ArcheoSciences
Revue d'archéométrie

43-1 | 2019
Varia

Les céramiques métallurgiques de Castel-Minier (Ariège, France) XIII^e-XV^e siècle

Metallurgical ceramics from Castel-Minier (Ariège, France), 13-15th c.

**Manon Géraud, Julien Flament, Alice Hunt, Guillaume Sarah, Eddy Foy et
Florian Téreygeol**

Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/archeosciences/6317>

DOI : 10.4000/archeosciences.6317

ISSN : 2104-3728

Éditeur

Presses universitaires de Rennes

Édition imprimée

Date de publication : 30 décembre 2019

Pagination : 83-95

ISBN : 978-2-7535-8016-9

ISSN : 1960-1360

Référence électronique

Manon Géraud, Julien Flament, Alice Hunt, Guillaume Sarah, Eddy Foy et Florian Téreygeol, « Les céramiques métallurgiques de Castel-Minier (Ariège, France) XIII^e-XV^e siècle », *ArcheoSciences* [En ligne], 43-1 | 2019, mis en ligne le 01 janvier 2022, consulté le 28 février 2022. URL : <http://journals.openedition.org/archeosciences/6317> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/archeosciences.6317>

Article L.111-1 du Code de la propriété intellectuelle.

Les céramiques métallurgiques de Castel-Minier (Ariège, France) (xiii^e-xv^e siècle)

Metallurgical Ceramics from Castel-Minier (Ariège, France), 13-15th c.

Manon GÉRAUD^a, Julien FLAMENT^b, Alice HUNT^c, Guillaume SARAH^b
Eddy FOY^d et Florian TÉREYGEOL^d

Résumé : Castel-Minier est un site minier et métallurgique situé au cœur des Pyrénées ariégeoises. De la fin du xiii^e siècle au xv^e siècle, ses ateliers ont produit de l'argent, du cuivre et du plomb à partir de minerais extraits sur place. Des récentes fouilles ont mis au jour des structures de chauffe et un large corpus d'objets provenant des différentes activités métallurgiques du site. Ce corpus comprend notamment neuf fragments de céramiques métallurgiques. Dans cet article, nous présentons leur étude céramologique ainsi que l'analyse des résidus métalliques présents sur leur surface. D'une part, les résultats rendent compte de la vocation polymétallurgique du site en mettant en évidence la nature des métaux travaillés (plomb, argent ou cuivre) mais également en identifiant les étapes des chaînes opératoires métallurgiques auxquelles se rattachent certaines céramiques, notamment l'affinage de l'argent. D'autre part, ils ont permis d'identifier des stratégies différentes dans le façonnage des céramiques métallurgiques. Ainsi, celles liées au travail du plomb et de l'argent recyclent des pâtes ou du vaisselier domestique, alors que le travail du cuivre requiert une pâte spécifique dont les qualités physiques semblent plus adaptées à la métallurgie.

Abstract: Castel-Minier is a mining and metallurgical site located in the central French Pyrenees. During the 13th–15th centuries C. E., its workshops extracted copper, lead and silver from non-ferrous ores mined nearby. Recent excavations unearthed heating structures and an exceptional corpus of metallurgical artefacts highlighting the broad range of metallurgical activities at Castel-Minier. Among these artefacts, nine fragments of crucibles were discovered. This paper presents the study of their paste and the analysis of the vitrification and metallic remains on their surface. On the one hand, the results account for the polymetallurgical nature of the site by underlining the use of different metals (lead, silver or copper), and by identifying some of the metallurgical process for which ceramics were used, in particular silver refining. On the other hand, the results pointed out different strategies in technical ceramics making. Thus, those used for the metallurgy of lead and silver recycle common pastes or pots, while the copper metallurgy uses specific pastes whose physical qualities seem more suited to metallurgy.

Mots clés : céramiques métallurgiques, creuset, coupellation, alliages cuivreux, argent.

Keywords : Technical ceramics, crucible, cupellation, copper alloys, silver.

^a TRACES, UMR5608, Université Toulouse Jean-Jaurès, France, Maison de la Recherche – 5 allée Antonio-Machado, 31058 TOULOUSE Cedex 9. (geraud.manon@gmail.com)

^b IRAMAT-CEB, UMR5060, CNRS, Université d'Orléans, France.

^c Center for Applied Isotope Studies, University of Georgia, USA.

^d LAPA-IRAMAT, NIMBE, CEA, CNRS, Université Paris-Saclay, CEA Saclay, France.

1. INTRODUCTION

Les céramiques métallurgiques sont des artefacts de premier plan pour étudier plusieurs étapes des procédés anciens d'extraction, de transformation et de mise en forme des métaux (Rehren, 2003). Les recherches archéologiques ont révélé des exemples d'utilisation de céramiques techniques dans le cadre d'activités d'essai de minerai (Martinón-Torres *et al.*, 2003), de métallurgie extractive (Téreygeol, 2014), de métallurgie secondaire (Thomas et Bourgarit, 2014) ou encore de fabrication monétaire (Arles et Téreygeol, 2009 ; Mille et Téreygeol, 2011). De par la variabilité de ces contextes, mais également celle des technologies employées et des caractéristiques techniques des pâtes, une diversité importante de céramiques métallurgiques a ainsi pu être mise en évidence (Bayley et Rehren, 2007). De nombreux moyens analytiques sont disponibles pour leur étude et permettent de répondre à des problématiques de divers ordres (Martinón-Torres et Rehren, 2014) : nature et caractéristiques techniques des pâtes, provenance, fonction. Autant que l'étude des produits métallurgiques (déchets, objets finis), celle des céramiques est en effet cruciale pour comprendre les métallurgies anciennes en livrant des enseignements d'une part sur le type de métallurgie pratiquée et d'autre part sur l'étape de la chaîne opératoire à laquelle elles sont rattachées.

Présentation du site

Castel-Minier (comm. Aulus-les-Bains) est un site minier et métallurgique implanté dans la vallée du Garbet, au cœur des Pyrénées ariégeoises (figure 1). Il fait l'objet de recherches historiques et archéologiques depuis plusieurs décennies. Des premiers travaux archéologiques sont réalisés sur le site au début des années 1990 sur la rive droite (Dubois, 1999). Depuis les années 2000, une nouvelle phase de recherche a commencé sous la direction de Florian Téreygeol. Après des campagnes de prospections et de sondages, des fouilles programmées ont lieu depuis 2006. Elles ont pour objectifs l'étude des mines et des ateliers métallurgiques de manière à comprendre l'organisation fonctionnelle d'une unité de production, son évolution sur le temps long et les différentes chaînes opératoires qui y sont à l'œuvre. Ces problématiques sont abordées selon une méthodologie pluridisciplinaire – associant l'archéologie, l'histoire, la chimie, la géophysique, mais également l'archéologie expérimentale – qui a donné lieu à des publications et travaux scientifiques nombreux et variés (par exemple Dillmann *et al.*, 2006 ; Téreygeol *et al.*, 2010 ; Téreygeol et Heckes, 2012 ; Leroy *et al.*, 2010 ; Flament, 2017 ; Gosselin [en cours] ; Géraud [en cours]).

