Entre monnayage officiel et faux-monnayage : la fabrication de la monnaie au marteau en France (XIIIe - XVIIe siècles) : approche physico-chimique, expérimentale et historique

Adrien Arles

▶ **To cite this version:**

Adrien Arles. Entre monnayage officiel et faux-monnayage : la fabrication de la monnaie au marteau en France (XIIIe - XVIIe siècles) : approche physico-chimique, expérimentale et historique. Histoire. Université d'Orléans, 2009. Français. ⟨NNT : 2009ORLE1101⟩. ⟨tel-00418642v2⟩

HAL Id: tel-00418642

https://theses.hal.science/tel-00418642v2

Submitted on 9 Feb 2010

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

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

HAL Authorization

UNIVERSITÉ D'ORLÉANS

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES DE L'HOMME ET DE LA SOCIÉTÉ

CENTRE ERNEST-BABELON

INSTITUT DE RECHERCHE SUR LES ARCHÉOMATÉRIAUX

THÈSE présentée par :

Adrien ARLES

soutenue le : **13 février 2009**

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'université d'Orléans**

Discipline/ Spécialité : Histoire

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

Volume 1 : Texte

THÈSE dirigée par :

M. Bernard GRATUZE	Directeur de Recherche - CNRS
M. Florian TÉREYGEOL	Chargé de Recherche - CNRS

RAPPORTEURS :

M. Pierre FLUCK	Professeur - Université de Haute Alsace
M. Ivan GUILLOT	Professeur - Université de Paris 12

JURY :

M. Alain DAVESNE	Professeur - Université d'Orléans, Président du jury
M. Pierre FLUCK	Professeur - Université de Haute Alsace
M. Bernard GRATUZE	Directeur de Recherche - CNRS
M. Ivan GUILLOT	Professeur - Université de Paris 12
M. Jacques POIRIER	Professeur - Université d'Orléans
M. Florian TÉREYGEOL	Chargé de Recherche - CNRS

Sculpture du XII^{e} siècle relevée par M. Deville dans les ruines de l'abbaye romane normande de Saint-Georges de Boscherville (76).

Remerciements

Au terme de ce travail, il est important pour moi d'adresser mes remerciements aux personnes et organismes qui ont permis et soutenu cette recherche réalisée au sein du Centre Ernest-Babelon de l'Institut de Recherche sur les Archéomatériaux (IRAMAT).

C'est en premier lieu la Région Centre qui a financé la bourse de recherche me permettant ainsi de mener à bien cette étude.

J'adresse ma grande reconnaissance à Bernard Gratuze, directeur de l'IRAMAT et du Centre Ernest-Babelon qui a décidé de m'accueillir au sein de son laboratoire et de diriger ma thèse. Sa très grande disponibilité m'a permis d'enrichir mes connaissances des méthodes d'analyse des matériaux de nombreuses techniques ingénieuses.

Je tiens à remercier tout particulièrement Florian Téreygeol, mon co-directeur de thèse, pour la confiance qu'il m'a témoignée en me proposant ce sujet de recherche que j'ai ensuite développé durant cette thèse précédée de deux DEA. Il a su me guider durant ces nombreuses années et m'a fait partager ses connaissances sur l'Histoire des techniques et l'expérimentation métallurgique ainsi que sur les méthodes archéologiques. Ce travail lui doit beaucoup.

Je suis également reconnaissant envers chacun des membres du jury qui a voulu me faire l'honneur de s'intéresser et de juger ce travail. Je remercie Messieurs Pierre Fluck, professeur de l'université de Haute Alsace et Ivan Guillot, professeur de l'université de Paris XII qui ont accepté d'être rapporteurs de ma thèse, ainsi que Jacques Poirier, professeur de l'université d'Orléans et particulièrement Alain Davesne, professeur et directeur de l'URF Lettres de l'université d'Orléans qui a accepté de présider ce jury.

Je tiens à avoir une pensée pour Jean-Noël Barrandon qui a disparu durant le développement de cette étude. Je suis fier d'avoir pu travailler dans le laboratoire d'archéométrie dont il fut à l'origine.

Je voudrais particulièrement adresser mes remerciements à Messieurs Stéphane Lequien, ancien directeur du Laboratoire Pierre Süe et Philippe Dillmann, responsable du groupe « Archéomatériaux et prévision de l'altération » de ce laboratoire, pour m'avoir accueilli durant mes stages de DEA qui ont précédé cette thèse et qui m'ont, par la suite, permis d'avoir accès à leur laboratoire durant cette recherche.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à Anne Bocquet, Pierre Mille et Jean-Paul Nibodeau, archéologues de l'institut national de recherches archéologiques préventives, pour m'avoir confié le matériel de l'atelier monétaire de La Rochelle. Je remercie également le Service régional d'archéologie du Poitou-Charentes et plus particulièrement Jean-François Baratin, Eric Normand, ainsi que Pierre-Arnaud de Labriffe et Guy Rancoule qui ont permis l'organisation des chantiers de fouilles de Montreuil-Bonnin et de La Catette et pour m'avoir confié plusieurs des *corpus* de mon étude. Mes remerciements vont également aux personnels du musée de Poitiers, et particulièrement à Madame Hiernard, qui m'ont donné accès à leur collection. De même que je remercie François Matta qui m'a remis le matériel archéologique qu'il a découvert dans la grotte de La Catette.

Je voudrais remercier les historiens numismates Marc Bompaire et Arnaud Clairand pour m'avoir transmis un bon nombre de leurs retranscriptions inédites d'archives et avec qui j'ai pu avoir d'intéressantes discussions sur mes problématiques numismatiques.

Je souhaite aussi remercier le personnel des Mines d'Argent des Rois Francs de Melle, particulièrement Jean-Paul Bailleul et Jean-Philippe Marnais pour m'avoir permis de reconstituer le monnayage au marteau sur de coins qui m'a fourni les coins de mes frappes et François Peyrat qui a reconstitué la sole du four expérimenté. C'est également l'occasion de saluer ici mes collègues expérimentateurs : Aurore Doridot, Alessandro Ervas, Paolo Piccardo et Dominique Robcis avec qui j'ai beaucoup appris sur le travail du métal.

J'adresse un grand merci aux permanents du Centre Ernest-Babelon et Laboratoire Pierre Süe en particulier Maryse Blet-Lemarquand, Jean-Claude Rimbault et Alain Giovagnoli, du Centre Ernest-Babelon ainsi qu'à Oulfa Belhadj et Eddy Foy du Laboratoire Pierre Süe pour la disponibilité et la bienveillance dont ils ont toujours fait preuve.

Quant aux stagiaires, doctorants et post-doctorants archéomètres que j'ai pu croiser durant ma recherche, merci à vous. On tourne moins en rond quand on ne rame pas tout seul. Et je tiens plus particulièrement à remercier Marie-Cécile Vivier qui m'a aidé à étudier l'un des *corpus* de faux-monnayage et qui a eu le courage de rédiger son mémoire de master tout en participant au chantier de fouilles de la grotte de La Catette. Je remercie également Anne Michelin qui a observé certains de mes échantillons d'argenture. Merci aussi à toi guinea pig qui a su sans soupir et sans sourciller supporter à un rythme de soutier ces semaines qui précèdent la soutenance, ça soutient et ça impose sincèrement le respect !

Un grand merci aussi aux fouilleurs et fouilleuses qui ont participé aux différents chantiers archéologiques organisés dans le cadre de cette étude, la palme de l'assiduité (acidité ?) revenant à Magdalena et Mélanie pour leurs trois rounds consécutifs.

Merci à mes relectrices, Dominique Lhuillier, secrétaire du Centre Ernest-Babelon, et ma mère, Martine Courtiade, pour leurs lectures attentives.

Enfin, ce travail n'aurait pu aboutir sans le soutien de ma famille, de mes amis et de Celia qui ont eu le courage de me supporter et ce, jusque pendant la rédaction de ce manuscrit, preuve en est de leur patience.

Sommaire

AVANT-PROPOS **13**

Introduction **15**

Chapitre I. Bibliographie **29**

I. Sources manuscrites **29**
II. Sources imprimées **30**
III. Bibliographie : monnayage officiel **32**
IV. Bibliographie : faux-monnayage **41**
V. Bibliographie : prospection géochimique **44**
VI. Bibliographie scientifique **54**
VII. Bibliographie : études des procédés d'argenture **50**

Chapitre II. Etude bibliographique et *corpus* archéologiques **57**

Partie 1. La chaîne opératoire officielle *57*
I. Les sources **57**
II. La chaîne opératoire selon les sources **66**
A. Les matières premières du monnayage médiéval français 72
B. Les opérations de fonderie 75
C. Mise en forme au marteau 84
D. Blanchiment des flans 96
E. Frappe au marteau 101
F. Le retraitement des déchets 105
III. Remarques sur la chaîne opératoire réglementaire du monnayage au marteau **109**

Partie 2. Le faux-monnayage au Moyen Age et au début de la période moderne *115*

Partie 3. Présentation du corpus de l'étude *129*
I. Sites précurseurs **130**
A. Monnayage royal : La Rochelle (Charente-Maritime) 130
1 - Les fouilles 131
2 - Le matériel archéologique 140
a. Les céramiques métallurgiques 141
b. Le mobilier numismatique métallique 144
B. Faux monnayage : la grotte de Lauradieu (Aude) 153
1 - La fouille 154
2 - Le matériel archéologique associé à la production de fausses monnaies 156
II. Les sites issus de fouilles récentes **161**
A. La recherche des sites 161
1 - Le choix des sites 162
2 - Les moyens usuels de prospection 163
3 - Le développement d'une nouvelle méthode : la prospection géochimique de sites de métallurgie des métaux non ferreux 166
a. Etude bibliographique 166
b. Protocole de prospection géochimique pour la mise en évidence de sites archéologiques de métallurgie 176

B. Monnayage officiel : Montreuil-Bonnin (Vienne) 216
1 - L'atelier monétaire de Montreuil-Bonnin 216
2 - Les investigations archéologiques 222
a. La topographie du site et les prospections géophysiques 222
b. La prospection géochimique 227
c. Les sondages archéologiques 232
3 - Le matériel métallurgique archéologique 237
a. Les scories et parois de four métallurgiques 238
b. Les céramiques métallurgiques 239
C. Faux monnayage : la grotte de La Catette (Aude) 242
1 - Situation et topographie de la grotte de La Catette 244
2 - La prospection géochimique 246
3 - La fouille 250
4 - Le matériel archéologique 254
a. Le matériel monétaire 254
b. Les outils 261
III. Critique du corpus 263

