouverture sommitale des creusets.

4.4. Des creusets ovoïdes : une pratique laténienne répandue

Les creusets de Berloz et de Lamine possèdent une forme ovoïde presque fermée. S'il est possible que certains autres récipients métallurgiques protohistoriques de la région montrent la même morphologie et un mode de fabrication identique, on ne peut totalement l'affirmer du fait de leur importante fragmentation. En dehors de cette région, s'il existe d'autres formes de creusets pour la période, notamment des récipients ouverts, les creusets ovoïdes, presque fermés, sont très répandus (Modaressi-Tehrani, 2004 : 30-31, pour une revue bibliographique). Ils se distinguent des creusets ouverts majoritaires à l'âge du Bronze, fonctionnant davantage en fusion oxydante, tels que la majorité des récipients découverts au Fort-Harrouard dans l'Eure-et-Loir (Queixalos et al., 1987 : 23).

Dans les régions voisines, des comparaisons peuvent être trouvées dans des ensembles de La Tène ancienne. Dans un atelier de Souffelweyersheim dans le Bas-Rhin, le volume, la morphologie et le mode de fabrication des creusets sont très semblables aux récipients étudiés ici (Lefranc et al., 2008 : 56-58 et 69-71), de même vers l'ouest, à Condé-sur-Ifs en Normandie (Zaour et al., 2014 : 174-75) ou à Bourges (Cher), pour un plus petit contenant (Mille, 2007 : 171). Une activité métallurgique datée de La Tène C sur le site de Lacoste en Gironde a également laissé des vestiges de creusets lutés semblables, mais ceux-là étaient en outre probablement obturés par un bouchon (Lagarde-Cardona et al., 2013 : 301).

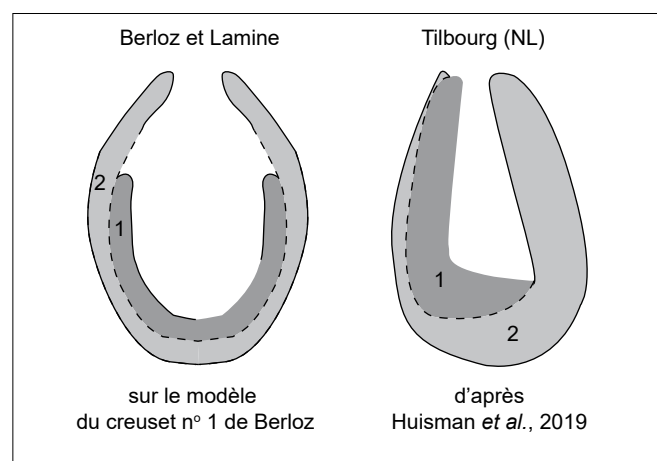


Fig. 14 – Comparaison de la forme de la partie inférieure du creuset et du mode de fabrication du récipient entre les creusets de Berloz et Lamine et ceux découverts à Tilbourg aux Pays-Bas. DAO : L. Saussus, d'après Huisman et al., 2019. Les creusets ne sont pas à l'échelle.

D'autres sites témoignent d'une variante. Vers le nord, à Tilbourg (Tilburg), à environ à 120 km de Berloz, des creusets de La Tène ancienne présentent un profil général ovoïde et une petite ouverture sommitale, mais la forme de la partie principale du creuset et le mode de fabrication diffèrent de ce qui est observé à Berloz et Lamine (Huisman et al., 2019, 2020). La partie principale prend la forme d'une large cuillère recouverte de lut, ce manteau formant une épaisse paroi par-dessus le métal (Fig. 14). De semblables creusets bivalves contemporains sont trouvés à Sévaz en Suisse (Mauvilly et al., 1998, 2001). C'est probablement la même configuration remarquée à Cologne dans le nord de la Rhénanie (Rehren, 2002) et pour un fragment de Singen-am-Hohentwiel, dans le Bade-Wurtemberg (Hopert, 2003 : pl. 9).

Non loin de Tilbourg, à Oss-Ussen, deux exemplaires de la seconde moitié du V^e siècle av. J.C. peuvent être rapprochés de ceux de Berloz et Lamine, mais ils sont brisés dans leur partie supérieure (Van den Broeke, 2012 : 88 et 99)⁶. La jonction entre la partie basse du récipient et le lut qui en forme le chapeau est en effet un point de rupture fréquent. Sur certains sites, il est possible que des creusets en apparence ouverts et munis d'une couche de lut, aient été en réalité des creusets quasiment fermés (voir quelques exemples dans Zaour *et al.*, 2014 : 174). Dans l'état des connaissances, les découvertes de creusets ovoïdes presque fermés témoigneraient de pratiques propres à la culture laténienne et dépassant l'aire hesbignonne. Si la forme générale est la même, il existe cependant au moins deux modes de fabrication distincts, correspondant à différentes solutions des fondeurs pour parvenir finalement au même résultat. Le principal avantage de ces creusets est de limiter l'oxydation et la perte de métal lors de la fusion. Il demeure à présent à poser la question d'un lien entre le mode de fabrication en deux couches et la qualité de la terre utilisée.

5. La terre des creusets : propriétés et altérations

5.1. Méthodes d'analyses

Différents examens archéométriques ont été réalisés à l'IRSNB. Des lames minces couvertes (pour observation au microscope optique polarisant) et des lames minces polies non-couvertes (pour observation et analyses au MEB) ont été taillées dans les fragments de creusets du site de Berloz ainsi que dans des tessons de céramique non métallurgique pour comparaison. Pour les fragments de creusets, les lames minces ont été réalisées de sorte qu'elles comprennent les deux couches de terre. Elles ont été examinées au microscope optique polarisant. Les individus complets et les moules de fonderie n'ont été soumis à aucune analyse destructive.

Les sections polies et les lames minces polies (non couvertes) réalisées sur des fragments de creusets ont été observées et analysées au microscope électronique environnemental à balayage (MEB), assorti d'un détecteur BSE (électrons rétrodiffusés)⁷. Des analyses chimiques semi-quantitatives ont été effectuées avec un spectromètre à dispersion d'énergie (EDAX Apollo 10 SDD *silicon drift detector*) à 23 kV de manière à couvrir le spectre des longueurs d'onde de tous les éléments susceptibles d'être présents. Par ailleurs, l'analyse par diffraction des rayons X (DRX) permet de caractériser la composition minéralogique des différents constituants des deux couches des creusets et de faire le lien avec les observations en lames minces et les analyses chimiques. Les parties des échantillons sélectionnés sont réduites en poudre puis finement broyées en évitant le surbroyage⁸. La poudre est tamisée selon une maille de 53 µm et la partie plus grossière est rebroyée jusqu'à ce que toutes les cristallites soient de dimension inférieure à 53 µm. Les poudres, préparées sous forme d'agrégats désorientés, sont chargées dans un support en acier puis mesurées dans une configuration Bragg-Brantano à l'aide d'un diffractomètre PANalytical Empyrean (tube de cuivre λ : 1,5418 Å avec un filtre

6 L'auteur omet de préciser si les creusets sont composés de deux couches de terre.

7 Pour les sections polies, les échantillons ont été sciés puis enrobés sous vide dans de la résine époxy (STRUERS, EpoFix kit). La surface a été polie à la main avec du carbure de silicium jusque 4000 mesh (environ 3,75 µm) puis à la machine (STRUERS) avec des solutions aqueuses diamantées de 3 µm puis de 1 µm. Le MEB utilisé est le FEI Quantum 200. Ce MEB environnemental évite d'avoir à effectuer la métallisation des échantillons.