Sur la rive gauche du torrent du Garbet se développe un réseau minier souterrain étendu (d'où ont été extraits galène argentifère, chalcopryrite, tétraédrite et bournonite), tandis que la rive droite est consacrée à la métallurgie. L'activité du site couvre une période qui s'étend de la fin du XIII^e siècle au

Figure 1 : Localisation du site de Castel-Minier (Ariège).

Figure 1: Location of Castel-Minier (Ariège)

xv^e siècle. Dès le début de l'occupation se met en place la métallurgie de l'argent et du plomb, complétée par la suite par celle du cuivre et des alliages cuivreux et la sidérurgie. Lors de la dernière phase d'occupation (fin xv^e-xvi^e siècle), les activités concernant les métaux non-ferreux disparaissent et le site se tourne alors vers la production exclusive de fer au moyen d'une mouline, appareil utilisant l'énergie hydraulique pour la soufflerie et le martelage.

Corpus de céramiques métallurgiques et problématiques

Le mobilier en céramique mis au jour lors des fouilles de Castel-Minier fait déjà l'objet de recherches approfondies (Géraud 2016; Géraud 2017). Cependant, et malgré le caractère exceptionnel d'une telle découverte en contexte minier, les céramiques métallurgiques n'ont pas encore été étudiées. La raison principale de cette lacune s'explique par les difficultés que pose l'identification de la fonction métallurgique des céramiques mais également par le faible corpus qu'elles forment. En effet, celui-ci reste limité : a minima, neuf individus ont pu être identifiés à partir de treize fragments assimilés à des céramiques métallurgiques (tableau 1). Pour un site de l'importance de Castel-Minier, ce nombre peut apparaître surprenant lorsque d'autres ateliers datés des périodes médiévale et moderne ont fourni plusieurs centaines de fragments (Arles et Téreygeol 2009; Martinon-Torres *et al.*, 2003). Deux raisons peuvent expliquer le volume limité du corpus. La première, factuelle, est celle du recyclage des céramiques métallurgiques usagées. Cette pratique est mentionnée dans les sources écrites médiévales pour la constitution de chamotte (terre cuite broyée) afin de façonner de nouveaux pots métallurgiques (Smith et Hawthorne, 1963, p. 96 et 142). Dans l'objectif de récupérer les gouttelettes de métaux précieux piégées dans les céramiques, ce recyclage est également attesté à Montreuil-Bonnin (Arles et Téreygeol, 2009, p. 142). Le caractère limité du corpus de Castel-Minier peut s'expliquer par une seconde raison, conjecturale, liée à l'état d'avancement de la fouille du site.

Quelles qu'en soient les causes, le volume restreint du corpus constitue la principale difficulté de l'étude. Par ailleurs, les artefacts découverts sont très fragmentés (figure 2) tandis que leur dispersion chrono-spatiale est notable (figure 3). Les neuf individus reconnus couvrent en effet une large part de la période d'occupation du site : quatre proviennent de contextes du xiv^e siècle (C2, C3, C5, C7), quatre autres de niveaux du xv^e siècle (C1, C4, C6, C8), et le dernier est issu de démolitions modernes (C9). Ils ont en outre été découverts ponctuellement au sein des différents secteurs du site,

contrairement à d'autres ateliers (Arles et Téreygeol, 2009). Dès lors, il devient difficile de proposer des typologies et des modèles.

2. MÉTHODOLOGIE

L'étude du corpus de céramiques métallurgiques de Castel-Minier poursuit plusieurs objectifs. Il s'agit tout d'abord de caractériser la nature de la pâte employée pour les confectionner. Cette première étape doit permettre de discuter l'hypothèse du recours à une pâte particulière, adaptée à la fonction des céramiques, ou celle du recyclage de céramiques domestiques. Une étude macroscopique et sous loupe bino-culaire des céramiques métallurgiques a ainsi permis une première identification des résidus et surtout des pâtes. Pour la description de celles-ci, la méthode et les échelles de taille, abondance et tri granulométrique des inclusions proposées par le manuel de céramologie de Cambridge ont été prises comme modèles (Orton *et al.* 1993, p. 231-242). Bien que l'analyse pétrographique n'ait pas encore été menée à ce stade de l'étude, cette méthode simple à mettre en œuvre a permis d'identifier et de distinguer les différents types de pâtes des échantillons.

Dans un second temps, l'étude a concerné les résidus métalliques présents à la surface et dans l'épaisseur des creusets. Des analyses élémentaires ont été réalisées dans le but de préciser la nature des métaux travaillés mais également d'identifier les étapes des chaînes opératoires métallurgiques. Différentes méthodes ont été utilisées. Afin d'observer l'interface céramique/vitrification des échantillons et de vérifier la présence de métaux, un microscope électronique à balayage couplé à un système de microanalyse (MEB-EDX) a été utilisé. Les observations ont été menées au laboratoire LAPA-IRAMAT du CEA (Paris-Saclay) sur un modèle JEOL 7001-F, couplé à un spectromètre dispersif en énergie pour l'analyse chimique (spectromètre et détecteur de rayons X SDD Si(Li) Oxford). La tension d'accélération du MEB a été fixée à 15 kV. Par ailleurs, dans l'objectif de tester la pollution globale de chaque céramique, des profils de concentration des principaux éléments métalliques ont été réalisés par spectrométrie de fluorescence X (XRF) à l'aide d'un générateur de rayons X à anode tournante Rigaku RU – 200BH équipé d'une anode au molybdène qui délivre un flux de photons à 17,5 keV. Le faisceau est monochromatisé autour de la raie k alpha du molybdène grâce à un miroir multicouches. A partir du spectre de XRF, les intensités des pics des éléments recherchés sont extraites et permettent de définir un profil en nombre de coups (unité arbitraire) pour une durée d'analyse ponctuelle de 300 secondes pour