Chapitre III. La fabrication de la monnaie au Moyen Age 269

Partie 1. Réalisation des alliages 269
I. Le four en trou de serrure de l'atelier monétaire de La Rochelle 270
A. Construction du four 272
B. Mise en chauffe et conduite du four 277
1 - Le séchage du four 277
2 - Le préchauffage du four 277
3 - La conduite du four 279
C. Résultats expérimentaux 281
D. Les apports de l'expérimentation 289
II. Les creusets de l'atelier monétaire de Montreuil-Bonnin 297
III. La composition des alliages du monnayage du second atelier de La Rochelle 323
A. Définition du protocole d'analyse 323
B. Les résultats analytiques 331
1 - Les métaux du monnayage de l'atelier de La Rochelle 334
2 - Les monnayages du XVI^{e} siècle à La Rochelle 357
IV. Discussion sur les opérations de fonderie 369

Partie 2. La chaîne opératoire du monnayage au marteau 387
I. Coulée et mise en forme des lames 387
A. La coulée des lames 388
B. La mise en forme des lames 398
II. Mise en forme des carreaux et des flans 413
A. Deux comptes monétaires de production 416
B. Expérimentations : mise en forme et déchets de coupe 422
C. Le poids des ordonnances monétaires sur le travail des monnayeurs 427
D. La chaîne opératoire officielle dans le monnayage de La Rochelle 433
1 - Découper les lames en carreaux 433
2 - Battre et ajuster les carreaux 439
3 - Flatir et rechausser les carreaux pour produire des flans 442
4 - Bouer les flans 448
5 - Les traitements de recuit au cours de la préparation de flans 451
6 - Le monnayage de bas billon de La Rochelle 454
7 - Bilan : l'épaisseur comme paramètre de réglage 456

III. Blanchiment des flans 459
A. Observations archéologiques 461
B. Approche expérimentale 468
1 - Préparation des échantillons 469
2 - Protocole de blanchiment 471
3 - Résultats expérimentaux 473
a. Analyse des réactifs et des produits de réaction 473
b. Observations macroscopiques et métallographiques 475
4 - Proposition de mécanisme 478
C. Discussion 487
IV. La Frappe au marteau en conclusion 505

Chapitre IV. Deux fabrications de fausses monnaies : le faux-monnayage audois 511

Partie 1. Un faux-monnayage d'opportunité : La grotte de Lauradieu 512
I. Datation du faux-monnayage de la grotte de Lauradieu 513
II. Les matières premières du faux-monnayage de la grotte de Lauradieu 517
III. La chaîne opératoire du faux-monnayage de la grotte de Lauradieu 531
IV. L'estimation de la production du faux-monnayage de la grotte de Lauradieu 544
V. Le profil du faux-monnayeur de la grotte de Lauradieu 549

Partie 2. Les faux-monnayages de la grotte de La Catette 553
I. Datation du faux-monnayage de la grotte de La Catette 553
II. Les matières premières de faux-monnayage de la grotte de La Catette 563
III. Les chaînes opératoires du faux-monnayage de la grotte de La Catette 573
A. Différents faux-monnayages 573
B. Deux chaînes opératoires de faux-monnayage 577
1 - La production de fausses monnaies de bas billon 577
2 - La production de fausses monnaies de billon 586
3 - Une adaptation avantageuse 591
IV. Le profil du faux-monnayeur de la grotte de La Catette 595

CONCLUSION 603

GLOSSAIRE 621

TABLE DES FIGURES ET DES TABLEAUX 625

ANNEXES ..... VOLUME 2

Avant-propos

Pour l'aider dans la consultation de cet ouvrage, le lecteur trouvera à la fin de ce premier volume, un glossaire qui rassemble les définitions du vocabulaire technique employé dans les discussions.

Les annexes qui regroupent la présentation des méthodes d'analyse, les différents inventaires de *corpus* archéologiques étudiés ainsi que plusieurs comptes rendus d'examens métallographiques ponctuels et de reconstitutions expérimentales, ont été renvoyées dans le second volume. La première annexe présentée est par ailleurs consacrée à la présentation des principales unités monétaires.

Les concentrations associées aux analyses de composition réalisées dans cette thèse sont exprimées, sauf mention contraire, en pourcentages massiques (%mass). Pour plus de concision, j'ai parfois utilisé les abréviations de la classification périodique de D. Mendeleïev, pour désigner les éléments chimiques. Je rappellerai donc ici les principaux composés rencontrés : antimoine (Sb), argent (Ag), arsenic (As), cuivre (Cu), étain (Sn), fer (Fe), mercure (Hg), or (Au), plomb (Pb) et zinc (Zn).

Introduction

Dans les années 1990, la construction d'un parking souterrain sous la place de Verdun à La Rochelle (17) a permis aux archéologues de faire une découverte exceptionnelle. Au cours de leurs travaux, ils ont mis au jour les vestiges d'un atelier monétaire royal en activité entre la fin du XIV^{e} et la fin du XVII^{e} siècle. Il s'agit de la seule fabrique officielle française ayant pu faire l'objet de fouilles, jusqu'à aujourd'hui.

Les objets retrouvés au cours des travaux archéologiques apparaissent, pour la plupart, directement associés à l'activité propre à l'atelier, avec un *corpus* à la fois métallique et métallurgique : flans, carreaux, parois de four, creusets, coupelles de cendre, pierre de touche. La partie métallique est particulièrement remarquable puisqu'elle regroupe une très grande quantité d'objets correspondant à des monnaies à divers stades de mise en forme : les géométries orthogonales précédant les profils arrondis dans la chaîne opératoire. A première vue, leur lecture autorise l'observation de toutes les étapes de transformation. Ce matériel daté de la fin du Moyen Age et du début de la période moderne, a donc permis d'envisager une étude globale de la fabrication monétaire pour ces époques et en particulier de la chaîne opératoire qui y est associée, c'est-à-dire celle du *monnayage au marteau*.

Dans les principaux ouvrages et manuels de référence traitant de la numismatique médiévale, la question de la fabrication des monnaies n'est pas négligée. Au même titre que l'organisation administrative des ateliers monétaires, la description des différentes étapes de mises en forme nécessaires à l'obtention des pièces, fait généralement l'objet d'un chapitre entier[1]. Ce sont principalement

[1] Blanchet J.-A. *et al.*, *Manuel de numismatique française*, 4 tomes, Bologne, Italie, Formi Editore, t. 2, 1969, p. 21-29.
Challis C. E., *The Tudor coinage*, Manchester, Angleterre, Manchester University Press, 1978, p. 10-20.
Babelon E., *Introduction générale à l'étude des monnaies de l'Antiquité*, New York, Etats Unis, Arno press, fac-sim. de l'édition de 1901 (sans le chap. I), parue sous le titre : *Traité des monnaies grecques et romaines*, 1979, p. 807-832.
Grierson P., *Monnaies et monnayage introduction à la numismatique*, édité par Lemerle P., Paris, Aubier, coll. « Collection Historique », 1976, p. 125-161.

les traités techniques, par ailleurs rédigés par des personnels du milieu monétaire, qui constituent la base de la définition des procédés de transformation. Cependant, les numismates ont su les compléter par d'autres sources, la plupart propres au fonctionnement très réglementé de la production des monnaies[2]. L'ouvrage de F. Dumas et M. Bompaire expose un inventaire particulièrement détaillé des différentes données disponibles pour la période médiévale[3]. Dans le cadre de leurs études, les historiens de la monnaie ont à leur disposition les règlements, baux et ordonnances royales qui fixent la fabrication monétaire dans un cadre légal[4]. Ils peuvent également consulter les différents comptes rendus intervenant lors des contrôles qui encadrent cette activité sensible. Il s'agit en l'occurrence de procès verbaux d'épreuves auxquelles doivent parfois se soumettre les ouvriers, de comptes de production et d'inventaires intervenant généralement à la suite de fraudes ou de changements au sein des officines[5]. A ces documents, s'ajoutent même parfois la description des bâtiments lorsque des travaux sont réalisés dans les fabriques[6]. Enfin, les numismates se sont également appuyés sur des sources moins officielles telles que l'iconographie et les récits d'observateurs étrangers de la chose monétaire pour définir leurs versions des procédés de fabrication[7].

A partir de cette somme d'informations, les historiens de la monnaie proposent pour le Moyen Age, un bilan des différentes opérations nécessaires à l'élaboration

---

Engel A. *et al.*, *Traité de numismatique du Moyen Age*, 3 tomes, Paris, Ernest Leroux, t. 1, 1891, p. XLIX-LIII.
Le Noir M., *L'art du monnayage*, Paris, Le Préau des Livres, 1981, d'après l'édition de 1788, 88 p.
Bompaire M. *et al.*, *Numismatique médiévale, monnaies et documents d'origine française*, Turnhout, Belgique, Brepols, coll. « L'atelier du médiéviste », t. 7, 2000, p. 453-531.

[2] Boizard J., *Le traité des monoyes, de leurs circonstances et dépendances*, édité par Clairand A. *et al.*, Paris, K&H, coll. « Documents d'Histoire Monétaire », 2000, d'après l'édition de 1692, XV et 243 p.
Blanchet A. *et al.*, *Manuel de numismatique française*, *op. cit.*, t. 2, p. 21.
Ben Romdhane K., Traité inédit de technique monétaire, *Revue Numismatique*, vol. 6, n° 30, 1988, p. 207-226.

[3] Bompaire M. *et al.*, *Numismatique médiévale..., op. cit.*, t. 7, p. 453-531.

[4] Lafaurie J., Relation de Me Henry Poullain, ci-devant conseiller en la cour des monnaies, de l'épreuve de fabrication des espèces, sur certains nouveaux instruments proposés par Nicolas Briot,..., *Bulletin de la Société Française de Numismatique*, vol. 18, 1963, p. 310-311.

[5] *Id.*

[6] Bompaire M., Lieux de monnaie et ateliers monétaires dans la France médiévale, dans La Guardia R. *et al.*, eds., *I luoghi della moneta : le sedi delle zecche dall'antichita all'et moderna*, Milan, Italie, Comune di Milano, 2001, p. 87-100.
Cook B. J., The late medieval mint of London, dans La Guardia R. *et al.*, eds., *I luoghi della moneta : le sedi delle zecche dall'antichita all'et moderna*, Milan, Italie, Comune di Milano, 2001, p. 101-113.

[7] Dhenin M., Le vocabulaire du monnayage et la précellence du langage français : Henri Estienne, Project du livre intitulé : de la précellence du langage français, Paris, 1579, *Bulletin de la Société Française de Numismatique*, vol. 32, 1977, p. 275-276.
Challis C. E., *The Tudor coinage*, *op. cit.*, p. 10.
Babelon E., *Introduction générale..., op. cit.*, p. 816-821.

des espèces. Bien que l'inventaire semble exhaustif, il n'est globalement que descriptif. Les données extraites de l'étude des sources sont exposées sans discussion technique complémentaire. La principale raison d'un tel constat est certainement l'apparente simplicité des opérations de mise en forme présentées qui ne semblent pas demander plus de précisions. De plus, l'intérêt des numismates pour les questions de fabrication, intervient notamment dans une réflexion sur les rythmes de production. C'est à partir de ces évaluations qu'ils développent ensuite de problématiques d'histoire économique et monétaire[8]. Dans ce cas, les questions techniques viennent essentiellement fixer le cadre général des discussions.