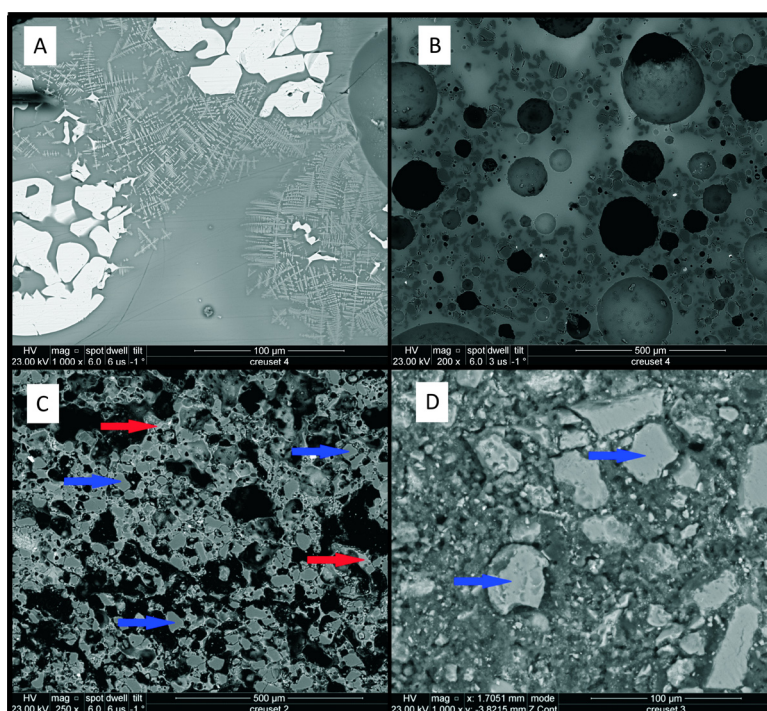
8 À l'aide d'un broyeur planétaire de laboratoire de marque Fritsch.

au nickel, un détecteur de 40 x 300 x 40 mm). La zone étudiée est comprise entre 6 et 69 degrés 2-theta. L'interprétation semi-quantitative se fait à l'aide du logiciel *Visual Crystal 6*.

5.2. Les examens pétrographiques en lames minces et au MEB

L'examen pétrographique des lames minces et des objets polis au MEB apportent de nombreuses observations communes. Les observations ont été menées à différentes hauteurs du lut et du corps du creuset. Elles montrent une pâte complètement fondue en surface quand on se rapproche du fond des récipients (Fig. 15A). Au microscope optique polarisant, la vitrification progressive de la matrice argileuse se marque par la forte diminution de la biréfringence⁹ puis son absence totale dans les phases vitreuses. L'abondance et le diamètre des pores à section circulaire diminuent de la paroi externe du lut vers la paroi interne du creuset avec une discontinuité à l'interface entre le lut et le corps. Ces pores sont vides (exempts de minéraux secondaires) et non connectés (porosité fermée). Les structures fluidales visibles dans la partie externe du lut se caractérisent par l'homogénéisation progressive des compositions chimiques aux dépens des anciennes inclusions et constituants de la matrice. À l'opposé, en s'éloignant de la paroi externe du creuset, la composition du verre est liée à celle des constituants qui fondent les premiers. Dans les zones du lut soumises à des températures moindres (partie supérieure du creuset), on observe surtout la déshydroxylation (amorphisation) des minéraux argileux et la formation d'une bordure réactionnelle autour des grains.

Fig. 15 – Images prises au MEB des parois de 4 creusets. A. Surface fortement vitrifiée du lut. Les globules d'oxyde de fer (blanc) et les dendrites de wüstite (gris clair) sont noyées dans une phase vitreuse riche en silicium (gris moyen). B. Zone du lut moins vitrifiée riche en vésicules rondes et en grains de quartz fondus en périphérie. C. Zone faiblement vitrifiée à structure squelettique. Les grains de quartz (flèches bleues) ne sont pas fondus et se distinguent dans la pâte. La matrice argileuse vitrifiée apparaît plus claire (flèches rouges). D. Pâte non vitrifiée du corps d'un creuset. Les grains de quartz (flèches bleues) ne montrent aucune trace de fusion, sont entourés par un vide (« ring void ») et ont des bordures nettes et un contour subanguleux. La matrice argileuse est grenue et poreuse. Images MEB : T. Leduc, IRSNB.



⁹ La biréfringence est la propriété physique d'un matériau dans lequel la lumière se propage de façon anisotrope. Dans un milieu biréfringent, l'indice de réfraction n'est pas unique, il dépend de la direction de polarisation de l'onde lumineuse. Lorsqu'un rayon lumineux pénètre dans un cristal, il se dédouble en deux rayons de polarisation différente qui se propagent avec une vitesse différente. C'est une propriété optique/physique des minéraux cristallisés observée au microscope optique polarisant en lumière doublement polarisée. Avec d'autres propriétés optiques, la biréfringence aide à la détermination des minéraux observés en lames minces (pour une épaisseur fixée conventionnellement à 30 µm par les minéralogistes). La perte de cristallinité des minéraux sous l'action du chauffage, puis leur fusion, se marquent respectivement par un abaissement significatif de la biréfringence puis de sa disparition.

La matrice vitreuse est surtout silico-alumineuse (Tab. 3). Elle renferme de nombreux éléments chimiques (fer, calcium, potassium, phosphore, magnésium et sodium) issus de la fusion de la matrice argileuse riche en quartz et en autres inclusions. À mesure que l'on pénètre vers l'intérieur de la paroi du creuset, des grains détritiques de quartz partiellement fondus sont observés en périphérie, baignant dans une matrice vitreuse (Fig. 15B) et l'analyse chimique de la matrice s'appauvrit légèrement en silice. D'autre part, les zones très partiellement vitrifiées (Fig. 15C) ou non vitrifiées (Fig. 15D) montrent une structure squelettique dans laquelle les grains de quartz sont encore bien visibles, et plus localement ceux de feldspath. La phase vitreuse possède une composition chimique très hétérogène dominée par la silice (de 52 à 67 % en poids d'oxyde), suivie par l'alumine (de 4 à 21 %), le fer (de 4 à 29 %), le phosphore (jusqu'à 35 %), le calcium (de 1 à 18 %) et le potassium (de 10 à 12 %). Les teneurs élevées en potassium, que ce soit en valeur absolue ou par rapport aux concentrations en alumine peuvent être apportées par la combustion du charbon de bois. Le potassium agit comme un fondant en abaissant la température de fusion des aluminosilicates et du quartz.

En lame-mince, outre le quartz et les feldspaths (là où ils ne sont pas fondus), on n'observe plus que de rares grains de minéraux denses réfractaires (zircon, tourmaline). Les autres minéraux (paillettes de micas, ferro-titanés et oxydes de fer) ont réagi pour former d'autres phases minérales : seul le fantôme de leur forme primitive est parfois vaguement conservée. Ainsi, ponctuellement, des petites plages montrent la présence de wüstite (oxyde de fer ferreux) et de fayalite (olivine ferreuse), issues de la réaction chimique en conditions réductrices entre les inclusions ferriques et la matrice argilo-siliceuse.

5.3. La composition chimique des terres

La matrice de la partie inférieure du creuset, c'est-à-dire la phase argileuse entre les inclusions minérales, possède une composition variable constituée majoritairement de silice, de 46 à 70 %, exprimés en poids d'oxyde. Elle comprend peu d'alumine, dont la teneur varie entre 9 et 22 %, à laquelle s'ajoutent du fer (de 3,5 à 16 %), du phosphore (jusqu'à 28 %), du calcium (de 1 à 16 %), du potassium (de 1 à 6 %) et dans une moindre mesure du magnésium (max. 2,8 %), du sodium (max. 2,3 %) et du titane (max. 4,5 %). La comparaison des analyses de la matrice (Tab. 3) obtenues sur les différentes parties des fragments de creusets montre que l'alumine est en moyenne plus abondante vers la surface interne de la partie inférieure du creuset. En ce qui concerne les éléments alcalins, le sodium est réparti de manière homogène sur toute l'épaisseur des deux couches alors que les teneurs en potassium sont quelque peu supérieures dans la zone externe du lut en contact avec la source de chaleur et le combustible. Le calcium est plus abondant dans la partie inférieure du creuset que dans le lut. Il existe toutefois un léger enrichissement en calcium dans la partie externe du lut mais qui reste en dessous des teneurs mesurées dans la partie principale du récipient. Des concentrations plus élevées en phosphore sont observées dans la zone interne du corps du creuset alors qu'elles sont faibles à très faibles dans les autres parties. Le fer se répartit de manière identique entre les deux parties mais avec des enrichissements locaux. Le potassium et l'alumine sont reliés aux minéraux argileux et aux feldspaths tandis que le titane entre dans la composition du rutil et des ferro-titanés comme l'ilménite et les leucoxènes. Le magnésium est surtout présent dans les minéraux argileux et, dans une moindre mesure, en substitution du calcium des carbonates. Les teneurs élevées en calcium impliquent la présence de calcite dans la pâte, sans toutefois exclure la présence de phosphate de calcium. Par ailleurs, les teneurs élevées en phosphore dans la partie interne non vitrifiée du creuset peuvent s'expliquer par la pollution de cet élément due à l'utilisation d'engrais ou à la présence d'ossements (Freestone 2001 ; Merkel, 2016 : 226). Quoiqu'il en soit, les compositions chimiques ainsi que la dimension des grains