n°	Contexte de découverte			Forme	Pâte céramique						LA-ICP-MS	Métallurgies rattachées
	US	Structure	Datation		Couleur	Type d'inclusions	Taille des inclusions	Abondance des inclusions	Tri granulométrique	Type de pâte rattaché		
C1	2316	Bâtiment 6	1re 1/2 XV	"Poche de coulée"	Gris à brun gris	Quartz, mica, particules plus sombres indéterminées	0,1-0,5 mm (jusqu'à 1 mm) (Fines à moyennes, voire grossières)	30-40 %	Modéré	Type domestique 12	Scorie blanchâtre sur la surface interne. Bille métallique visible.	Argent
C2	2338	Plate-forme 4	XIV	Coupelle	Gris, orange en surface	Quartz, mica, particules plus sombres indéterminées	0,1-0,5 mm (jusqu'à 1 mm) (Fines à moyennes, voire grossières)	30-40 %	Modéré	Type domestique 12	Scorie blanchâtre interne couvrante. Billes métalliques visibles.	Argent
C3	2389	Plate-forme 4	XIV	Ind.	Gris à gris foncé	Quartz, quelques micas	0,1-1 mm (Fines à grossières)	15-20 %	Faible	Type domestique 1	Scorie interne grise à blanchâtre. Vitrification externe grise à verdâtre.	Plomb ?
C4	3012	Bâtiment 9	XV	Ind.	Rouge orangé	Quartz, quelques micas	0,1-1 mm (Fines à grossières)	15-20 %	Faible	Type domestique 5	Fine scorie interne grise à blanchâtre.	Non déterminé
C5	3066	Plate-forme 5	XIV	Ind.	Gris foncé à noir	Quartz, mica, particules plus sombres indéterminées	0,1-0,5 mm (Fines à moyennes)	30-40 %	Bon	Type domestique 12	Scorie interne blanchâtre.	Plomb
C6	3072	Plat-du-Roi 1re plate-forme	XV	"Poche de coulée"	Blanc	Quartz	0,5-2 mm (Grossières à très grossières)	30-40 %	Bon	Type métallurgique 1	Scorie noire à brune sur toute la surface (interne et externe).	Laiton, laiton au plomb, plomb
C7	2519	Bâtiment 3	XIV	Ind.	Gris clair	Quartz, quelques micas	0,1-1 mm (parfois > 1 mm) (Fines à grossières, voire très grossières)	15-20 %	Très faible	Type domestique 1	Vitrification verte à brune.	Céram. non métallurgique
C8	3067 (/3091)	Plat-du-Roi pente	XV	Ind.	Gris	Quartz, quelques micas	0,1-1 mm (Fines à grossières)	15-20 %	Faible	Type domestique 1	Vitrification interne rougeâtre couvrante.	Cuivre au plomb, plomb
C9	3065	Plat-du-Roi enceinte castrale	XVI-XXI	"Poche de coulée"	Blanc	Quartz	0,5-2 mm (Grossières à très grossières)	30-40 %	Bon	Type métallurgique 1	Scorie noire à brune sur toute la surface (interne et externe). Traces internes d'oxyde de plomb.	Cuivre

Tableau 1. Liste des céramiques métallurgiques étudiées
 Table 1: List of the studied metallurgical ceramics

un pas de 30 µm (soit une durée d'analyse d'échantillon proche de 34 heures). Enfin, la composition élémentaire des billes métalliques macroscopiques conservées sur deux échantillons a été déterminée par spectrométrie de masse à plasma avec ablation laser (LA-ICP-MS). Les manipulations ont été menées au laboratoire IRAMAT – Centre Ernest-Babelon d'après la méthodologie présentée dans Sarah et Gratuze (2016), avec un spectromètre Element XR de la société Thermo Fischer Scientific couplé à un système d'ablation laser modèle Resonetics RESolution S155-E. Le laser est généré par un excimère ArF qui émet dans l'ultraviolet (193 nm). Le diamètre du faisceau est fixé à 100 µm, pour une fréquence d'ablation de 8 Hz tandis que la fluence mesurée à la surface de l'échantillon est de 2,2 J.cm⁻². La détermination des teneurs élémentaires repose sur une calibration interne et externe au moyen de matériaux de référence.

3. RÉSULTATS

L'étude des formes

La présence de fragments de bords ou de fonds au sein du corpus permet de distinguer quelques formes connues. Il est néanmoins impossible de définir une véritable typologie morphologique des céramiques métallurgiques de Castel-Minier du fait du nombre d'individus restreint du corpus et de leur mauvais état de conservation. La première forme notable est celle que l'on appelle « poche de coulée », avec des parois verticales et un fond globulaire. Au moins trois céramiques de notre corpus semblent correspondre à cette description : C1, C6 et C9 (figure 2). Les creusets des deux ateliers monétaires poitevins de La Rochelle et de Montreuil-Bonnin (Arles, 2009, p. 141 ; Arles et Téreygeol, 2009) appartiennent à ce type. La forme plutôt élancée de ces individus est un caractère notable qui favorise la conservation de la chaleur et offre une meilleure résistance aux contraintes thermiques. En outre, grâce à leur fond hémisphérique, ils peuvent

Figure 2 : (Voir planche couleur XIII) Le corpus des céramiques métallurgiques de Castel-Minier. (Dessins et clichés : J.-C. Méaudre).

Figure 2: (See colour plate XIII) Set of the metallurgical ceramics from Castel-Minier. (Drawings and photographs: J.-C. Méaudre).

Figure 3 : (Voir planche couleur XIV) Localisation des céramiques sur le site : en vert les découvertes dans des contextes du xiv^e siècle, en rouge les découvertes dans des contextes du xv^e siècle. (C9 est associé au matériel du xv^e siècle bien qu'il soit trouvé dans les niveaux de démolition de l'ensemble castral datant du xix^e siècle).

Figure 3: (See colour plate XIV) Location of the ceramics on the site: in green finds in the 14th century context, in red finds in the 15th century contexts. (C9 is associated with the material of the 15th century although it was found in demolition levels of the castral complex dating from the 19th century).

être stabilisés dans des foyers de charbon (Bayley et Rehren, 2007, p. 47). Dans notre corpus, l'individu C1 est le plus petit. Son diamètre à l'ouverture est d'environ 5 cm et il possède des parois de 7 mm d'épaisseur. L'absence de fond ne permet pas de connaître sa hauteur ni son volume réel. Le gabarit des deux autres individus de type « poche de coulée » (C6 et C9) est plus grand. Le diamètre de l'individu C6 est de 12 cm, celui de C9 semble être du même ordre, autour de 14 cm. L'épaisseur de la paroi varie entre 9 et 12 mm. Nous ne connaissons encore une fois pas la hauteur exacte de ces céramiques, mais par une nouvelle analogie avec les creusets poitevins dont la morphologie est très proche, on peut supposer une hauteur comprise entre 17 et 19 cm, pour un volume utile d'au moins 1 L de métal.