Parallèlement aux descriptions proposées par les historiens, qu'en est-il de celles des physico-chimistes qui se sont également intéressés aux questions de fabrication monétaire ? Ces derniers ont considéré différents problèmes de mise en forme à partir de multiples approches propres à leurs domaines de compétences respectifs. Il apparaît toutefois que ces expertises techniques sont principalement développées à partir des monnayages antérieurs à la période médiévale.

La rareté des vestiges liés à la production des monnaies au Moyen Age, est-elle le paramètre qui a contraint les physico-chimistes à s'intéresser plus à l'Antiquité qu'à la période médiévale ? Cet argument ne justifie pas ce déséquilibre. Il suffit pour cela de considérer les *corpus* d'étude retenus par les chercheurs. Ces derniers n'ont que très rarement accès à des collections d'objets en cours de mise en forme[9]. Ils sont finalement obligés d'analyser les objets finis, c'est-à-dire les monnaies qui nous sont parvenues en plus grand nombre. En d'autres termes, leurs approches auraient pu également être réalisées à partir des monnayages médiévaux.

L'intérêt plus important des chercheurs pour l'Antiquité tient-il seulement de cette période ? La quantité des sources disponibles est peut-être l'un des paramètres à prendre en compte. Les nombreuses données monétaires rassemblées à partir de la fin du Moyen Age peuvent en définitive suggérer qu'il n'y a pas ou peu d'inconnus sur les méthodes de mise en forme. Et les présentations des procédés proposées par les numismates laissent à penser que les descriptions disponibles dans les traités techniques se suffisent à elles-mêmes.

Une telle observation est d'ailleurs transposable aux études développées sur les différents appareillages qui, à partir du XVII^{e} siècle, vont aboutir à la mécanisation

[8] Bompaire M., Les cadences de production (XIV^{e}-XVI^{e} s.), en France principalement, dans Depeyrot G. *et al.*, eds., *Rythmes de la production monétaire, de l'Antiquité à nos jours*, Paris, Université Catholique de Louvain, 1986, t. 7, p. 579-613.

[9] Larozas C., Technique de fabrication des monnaies dites « découpées au burin », *Cahiers Numismatiques*, vol. 43, n° 168, 2006, p. 9-22.

de la fabrication des monnaies. Les débats se limitent globalement à dater les transitions qui voient la disparition des procédés anciens. Les discussions se concentrent pour cela sur la recherche de stigmates caractéristiques des nouvelles techniques sur les monnaies[10]. Il n'y a pas d'approche technique effective et les interprétations portent rapidement sur les conséquences des changements, sur la productivité et l'organisation interne des fabriques. Pour les périodes les plus anciennes, les informations disponibles sont en revanche très limitées ce qui offre, en quelque sorte, un plus grand domaine de recherche. Mais ce manque de source oblige par ailleurs certains auteurs à supposer l'existence d'un rapport d'analogie entre les procédés antiques et d'autres plus récents, mieux documentés, pour constituer la base de leur réflexion[11].

L'état de l'art des recherches portant sur les techniques du monnayage au marteau en vigueur dans les ateliers monétaires français jusqu'au milieu du XVII^{e} siècle, se résume aux descriptions établies par les numismates. Il a donc un réel intérêt à en proposer ici une étude globale en particulier à partir de l'examen et la caractérisation du *corpus* archéologique découvert à La Rochelle.

D'un autre côté, les différentes approches dont rendent compte les physico-chimistes qui se sont intéressés à des problématiques similaires pour d'autres types de monnayages n'en sont pas moins intéressantes. Elles exposent les différentes méthodes qui ont été retenues pour répondre aux questions liées aux techniques monétaires. La prise en compte des avantages et des limites de chacune des études exposées doit permettre de définir un protocole multidisciplinaire idéal pour traiter le sujet de cette thèse.

Il apparaît que les recherches exposées par les physico-chimistes sur des questions de fabrication monétaire sont cantonnées à leurs spécialités respectives.

---

[10] Besly E., Rotary coining in Britain, dans Archibald M. M. *et al.*, eds., *Metallurgy in numismatics,* Londres, Angleterre, Royal numismatic society, 1993, t. 3, p. 118-129.
Gaspar P. P., Coining and die-making techniques in the 17th century, dans Archibald M. M. *et al.*, eds., *Metallurgy in numismatics,* Londres, Angleterre, Royal numismatic society, 1993, t. 3, p. 130-141.
Sellwood D., Early Austrian and German machine minting, dans Archibald M. M. *et al.*, eds., *Metallurgy in numismatics,* Londres, Angleterre, Royal numismatic society, 1993, t. 3, p. 108-117.
Thompson R. H., Mechanisation at the 17th century London mint: The testominy of tokens, dans Archibald M. M. *et al.*, eds., *Metallurgy in numismatics,* Londres, Angleterre, Royal numismatic society, 1993, t. 3, p. 143-153.

[11] « Comme les renseignements que nous possédons sur l'organisation intime des ateliers monétaires de l'antiquité grecque ou romaine, sont très incomplets, ou parfois obscurs, nous chercherons à suppléer à leur silence par l'examen sommaire des procédés usités dans les temps plus rapprochés de nous..., ».
Babelon E., *Introduction générale..., op. cit.*, p. 807.
Delamare F. *et al.*, Evolution of coin striking processes: A mechanical survey. I. Hammer striking, *Journal of Mechanical Working Technology*, vol. 11, 1985, p. 37-52.

Elles sont parfois confrontées aux points de vue des numismates qui prennent part aux discussions[12].

La première démarche qu'il est indispensable de mettre en œuvre dans une réflexion sur une chaîne opératoire, consiste à considérer les paramètres morphologiques relevés sur les échantillons caractéristiques de la production étudiée. L'intérêt d'une telle approche est particulièrement bien illustré par l'article de C. Larozas à propos d'un monnayage antique[13]. A partir de simples observations des stigmates et défauts de mise en forme, il présente une démonstration technique très convaincante. Celle-ci va d'ailleurs à l'encontre des théories défendues par de précédents numismates qui n'ont pas considéré les monnaies en question sous ce même point de vue. Cette étude souligne cependant l'intérêt de disposer d'un échantillonnage qui ne rassemble pas uniquement des objets finis. Une partie de ses hypothèses est formulée à partir de la caractérisation de lingots, de *carreaux* et de *flans*, en d'autres termes, d'artefacts en cours transformation dont la description de l'évolution morphologique est évidemment très significative dans une réflexion sur une chaîne opératoire. Néanmoins, il est très rare de pouvoir disposer de collections de tels vestiges dont les processus de mise forme n'auront pas été menés à terme.

La mise à disposition, pour cette thèse, du matériel archéologique en cours de transformation découvert à La Rochelle constitue donc un atout exceptionnel. A titre d'exemple, la rareté de tels échantillons est telle, qu'elle n'est pas remise en cause après l'élargissement à l'Europe du périmètre de recherche. En effet, seules deux autres fabriques médiévales, celle de Porto au Portugal et celle de Trondheim en Norvège, ont pu faire l'objet de fouilles[14]. Ces dernières ont révélé les mêmes

---

[12] Condamin J. *et al.*, Techniques romaines (I), *Revue Numismatique*, vol. 6, n° 7, 1965, p. 123-133. Delamare F. *et al.*, Etude mécanique de la frappe des monnaies, une méthode : La simulation sur pâte à modeler et son application à la frappe du statère éginètique, *Revue d'Archéométrie*, vol. 12, 1988, p. 81-91.

[13] Larozas C., Technique de fabrication..., *op. cit.*, p. 9-22.

[14] McLees C., The late medieval mint workshops at the Archbishop's Palace, Trondheim, *Antiquity*, vol. 68, 1994, p. 264-274.
McLees C., Itinerant craftsmen, permanent smithies and the archbishop's mint: the character and context of metalworking in medieval Trondheim, *Historical metallurgy*, vol. 30, n° 2, 1996, p. 121-135.
Dordio P. *et al.*, La maison d'Henri le Navigateur. Les maisons médiévales de la Douane et de la Monnaie, un centre de la couronne portugaise dans la ville de Porto (Portugal), dans De Boe G. *et al.*, eds., *Material culture in medieval Europe: papers of the "Medieval Europe Brugge 1997" Conference*, Zellik, Belgique, 3 t., Instituut voor het Archeologisch Patrimonium, 1997, t. 3, p. 171-182.
Lopes I. A. *et al.*, Excavaciones arqueológicas en la Casa de la Moneda de Oporto (sgs. XIV-XVI), dans Jorge V. O., ed., *3º Congresso de Arqueología Peninsular* Vila Real, Portugal, ADECAP, 1999, t. 7, p. 57-72.

types de vestiges que ceux découverts à La Rochelle. Parallèlement aux structures et artefacts métallurgiques, les archéologues ont pu dégager des artefacts explicites des fabrications monétaires associées.

Les raisons de la si faible représentativité des vestiges monétaires tient évidemment en premier lieu du nombre initialement limité de telles entreprises. Il suffit par exemple de considérer la répartition des ateliers monétaires français au XVI^{e} siècle.

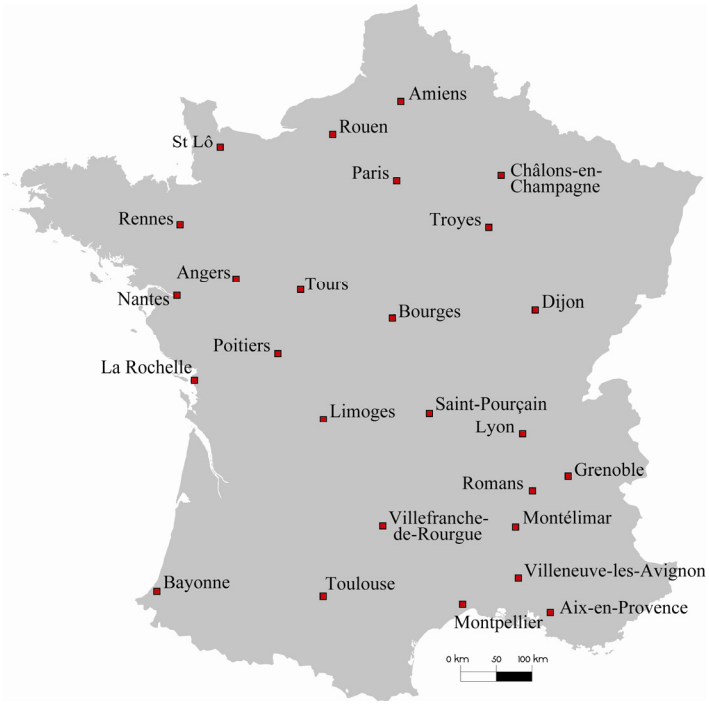


Figure 1 - Ateliers monétaires français au XVI^{e} siècle.