Analyses surfaciques de la matrice argileuse (exprimées en %)									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	MgO	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	FeO	TiO ₂
LUT									
Creuset 2 zone externe vitrifiée	61	9	1	1	0	6	3	18	1
Creuset 3 zone externe vitrifiée	63	9	1	1	9	3	5	8	2
Creuset 2 zone médiane vitrifiée	78	10	1	1	0	3	1	5	2
Creuset 2 zone interne vitrifiée	75	11	1	1	0	3	1	7	1
moyenne	69	9,7	0,8	1,1	2,2	3,5	2,5	9,5	1,5
écart-type	8	0,9	0,1	0,1	4,5	1,6	2,0	6,1	0,7
Partie intérieure de Creuset									
Creuset 2 zone externe vitrifiée	76	8	1	1	1	3	7	3	1
Creuset 2 zone externe vitrifiée	75	7	1	2	0	2	9	4	1
Creuset 2 zone externe vitrifiée	69	8	1	2	0	2	11	6	1
Creuset 2 zone externe vitrifiée	68	12	1	1	0	5	8	3	1
Creuset 3 zone externe peu vitrifiée	52	15	1	2	7	2	7	10	4
Creuset 3 zone interne non vitrifiée	57	15	1	2	7	2	6	9	1
Creuset 3 zone interne non vitrifiée	58	14	0	1	9	4	4	10	1
Creuset 3 zone interne non vitrifiée	42	18	1	3	13	3	8	11	3
moyenne creuset 2	72	9,0	0,9	1,5	0,3	3,0	8,6	4,0	0,9
écart-type creuset 2	4	2,1	0,3	0,5	0,5	1,6	1,7	1,3	0,1
moyenne creuset 3	52	15,3	0,6	1,8	9,0	2,5	6,3	10,0	2,4
écart-type creuset 3	7	1,6	0,4	0,7	2,5	0,8	1,5	1,1	1,5

Analyses ponctuelles de grains micrométriques dans la matrice argileuse (en %)									
LUT									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	MgO	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	FeO	TiO ₂
Creuset 2 zone externe vitreuse	57	4	2	4	3	10	12	7	1
Creuset 2 zone externe vitreuse	58	5	2	3	3	10	12	8	1
Creuset 2 zone externe vitreuse	58	4	1	3	3	10	12	8	1
Creuset 2 zone externe vitreuse	63	14	1	2	0	5	1	8	5
Creuset 2 zone externe vitreuse	55	5	1	4	4	8	12	8	1
Creuset 2 zone externe vitreuse	60	9	1	3	0	4	17	4	1
Creuset 2 zone externe vitreuse	66	11	1	2	0	8	7	4	1
Creuset 2 zone externe vitreuse	63	14	1	2	0	3	11	5	1
Creuset 2 zone externe vitreuse	61	10	1	3	0	2	15	6	2
Creuset 4 zone externe vitreuse	56	6	0	2	1	3	18	14	0
Creuset 4 zone externe vitreuse	67	7	1	1	0	6	2	16	0
Creuset 4 zone externe vitreuse	55	6	1	2	1	4	14	16	1
Creuset 4 zone externe vitreuse	58	7	1	1	0	5	6	21	1
Creuset 4 zone externe vitreuse	64	10	1	1	0	3	2	17	1
Creuset 4 zone externe vitreuse	68	16	1	2	0	4	1	7	1
Creuset LM BER-1 zone externe vitrifiée	52	5	1	2	3	3	8	25	1
Creuset LM BER-1 zone externe vitrifiée	37	8	1	1	16	3	4	29	1
Creuset LM BER-1 zone externe vitrifiée	52	10	1	1	9	4	4	19	1
moyenne zone externe	58	8,6	1,0	2,1	2,4	5,3	8,8	12,3	1,1
écart-type zone externe	7	3,7	0,4	1,0	4,1	2,7	5,6	7,5	1,1
Creuset 2 zone vitreuse	63	19	1	2	0	4	1	7	1
Creuset 2 zone médiane vitreuse	65	18	1	2	0	4	1	8	1
Creuset 2 zone médiane vitreuse	69	17	2	1	0	5	1	5	0

Creuset 4 zone médiane vitreuse	64	18	1	2	0	3	1	9	2
<i>moyenne zone médiane</i>	65	18,1	1,4	1,8	0,0	4,3	1,2	7,1	1,0
<i>écart-type zone médiane</i>	2	0,7	0,2	0,5	0,0	1,0	0,2	1,8	0,5
Creuset 2 zone interne vitreuse	69	18	1	2	0	4	1	4	1
Creuset 3 zone interne vitreuse	60	13	1	3	0	2	12	6	1
Creuset 3 zone interne vitreuse	59	13	1	4	1	2	11	8	1
Creuset 4 zone interne vitreuse	67	17	1	2	0	4	1	7	1
Creuset 4 zone interne vitreuse	65	16	1	2	0	3	1	10	2
<i>moyenne zone interne</i>	64	15,3	1,2	2,4	0,2	3,3	5,3	7,1	1,1
<i>écart-type zone interne</i>	4	2,3	0,2	0,9	0,3	0,9	5,9	2,1	0,4
<i>Partie intérieure de Creuset</i>									
Creuset 1 zone externe vitreuse	64	13	1	1	0	3	1	15	1
Creuset 1 zone externe vitreuse	55	9	0	1	0	2	1	26	1
Creuset 1 zone externe vitreuse	62	10	1	1	0	6	2	18	1
Creuset 1 zone externe vitreuse	66	15	1	1	0	3	1	11	1
Creuset 1 zone externe vitreuse	64	9	1	3	0	5	6	12	1
Creuset 1 zone externe vitreuse	61	11	1	2	0	3	16	5	1
Creuset 1 zone externe vitreuse	46	10	1	0	1	3	7	31	0
Creuset 1 zone externe vitreuse	70	11	1	1	0	5	4	8	1
Creuset 1 zone externe vitreuse	65	9	1	1	0	5	10	8	1
Creuset 1 zone externe vitreuse	63	10	1	2	0	5	13	6	1
Creuset 1 zone externe vitreuse	70	12	1	1	0	5	6	4	1
Creuset 4 zone médiane vitreuse	63	22	2	1	0	4	5	4	0
Creuset 3 zone interne non vitrifiée	53	18	1	1	11	2	6	7	1
Creuset 3 zone interne non vitrifiée	29	21	0	1	27	1	9	10	2
Creuset 3 zone interne non vitrifiée	28	19	0	1	28	1	9	13	1
Creuset 3 zone interne non vitrifiée	46	20	0	1	15	2	7	8	1
Creuset 3 zone interne non vitrifiée	44	16	0	2	9	1	4	19	4
<i>moyenne</i>	56	13,9	0,7	1,3	5,3	3,3	6,2	12,1	1,1
<i>écart-type</i>	13	4,7	0,6	0,7	9,5	1,7	4,1	7,7	0,9

Tab. 3 – Résultats semi-quantitatifs des analyses chimiques (EDS) des creusets effectuées sur des coupes transversales fraîches et polies. Les analyses ponctuelles correspondent à des mesures effectuées sur des surfaces de l'ordre de 4 à 5 μm^2 . Les analyses surfaciques couvrent une zone de forme carrée ou rectangulaire dont la forme et la dimension sont choisies par l'opérateur en fonction de la configuration de l'échantillon. La dimension est généralement supérieure à 20 μm^2 . Ici, l'analyste a évité au maximum d'intégrer les minéraux en grains pour se focaliser sur la matrice microcristalline ou le verre. Les valeurs, exprimées en pourcents, sont arrondies à l'unité.

de quartz s'accordent avec l'usage de loess non décarbonatés¹⁰ pour la fabrication des creusets ou de loess remaniés par les processus érosifs naturels. La composition chimique de la pâte du creuset, avec des teneurs faibles en aluminium et relativement riche en alcalins et alcalino-terreux, ne peut être qualifiée de réfractaire au sens moderne du terme (Poirier, 2001).