La seconde forme qui a pu être reconnue est représentée par un seul individu (C2). De petit gabarit, il possède des parois évasées, épaisses de 6 à 10 mm, pour un diamètre interne de minimum 3 cm dans sa partie la plus basse (figure 2). Cette forme plus atypique pourrait correspondre à celle d'une coupelle utilisée pour l'affinage de l'argent. La fonction de ce type de céramique est liée à l'étape de séparation des métaux par voie sèche : la coupellation. Ce procédé consiste en une réaction d'oxydation à haute température qui exploite l'affinité différentielle des métaux avec l'oxygène. Dans ces conditions, l'argent ne s'oxyde pas tandis que le plomb, le cuivre et plusieurs autres éléments qu'ils

contiennent se combinent avec l'oxygène pour former des oxydes qui sont absorbés par la coupelle. La coupellation peut se pratiquer à différentes échelles. À petite échelle, elle est réservée à l'affinage ultime de l'argent et attestée dans des contextes d'atelier monétaire ou de fonderie (Gauthier, 2012 ; Téreygeol et Thomas, 2003 ; Mongiatti, 2009). Le procédé se déroule dans un contenant de forme ouverte confectionné à partir d'un matériau réfractaire et poreux, le plus souvent de la cendre d'os, de la cendre végétale ou un mélange des deux (White et Kearns, 2010 ; Martinón-Torres *et al.*, 2008 ; Ulseth *et al.*, 2015 ; Téreygeol et Thomas, 2003 ; Thomas *et al.*, 2006 ; Rehren, 1996 ; Martinón-Torres, *et al.*, 2003 ; Mille et Téreygeol, 2011). La coupellation à petite échelle pouvait être également réalisée sur une couche de cendre appliquée dans un récipient en céramique, comme le décrit au xii^e siècle le moine Théophile dans son *De Diversis Artibus* (Smith et Hawthorne, 1963, p. 96) ou encore Agricola dans *De re metallica*, traité technique du milieu du xvi^e siècle consacré aux activités minières et métallurgiques (Hoover et Hoover, 1950, p. 484).

Les cinq derniers individus (C3, C4, C5, C7 et C8) sont trop fragmentés et/ou de trop petites dimensions pour reconnaître leur morphologie d'origine. Ils possèdent des parois dont l'épaisseur varie entre 5 et 7 mm.

La spécificité des pâtes

De même que pour les formes, les fragments de céramiques métallurgiques de Castel-Minier présentent des pâtes très variées que nous avons réparties dans quatre groupes (figure 4). Le premier comprend les céramiques C1, C2 et C5. Elles possèdent une matrice argileuse grise plus ou moins foncée à cœur et brune à orange en surface. Le dégraissant particulièrement abondant (30-40 % de la surface interne) comprend des inclusions modérément triées fines à moyennes (0,1-0,5 mm), parfois grossières (jusqu'à 1 mm), notamment des grains de quartz et de mica, ainsi que des particules plus sombres. Les céramiques C3, C7 et C8 forment un deuxième groupe. Leur matrice argileuse est gris clair, l'individu C3 présentant une coloration plus sombre près de sa surface externe. Ces pâtes ont un dégraissant moins abondant que les premières (15-20 %) : essentiellement des grains de quartz fins à grossiers, voire très grossiers (0,1 mm à plus d'un millimètre), d'un tri granulométrique faible. On peut également observer quelques micas fins. La pâte de la céramique C4 se distingue de celles du deuxième groupe par la couleur rouge de sa matrice due à une cuisson en atmosphère oxydante à l'opposé des autres pâtes cuites en atmosphère réductrice. Enfin, le dernier groupe réunit les individus C6 et C9. Leur pâte est constituée d'une matrice argileuse blanche qui comprend jusqu'à 40 % d'inclusions de grains de quartz, plutôt calibrés, grossiers à très grossiers (0,5-2 mm).

Les pâtes des céramiques métallurgiques sont ainsi diverses, l'ensemble des fragments présente en revanche une vitrification sur leur paroi interne et/ou externe (figure 2). L'intérieur des trois fragments du premier groupe ainsi que des fragments C3 et C4 est couvert d'une scorie blanchâtre opaque plus ou moins épaisse. Des billes métalliques sont en outre visibles sur les individus C1 et C2. Les deux autres fragments du deuxième groupe (C7 et C8) présentent une vitrification respectivement verte et rougeâtre. Enfin, la surface des céramiques du dernier groupe (C6 et C9) est entièrement recouverte d'une scorie noire à brune, présentant en outre des traces internes d'oxyde de plomb pour l'individu C9. On peut également observer l'empreinte d'un morceau de charbon près du bord de ce dernier.

La première de nos questions concernait la spécificité des céramiques métallurgiques par rapport aux céramiques communes. Pour ce faire, une comparaison avec le vaisselier domestique de Castel-Minier a été entreprise. Plusieurs rapprochements avec la typologie des pâtes du site peuvent tout d'abord être faits (figure 4). Notre premier groupe de pâtes correspond ainsi au type domestique appelé « com-mingeois » qui comprend une quantité importante d'inclu-

Figure 4 : (Voir planche couleur XIV) Groupes de pâtes céramiques métallurgiques et domestiques retrouvées à Castel-Minier.
Figure 4: (See colour plate XIV) Groups of metallurgical and common ceramic pastes found in Castel-Minier.

sions calibrées de quartz et de mica au sein d'une matrice généralement grise¹. Les pâtes des deuxième et troisième groupes sont quant à elles respectivement comparables aux pâtes communes sableuses grises et rouges qui contiennent une part moindre d'inclusions de quartz non calibrées et se distinguent par l'atmosphère de cuisson qu'elles ont subie (réductrice ou oxydante)². Ces trois types de pâtes domestiques sont les plus représentés parmi la céramique mise au jour à Castel-Minier (ils constituent à eux trois 63 % du vaisselier domestique) et sont considérés comme d'origine locale³. De ce fait, deux interprétations peuvent être proposées : soit une majorité des céramiques métallurgiques retrouvées a été façonnée avec une matière première aisément disponible (c'est ce qui semble être le cas au moins pour les individus C1 et C2), soit elle provient du réemploi de céramiques communes. La fragmentation de notre corpus de céramiques métallurgiques ne permet pas de reconnaître d'éventuelles formes domestiques connues et donc de véri-

1. Type 12 de la typologie de Castel-Minier.

2. Types 1 et 5 de la typologie de Castel-Minier.

3. Voir Géraud 2017 pour le type 12 ; Géraud 2016 pour les types 1 et 5.

fier cette dernière hypothèse, qui a été démontrée par ailleurs dans d'autres contextes (Martinón-Torres et Rehren, 2009, p. 68).

À l'opposé, aucune analogie n'est possible entre le groupe 4 de céramiques métallurgiques et les productions domestiques du site. Leurs pâtes sont plus grossières et présentent des épaisseurs plus importantes. En revanche, elles sont extrêmement proches des pâtes qui constituent les creusets en « poche de coulée » retrouvés au sein des ateliers monétaires de La Rochelle (Arles, 2009, p. 141-143) et de Montreuil-Bonnin (Arles et Téreygeol, 2009) ou encore de celles des creusets triangulaires produits dans la région de la Hesse (Martinón-Torres et Rehren, 2009). L'abondance du dégraissant de quartz donne notamment à ces productions particulières une dureté et une résistance aux chocs thermiques qui peuvent être des propriétés recherchées dans le cadre d'une production de creusets. Cette particularité a été identifiée dans la Hesse et semble expliquer leur fort succès pendant plusieurs siècles (Martinón-Torres et Rehren, 2009). Finalement, les céramiques métallurgiques C6 et C9, bien qu'elles ne semblent pas, à cette échelle d'observation, contenir le dégraissant de chamotte préconisé par les traités de métallurgie (Smith et Hawthorne, 1963, p. 96 et 142), ont été façonnées dans une matière première particulière, dans l'objectif de résister aux températures subies lors des opérations de métallurgie.