De plus, leur démantèlement doit normalement faire l'objet d'un soin particulier pour simplement éviter le risque de réutilisation des locaux à des fins de faux-monnayage. Et, quand il ne s'agit pas d'officines itinérantes comme cela a été le cas au Moyen Age en Allemagne, en Autriche et en Suisse, les ateliers monétaires se situaient généralement dans un contexte aujourd'hui urbanisé qui rend difficile toute opération archéologique[15]. C'est d'ailleurs à l'occasion de chantiers

---

Dordio P., Medieval and early modern Portuguese mints: locations and buildings, dans La Guardia R. *et al.*, eds., *I luoghi della moneta : le sedi delle zecche dall'antichita all'et moderna*, Milan, Italie, Comune di Milano, 2001, p. 115-128.

Risvaag J. A., Mints in Scandinavia: The case of Trondheim, dans La Guardia R. *et al.*, eds., *I luoghi della moneta : le sedi delle zecche dall'antichita all'et moderna*, Milan, Italie, Comune di Milano, 2001, p. 131-140.

[15] Zäch B., "Werkstatt, Haus und Mûnzhof", Later medieval and early modern mints in Switzerland, Germany and Austria, dans La Guardia R. *et al.*, eds., *I luoghi della moneta : le sedi delle zecche dall'antichita all'et moderna*, Milan, Italie, Comune di Milano, 2001, p. 129-130.

d'aménagements urbains que les fouilles des fabriques de La Rochelle, Porto et Trondheim ont pu avoir lieu.

A ce jour, une partie du matériel métallique découvert à Trondheim a fait l'objet d'une étude physico-chimique préliminaire. Il s'agit d'analyses de composition réalisées sur des coupes métallographiques de plusieurs vestiges monétaires sélectionnés parmi les lingots et monnaies en cours d'élaboration[16]. Celles-ci seront bientôt complétées puisqu'elles seront parallèlement mises en œuvre sur le matériel issu des fouilles de Porto. En effet, ces deux *corpus* monétaires sont actuellement étudiés d'un point de vue technique par T. Kearns dans le cadre de sa thèse à l'*Institute of Archaeology* de Londres[17].

Dans la mesure où la fabrication monétaire est une chaîne opératoire de mise en forme de métaux, il n'est pas surprenant que les approches métallographiques occupent une place importante dans les études qui traitent des questions sur le monnayage. Cette démarche vise à révéler dans la structure interne d'un objet métallique, les défauts résultant des traitements mécaniques et thermiques subis par le matériau durant sa préparation. Pour les monnayages antiques, ces analyses devaient répondre à la question des possibles frappes à chaud de certaines monnaies ainsi qu'à celle des techniques d'argenture[18]. Cette approche se voit

---

[16] Lohne O. *et al.*, *Hamerete sølvholdige stenger fra Erkebispegården, Kjemisk analyse og mikrostrukturundersøkelser*, SINTEF, rapport STF80A04068, Trondheim, Norvège, 1998, 23 p.
Lohne O. *et al.*, *Myntproduksjon i Erkebispegården i Trondheim*, SINTEF, rapport STF24A98589, Trondheim, Norvège, 1998, 10 p.

[17] Kearns T. *et al.*, Fire assay and quality control in the mint of Porto from the late Middle Ages to the Renaissance: some preliminary analitycal results, poster présenté au *37th International Symposium on Archaeometry*, Sienne, Italie, 2008.

[18] Condamin J. *et al.*, Métallurgie des monnaies antiques, problèmes anciens et nouveaux à la lumière des récentes recherches de laboratoire de Lyon, dans *Actes du congès international de Numismatique*, Copenhague, Danemark, 1967, p. 265-268.
Cope L. H., Surface-silvered ancient coins, dans Hall E. T. *et al.*, eds., *Methods of Chemical and Metallurgical Investigation of Ancient Coinage,* London, Royal Numismatic Society, 1972, t. 8, p. 261-278.
Sellwood D., Alterations in mint technology for the Edwardian penny, dans Metcalf D. M. *et al.*, eds., *Metallurgy in numismatics,* Londres, Angleterre, Royal numismatic society, 1980, t. 1, p. 178-179.
Gruel K. *et al.*, Aléas de la frappe monétaire à l'époque gauloise, dans Depeyrot G. *et al.*, eds., *Rythmes de la production monétaire, de l'Antiquité à nos jours*, Paris, Université Catholique de Louvain, 1986, t. 7, p. 67-77.
Russo G., Sulla tecnica di produzione del numerario in lega d'argento nel mondo antico e medievale, *Rivista Italiana di Numismatica e Scienze Affini*, vol. XCVII, 1996, p. 167-181.
Calliari I. *et al.*, Augustan Tresviral coinage of Rome mint: Central, auxiliary and imitation coins from Moesia-Thracia area, dans *Proceedings of Archaeometallurgy in Europe*, Milan, Italie, 2 t., AIM, 2003, t. 2, p. 221-226.
Pinasco M. R. *et al.*, Metallographic approach to the investigation of metallic archaeological objects, *Annali di Chimica*, vol. 97, n° 7, 2007, p. 553-574.

cependant limitée par les *corpus* disponibles pour ces recherches puisque ce sont généralement des monnaies sur lesquelles sont mises en œuvre de telles analyses. Il en résulte deux principaux inconvénients. Le premier tient du caractère invasif de la méthode qui nécessite d'observer une coupe prélevée dans les échantillons. Dans ce cas, on comprend qu'il faille limiter de façon importante le nombre d'artefacts étudiés. D'un autre côté, les pièces sont des objets finis. Les observations réalisées rendent donc compte en définitive de la somme des processus de transformation imposés à l'échantillon durant son élaboration. Comment faire alors correspondre à des étapes précises de mise en forme, les structures observées[19] ?

Pour pallier, dans une certaine mesure, au manque de matériel archéologique qui témoigne des étapes intermédiaires de transformation, les chercheurs ont parfois recours à l'expérimentation paléométallurgique. A partir de la reconstitution d'une chaîne opératoire supposée, ils peuvent, entre autres, disposer d'un *corpus* dont le processus de fabrication est parfaitement connu. Après leur analyse, ces échantillons constituent une base de référence à laquelle sont comparés les objets archéologiques[20]. La difficulté de cette méthode réside dans la définition des procédés de mise en forme à expérimenter. Dans ce cas, l'absence de sources en particulier pour les périodes les plus anciennes, oblige parfois les expérimentateurs à faire de nombreux essais dans certains cas suggérés à partir d'hypothèses plus ou moins assurées. C'est notamment ce dont rend compte un article de D. Sellwood dans lequel il présente une multitude d'expériences différentes qui n'ont finalement pour but que de vérifier la faisabilité des nombreuses méthodes proposées[21]. Une vingtaine d'années plus tard, il atteste implicitement le danger de sa démarche qui peut être ici qualifiée d'instinctive, puisqu'il déclare : « Experience of the attitude of the « shop-floor » to inquiries from above prompts me to suppose that the thirteenth-century mint personnel were indulging in standard obfuscatory techniques to increase their apparent

[19] Condamin J. *et al.*, Métallurgie des monnaies antiques..., *op. cit.*, p. 265-268.
[20] Sellwood D., Medieval minting techniques, *British Numismatic Journal*, vol. 31, 1962, p. 57-65.
Delamare F. *et al.*, Etude mécanique de la frappe..., *op. cit.*, p. 81-91.
Tobey L. B. *et al.*, Experiments to simulate ancient Greek coins, dans Archibald M. M. *et al.*, eds., *Metallurgy in numismatics,* Londres, Angleterre, Royal numismatic society, 1993, t. 3, p. 28-35.
Andrieux P. *et al.*, Etudes expérimentales et métallurgiques du moulage de monnaies en bronze de la fin de l'Empire romain, dans *L'exception égyptienne ? Production et échanges monétaires en Egypte hellénistique et romaine, actes du colloque d'Alexandrie*, Le Caire, Egypte, IFAO, 2005, p. 225-254.
Larozas C., Technique de fabrication..., *op. cit.*, p. 20.
Pinasco M. R. *et al.*, Metallographic approach..., *op. cit.*, p. 567-572.
[21] Sellwood D., Medieval minting techniques, *op. cit.*, p. 57-65.

indispensability. »[22]. En définitive, l'auteur justifie ses incompréhensions des techniques mises en œuvre par les ouvriers monétaires, par un désir de faire paraître leur travail complexe alors que selon lui il ne l'est pas...

Dans le cadre de l'étude du monnayage au marteau pour lequel il existe différentes sources bibliographiques monétaires, l'approche expérimentale est donc moins soumise à de tels risques. De plus, elle est ici très fructueuse dans le processus de réflexion sur le travail de la matière, car il est parfois difficile de comprendre une technique, un geste, à partir de descriptions écrites. D'autant plus que notre rapport avec la matière est souvent virtuel et la réflexion peut se conforter dans l'erreur lorsqu'elle ne s'appuie pas sur des observations réelles. Pour ce qui est du cas de La Rochelle, disposant d'objets à divers stades d'élaboration, la compréhension à partir des textes paraît plus aisée, mais elle porte le risque d'une simplification par superposition de l'information historique sur l'artefact archéologique. C'est une des raisons qui encouragent la mise en place de reconstitutions expérimentales. Grâce à de telles méthodes, il est possible d'appréhender et de comprendre le comportement de la matière. De plus, les données collectées ne sont pas seulement liées au matériau lui-même. Elles nous renseignent sur des faits qui ne laissent pas de traces tangibles comme par exemple un geste par rapport au travail du métal et de la durée de celui-ci, ou au contraire, l'observation d'un phénomène différent de celui décrit par un texte. En effet, si les vestiges archéologiques permettent d'observer le résultat des gestes de mise en forme, leur compréhension reste toujours de l'ordre de la construction intellectuelle. L'expérimentation propose une solution plus probable, sans être certaine, mais validée par la comparaison avec les objets archéologiques.

De plus, la compréhension d'un procédé ancien s'appuie souvent sur des descriptions contemporaines de l'époque étudiée. Il faut alors admettre que ces descriptions peuvent être incomplètes, du fait d'un oubli volontaire ou non, de la part du rapporteur, ce dernier souhaitant garder un certain savoir secret ou estimant trop évidente une information pour prendre la peine de la consigner.

Les études morphologiques, métallographiques et expérimentales constituent les principales approches retenues par les physico-chimistes pour traiter des questions de fabrication. Cependant, d'autres auteurs proposent des démarches plus originales qui n'en sont pas moins pertinentes.