¹⁰ Les profils géologiques des loess montrent que la partie supérieure est constituée de loess décarbonatés reposant sur des loess carbonatés. La calcite se trouve parfois sous forme de concrétions appelées « poupées de loess ». Le loess se compose majoritairement de quartz, suivi des minéraux argileux (illite, smectites, kaolinite, de nombreux interstratifiés irréguliers gonflants...) ainsi que de la calcite et des oxydes et hydroxydes de fer. De manière accessoire, on observe quelques paillettes de micas et de chlorite et des grains de minéraux denses (zircon, tourmaline, rutile, ferro-titanés, apatite détritique et minéraux de terres rares). Quelques grains d'amphiboles vertes ou brunes témoignent d'une contribution volcanique dans quelques lamines.

5.4. L'analyse diffractométrique des parois de creuset

L'analyse diffractométrique (Tab. 4) identifie uniquement les phases cristallines, les composés amorphes de la phase vitreuse n'étant pas détectables. Les hautes températures auxquelles sont soumises les creusets induisent la transformation voire la disparition de certaines phases minérales et la formation de nouvelles phases, dites néoformées, avec des phases amorphes. Cet assemblage minéral permet d'approcher la composition minérale de la terre crue et fournit une gamme des températures atteintes lors de l'utilisation du creuset.

Les résultats indiquent que le quartz (détritique) reste le minéral cardinal des phases cristallines. La cristobalite, phase siliceuse de haute température formée aux dépens du quartz, n'apparaît que dans les parois externes, soumises aux plus hautes températures. Les proportions apparemment élevées en feldspaths ne reflètent pas leur teneur initiale dans la terre crue. En effet, la majorité des grains de feldspaths sont néoformés lors de la chauffe. Le creuset renferme donc des grains de feldspaths détritiques, indicatifs de la nature et de la source de la terre auxquels s'ajoutent les feldspaths formés aux dépens des minéraux argileux après leur déshydroxylation (la température de déshydroxylation varie d'un minéral à l'autre). Le fer est présent surtout dans la magnétite (Fe_3O_4) et dans une moindre mesure dans l'hématite (Fe_2O_3) indiquant un déficit en oxygène dû à la présence de matières organiques dans la pâte des creusets et la chauffe au charbon de bois. Des traces de fer, probablement métallique, sont notées dans deux creusets. Le pyroxène (aluminosilicate de fer, de magnésium et de calcium) identifié dans un échantillon s'est formé à haute température aux dépens des phyllosilicates (minéraux argileux) et des carbonates. Enfin, plusieurs réflexions apparaissant sur 2 diffractogrammes n'ont pas pu être attribuées à une phase cristalline spécifique, présente toutefois en faible proportion. La minéralogie indique des températures dépassant 1000°C , mais n'atteignant pas beaucoup plus que 1200°C . Les températures ont été plus élevées pour la paroi externe que pour la paroi interne des creusets.

Tab. 4 – Analyse minéralogique semi-quantitative de 4 parois de creusets de Berloz notées 1 à 4. EXT : paroi externe (lut vitrifié) ; INT : paroi interne (partie inférieure du creuset).

Phases cristallines en %	1-EXT	1-INT	2-EXT	2-INT	3-EXT	3-INT	4-EXT	4-INT
Quartz	81	87	98	99	97	66	91	95
Cristobalite	5		2		1	1	7	
Feldspath <i>sensu lato</i>	10	11				22		
Magnétite	4	1			1		2	
Hématite					1			
Fer (métal)				1				4
Pyroxène						11		
Phase indéterminée		1						1

5.5. Des terres locales aux propriétés réfractaires médiocres

Les différentes observations et analyses des creusets montrent l'utilisation par un artisan de terres lœssiques, probablement locales pour la confection des deux parois des creusets. Il ne semble pas y avoir de dégraissant ajouté autres que des débris végétaux, visibles par la tomographie. Celle-ci montre des pores linéaires sous forme de rectangles allongés, alignés parallèlement aux parois. Ils sont attribués à des débris végétaux présents et ajoutés à la pâte. La combustion de ces matières organiques confère une porosité supplémentaire à la pâte. Elle limite les fissures au séchage et les chocs thermiques, le lut fonctionnant alors comme un isolant qui répartit la température autour du récipient (Thomas,

2006, 2013 : 265). Les terres sont peu réfractaires compte tenu de leurs teneurs en alcalins et en alcalino-terreux. La combustion et le contact avec le combustible enrichit la surface du creuset en potassium qui a probablement contribué à faire fondre le lut à des températures plus basses. Ces deux aspects entraînent la fusion du lut et sa forte solidarisation à la partie inférieure du creuset lors de la fusion des alliages. La composition chimique de la terre, ses déformations et ses fortes altérations indiquent une qualité réfractaire médiocre qui n'est pas adaptée à de multiples utilisations du récipient. Par ailleurs, l'examen des creusets de Berloz ne montre pas l'ajout à la terre de cendres de plantes halophytes responsables des concentrations élevées en sodium, calcium et magnésium comme l'ont montré Huisman *et al.* (2020) pour les creusets de Tilbourg (NL).

Certaines argiles tertiaires altérées ont des propriétés réfractaires en raison de leur richesse en kaolinite (ou halloysite). Elles sont appelées « derles » voire « blanches derles ». Si elles sont totalement absentes de Hesbaye, de telles terres existent au sud de la Meuse entre la vallée du Hoyoux, dans la région d'Andenne et dans l'Entre-Sambre-et-Meuse. Les gisements au nord de la Meuse sont rares et semblent limités à la région andennaise. Malgré leur relative proximité, ces terres n'ont pas été employées pour la confection des creusets laténiens.

Enfin, les examens en lames minces et en microscopie électronique à balayage de cinq tessons de céramique distinguent la pâte des creusets de celle de la vaisselle en céramique de consommation courante, réalisée avec différentes terres non-locales, avec différents dégraissants et sans propriétés réfractaires. Une analyse archéométrique des pâtes céramiques laténiennes et de creusets d'éventuels sites de bronziers dans la zone d'affleurement des derles mériterait d'être menée pour mieux comprendre l'exploitation des ressources minérales et la circulation des matières premières et des produits finis à la fin de l'âge du Fer.