La fonction métallurgique des céramiques

L'étude macroscopique des pâtes du groupe 4 semble confirmer la vocation métallurgique des céramiques C6 et C9. En revanche, dans le cas des trois premiers groupes, malgré la présence de vitrifications et/ou de scories, une confirmation est nécessaire dans la mesure où leurs pâtes s'apparentent à celles du vaisselier domestique du site. En effet, les pots communs en pâtes sableuses sont généralement décorés d'une glaçure plombifère sur une partie de leur surface interne et/ou externe. La coexistence à Castel-Minier entre des espaces consacrés aux activités métallurgiques et d'autres à vocation domestique justifiait l'identification de l'origine des vitrifications, qu'elles soient de nature décorative (et éventuellement altérée) ou accidentelle.

Pour ce faire, l'analyse MEB-EDX a apporté plusieurs éléments de réponse. Le premier se trouve à l'interface entre les couches de vitrification et la matrice argileuse. En effet, on retrouve sur la majorité des individus étudiés l'interaction caractéristique entre la pâte céramique et le métal fondu qu'ils contiennent. La matrice argileuse a fondu par contact avec le métal. Cette réaction entraîne l'altération des minéraux qu'elle contient, notamment la fracturation des micas

et feldspaths au niveau de leur liaison chimique K-Si qui se traduit par une diffusion de potassium vers la surface de la céramique observable par cartographie (Ghiri *et al.*, 2012) (figure 5). Cette réaction n'a en revanche pas été observée sur un individu, le fragment C7, qui est ainsi à exclure du corpus de céramiques métallurgiques. La présence de billes métalliques microscopiques a en outre confirmé la fonction métallurgique de certaines céramiques. C'est notamment le cas pour l'individu C6, dont l'analyse a révélé la coexistence du plomb et du cuivre dans la pâte (figure 6).

Au-delà de cette analyse ponctuelle, la réalisation de profils de concentration par XRF a permis de mettre en évidence la pollution globale en éléments métalliques de chaque céramique. Le premier enseignement concerne l'omniprésence

Figure 5 : (Voir planche couleur XV) (A) Interaction entre la matrice argileuse et la couche de vitrification de la céramique C6 et cartographie de la concentration en potassium associée; (B) Interaction entre la matrice argileuse et la couche de vitrification de la céramique C7.

Figure 5: (See colour plate XV) Interaction between the ceramic matrix and the slag: C6 fragment (A) and C7 fragment (B).

Figure 6 : (Voir planche couleur XV) Analyse MEB d'une section polie de l'individu C6. Gauche : cartographie élémentaire montrant la répartition du plomb. Droite : billes sulfurées (blanc) dans une matrice vitreuse (gris). L'analyse EDX montre qu'elles sont composées d'un sulfure de cuivre.

Figure 6: (See colour plate XV) SEM analysis of a polished section of the individual C6. Left: elementary mapping showing lead distribution. Right: Sulfidic prills (white) in a glassy matrix (grey). The EDX analysis shows that they consist of a copper sulfide.

du plomb qui se trouve parfois associé à d'autres éléments. Ainsi, trois groupes de creusets peuvent être distingués et éventuellement rattachés à différents types de métallurgies. Les individus C5, C6 et C8 sont caractéristiques de cette partition (figure 7).

La chaîne opératoire du plomb argentifère

La fonte du plomb désargenté

La production d'argent est représentée par au moins trois céramiques métallurgiques (C1, C2 et C5) qui témoignent de plusieurs étapes de la chaîne opératoire.

L'une d'entre elles (C5) appartient à un groupe de céramiques métallurgiques dont l'analyse XRF a montré que ses individus contiennent de fortes teneurs en plomb selon un profil de concentration similaire (figure 7). La forte pollution en plomb des céramiques de ce groupe est due à la capacité de cet élément à s'oxyder aisément et à réagir avec la silice : il se diffuse ainsi rapidement dans la céramique (Dungworth, 2000, p. 85). La présence du cuivre a été décelée dans certaines pâtes mais avec une intensité 100 fois inférieure à celle du plomb. Ainsi, les céramiques ont accueilli du plomb contenant du cuivre, sans que leurs proportions puissent être établies. L'interprétation fonctionnelle qui peut être avancée pour expliquer la présence de ce métal concerne l'utilisation des creusets pour la fonte de plomb désargenté issu du retraitement des sous-produits de la coupellation (soles de four, oxydes de plomb), pratique mise en évidence à Castel-Minier. Dans ce cas, le passage au creuset de plomb désargenté peut s'expliquer par la volonté de produire des

Figure 7 : (Voir planche couleur XV) Profils de concentration du plomb, du zinc et du cuivre par spectrométrie de fluorescence X (XRF) pour les individus C5, C6 et C8, où X représente la distance depuis la surface interne du fragment de céramique.

Figure 7: (See colour plate XV) XRF profiles of lead, zinc and copper for C5, C6 and C8 individuals.

masses standardisées, de type lingot, destinées à l'exportation. L'étude des sources textuelles relatives à Castel-Minier conforte cette hypothèse (Dupuy 1779 ; Mugueta Moreno, 2004).

Le lingotage de l'argent partiellement affiné

Deux autres céramiques de notre corpus se rattachent à la chaîne opératoire de la production d'argent et plus précisément à l'étape ultime de l'affinage. Sur le creuset C1, l'analyse LA-ICP-MS d'une bille métallique a permis de déterminer sa composition élémentaire. Il s'agit d'un alliage d'argent (92,7 %), de plomb (6,7 %) et de cuivre (0,5 %) (tableau 2). Cette composition est compatible avec celle d'un argent partiellement affiné issu d'une première coupellation. En effet, l'extraction de l'argent contenu dans le plomb d'œuvre ne peut pas être réalisée en une seule opération. Une première coupellation permet d'obtenir des plombs partiellement enrichis en argent (Téreygeol et Guirado, 2013, p. 169-188 ; Gauthier *et al.*, à paraître). Il est donc nécessaire de reproduire l'opération de manière à obtenir un argent dont la pureté est adaptée à ses finalités, qu'elles concernent l'orfèvrerie ou la production monétaire. Ainsi, il est possible d'assigner au creuset C1 une fonction de lingotage des masses métalliques obtenues à l'issue d'une première coupellation. Cette opération est destinée à confectionner un alliage homogène de manière à faciliter son affinage. L'hypothèse est renforcée par la taille réduite du creuset qui est en adéquation avec les alliages de plomb

Élément	Céramique C1	Céramique C2					
		1	2	4	5	6	7
Ag	92,74 %	99,96 %	99,95 %	85,34 %	96,44 %	95,89 %	99,42 %
Cu	0,54 %	0,02 %	0,03 %	0,88 %	0,35 %	0,25 %	0,09 %
Pb	6,68 %	0,01 %	0,03 %	13,75 %	3,20 %	3,84 %	0,48 %
Au	4,6	3,7	3,9	3,0	3,4	3,3	3,8
Bi	371	nd	nd	89	38	39	1,2
Zn	1,4	nd	nd	49	43	57	nd
As	1,4	nd	nd	3,4	8,2	10	nd
Cd	17	13	13	12	14	13	14
Sb	nd	nd	nd	63	13	22	nd

Tableau 2, compositions élémentaires déterminées par LA-ICP-MS des billes métalliques contenues dans les céramiques métallurgiques. Sauf mention contraire, les valeurs sont en ppm ; nd : non détecté.