Dans un de ses articles J. Guey emploie une méthode propre à la numismatique pour répondre à une problématique technique[23]. Celle-ci consiste à considérer un

[22] Sellwood D., Alterations in mint technology..., *op. cit.*, p. 179.
[23] Guey J., Techniques Romaines (II), *Revue Numismatique*, vol. 6, n° 8, 1966, p. 33-60.

corpus d'étude conséquent afin de mettre en évidence des répartitions statistiques particulières qui peuvent dériver d'un processus de mise en forme. Dans sa démonstration, l'auteur s'appuie notamment sur l'observation des masses au sein d'une sélection de monnaies. Sa démonstration lui permet finalement de placer une étape de découpe à un instant précis d'une chaîne opératoire.

Une seconde approche statistique intéressante est celle commune à I. Panek et J. Brand[24]. A partir de données disponibles dans des comptes de production, tous deux se sont intéressés au volume des déchets résultant des différentes opérations de fabrication. La discussion de J. Brand est la plus générale et son raisonnement n'est pas limité par une période, un pays, ni une technique particulière. Ses observations n'en sont pas moins très pertinentes sur des points précis de mise en forme qui éclairent globalement des problématiques liées à l'élaboration de monnaies.

Enfin, il est important d'évoquer les travaux originaux à l'initiative de F. Delamare qui a considéré les techniques monétaires de son point de vue de physicien, à partir d'études de mécanique des matériaux[25]. Le principe de ces recherches est d'évaluer la quantité d'énergie consommée lors de la mise en forme et en particulier lors de la frappe des pièces. Les hypothèses ensuite formulées quant aux processus de fabrication reposent alors sur le postulat que la méthode la plus probable retenue par les ouvriers monétaires, est celle qui requiert le moins d'énergie. Une telle proposition suppose un contexte de production particulier dans lequel le matériau métallique transformé impose les méthodes à employer. Il n'est donc pas *a priori* possible de s'appuyer sur un tel raisonnement pour traiter du monnayage au marteau puisque celui-ci est, à l'époque considérée, strictement encadré par une administration qui fixe notamment de nombreux paramètres d'élaboration que doivent respecter les ouvriers monétaires.

---

[24] Panek I., Un compte monétaire bohémien du début du XIV^e^ siécle, *Bulletin du Cercle d'Etudes Numismatiques*, vol. 12, n° 2, 1975, p. 27-32.
Brand J. D., Scissel and swarf, dans Archibald M. M. *et al.*, eds., *Metallurgy in numismatics,* Londres, Angleterre, Royal numismatic society, 1993, t. 3, p. 87-98.

[25] Delamare F. *et al.*, Introduction à une étude mécanique de la frappe des monnaies, dans *Actes des Journées paléométallurgiques*, Compiègne, 1983, 20 p.
Delamare F. *et al.*, A mechanical analysis of coin striking: Application to the study of Byzantine gold solidi minted in Constantinople and Carthage, *Journal of Mechanical Working Technology*, vol. 10, 1984, p. 253-271.
Delamare F. *et al.*, Evolution of coin striking..., *op. cit.*, p. 37-52.
Delamare F. *et al.*, Etude mécanique de la frappe..., *op. cit.*, p. 83-91.
Delamare F. *et al.*, A mechanical approach to coin striking: Application to the study of Byzantine gold solidi dans Oddy W. A., ed., *Metallurgy in numismatics,* Londres, Angleterre, Royal numismatic society, 1988, t. 2, p. 41-53.

Les multiples approches exposées par les numismates et physico-chimistes pour répondre à des problématiques liées aux techniques des productions monétaires, présentent différents avantages propres à chacun des points de vue retenus. D'un autre côté, elles ont aussi leurs limites qui résultent principalement des hypothèses que les chercheurs se voient contraints d'accepter pour poursuivre leurs démonstrations. Or, certaines des incertitudes rencontrées pourraient être rapidement levées par une plus grande ouverture des recherches définies. En effet, leurs auteurs restreignent leurs recherches à leurs spécialisations respectives. Face à certaines problématiques rencontrées, ils sont contraints d'admettre des hypothèses que d'autres disciplines pourraient confirmer ou infirmer, donnant plus de poids aux démonstrations proposées.

Dans ses études mécaniques, F. Delamare reconnaît que la qualité de ses résultats, est plus fortement influencée par les paramètres monétaires qu'il suppose, que par la modélisation utilisée[26]. De même, pour ses calculs, il doit estimer la masse du marteau pour évaluer l'énergie disponible lors des frappes. Il n'envisage alors qu'une seule configuration sans prendre en compte, par exemple, la possibilité d'une frappe à deux mains réalisée avec une masse. Or, cette méthode est bien plus énergétique que celle retenue dans les démonstrations exposées. La considération de données archéologiques pouvant offrir un éclairage sur les outils utilisés dans les ateliers métallurgiques, même étrangers des questions monétaires, aurait certainement permis de définir un référentiel plus pertinent.

Une remarque similaire est applicable à la démarche expérimentale de D. Sellwood. Celle-ci semble se cantonner à la réalisation de multiples essais qui auraient pu être rationnalisés par une approche plus globale prenant par exemple en compte plus de données bibliographiques, archéologiques et morphologiques[27].

Fort de ce constat général, il a été possible de proposer un protocole d'étude pour traiter des problématiques liées au monnayage au marteau en vigueur dans les ateliers monétaires français jusqu'au milieu du XVII^{e} siècle. Le matériel archéologique issu des fouilles de l'hôtel de la Monnaie de La Rochelle constitue une base principale autour de laquelle a été mise en place une approche pluridisciplinaire. Celle-ci a notamment été définie à partir des différentes recherches qui viennent d'être exposées. Ainsi, les limites propres à chacun des

[26] « It should be remembered that these geometrical hypotheses [quant aux dimensions des monnaies avant leur frappe] are the major causes of errors, rather than the computation itself. ». Delamare F. *et al.*, A mechanical approach..., *op. cit.*, p. 43.
[27] Sellwood D., Medieval minting techniques, *op. cit.*, p. 57-65.

points de vue retenus peuvent se voir éclairées par la complémentarité des méthodes.

Dans un premier temps, il a été décidé de réaliser une étude bibliographique à partir des nombreuses sources dont rendent compte les numismates. Elle a permis de définir une chaîne opératoire qui sera qualifiée de théorique. Celle-ci était normalement mise en œuvre dans les fabriques monétaires royales donc celle de La Rochelle. Il était ensuite envisageable de confronter cette base de référence aux données extraites de la caractérisation d'un *corpus* archéologique rassemblé à dessein.

Malgré la somme d'informations qu'il a été possible de récolter avec la collection de La Rochelle, il a tout de même été jugé pertinent de disposer d'un second site de référence. Ce choix se justifie ne serait-ce que pour discuter de l'influence de l'administration monétaire sur les opérations de fabrication. Dans la mesure où l'officine rochelaise constituait le seul atelier monétaire français ayant fait l'objet de fouilles, il a été nécessaire de décider de mettre en œuvre de nouveaux travaux archéologiques afin d'élargir le nombre de témoignages disponibles. Ces fouilles se sont organisées aux abords et à l'intérieur du château de Montreuil-Bonnin (86). Plusieurs caractéristiques de l'atelier monétaire, directement associé au château au Moyen Age, préfigurait la découverte de potentiels vestiges. De plus, la proximité géographique de cette fabrique avec celle de La Rochelle pouvait révéler des particularismes locaux. Enfin, c'est à l'occasion de ces recherches qu'a pu être proposée une nouvelle démarche de prospection archéologique de sites de métallurgie des métaux non ferreux.

Bien que les travaux engagés n'aient pas localisé précisément la fabrique, ils ont tout de même révélé un très grand nombre de fragments de creusets dont l'étude a apporté un éclairage sur les procédés de fonderie monétaires, complémentaire de celui La Rochelle.

Toujours dans une démarche de confrontation des données, il a également été décidé de s'intéresser à plusieurs exemples de faux-monnayage contemporain des procédés de fabrication discutés dans cette thèse. Il s'agit bien de témoignages de fabrication monétaire qui font en outre plus souvent l'objet de découvertes archéologiques. Les techniques associées à ces activités clandestines sont toutefois particulières puisqu'elles ne sont pas contraintes par des règlements. C'est notamment ce qui représente l'un des intérêts de les prendre en compte, car leur confrontation avec des mises en forme réalisées dans un cadre légal, peuvent justement souligner les opérations clefs de ces différentes classes de monnayages.

Deux exemples de contrefaçons monétaires audoises ont donc été retenus pour être intégrés aux discussions. D'abord sélectionnées à partir des relations d'analogies existant entre ces productions clandestines, l'une d'elles a par ailleurs révélé des caractéristiques particulières. Elle témoigne, en outre, de la mise en œuvre de techniques finalement similaires à celles en vigueur dans les ateliers monétaires officiels. En ce sens, elle constitue un lien entre plusieurs des problématiques développées dans cette étude.

Après avoir rassemblé et inventorié les différents *corpus* archéologiques et bibliographiques, il a été possible de les confronter en appliquant la plupart des approches dont témoigne la littérature qui a traité de questions liées aux techniques monétaires. Dans cette étude, les observations morphologiques préliminaires se sont révélées indispensables et particulièrement pertinentes puisque mises en œuvre sur des collections d'objets en cours de transformation. De même, le nombre important d'objets considérés a permis de révéler des variations métrologiques en relation directe avec certaines étapes de fabrication. Des analyses de composition ont également été systématiquement réalisées afin de discuter, entre autres, des questions liées aux matières premières employées dans les monnayages officiels et clandestins. Couplées avec les données morphologiques, les informations analytiques ont par ailleurs facilité la définition d'un échantillonnage restreint pour proposer différentes études métallographiques. Enfin, dans cette recherche, la part de l'expérimentation est importante. A partir des résultats des examens préliminaires, l'ensemble des chaînes opératoires associées aux artefacts étudiés ont pu être intégralement reconstituées sur la plateforme d'expérimentations paléométallurgiques des *Mines d'Argent des Rois Francs* à Melle (79). Plus que de fournir des analogues comparables aux objets archéologiques ainsi que de favoriser la compréhension des gestes techniques impliqués dans les différentes fabrications, il a été envisagé de prendre en compte les chaînes opératoires reconstituées également à partir de leurs productions respectives de déchets métalliques. Ce sont notamment les articles de J. Brand et I. Pavek qui ont montré l'intérêt de considérer de telles données[28]. L'expérimentation ajoute ici une dimension supplémentaire au point de vue des deux auteurs.

En définitive, c'est à partir du croisement des informations obtenues par les nombreuses approches retenues, qu'il est maintenant possible de présenter une

[28] Panek I., Un compte monétaire bohémien..., *op. cit.*, p. 27-32.
Brand J. D., Scissel and swarf, *op. cit.*, p. 87-98.

description plus complète des techniques du monnayage au marteau en vigueur dans les ateliers monétaires royaux jusqu'à la fin du XVII^{e} siècle.