6. Les métaux coulés

Les sites de Berloz et Lamine n'ont pas livré de chutes de fonderie en alliage à base de cuivre qui permettrait de déterminer précisément la nature des métaux coulés. Néanmoins, l'examen au microscope électronique à balayage montre qu'un fragment de creuset présente de nombreuses billes métalliques plus ou moins oxydées, piégées entre le lut et la partie inférieure du récipient (Fig. 16). Ces billes de métal résultent de la perte de matière en fusion, s'infiltrant par les fissures de la pâte, elles-mêmes accentuées par la manipulation du creuset à la pince avant ou lors de la coulée. Dans le but d'identifier la nature des alliages coulés dans ce cas précis, 21 analyses semi-quantitatives (EDS) ont été réalisées sur cet échantillon (Tab. 5). La plupart des billes sont très oxydées (Fig. 17), mais certaines mieux conservées

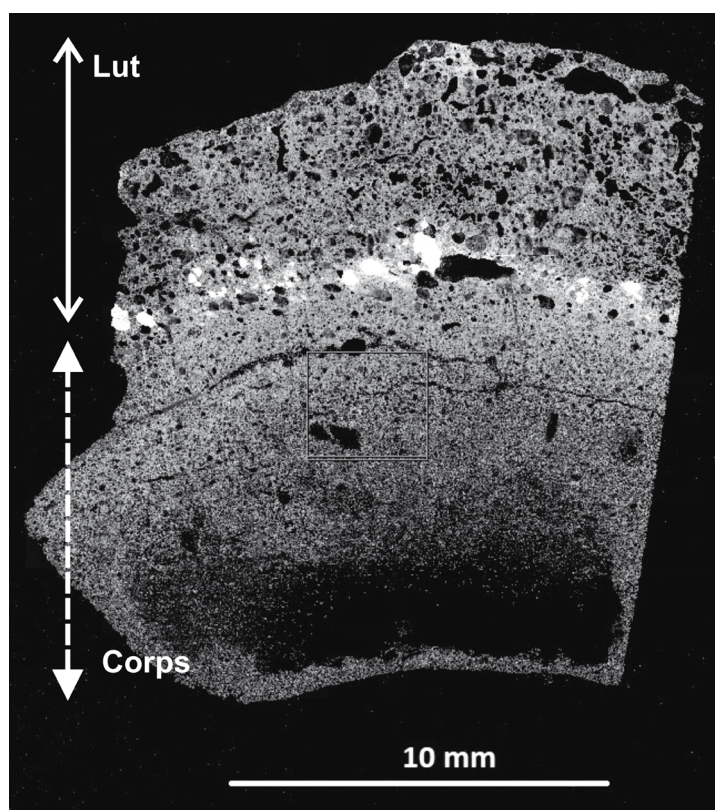


Fig. 16 – Coupe transversale dans une paroi de creuset montrant (en blanc) des globules d'alliages Cu-Sn et d'oxydes métalliques localisés entre la partie inférieure du creuset et le lut. La partie noire visible en bas de la coupe est due à l'arrachement de la terre friable et non vitrifiée lors du polissage de l'échantillon. Images MEB : T. Leduc, IRSNB.

N° analyse	Cu	Sn	Pb	Ag	As	Remarque
1	97	3				
2	94	6				
3	97	3				
4	95	5				
5	99	1				très corrodé
6	99	1				
7	45	55				très corrodé
8	95	5				
9	49	51				très corrodé
10	12	88				très corrodé
11	14	86				très corrodé
12	22	78				très corrodé
13	22	78				très corrodé
14	44	56				très corrodé
15	100					
16	46	53	1			très corrodé
17	100					très corrodé
18	100					très corrodé
19	63	4	33			très corrodé
20	53	29	1	14	3	très corrodé
21	98	1	1			

Tab. 5 – Résultats semi-quantitatifs des analyses chimiques (EDS) des globules métalliques entre la partie supérieure et le lut d'un seul creuset, normalisés à 100 %.

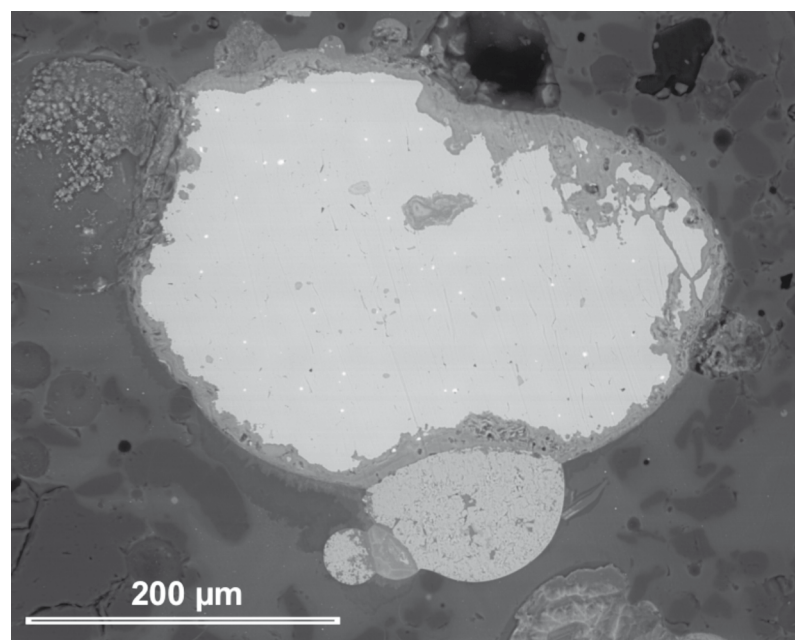


Fig. 17 – Nodule d'alliage de cuivre et d'étain renfermant des grains micrométriques de plomb (ponctuations blanches). L'alliage altéré est visible sous la forme d'une couronne plus sombre. Images MEB : T. Leduc, IRSNB.

permettent d'identifier des bronzes à priori faiblement chargés en étain, dont la teneur varie entre 1 et 6 %. Ces alliages ne comportent pas ou très peu de plomb, à l'exception d'une bille qui se distingue par la présence d'argent et d'arsenic. Par ailleurs, les billes les plus oxydées montrent d'importantes teneurs en phosphore, exclues du tableau pour une normalisation à 100 %. Comme pour les terres, ces teneurs peuvent être liées à une pollution par des ossements se trouvant dans la même structure archéologique.

Si ces résultats montrent différentes teneurs en étain, ils doivent être considérés avec beaucoup de prudence. La variabilité des compositions entre les différentes billes analysées peut s'expliquer par le comportement thermochimique des alliages, notamment par des phénomènes de volatilité différenciées lors de la coulée et d'oxydation pendant l'enfouissement. Des travaux ont ainsi montré que la composition des billes de métal plus ou moins oxydées se trouvant à la surface des creusets ou de moules de fonderie peut être très différente de celle de l'alliage coulé (Dungworth, 2000 ; Martín-Torres *et al.*, 2014). De même que certaines impuretés, le plomb et l'étain peuvent être sur-représentés, même s'ils ne sont présents qu'en faibles quantités au départ. Les hautes teneurs en plomb peuvent aussi s'expliquer par l'analyse d'un nodule, non soluble dans le cuivre à l'état solide. D'autres hypothèses, non exclusives des précédentes, peuvent être avancées pour expliquer la variabilité des compositions. Dans le cas de recyclage d'objets réformés de compositions et de températures de fusion différentes, certaines gouttes se trouveraient piégées à différents moments. Des billes plus riches en étain ou en plomb peuvent également résulter de l'élaboration de l'alliage dans le creuset.

7. Conclusions

Les résultats des fouilles menées sur plusieurs sites laténiens de Hesbaye liégeoise attestent l'association du travail des alliages à base de cuivre et du fer. Les sites de Berloz et de Lamine ont livré des creusets et fragments de creusets, ainsi que de rares vestiges de moules, issus d'ateliers de bronziers dans lesquels différents objets en bronze ont été coulés, avec au moins deux techniques de fonderie distinctes, même si la modestie de l'ensemble des vestiges ne permet pas d'en dire plus.