Table 2: Elemental compositions determined by LA-ICP-MS of metallic prills entrapped in metallurgical ceramics. Unless otherwise stated, values are in ppm; nd: not detected.

partiellement enrichis issus de la coupellation initiale et qui représentent quelques dizaines de grammes (Flament, 2017, p. 526).

La coupellation à petite échelle

La céramique C2, dont la forme semble indiquer une fonction de coupelle, contient plusieurs billes métalliques dispersées sur sa surface interne. L'analyse de six d'entre elles a révélé trois groupes de composition (tableau 2). Le premier est composé des trois billes aux teneurs en argent supérieures à 99 %. Le second est composé de deux billes contenant 96,4 et 95,9 % d'argent alors que le troisième est constitué d'une bille contenant 85,3 % d'argent. La variabilité des alliages à base d'argent présents sur la céramique est compatible avec l'hypothèse d'un usage pour l'affinage ultime de l'argent. Le premier groupe représente le produit final et témoigne de l'aboutissement de la coupellation. Pour le second, la coupellation s'est terminée avant que tout le plomb ne se soit oxydé. Il en va de même pour le troisième groupe avec toutefois un état d'avancement moindre de la coupellation.

La présence de billes métalliques sur le contenant en céramique indique certainement une malfaçon de la sole qui a permis la pénétration de faibles quantités d'alliage. On peut imaginer l'apparition de fissures et de vides au contact céramique-cendre imputables au phénomène de retrait lors de la phase de séchage de la cendre. Des projections issues du bain métallique ont pu les atteindre à différents stades de la coupellation ce qui expliquerait l'hétérogénéité des teneurs en argent. Nous pouvons estimer que cette coupelle C1 était bien utilisée pour la coupellation d'une petite quantité d'argent lors de l'affinage ultime de celui-ci. Ce processus, conduit à petite échelle, est par ailleurs attesté à Castel-

Minier par l'identification de sole de coupellation de taille réduite. En outre, la découverte à Castel-Minier d'éléments de métrologie pour le contrôle de petites masses de métal, un poids marchand de Toulouse et une pile à godet (Téreygeol et Gauthier, 2013) confirme que des volumes de métal tels qu'a pu contenir le creuset C1 étaient maniés sur le site en fin de chaîne opératoire pour exporter l'argent.

Les chaînes opératoires du cuivre et de ses alliages

La métallurgie du cuivre est représentée par deux céramiques. Le creuset C6 présente une contamination en Pb, Cu et Zn (figure 7). Cette combinaison d'éléments suggère une première interprétation fonctionnelle de cette céramique qui concerne la fonte d'un alliage cuivreux et plus particulièrement un laiton (alliage de cuivre et de zinc) au plomb. C'est en effet ce type de pollution que l'on retrouve dans des creusets utilisés dans le cadre de la métallurgie de cet alliage. Le zinc est un métal très volatil qui se diffuse rapidement dans la matrice des creusets (Dungworth, 2000). Cela explique la faible teneur en zinc dans les billes métalliques du creuset C6 alors que ce métal est présent dans la pâte (figure 7). Distinguer si un creuset a été utilisé pour confectionner un alliage, le fondre ou le recycler est délicat. Cependant, les études des céramiques utilisées pour la cémentation du laiton ont toutes démontré une concentration particulièrement élevée en zinc sur toute l'épaisseur des parois par rapport aux creusets utilisés pour fondre cet alliage (Bayley, 1984 ; Picon *et al.*, 1995 ; Rehren, 1996). La pollution du creuset de Castel-Minier se limite à la surface : à l'intérieur, elle provient du contact entre le creuset et l'alliage, à l'extérieur des vapeurs diffusées lors de la chauffe de celui-ci (Martinón-Torres et Rehren, 2002, p. 106). En

outre, aucun indice de production de laiton par cémentation n'a été retrouvé sur le site, le minerai de zinc disponible en mine, de la sphalérite, ne se prête pas à ce procédé. En revanche, des déchets de coulée relèvent de cette catégorie d'alliage, ce qui laisse présager de l'utilisation de ce creuset pour la fonte ou le recyclage de laiton.

À partir des données issues de l'analyse MEB-EDX, une seconde interprétation fonctionnelle peut être proposée pour la céramique C6. La composition élémentaire des billes prises dans la phase vitreuse montre en effet qu'elles sont composées d'un sulfure de cuivre contenant des teneurs notables en fer, argent, zinc et plomb (figure 6). Le soufre, le cuivre, le zinc, le fer et l'argent sont des métaux fréquemment associés dans les minerais de la famille des « cuivres gris » (tétratérite) découverts dans les niveaux stratigraphiques de Castel-Minier mais également dans les mines de la vallée du Garbet (Flament, 2017, p. 347). Jusqu'ici, les indices du travail de ce minerai sur le site étaient ténus. L'analyse de la céramique C6 permet d'envisager une chaîne opératoire du traitement de la tétratérite à petite échelle qui s'apparente à des pratiques d'essai de minerai. Plus précisément, cet individu a pu servir à traiter une matte (issue de la réduction de la tétratérite) par emplombage pour en récupérer l'argent.

D'après les données issues de l'analyse XRF (figure 7), la céramique C8 est à mettre en relation avec le travail d'un alliage plomb-cuivre. De tels alliages ont été mis en évidence parmi le corpus de plombs de Castel-Minier. Ils peuvent provenir du traitement de minerais mixtes associant de la galène et de la chalcopryrite mais également du recyclage d'objets domestiques confectionnés à partir de cet alliage, notamment de la vaisselle.

4. CONCLUSION

À ce point de l'étude, le corpus de céramiques métallurgiques de Castel-Minier, bien que limité, est riche d'informations qu'il s'agisse de la typologie comme de la caractérisation du travail des métaux non ferreux. Il confirme en premier lieu la nature poly-métallurgique du site. Une partie du corpus révèle des activités de traitement du plomb désargenté et d'affinage de l'argent. Une autre partie se rattache à la métallurgie du cuivre et concerne la fonte de laiton et d'alliage cuivre-plomb. Ce constat met en évidence les pratiques de métallurgie extractive et de métallurgie secondaire ainsi que le recyclage et la valorisation des sous-produits des chaînes opératoires.