Cette thèse se développe en trois parties principales. La première est consacrée à l'étude bibliographique des différentes sources monétaires qui ont permis de définir une chaîne opératoire réglementaire de fabrication des monnaies dans les ateliers officiels. C'est également dans ce chapitre que sont présentés les quatre *corpus* archéologiques correspondant aux sites de La Rochelle, Montreuil-Bonnin et aux grottes de Lauradieu et de La Catette. La description des chantiers de fouilles mis en œuvre dans le cadre de cette étude est par ailleurs l'occasion d'exposer le développement d'une nouvelle méthode de prospection archéologique de site de métallurgie de métaux non ferreux.

Les différentes problématiques liées à la fabrication monétaire, développées dans cette étude sont discutées dans les deux chapitres suivants. Ils distinguent les procédés du monnayage officiel en vigueur dans les ateliers monétaires de La Rochelle et de Montreuil-Bonnin, et les techniques liées aux faux-monnayages des grottes de Lauradieu et de La Catette.

La conclusion de cette étude offre finalement la possibilité de mettre en parallèles les différentes chaînes opératoires proposées afin de souligner les relations d'analogie qui peuvent exister entre le monnayage officiel et le faux-monnayage aux époques considérées.

Chapitre I. Bibliographie

Dans ce chapitre, sont exposées l'ensemble des sources bibliographiques utilisées dans cette étude. Elles ont été classées selon leur origine ainsi que selon les thèmes auxquels elles font référence.

Les sources manuscrites consultées correspondent pour certaines à des retranscriptions que mon confiés les historiens numismates M. Bompaire et A. Clairand. Les autres ont été extraites de la base de donnée proposée par l'association *@rchives monétaires.org* a pour but de promouvoir la publication des archives et écrits relatifs à la Monnaie et aux questions financières ainsi que la pratique et la connaissance de la numismatique. Cette base de données est consultable sur Internet à l'adresse : www.archivesmonetaires.org.

I. Sources manuscrites

Anonyme, Bibliothèque nationale de France, Nouv. Acq. Fr. 471, n. p.

De Thoisy M., *Manuscrits "Poullain", tome 1*, Monnaie de Paris, ms. 55, f° 52r°-57v°, n. p.

Delaguerre, Bibliothèque nationale de France, Cabinet des Médailles, Rés. ms. 17004 PRI 8°, retranscription Clairand A., communication personnelle, n.p.

Déclaration du roy Philippes de Valois portant règlement des différends qui estoient entre les maîtres des Monoyes et les ouvriers et monoyers du royaume, Monnaie de Paris, ms. 4° 4, f° 101r°-108v°, 25 septembre 1327, n. p.

Archive départementales de l'Isère, B4403, 1420, n. p.

Ordonnance portant règlement pour les fonctions des officiers des Monnoyes et justiciables d'icelles, Trésor des chartes, ms. 4° 18, f° 188v°-196r° : Des ouvriers et monnoyers, 1423, n. p.

Lettres patentes portant deffenses de fabriquer doresnavant dans les Monoyes des doubles et petits deniers, Monnaie de Paris, ms. 4° 28, f° 221r°-222v°, 6 juillet 1546, n. p.

Lettres patentes pour deffendre le cours et la fabrication des liards et petits deniers tournois, Monnaie de Paris, ms. 4° 29, f° 63r°-64v°, 3 septembre 1548, n. p.

Ordonnances du roy contenant le descry des doubles et petitz deniers tournois neufz à la petite croix, portans en légende Henricus, Paris, Dallier, 1352 [sic pour 1552], 18 p.

Arrest de la Cour des monoyes qui excepte du décry des doubles et petits deniers ceux à la petite croix qui ont pour légende Franciscus, Monnaie de Paris, ms. 4° 140, 27 janvier 1553.

Archives nationales, Z1b 57, fol. 12, 1556, n. p.

Arrest de la Cour des monoyes qui ordonne une fabrication de doubles et deniers de cuivre fin en la Monoye de Paris Monnaie de Paris : ms. 4° 147, 8 février 1593, n. p.

Arrest de la Cour des monoyes qui permet à Alexandre Olivier de faire fabriquer des doubles et deniers de cuivre pur, Monnaie de Paris : ms. 4° 42, f° 261r°-262r°, 8 janvier 1603, n. p.

Arrest du Conseil d'Etat du roy qui ordonne qu'il sera fabriqué en la Monnoye du moulin à Paris pour trente mil livres de doubles et deniers de cuivre fin, Monnaie de Paris : ms. 4° 44, f° 221r°-222v°, 10 novembre 1607, n. p.

Arrest de la Cour des monoyes qui ordonne que la fabrication des doubles et deniers de cuivre pur sera continuée en la Monoye du moulin étably à Villeneuve Saint-André-lez-Avignon jusqu'à concurrence de 20.000 livres, Monnaie de Paris : ms. 4° 49, f° 55r°-57v°, 6 juillet 1620, n. p.

Lettres patentes qui ordonnent la fabrication de 10.000 livres en doubles et deniers de cuivre pur en la Monnoye de Villeneuve-lès-Avignon, Monnaie de Paris : ms. 4° 54, f° 121r°, 31 janvier 1633, n. p.

Edit du roy pour la fabrication de nouvelles espèces d'or et d'argent et la réformation de celles qui ont cours à présent, Léonard F., 1689, 7 p.

Anonyme, *Mémoire sur la fabrication des sols de billon, ordonnée par édit du mois d'octobre 1738*, Monnaie de Paris, ms. f° 58, 1738, retranscription Clairand A., communication personnelle, n. p.

II. Sources imprimées

Agricola G., *De Re Metallica*, édité par Hoover H., Hoover L. H., New York, Etats Unis, Courier Dover Publications, 1950, traduit de l'édition en latin de 1556, 638 p.

Boizard J., *Le traité des monoyes, de leurs circonstances et dépendances*, édité par Clairand A., Kind J.-Y., Paris, K&H, coll. « Documents d'Histoire Monétaire », 2000, d'après l'édition de 1692, XV et 243 p.

Brisson B., Frerot N., eds., *Les basiliques ou edicts et ordonnances des rois de France*, Paris, R. Foüet, 1611, 1527 p.

Constans G., *Traité de la Cour des monnoyes et de l'estendue de sa jurisdiction. Divisé en cinq parties*, Paris, S. Cramoisy, 1658.

De Bettange M., *Traité des monoyes contenant des instructions pour la partie des monoyes, un recueil des espèces d'or et d'argent fabriquées depuis Pharamond jusqu'à présent*, 2 tomes, Avignon, Jouve J. et Challiol J., t. 1, 1760, 267 p.

De Laurière E., Secousse D.-F., De Vilevault L.-G., De Bréquigny L. G. O. F., Pastoret E., eds., *Ordonnances des rois de France de la troisième race*, 22 tomes, Paris, Imprimerie royale, t. 1, 1723, XL-900 p.

De Thumery J., Epreuves contradictoires faites entre Nicolas Briot et les ouvriers de la Monnaie de Paris, dans Mazerolle F., ed., *Les médailleurs français du XV^e^ siècle au milieu du XVII^e^*, 3 tomes, Paris, Imprimerie nationale, 1902, t. 1, p. 335-345.

De Vilevault L.-G., De Bréquigny L. G. O. F., eds., *Ordonnances des rois de France de la troisième race*, 2 tomes, Paris Imprimerie royale, t. 11, 1769, LXXVII-514-CXCV p.

Ercker L., *Treatise on ores and assaying*, édité par G. S. A., Smith C. S., Chicago, Etats-Unis, University of Chicago Press, 1951, traduit de l'édition allemande de 1574, XXXIII pl. et 359 p.

Froissart J., *Les chroniques de Sire Jean Froissart qui traitent des merveilleuses emprises, nobles aventures et faits d'armes advenus en son temps en France, Angleterre, Bretaigne, Bourgogne, Ecosse, Espaigne, Portingal et les autres parties*, 3 tomes, édité par Buchon J. A. C., Paris, A. Desrez, coll. « Panthéon littéraire », t. 3, 1835, LX pl., 740 p.

Froissart J., *Oeuvres de Froissart : 1346-1356, depuis la bataille de Crécy jusqu'à la bataille de Poitiers*, 26 tomes, édité par Kervyn De Lettenhove J. B. M., Osnabrück, Allemagne, Biblio, t. 5, 1967, 558 p.

Halleux R., ed., *Les alchimistes grecs, tome I : Papyrus de Leyde - Papyrus de Stockholm - Recettes*, Paris, Les Belles Lettres, coll. « Collection des universités de France Série grecque », 1981, 242 p.

Magnus O., *Historia de gentibus septentrionalibus*, Rome, 1555, n. p.

Pline, *Histoire naturelle des métaux et de la sculpture, livre XXXIV*, édité par Le Bonniec H., Gallet De Santerre H., Paris, Les Belles Lettres, coll. « Collection des universités de France Série latine », t. 141, 1953, 324 p.

Poullain H., Relation de Me Henry Poullain, ci-devant conseiller en la cour des monnaies, de l'épreuve de fabrication des espèces, sur certains nouveaux instruments proposés par Nicolas Briot, tailleur général des monnayes de France, faite ès présence de messieurs de Boissise et de Marillac, conseillers d'Estat, dans Mazerolle F., ed., *Les médailleurs français du XV^e^ siècle au milieu du XVII^e^*, 3 tomes, Paris, Imprimerie nationale, 1902, t. 1, p. 319-335.

Smith C. S., Hawthorne J. G., eds., *Mappae Clavicula: A little key to the world of medieval techniques*, Philadelphia, The American Philosophical Society, coll. « Transactions of the American Philosophical Society », t. 64, part 4, 1974, 128 p.

Théophile, L'escalopier C. D., Guichard J.-M., *Théophile, prêtre et moine. Essais sur divers arts*, Nogent-le-Roi, Laget J., Daviaud P., Librairie des Arts et Métiers, 1977, LXXII pl. et 314 p.

III. Bibliographie : monnayage officiel

Andrieux P., Fluzin P., Pichot V., El-Amouri M., Picard O., Etudes expérimentales et métallurgiques du moulage de monnaies en bronze de la fin de l'Empire romain, dans *L'exception égyptienne ? Production et échanges monétaires en Egypte hellénistique et romaine, actes du colloque d'Alexandrie*, Le Caire, Egypte, IFAO, 2005, p. 225-254.

Arles A., Téreygeol F., L'atelier monétaire médiéval de Montreuil-Bonnin (Vienne) : Bilan des trois campagnes de prospection, dans *Actes du colloque Numismatique et archéologie en Poitou-Charentes*, Niort, 7-8 décembre 2007, à paraître.

Arles A., Tereygeol F., Bonnamour G., L'atelier monétaire médiéval de Montreuil-Bonnin : bilan des campagnes de prospection, *Bulletin de liaison année 2007 de l'association des archéologues de Poitou-Charentes*, vol. 36, 2007, p. 87-101.