L'examen des vestiges et le croisement de différentes analyses archéométriques ont permis de déterminer le mode de fabrication de ces creusets en deux parties et la nature des terres utilisées pour les fabriquer. Les creusets étudiés sont constitués de terres limoneuses probablement extraites localement. Ces dernières ne possèdent pas de qualités réfractaires particulières et sont dégraissées avec des débris végétaux. La pratique observée à Berloz est la même qu'à Lamine. En revanche, elle diffère de celle de l'atelier de Tilburg aux Pays-Bas (La Tène A). Si la forme externe des creusets hesbignons est très proche, le mode de fabrication n'est pas le même. Aux Pays-Bas, le travail de la terre se distingue aussi par le mélange de la terre limoneuse avec des cendres de végétaux halophytes (Huisman *et al.*, 2020). On trouve néanmoins, comme sur d'autres sites, la pratique commune du lutage de ces creusets, le lut permettant d'améliorer les propriétés thermiques et mécaniques du creuset, d'autant plus nécessaire lorsque les qualités réfractaires sont médiocres comme c'est le cas ici. Une étude archéométrique comparée des creusets de ces différents sites, en Hesbaye mais aussi en France, aux Pays-Bas ou encore en Suisse pourrait permettre de distinguer des pratiques d'atelier dans la préparation des terres et dans la mise en forme de ces récipients. Enfin, tout concourt à montrer que ces creusets sont probablement à usage unique. Les très faibles qualités réfractaires de la terre ne permettent pas des usages multiples de ces récipients et la quasi-fermeture du creuset rend peu vraisemblable l'introduction du métal par son ouverture pour une seconde coulée, même si l'hypothèse ne doit pas totalement être exclue.

Remerciements

Les auteurs remercient Erik van de Gehuchte pour le travail effectué lors des observations des creusets en microtomographie, Nicolas Thomas pour la relecture du manuscrit, ainsi que Nolwenn Zaour pour ses indications bibliographiques.

Bibliographie

BOSQUET D., QUICK R. S., KEELEY L. M., JADIN I. & GOLITKO M., 2007. Waremme/ Waremme : campagne de prospection magnétique et fouilles sur le site de « La Campagne du Moulin » à Grand-Axhe. *Chronique de l'Archéologie wallonne*, 14 : 101-103.

CAHEN-DELHAYE A. & HURT V., 2013. *La nécropole de la Tène ancienne à Légglise- Gohimont en Ardenne belge*. Artefact, 11, Édition du CEDARC, Treignes : 120 p.

CAHEN D., KEELEY L. H., JADIN I. & VAN BERG P.-L., 1988. Darion, Oleye, Waremme : sites fortifiés du Rubané récent en Hesbaye liégeoise. In : *Colloque international « Rubané et Cardial : Néolithique ancien en Europe moyenne »*, Liège, 11-12-13 novembre 1988. Édition anticipée, Université de Liège en collab. avec l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique et l'U.I.S.P.P. (Commission du Néolithique), Liège : 9 p.

CAHEN D., KEELEY L. H., JADIN I. & VAN BERG P.-L., 1990. Trois villages fortifiés du Rubané récent de Hesbaye liégeoise. In : Cahen D. & Otte M. (éd.), *Rubané & Cardial. Actes du Colloque de Liège, novembre 1988*, ERAUL (Études et Recherches archéologiques de l'ULg), 39, Liège : 125-146.

CROUTSCH C., LANDOLT M., BROE E., FLEISCHER F., MULOT A., NOCUS N., PÉLISSIER A., PUTELAT O. & ROUSSELET O., 2015. Le site de Mittelhausen « Liesbuehl/Gimbretter Weg » (Bas-Rhin, Alsace) : économie et environnement d'une aire d'ensilage de La Tène ancienne dans le Kochersberg ». *Revue Archéologique de l'Est*, t. 64, n° 187 : 111-160.

DESTEXHE G., 1968. Contribution à l'étude de la céramique omalienne en Hesbaye. In : *Fédération Archéologique et Historique de Belgique. Annales du Congrès des travaux du Congrès, Congrès de Liège*, Liège : 487-504.

DESTEXHE G., 1982. Un site de l'âge du Fer à Lamine. *Bulletin de la Société Royale Belge d'Études Géologiques et Archéologiques Les Chercheurs de la Wallonie*, 25 / Années 1980-1982 : 163-210.

DESTEXHE G., 1984a. Sondage dans un site d'habitat de La Tène II à Fexhe-le-Haut-Clocher. *Archéologie hesbignonne*, 3 : 61-84.

DESTEXHE G., 1984b. Un site de La Tène à Remicourt. *Bulletin de la Société Royale Belge*

d'Anthropologie et de Préhistoire, 95 : 59-88 (= *Archéologie hesbignonne*, 4 : 4-42).

DESTEXHE G., 1986. Quelques découvertes anciennes des âges des métaux en Hesbaye. *Archéologie hesbignonne*, 5 : 14-75.

DESTEXHE G., 1987. La Protohistoire en Hesbaye centrale, du Bronze final à la romanisation. *Archéologie hesbignonne*, 6 : 446 p.

DESTEXHE G., 1990. Les occupations omaliennes, de la Tène et romaine du Thier de la Vigne à Oudoumont. *Archéologie hesbignonne*, 9 : 3-65.

DESTEXHE G., 2012. Le Musée communal d'Archéologie hesbignonne à Saint-Georges-sur-Meuse. 100 000 ans d'Histoire des habitants de la Hesbaye. *Archéologie hesbignonne*, 21 : 199 p.

DESTEXHE G., 2016. Une importante fosse de La Tène finale à Haneffe « Champ Tirtiaux » (Commune de Donceel, prov. de Liège). *Archéologie hesbignonne*, 24 : 51-103.

DESTEXHE G., 2021 (à paraître). La protohistoire dans la commune de Remicourt (Hesbaye liégeoise). *Archéologie hesbignonne*, 30.

DESTEXHE G. & GOEMAERE É., 2018. Vestiges d'un habitat du Second Âge du Fer à Verlaine 'Plantation Buttiens'. *Lunula. Archaeologia protohistorica*, 26 : 149-157.

DESTEXHE G. & GOEMAERE É., 2020. Un remarquable site d'activité métallurgique de La Tène C-D à Berloz (Hesbaye liégeoise). *Archéologie hesbignonne*, 29 : 79-95.

DESTEXHE-JAMOTTE J., 1950. Emplacement d'habitation de l'Âge du Fer à Moxhe (vallée de la Meuse). *Bulletin de la Société Royale Belge d'Anthropologie et Préhistoire*, 61 : 266-269.

DUNGWORTH D., 2000. A note of the analysis of crucibles and moulds. *Historical metallurgy*, 34 (2) : 83-86.

FOCK H., REMY H., GOFFIOUL C. & BOSQUET D., 2008. *Les Traverses du Temps*. Archéologie et TGV, Namur, 162 p.

FREESTONE I., 2001. Post-depositional changes in archaeological ceramics and glasses. In : Brothwell D. R. & Pollard A. M. (éd.), *Handbook of archaeological sciences*, John Wiley, Chichester : 615-625.