Les céramiques métallurgiques sont également symptomatiques de l'évolution des activités sur le site. Alors que

jusqu'au XIV^e siècle, les ateliers se consacrent à la métallurgie du plomb et de l'argent, le XV^e siècle voit se développer la transformation de minerais de cuivre. De surcroît, la spécialisation des espaces qui avait été proposée à partir des données de terrain est corroborée par notre étude. Ainsi, le creuset C6 a été découvert dans un espace dont les activités concernent principalement la métallurgie du cuivre à partir du XV^e siècle. De la même manière, l'individu C9 a été retrouvé dans un niveau de remblais moderne dans ce même secteur. Il n'a pu à ce jour faire l'objet d'analyses poussées en raison de sa découverte récente lors de la dernière campagne de fouille et ne peut donc être de façon certaine associé au travail du cuivre. Néanmoins, sa localisation ainsi que sa pâte tendent à l'associer à cette métallurgie. Par ailleurs, les fragments, qui se rattachent à la métallurgie de l'argent ont été retrouvés dans des niveaux ayant livré des fragments métalliques, de minerais de plomb argentifère ou de casses de coupellations, autant d'indices de la chaîne opératoire du métal blanc.

L'utilisation d'une pâte spécifique pour le façonnage de creusets à partir du XV^e siècle dénote une évolution technique et économique qui concerne également les chaînes opératoires métallurgiques avec la production de nouveaux alliages dont des bronzes au plomb antimoniés. D'ailleurs, cette pâte spécifique semble toujours associée à la métallurgie du cuivre qui nécessite d'atteindre des températures plus importantes et donc une plus forte résistance aux chocs thermiques.

À l'opposé, la métallurgie de l'argent et du plomb fait uniquement appel à la (ré)utilisation de pâtes et/ou de pots domestiques. Les pratiques de recyclage révèlent un certain pragmatisme des métallurgistes. Le choix particulier de la pâte céramique dite « Commingeoise » est intéressant. Celle-ci contient en effet une part importante de dégraissant de quartz qui pourrait ainsi lui conférer une résistance mécanique et thermique adaptée à une fonction métallurgique. Malgré le corpus limité, il semble ainsi que l'on puisse dresser une typologie des céramiques métallurgiques de Castel-Minier qui établit un lien entre les fonctions et les propriétés techniques. Cette étude révèle également l'importante nécessité, lors des études céramologiques, de vérifier si une céramique métallurgique ne s'est pas mêlée au corpus des céramiques communes.

Cette confrontation entre investissement technique et recyclage pose la question de l'identité de l'artisan qui a façonné les céramiques techniques. Était-ce le potier qui produisait le vaisselier domestique local ou était-ce un métallurgiste, comme le préconise Agricola? Une future étude pétrographique tentera de répondre à cette problématique en abordant la question de l'origine des pâtes. En

outre, seules des analyses semi-quantitatives ont été menées jusqu'à présent et la détermination précise des compositions en éléments majeurs et en éléments-traces des argiles semble indispensable. Ces méthodes d'étude complémentaires permettraient d'étayer les rapprochements opérés avec des pâtes domestiques, en précisant la nature des matériaux utilisés en métallurgie. Ces mesures donneraient également l'occasion d'appréhender de façon plus précise leurs propriétés réfractaires et d'aborder les méthodes de façonnage employées, en particulier une mise en forme par moulage, préconisée dans les traités de métallurgiques, ou par tournage comme l'attestent de nombreux exemples archéologiques (Arles et Téreygeol, 2009, p. 138; Martinón-Torres et Rehren, 2009, p. 54 et 60).

Bibliographie

- Arles, A., 2009. Entre monnayage officiel et faux-monnayage. La fabrication de la monnaie au marteau en France (XIII^e-XVII^e siècles). Approche physico-chimique, expérimentale et historique. Thèse de doctorat, Université d'Orléans, France.
- Arles, A., Téreygeol, Fl., 2009. La fonte des alliages dans les ateliers monétaires médiévaux : L'exemple de Montreuil-Bonnin (Vienne). *Numismatique et Archéologie En Poitou-Charentes, Recherches et Travaux de la Société d'Études Numismatiques et Archéologiques*, 2 : 129-148.
- Bayley, J., 1984. Roman brass-making in Britain. *Journal of the Historical Metallurgy Society*, 18 : 42-43.
- Bayley, J., Rehren, Th., 2007. Towards a functional and typological classification of crucibles. In S. La Niece, D. Hook, P. Craddock (dir.). *Metals and Mines Studies in Archaeometallurgy*. Archetype, Londres, 46-55.
- Dillmann, Ph., Téreygeol, Fl., Verna, C., 2006. Premières analyses métallographiques des produits sidérurgiques trouvés sur le site médiéval de Castel-Minier (Aulus-les-Bains, 09). *ArcheoSciences*, 30 : 7-14.
- Dubois, Cl., 1999. Les mines de plomb argentifère et zinc d'Aulus-les-Bains (Ariège). *Archéologie du Midi médiéval*, 17: 187-211.
- Dungworth, D., 2000. A note on the analysis of crucibles and moulds. *Journal of the Historical Metallurgy Society*, 34 : 83-86.
- Dupuy, J., 1779. La recherche et découverte des mines des montagnes Pyrénées, faite en l'an mil six cents par Jean de Malus Escuyer & Maistre de la monoye de Bourdeaux ». In N. Gobet (dir.). *Les Anciens minéralogistes du royaume de France*. Ruault, Paris, 75-175.
- Flament, J., 2017. Les métallurgies associées de la fin du XIII^e siècle au XV^e siècle. L'argent, les cuivres et le plomb à Castel-Minier (Ariège, France). Thèse de doctorat, Université d'Orléans, France.
- Gauthier, J., 2012. La fortune des entreprises minières : histoire et archéologie de l'essai des minerais par voie sèche en Europe, du haut Moyen Âge au XVIII^e siècle. Thèse de doctorat, Université de Haute-Alsace, France.
- Gauthier, J., Flament, J., Silenzi, Fr., Téreygeol, Fl., 2019. Broyer le minerai et affiner l'argent : deux exemples d'une approche intégrée de l'expérimentation ». In G. Verly, F. Rademakers, F. Téreygeol (eds.), *Studies in experimental archaeometallurgy: methodological approaches from non-ferrous metallurgies*, Monographies Instrumentum, n°60, Editions Mergoïl, Dijon.
- Géraud, M., 2016. La céramique du site de Castel-Minier (Aulus-les-Bains, Ariège) : la fin de l'occupation du site, XV^e-XVI^e siècles. Mémoire de master 1, Université Toulouse Jean-Jaurès, France.
- Géraud, M., 2017. La Commingeoise de Castel-Minier (Aulus-les-Bains, Ariège) : étude typologique, technologique et archéométrique. Mémoire de master 2, Université Toulouse Jean-Jaurès, France.
- Géraud, M., en cours. La céramique médiévale dite « Commingeoise », pour une redéfinition d'un ensemble chrono-culturel du sud de la France. Thèse de doctorat, Université Toulouse Jean-Jaurès, France.
- Ghiri, M. N., Abtahi, A., Hashemi, S. S., Jaberian, F., 2012. Potassium release from sand, silt and clay fractions in calcareous soils of southern Iran. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 58: 1439-1454.
- Gosselin, M., en cours. Qualités des alliages ferreux : une approche diachronique et statistique. Thèse de doctorat, Université de Paris Nanterre, France.
- Hoover, H. C., Hoover, L. H., 1950. *Georgius Agricola De re Metallica*. Dover, New York.
- Leroy S., Cohen S. X., Verna C., Gratuze B., Téreygeol Fl., Fluzin Ph., Bertrand L., Dillmann Ph., 2012. The medieval iron market in Ariège (France). Multidisciplinary analytical approach and multivariate analyses. *Journal of Archaeological Science*, 39 : 1080-1093.
- Martinón-Torres, M., Rehren, Th., 2009. Post-Medieval Crucible Production and Distribution: A Study of Materials and Materialities. *Archaeometry*, 51 : 49-74.
- Martinón-Torres, M., Rehren, Th., 2014. Technical Ceramics. In B. W. Robert, C. T. Thornton (ed.). *Archaeometallurgy in Global Perspective*. Springer, New York, 107-131.
- Martinón-Torres, M., Rehren, Th., von Osten, S., 2003. A 16th century lab in a 21st century lab: archaeometric study of the laboratory equipment from Oberstockstall (Kirchberg am Wagram, Austria). De [<http://www.antiquity.ac.uk/projgall/martinon298>].
- Martinón-Torres, M., Thomas, N., Rehren, Th., Mongiatti, A., 2008. Some problems and potentials of the study of cupellation remains the case of post-medieval Montbéliard France. *ArcheoSciences*, 32 : 59-70.