Babelon E., *Introduction générale à l'étude des monnaies de l'Antiquité*, New York, Etats Unis, Arno press, fac-sim. de l'édition de 1901 (sans le chap. I), parue sous le titre : *Traité des monnaies grecques et romaines*, 1979, 1206 p.

Bardonnet A., Comptes d'Alfonse de Poitiers (1243-1247), *Archives historiques du Poitou*, vol. IV, 1875, 234 p.

Bardonnet A., Comptes et enquêtes d'Alfonse, comte de Poitou, 1253-1269, *Archives historiques du Poitou*, vol. VIII, 1879, p. 13-14, 34-35 et 158-159.

Barrandon J.-N., Picard O., *Monnaies de bronze de Marseille. Analyse, classement, politique monétaire*, Paris, CNRS Edition, coll. « Cahiers Ernest-Babelon », t. 10, 2007, 164 p.

Barthélémy A. D., Lecointre-Dupont G., *Apurement des comptes de la monnaie d'or fabriquée à Angers, du 25 novembre 1331 au 1er décembre 1333, et à Montreuil-Bonnin du 1er mars 1337 au 22 février 1346*, coll. « Archives historiques du Poitou », t. 4, 1875, 235-274 p.

Ben Romdhane K., Traité inédit de technique monétaire, *Revue Numismatique*, vol. 6, n° 30, 1988, p. 207-226.

Besly E., Rotary coining in Britain, dans Archibald M. M., Cowell M. R., eds., *Metallurgy in numismatics,* Londres, Angleterre, Royal numismatic society, 1993, t. 3, p. 118-129.

Blanchet J.-A., Comptes de l'atelier royal de Montreuil-Bonnin de 1295 à 1298, *Revue Numismatique*, 1907, p. 411-413.

Blanchet J.-A., Dieudonné A., *Manuel de numismatique française*, 4 tomes, Bologne, Italie, Formi Editore, t. 2, 1969, IX pl., 468 p.

Blanchet J.-A., Dieudonné A., *Manuel de numismatique française*, 4 tomes, Bologne, Italie, Formi Editore, t. 3, 1969, VIII pl., 612 p.

Blanchet J.-A., Dieudonné A., *Manuel de numismatique française*, 4 tomes, Bologne, Italie, Formi Editore, t. 4, 1969, VIII pl., 464 p.

Bocquet A., Clairand A., Mille P., Nibodeau J.-P., Les fouilles du second atelier monétaire de La Rochelle (XV^{e}-XVII^{e} siècle), *Bulletin de la Société Française de Numismatique*, vol. 53, n° 9, 1998, p. 237-240.

Bocquet A., Mille P., *La Rochelle Place de Verdun, Fouille préventive AFAN, octobre 1994 Juillet 1995*, Document final de synthèse, SRA Poitou-Charentes, Poitiers, 1995, n. p.

Bocquet A., Mille P., Nibodeau J.-P., L'hôtel de la Monnaie de La Rochelle, dans Cavaillès M., Clairand A., Gendron C., Hiernard J., Téreygeol F., eds., *Argent caché... et retrouvé, les trésors monétaires découverts en Deux-Sèvres,* Parthenay, Musée municipal de Parthenay, 2007, p. 39-42.

Bompaire M., *L'atelier monétaire royal de Montpellier et la circulation monétaire en bas Languedoc jusqu'au milieu du XV^{e} siècle*, Thèse de l'Ecole des Chartes, Paris, 1980, XVI et 615 p.

Bompaire M., Les cadences de production (XIV^{e}-XVI^{e} s.), en France principalement, dans Depeyrot G., Tony H., Ghislaine M., eds., *Rythmes de la production monétaire, de l'Antiquité à nos jours*, Paris, Université Catholique de Louvain, 1986, t. 7, p. 579-613.

Bompaire M., Un livre de changeur languedocien du milieu du XIV^{e} s., *Revue Numismatique*, vol. 6, n° 29, 1987, p. 118-183.

Bompaire M., L'activité monétaire sous le règne de Philippe IV le Bel, dans Mayhew N. J., ed., *The Gros Tournois : proceedings of the Fourteenth Oxford symposium on coinage and monetary history*, Oxford, Angleterre, Ashmolean Museum avec la Royal Numismatic Society et la Société Française de Numismatique, 1997, p. 51-104.

Bompaire M., Lieux de monnaie et ateliers monétaires dans la France médiévale, dans La Guardia R., Masseroli S., Tibiletti T., eds., *I luoghi della moneta :*

le sedi delle zecche dall'antichita all'et moderna, Milan, Italie, Comune di Milano, 2001, p. 87-100.

Bompaire M., Un siècle de monnayage à Montreuil-Bonnin (1247-1346), dans *Actes du colloque Numismatique et archéologie en Poitou-Charentes*, Niort, à paraître, 2007.

Bompaire M., La production monétaire en France au XIIIe siècle, *Gaceta Numismatica*, vol. 165, 2007, p. 5-32.

Bompaire M., Un exemple de livre de changeur français du XVe siècle, le manuscrit Bibl. nat. de Fr., Nouv. Acq. Fr. 471, dans *Colloque International : Culture monétaire, aspects mathématiques, technologiques et marchands (XIIIe-XVIe siècle)*, Orléans et Paris, 2004, à paraître.

Bompaire M., Dumas F., *Numismatique médiévale, monnaies et documents d'origine française*, Turnhout, Belgique, Brepols, coll. « L'atelier du médiéviste », t. 7, 2000, 687 p.

Bompaire M., Guerra M., Analyses de monnaies françaises du XIe siècle, le problème du zinc, dans Kluge B., Weisser B., eds., *XII. Internationaler Numismatischer Kongress Berlin 1997*, Berlin, Allemagne, 2000, p. 876-884.

Bouchet J., *Les annales d'Aquitaine, faicts et gestes en sommaire des roys de France, et d'Angleterre, et Pays de Naples et de Milan jusqu'en 1557*, Poitiers, Inquilbert de Marnef, 1557, 378 p.

Brand J. D., Scissel and swarf, dans Archibald M. M., Cowell M. R., eds., *Metallurgy in numismatics,* Londres, Angleterre, Royal numismatic society, 1993, t. 3, p. 87-98.

Braun G., Hogenberg F., eds., *Civitates Orbis Terrarum*, 6 tomes, t. 2, 1575.

Caley E. R., *Orichalcum and related ancient alloys: Origin, composition and manufacture with special reference to the coinage of the Roman Empire*, New York, Etats Unis, The American Numismatic Society, 1964, 115 p.

Calico F., Calico X., Trigo J., *Las monedas españolas desde Fernando e Isabel a Juan Carlos I : años 474 a 1994*, Barcelone, Espagne, Gabinete numismático Calico, 1994, 727 p.

Calliari I., Dabalà M., Martini M., Vajna E., Augustan Tresviral coinage of Rome mint: Central, auxiliary and imitation coins from Moesia-Thracia area, dans *Proceedings of Archaeometallurgy in Europe*, Milan, Italie, 2 t., AIM, 2003, t. 2, p. 221-226.

Carter G. F., Preparation of ancient coins for accurate X-ray fluorescence analysis, *Archaeometry*, vol. 7, n° 1, 1964, p. 106-113.

Castan C., Cayon J. R., *Las monedas hispano musulmanas y cristianas 711-1981*, Madrid, Espagne, Artegraf, 1981, 1180 p.

Challis C. E., *The Tudor coinage*, Manchester, Angleterre, Manchester University Press, 1978, 348 p.

Clairand A., Aperçu de l'activité des ateliers monétaires en Poitou-Charentes et composition des dépôts monétaires médiévaux et modernes découverts dans les Deux-Sèvres, dans Cavaillès M., Clairand A., Gendron C., Hiernard J., Téreygeol F., eds., *Argent caché... et retrouvé, les trésors monétaires découverts en Deux-Sèvres,* Parthenay, Musée municipal de Parthenay, 2007, p. 56-66.

Clairand A., Le trésor de Maisonnais, dans Cavaillès M., Clairand A., Gendron C., Hiernard J., Téreygeol F., eds., *Argent caché... et retrouvé, les trésors monétaires découverts en Deux-Sèvres,* Parthenay, Musée municipal de Parthenay, 2007, p. 132-134.

Collin B., L'argent du Potosi (Pérou) et les émissions monétaires françaises, *Histoire et mesure*, vol. XVII, n° 3/4, Monnaie et espace, 2002, p. 217-225.

Collin B., Le Roy Ladurie E., Barrandon J.-N., Guerra M., Morrisson C., Sur les traces de l'argent du Potosí, *Annales*, vol. 45, n° 2, 1990, p. 483-505.

Condamin J., Guey J., Picon M., Techniques romaines (I), *Revue Numismatique*, vol. 6, n° 7, 1965, p. 123-133.

Condamin J., Guey J., Picon M., Métallurgie des monnaies antiques, problèmes anciens et nouveaux à la lumière des récentes recherches de laboratoire de Lyon, dans *Actes du congès international de Numismatique*, Copenhague, Danemark, 1967, p. 265-268.

Condamin J., Picon M., Changes suffered by coins in the course of time and the influence of these on the results of a different methods of analysis, dans Hall E. T., Metcalf D. M., eds., *Methods of Chemical and Metallurgical Investigation of Ancient Coinage*, London, 9 - 11 December 1970, Royal numismatic society, 1972, p. 49-66.

Cook B. J., The late medieval mint of London, dans La Guardia R., Masseroli S., Tibiletti T., eds., *I luoghi della moneta : le sedi delle zecche dall'antichita all'et moderna*, Milan, Italie, Comune di Milano, 2001, p. 101-113.

Cowell M. R., Coins analysis by Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometry, dans Oddy W. A., Cowell M. R., eds., *Metallurgy in numismatics,* Londres, Angleterre, Royal numismatic society, 1998, t. 4, p. 448-460.

Day J., The great bullion famine of the fifteenth century, *Past & Present*, vol. 79, 1978, p. 3-54.

De Saulcy F., *Eléments de l'histoire des ateliers monétaires du royaume de France depuis Philippe-Auguste jusqu'à François Ier inclusivement*, Paris, C. L. Van Peteghem, 1877, VI pl. et 166 p.

De Saulcy F., *Histoire monétaire de Jean le Bon roi de France*, Paris, C. L. Van Peteghem 1880, 139 p.

De Vaissière P., *La découverte à Augsbourg des instruments mécaniques du monnayage moderne et leur importation en France en 1550 d'après les dépêches de Charles de Marillac*, Montpellier, Imprimerie Ricard Frères, 1892, 29 p.

Delamare F., Michaux-Van-Der-Mersch F., Etude mécanique de la frappe des monnaies, une méthode : La simulation sur pâte à modeler et son application à la frappe du statère éginètique, *Revue d'Archéométrie*, vol. 12, 1988, p. 81-91.