- HOPERT S., 2003. Singen-am-Hohentwiel Muelenzelgle: ein eisenzeitliches Handwerk-quartier. In : Plouin S. & Jud P. (éd.), *Habitat, mobilier et groupes régionaux à l'Âge du Fer*, Actes du XXe colloque de l'AFEAF, Colmar-Mittelwihr, Dijon, 16-19 mai 1996 20e suppl. à la Revue Archéologique de l'Est : 113-124.
- HUISMAN H., BACH A., JOOSTEN I., NGAN-TILLARD D. & VAN DEN EYNDE G., 2019. Midden-ljzetijd smeltkroesjes uit Tilburg. Een dubbele verrassing (prov. Noord-Brabant, Nederland). *Lunula. Archaeologia protohistorica*, 27 : 121-127.
- HUISMAN D., BACH A., JOOSTEN I., NGAN-TILLARD D. J. M. & EYNDE G., 2020. Ceramic-faience hybrids were used to recycle bronze in North-Western European Iron Age egg-shaped crucibles. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 32, August 2020 : DOI: 10.1016/j.jasrep.2020.102421
- JADIN I., 2003. *Trois petits tours et puis s'en vont... La fin de la présence danubienne en Moyenne Belgique*. Avec la participation de Cahen D., Deramaix I., Hauzeur A., Heim J., Livingstone Smith A. & Verniers J., 2e édition, ERAUL (Études et Recherches Archéologiques de l'Université de Liège), n° 109, Liège : 726 p.
- LAGARDE-CARDONA C., PERNOT M., SIREIX C. & LE BOURLLOT C., 2013. Approche du travail des alliages cuivreux sur le site du Second âge du Fer de Lacoste (Mouliets-et-Villemartin, Gironde). In : Actes du XXXV^e Colloque international de l'A.F.E.A.F., Pessac, Fédération Aquitania, coll. « Aquitania. Supplément », n° 30 : 325-329.
- LEFRANC P., BOËS E. & VÉBER C., 2008. Un habitat de la Tène ancienne à Souffelweyersheim « Les sept Arpents » (Bas-Rhin). *Revue Archéologique de l'Est*, t. 57, n° 179 : 41-74 (en ligne : <http://journals.openedition.org/rae/2193>, dernière consultation le 02 juin 2020).
- MARTIN F., 2017a. *Atuatuques, Condruses, Eburons... Culture matérielle et occupation du sol dans le territoire de la future civitas Tungrorum, de la fin de l'âge du Fer au début de l'époque gallo-romaine*. Thèse de doctorat, Université Libre de Bruxelles, Bruxelles, 2 vol. : 648 p.
- MARTIN F., 2017b. Culture matérielle et occupation du sol en *civitas Tungrorum*, de la conquête à la romanisation : recherches récentes. *Signa romana*, 7 : 77-83.
- MARTIN F., 2021 (à paraître). Recent research on material culture and territorial dynamics of late Iron Age tribes in the middle Meuse basin, on the eye of the Roman conquest. In : *Roman Networks II* : 12 p.
- MARTINÓN-TORRES M. & REHREN T., 2014. "Technical ceramics". In: Roberts B. W. & Thornton C. P. (éd.), *Archaeometallurgy in global perspective*. Springer New York, New York: 107-131.
- MAUVILLY M., ANTENEN I., GARCIA CRISTOBAL E., RUFFIEUX M. & SERNEELS V., 1998. Sévaz Tudinges : chronique d'un atelier de métallurgistes du début de la Tène dans la Broye. *Archäologie der Schweiz*, 21 (4) : 144-154.
- MAUVILLY M., GARCIA CRISTOBAL E., PEIRY C. & SERNEELS V., 2001. La métallurgie du bronze au milieu de l'âge du Fer. *Archäologie der Schweiz*, 24 (3) : 22-29.
- MERKEL S. W., 2016. *Silver and the silver economy at Hedeby: Raw materials, innovation, technology of ancient cultures RITaK 2*. Coll. "Der Anschnitt. Beiheft", Deutsches Bergbau-Museum, Bochum, n° 33 : xi-256 p.
- MILLE B., 2007. Les creusets de Saint-Martin-des-Champs. In : Milcent P.-Y. (éd.), *Bourges-Avaricum. Un centre proto-urbain celtique du V^e siècle av. J.-C. Les fouilles du quartier Saint-Martin-des-Champs et les découvertes des établissements militaires*, coll. « Bituriga », Édition de la ville de Bourges, Bourges : 169-173.
- MODARESSI-TEHRANI T., 2004. *Ein Ensemble frühlatènezeitlicher Metallverarbeitung aus der Siedlung von Eberdingen-Hochdorf (Lkr. Ludwigsburg)*. Metalla, 11, Leidorf, Bochum.
- PERNOT M., 2013. Alliages cuivreux et transferts de technologies au 1^{er} millénaire av. J.-C. dans le sud-ouest de l'Europe. *Mélanges de la Casa de Velázquez*, 43 (1) : 19-37.
- PERNOT M. & LABEAUNE R., 1999. Quelques moules de bronzier du premier Âge du Fer mis au jour sur le site Varennes-Vauzelles (Nièvre). In : Pernot M. & Rolley C. (éd.), *Techniques antiques du Bronze 2*, Publication du Centre de recherche sur les Techniques Gréco-romaines, 15, Dijon : 31-44.
- PINGOT J.-L., 2015. *Carte géologique de la Wallonie. Carte Landen n° 33/5 et Hannut-Montenaken n° 41/1-2, Échelle : 1/25 000. Notice explicative 2015*, Service public de la

Wallonie, Direction Générale Opérationnelle de l'Agriculture, des Ressources Naturelles et de l'Environnement (DGO3), SPW Éditions, Namur : 80 p. (en ligne : <http://geologie.wallonie.be>).

POIRIER J., 2001. Matériaux réfractaires. In : Boch P. (éd.), *Propriétés et applications des céramiques*, Hermès Science, Paris : 109-140.

QUEIXALOS I., MENU M. & MOHEN J.-P., 1987. Creusets pour la fonte des alliages à base de cuivre du Bronze Final au Fort-Harrouard à Sorel-Moussel (Eure-et-Loir). *Bulletin de la Société préhistorique française*, 84 (1) : 23-32.

REHREN T., 2002. Die Gußtiegel aus Köln-Porz. In : Joachim H.-E. (éd.), *Porz-Lind, Ein mittel- bis spätlatene-zeitlicher Siedlungsplatz im «Linder Bruch» (Stadt Köln)*, coll. "Rheinische Ausgrabungen", n° 47, Zabern, Mayence : 251-258.

RUTOT A. & VANDEN BROECK E., 1893. *Carte Hannut – Montenaken*, n° 119. Éditée à 1/40 000. *Carte géologique de Belgique*. Commission géologique de Belgique, Bruxelles : 1 pl.

SAUSSUS L. & THOMAS N., 2019. La mise en forme par fonderie. In : Saussus L. & Thomas N. (éd.), *Un atelier d'orfèvre autour de l'An Mil. Travail du cuivre, de l'argent et du fer à Oostvleteren (Flandre-Occidentale, Belgique)*, « Collection d'archéologie Joseph Mertens », 18, Presses Universitaires de Louvain, Louvain-la-Neuve : 53-67.

SÉGUIER J.-M., CABBOI L. & DUNIKOWSKI C., 2019. Dans les plaines de la confluence Seine-Yonne et leurs marges. In : Leroy M. & Cabboi L. (éd.), *Produire et travailler le fer. Les ateliers de l'est du Bassin parisien du V^e siècle av. J.-C. au X^e siècle apr. J.-C.*, coll. « Recherches

archéologiques », 16, INRAP-CNRS Éditions, Paris : 75-92.

SERNEELS V., 1993. Archéométrie des scories de fer, Recherches sur la sidérurgie ancienne en Suisse occidentale. *Cahiers d'Archéologie Romande*, 61 : 240 p.

THOMAS N., 2006, « Quand Melle enterrait ses métallurgistes : apports et limites de l'étude de creusets lutés découverts à Melle et à Niort en contexte funéraire (Deux-Sèvres, France) ». *ArcheoSciences. Revue d'archéométrie*, 30: 45-59.

THOMAS N., 2013. De la recette à la pratique : L'exemple du *lutum sapientiae* des alchimistes. In : Córdoba de la Llave R. (éd.), *Craft treatises and handbooks. The dissemination of technical knowledge in the Middle Ages*, coll. « De diversis Artibus, collection de Travaux de l'Académie Internationale d'Histoire des Sciences » 91, Brepols, Turnhout : 249-270.

TOCKI P., KEELEY L. H. & CAHEN D., 1988. Waremme-Longchamps, a fortified LBK: preliminary report. *Bulletin de la Société Royale Belge d'Anthropologie et de Préhistoire*, 99 : 115-128.

VAN DEN BROEKE P. W., 2012. *Het handgevormde aardewerk uit de IJzertijd en de Romeinse tijd van Oss-Ussen. Studies naar typochronologie, technologie en herkomst*. Doctoral thesis, Universiteit Leiden, Sidestone Press, Leiden : <http://hdl.handle.net/1887/20033> (dernière consultation : 08/2020).