- Martinón-Torres, M., Rehren, T., 2002. Agricola and Zwickau: Theory and Practice of Renaissance Brass Production in SE Germany. *Journal of the Historical Metallurgy Society*, 36 : 95-111.
- Mille, P., Téreygeol, Fl., 2011. *L'atelier monétaire royal de la Rochelle : la place de Verdun : archéologie d'un espace urbain*. Presses universitaires de Rennes, Rennes.
- Mongiatti, A., 2009. Assaying and smelting noble metals in 16th century Austria: a comparative analytical study. Thèse de doctorat, University College London, Royaume-Uni.
- Mugueta Moreno, Iñ., 2004. Política monetaria en Navarra bajo el reinado de los primeros Evreux (1328-1349). *En la España Medieval*, 27 : 77-104.
- Orton, C., Tyers, P., Vince, A., 1993. *Pottery in archaeology*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Picon, M., Nezet-Celestin, M. L., Desbat, A., 1995. Un type particulier de grands récipients en terre réfractaire utilisés pour la fabrication du laiton par cémentation. In L. Rivet (ed.). Actes du Congrès de Rouen de la Société française d'étude de la céramique antique en Gaule. Société française d'étude de la céramique antique en Gaule, Rouen, 207-215.
- Rehren, Th., 1996. Alchemy and Fire Assay - an Analytical Approach. *Journal of the Historical Metallurgy Society*, 30 : 136-142.
- Rehren, Th., 2003. Crucibles as Reaction Vessels in Ancient Metallurgy. In P. Craddock, J. Lang (dir.). *Mining and Metal Production through the Ages*. British Museum Press, Londres, 207-215.
- Sarah, G., Gratuze, B., 2016. LA-ICP-MS analysis of ancient silver coins using concentration profiles. In L. Dussubieux, M. Golitko, B. Gratuze (dir.). *Recent Advances in Laser Ablation ICP-MS for Archaeology*. Springer-Verlag, Berlin, 115-133.
- Smith, C. S., Hawthorne, J. G., 1963. *Theophilus. On divers arts. The foremost medieval treatise on painting, glassmaking and metalwork*. Dover Publications, New York.
- Téreygeol, Fl., 2014. Aulus-les-Bains, Le Castel-Minier : Opération triennale (2012-2014) : rapport final. SRA Midi-Pyrénées, Toulouse.
- Téreygeol, Fl., Arles, A., Foy, E., Florsch, N., Llubes, M., 2010. Dosages par fluorescence X portable d'ateliers médiévaux de production des métaux non-ferreux. *ArchéoSciences*, 34 : 243-252.
- Téreygeol, Fl., Gauthier, J., 2013. Le godet d'une pile du XIV^e siècle à Castel-Minier. *Instrumentum*, 38 : 44-46.
- Téreygeol, Fl., Guirado, M.-P., 2013. Affiner l'argent au four de coupellation. Expérimentations autour du De re Metallica d'Agricola ». In Fl. Téreygeol (dir.). *Comprendre les savoir-faire métallurgiques antiques et médiévaux*. Errance, Paris, 169-188.
- Téreygeol, Fl., Heckes, J., 2010. El vent de les manxes i el poder del mall : les eines hidrauliques de la « mouline » del jaciment arqueologic Castel-Minier (XVI^e s., França). In D. Gasquet D. (éd.). Actes de les primeres jornades de recerca i desenvolupament de la vall ferrera. Tremp, Garsineu Edicion, 51-63.
- Téreygeol, Fl., Thomas, N., 2003. La coupellation des alliages cuivre-argent : Approche expérimentale de l'essai d'argent par voie sèche. *Revue d'archéométrie*, 27 : 171-181.
- Thomas, N., Bourgarit, D., 2014. Les techniques de production des batteurs et fondeurs mosans au Moyen Age (XII^e-XVI^e siècles). In N. Thomas, I. Leroy, J. Plumier (dir.). *L'or des dinandiers. Fondeurs et batteurs mosans du Moyen Âge*. Maison du patrimoine médiéval mosan, Bouvignes-Dinant, 43-63.
- Thomas, N., Martinón-Torres, M., Goy, C., Rehren, T., 2006. La fouille archéologique de quartier de la Velotte à Montbéliard : nouvelles données sur des opérations de chimie oubliées. *Société d'émulation de Montbéliard*, 155 : 441-465.
- Ulseth, P., Lohne, O., Risvaag, J. A., Lohne, J., Ervik, T., 2015. Late Medieval bone-ash cupels from the archbishop's mint in Trondheim. *Fornvännen*, 110 : 267-279.
- White, H., Kearns, Th., 2010. *Legge's Mount, The Tower of London, Scientific Analysis of the Crucibles*. English Heritage, Portsmouth.