ZAOUR N., LEPAUMIER H., BERRANGER M. & FLUZIN P., 2014. Les activités métallurgiques dans les établissements ruraux enclos du second âge du Fer en Basse-Normandie : l'exemple du site des « Pleines » à Orval (Manche). *ArcheoSciences*, 38 : 165-181.

Résumé

« Fondre le bronze dans un atelier métallurgique laténien à Berloz (Hesbaye liégeoise, BE) : propriétés de la terre, mise en forme et utilisation des creusets »

Des fouilles anciennes effectuées en Hesbaye liégeoise ont livré les vestiges d'ateliers métallurgiques de la Tène finale. La production d'objets en bronze est très peu documentée dans cette région et mérite une attention particulière. Plusieurs creusets et fragments ont été découverts à Berloz (La Tène C-D1) et à Lamine (La Tène A) et peuvent être comparés avec leurs équivalents trouvés en quelques sites de l'Europe du Nord-Ouest. À Berloz, l'ensemble est complété par des fragments de moules de fonderie, des parois de four munies de perforations pour la ventilation mécanique, un fragment d'objet et des déchets scoriacés, dont certains témoignent de la mise en forme du fer à la forge. Cette contribution se concentre sur l'examen des creusets. Elle comprend un volet descriptif, des examens archéométriques au CT-Scan et des analyses pétrographiques, diffractométriques et chimiques afin de reconstituer la chaîne opératoire, la nature et l'origine des terres utilisées. Les dépôts métalliques piégés dans un de ces récipients permettent aussi d'approcher la composition de l'alliage fondu. Les récipients comprennent une première partie interne ouverte, recouverte ensuite de lut. Cette seconde couche de terre ferme presque totalement le creuset. Elle ne laisse qu'une petite ouverture à leur sommet, limitant ainsi l'oxydation du métal en fusion. Le mode de fabrication des creusets nécessite le dépôt du métal à fondre à l'intérieur avant qu'ils ne soient fermés, à moins de disposer de menus fragments. La surface externe des creusets est fortement vitrifiée vers le fond. Les creusets étaient placés dans le foyer dans un lit de charbon de bois pour y être portés à la température de fusion du métal, proche ici de la température de ramollissement de la terre. Cette étude montre que ces creusets ovoïdes sont modelés en terre locale, dégraissée avec des fragments végétaux et que le lut est de même composition. Leur qualité réfractaire est médiocre, le lut permettant de renforcer la tenue au feu de ces récipients très probablement à usage unique.

Mots-clés : Berloz (Hesbaye liégeoise, BE), atelier, métallurgie, alliage à base de cuivre, creusets, pétrographie céramique, archéométrie, La Tène, protohistoire, Hesbaye.

Abstract

“Bronze casting in a La Tène metallurgical workshop in Berloz (Liège Hesbaye, Belgium): clay properties, shaping and use of crucibles”

Ancient excavations at various sites in Hesbaye liégeoise have uncovered remains of metallurgical workshops from the final La Tène period. The production of bronze objects is very poorly documented in this region and deserves special attention. Multiple crucibles and fragments have been discovered at Berloz (La Tène C-D1) and Lamine (La Tène A) that can be compared to their counterparts found at certain sites in North-West Europe. At Berloz, the whole is completed by fragments of foundry moulds, furnace walls fitted with perforations for mechanical ventilation, a fragment of an object and slags, some of which bear traces in the iron of their shaping in the forge. This contribution will focus on the study of the crucibles. The study includes a descriptive component and an archaeometric study using CT-Scan observations and petrographic (PM and SEM), diffractometric (XRD) and chemical (EDS) analyses in order to reconstruct the operating chain and the nature and origin of the clay used. The metal traces trapped in one of these containers also make it possible to approximate the composition of the molten alloy. The recipients comprise an open internal part, then covered with lut. This second layer of clay almost completely envelops the crucible, only leaving a small opening at its summit to limit the oxidation of the molten metal. The production method requires that the metal to be melted is deposited inside before they are closed except minute fragments. The outside surface of the crucibles is extremely vitrified towards the bottom. The crucibles were placed in the furnace in a bed of charcoal to reach the fusion temperature of the metal which is close to the softening temperature of the clay. This study shows that these ovoid shaped crucibles are made in local earth, degreased with plant fragments and that the lut is of the same composition. Their refractory quality is mediocre, the lut making it possible to increase the fire resistance of these most likely single use containers.

Keywords: Berloz (Hesbaye near Liège, BE), workshop, metallurgy, copper alloys, crucibles, ceramic petrography, archaeometry, La Tène, Protohistory, Hesbaye.

Samenvatting

“Het smelten van brons uit de La Tène periode in het metallurgisch atelier van Berloz (Luiks Haspengouw, België): eigenschappen van de klei, vormgeving en gebruik van smeltkroezen”

Oude opgravingen op verschillende sites in Luiks Haspengouw hebben de resten blootgelegd van metallurgische werkplaatsen van het einde van de La Tène periode. De productie van bronzen objecten is zeer slecht gedocumenteerd in deze regio en verdient speciale aandacht. Meerdere smeltkroezen en fragmenten werden ontdekt in Berloz (La Tène C-D1) en Lamine (La Tène A), deze kunnen vergeleken worden met hun equivalenten gevonden in bepaalde sites in Noordwest-Europa. In Berloz wordt het geheel vervolledigd met fragmenten van gietvormen, ovenwanden voorzien van perforaties voor mechanische ventilatie, een fragment van een object en slakken, sommige van deze vertonen in het ijzer nog sporen van hun vorming in de smidse. Deze bijdrage zal zich toespitsen op de studie van de smeltkroezen. De studie omvat een beschrijvend deel en een archeometrische studie die gebruik maakt van CT-Scan observaties en petrografische (PM en SEM), diffractometrische (XRD) en chemische (EDS) analyses om de operatieketen en de aard en herkomst van de gebruikte klei te reconstrueren. De resten metaal die gevangen zitten in een van deze containers maken het mogelijk om de samenstelling van de gesmolten legering te benaderen. De houders bestaan uit een open intern deel, vervolgens bedekt met lut. Deze tweede laag omvat de smeltkroes in zijn geheel buiten een kleine opening aan de top met als doel de oxidatie van het gesmolten metaal tegen te gaan. De productietechniek vereist dat het te smelten metaal in de smeltkroes gelegd wordt vooraleer deze gesloten wordt buiten zeer kleine fragmenten. De buitenkant van de smeltkroezen is sterk verglaasd naar de bodem toe. De smeltkroezen werden in de oven in een bed van houtskool geplaatst ten einde de fusietemperatuur te bereiken die dicht bij de temperatuur ligt waarop de klei verzacht. Deze studie laat zien dat deze eivormige kroezen gemaakt zijn in lokale aarde, ontvet met plantfragmenten en dat de lut dezelfde samenstelling heeft. Hun vuurvaste karakter is matig, de lut maakt het mogelijk om de brandwerendheid van deze hoogstwaarschijnlijk eenmalig bruikbare containers te verhogen.

Trefwoorden: Berloz (Luikse Haspengouw, BE), werkplaats, metallurgie, koperlegeringen, smeltkroezen, keramische petrografie, archeometrie, Protohistorie, La Tène, Haspengouw.

Eric GOEMAERE

Thomas GOOVAERTS

Thierry LEDUC

Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique (IRSNB)

Direction opérationnelle Terre et Histoire de la Vie

Service Géologique de Belgique

29, rue Vautier

BE – 1000 Bruxelles

eric.goemaere@naturalsciences.be

thomas.goovaerts@naturalsciences.be

thierry.leduc@naturalsciences.be

Lise SAUSSUS

UCLouvain

Chargée de recherches FRS-FNRS

Centre de recherches d'archéologie nationale

INCAL

1, place Blaise Pascal

BE – 1348 Louvain-la-Neuve

lise.saussus@uclouvain.be

Guy DESTEXHE

ASBL Société archéologique de Hesbaye

BE – 4470 Saint-Georges-sur-Meuse

guy.destexhe@skynet.be