Delamare F., Montmitonnet P., Introduction à une étude mécanique de la frappe des monnaies, dans *Actes des Journées paléométallurgiques*, Compiègne, 1983, 20 p.

Delamare F., Montmitonnet P., A mechanical analysis of coin striking: Application to the study of Byzantine gold solidi minted in Constantinople and Carthage, *Journal of Mechanical Working Technology*, vol. 10, 1984, p. 253-271.

Delamare F., Montmitonnet P., Evolution of coin striking processes: A mechanical survey. I. Hammer striking, *Journal of Mechanical Working Technology*, vol. 11, 1985, p. 37-52.

Delamare F., Montmitonnet P., Morrisson C., A mechanical approach to coin striking: Application to the study of Byzantine gold solidi dans Oddy W. A., ed., *Metallurgy in numismatics,* Londres, Angleterre, Royal numismatic society, 1988, t. 2, p. 41-53.

Dhenin M., Le vocabulaire du monnayage et la précellence du langage français : Henri Estienne, Project du livre intitulé : de la précellence du langage français, Paris, 1579, *Bulletin de la Société Française de Numismatique*, vol. 32, 1977, p. 275-276.

Dordio P., Medieval and early modern Portuguese mints: locations and buildings, dans La Guardia R., Masseroli S., Tibiletti T., eds., *I luoghi della moneta : le sedi delle zecche dall'antichita all'et moderna*, Milan, Italie, Comune di Milano, 2001, p. 115-128.

Dordio P., Teixeira R., Lopes I. A., La maison d'Henri le Navigateur. Les maisons médiévales de la Douane et de la Monnaie, un centre de la couronne portugaise dans la ville de Porto (Portugal), dans De Boe G., Verhaeghe F., eds., *Material culture in medieval Europe: papers of the "Medieval Europe Brugge 1997" Conference*, Zellik, Belgique, 3 t., Instituut voor het Archeologisch Patrimonium, 1997, t. 3, p. 171-182.

Dumas F., *Le trésor de Fécamp et le monnayage en Francie occidentale dans la seconde moitié du X^e siècle*, Paris, Éditions du CTHS, 1971, 303 p.

Dumas F., Sur la frappe monétaire au XVe siècle, *Bulletin de la Société Française de Numismatique*, vol. 51, n° 4, 1996, p. 74-75.

Dungworth D., Caley's "zinc decline" reconsidered, *The numismatic chronicle*, vol. 156, 1996, p. 228-234.

Duplessy J., Le trésor de Vaucé (Mayenne), *Revue Numismatique*, vol. 6, n° 4, 1962, p. 277-313.

Duplessy J., La circulation des monnaies espagnoles en France (XVI^{e}-XVII^{e} siècles), dans *II Symposi Numismàtic de Barcelona*, Barcelone, Espagne, Societat catalana d'estudis numismàtics, 1980, p. 79-82.

Duplessy J., *Les monnaies françaises royales de Hugues Capet à Louis XVI (Hugues Capet - Louis XII)*, 2 tomes, Paris, Maastricht, Platt A.G. Van der Dussen, t. 1, 1988, 325 p.

Duplessy J., *Les monnaies françaises royales de Hugues Capet à Louis XVI (François 1er - Louis XVI)*, 2 tomes, Paris, Maastricht, Platt A.G. Van der Dussen, t. 2, 1989, 350 p.

Elias E. R. D., *The Anglo-Gallic coins*, Paris et Londres, Emile Bourgey et Spink & Son Ltd., 1984, 262 p.

Engel A., Serrure R., *Traité de numismatique du Moyen Age*, 3 tomes, Paris, Ernest Leroux, t. 1, 1891, lxxxvii et 350 p.

Estienne H., *Project du livre intitulé « De la precellence du langage françois »*, Paris, M. Patisson, 1579, 295 p.

Etienne R., Rachet M., Barrandon J.-N., Brenot C., Carcassonne C., Guey J., Picon M., *Le trésor de Garonne : Essai sur la circulation monétaire en Aquitaine à la fin du règne d'Antonin le Pieux (159-161)*, Bordeaux, Fédération Historique du Sud-Ouest, 184, LXXVIII pl. et 466 p.

Faucher T., *L'atelier monétaire d'Alexandrie sous les Lagides : problèmes techniques et stylistiques*, Thèse de doctorat d'Histoire de l'Université Paris-Sorbonne, Paris IV, Paris, 2006, 551 p.

Faucher T., Brousseau L., *Recréation d'un atelier monétaire antique : frappe monétaire et usure des coins*, PCR Paléométallurgies et expérimentations : Recherches sur les chaines de production des métaux aux périodes anciennes, sous la direction de F. Téreygeol, 2007, 64-72 p.

Fournier P.-F., Guébin P., eds., *Enquêtes administratives d'Alphonse de Poitiers, arrêts de son parlement tenu à Toulouse et textes annexes, 1249-1271*, Paris, Imprimerie nationale, 1959, CXII pl. et 491 p.

Gaspar P. P., Coining and die-making techniques in the 17th century, dans Archibald M. M., Cowell M. R., eds., *Metallurgy in numismatics,* Londres, Angleterre, Royal numismatic society, 1993, t. 3, p. 130-141.

Geiger H.-U., Eine unbekannte Glasscheibe des Schaffhauser Münzmeisters Zentgraf von 1563, *Gazette numismatique suisse*, vol. 17, 1967, p. 111-114.

Grierson P., *Monnaies et monnayage introduction à la numismatique*, édité par Lemerle P., Paris, Aubier, coll. « Collection Historique », 1976, 288 p.

Gruel K., Barral M., Veillon M., Aléas de la frappe monétaire à l'époque gauloise, dans Depeyrot G., Tony H., Ghislaine M., eds., *Rythmes de la production monétaire, de l'Antiquité à nos jours*, Paris, Université Catholique de Louvain, 1986, t. 7, p. 67-77.

Guey J., Techniques Romaines (II), *Revue Numismatique*, vol. 6, n° 8, 1966, p. 33-60.

Hawkes S. C., Merrick J. M., Metcalf D. M., X-ray fluorescent analysis of some dark age coins and jewellery, *Archaeometry*, vol. 9, n° 1, 1966, p. 98-138.

Hoffmann H., *Les monnaies royales de France depuis Hugues Capet jusqu'à Louis XVI*, Paris, Hoffmann H., 1878, CXVIII pl. et 216 p.

Hughes M. J., Oddy W. A., The production techniques, silver content, and circulation history of the twelfth-century Byzantine Trachy, *Archaeometry*, vol. 12, n° 1, 1970, p. 13-21.

Kearns T., Martinón-Torres M., Dordio P., Fire assay and quality control in the mint of Porto from the late Middle Ages to the Renaissance: some preliminary analitycal results, poster présenté au *37th International Symposium on Archaeometry*, Sienne, Italie, 2008.

Lafaurie J., Relation de Me Henry Poullain, ci-devant conseiller en la cour des monnaies, de l'épreuve de fabrication des espèces, sur certains nouveaux instruments proposés par Nicolas Briot,... *Bulletin de la Société Française de Numismatique*, vol. 18, 1963, p. 310-311.

Larozas C., Technique de fabrication des monnaies dites « découpées au burin », *Cahiers Numismatiques*, vol. 43, n° 168, 2006, p. 9-22.

Leddet P., Le journal du Sire de Gouberville, noms de monnaies et évaluations, *Revue Numismatique*, vol. 4, n° 31, 1928, p. 187-211.

Le Noir M., *L'art du monnayage*, Paris, Le Préau des Livres, 1981, d'après l'édition de 1788, 88 p.

Linke R., Schreiner M., Demortier G., The application of photon, electron and proton induced X-ray analysis for the identification and characterisation of medieval silver coins, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, vol. 226, n° 1-2, 2004, p. 172-178.

Lohne O., Ulseth P., *Myntproduksjon i Erkebispegården i Trondheim*, SINTEF, rapport STF24A98589, Trondheim, Norvège, 1998, 10 p.

Lohne O., Ulseth P., *Hamerete sølvholdige stenger fra Erkebispegården, Kjemisk analyse og mikrostrukturundersøkelser*, SINTEF, rapport STF80A04068, Trondheim, Norvège, 1998, 23 p.

Lopes I. A., Menéndez J. J. A., Dordio P., Texeira R., Excavaciones arqueológicas en la Casa de la Moneda de Oporto (sgs. XIV-XVI), dans Jorge V. O., ed., *3º Congresso de Arqueología Peninsular* Vila Real, Portugal, ADECAP, 1999, t. 7, p. 57-72.

Mazerolle F., *Les médailleurs français du XV^e siècle au milieu du XVII^e*, 3 tomes, Paris, Imprimerie nationale, t. 1, 1902, CLXXVIII et 630 p.

Mc Kerrell H., Stevenson R. B. K., Some analyses of Anglo-Saxon and associated Oriental silver coinage, dans Hall E. T., Metcalf D. M., eds., *Methods of Chemical and Metallurgical Investigation of Ancient Coinage,* London, Royal Numismatic Society, 1972, p. 195-209.

McLees C., The late medieval mint workshops at the Archbishop's Palace, Trondheim, *Antiquity*, vol. 68, 1994, p. 264-274.

McLees C., Itinerant craftsmen, permanent smithies and the archbishop's mint: the character and context of metalworking in medieval Trondheim, *Historical metallurgy*, vol. 30, n° 2, 1996, p. 121-135.

Metcalf D. M., Northover J. P., Interpreting the alloy of the later Anglo-Saxon coinage, *British Numismatic Journal*, 1986, p. 35-61.

Metcalf D. M., Schweizer F., The metal contents of the silver pennies of William II and Henry I, *Archaeometry*, vol. 13, n° 2, 1971, p. 177-187.

Nibodeau J.-P., *Rapport de sauvetage urgent AFAN, 2ème campagne : La Rochelle Place de Verdun, septembre 1996 mars 1997*, Document final de synthèse, SRA Poitou-Charentes, Poitiers, 1997, 126 p.

Panek I., Un compte monétaire bohémien du début du XIV^e siécle, *Bulletin du Cercle d'Etudes Numismatiques*, vol. 12, n° 2, 1975, p. 27-32.

Poey d'Avant F., *Les monnaies féodales de France*, 3 tomes, Graz, Autriche, Akademische Druck - u. Verlagsanstalt, t. 2, 1961, CI pl., 418 p.

Poirier J., *Contribution à l'analyse de l'or antique. Application aux monnayages du monde méditerranéen du II^e au XIV^e siècle*, Thèse de doctorat de Sciences Physiques de l'Université d'Orléans, Orléans, 1983, 206 p.

Puaud F., *Le château de Montreuil-Bonnin (Vienne)*, mémoire de maîtrise d'Histoire de l'Art de l'Université de Poitiers, 1992, vol. 1,133 p.

Queinnec J., Les ressources monétaires du Trésor, 1298-1300, dans Contamine P., Kerhervé J., Rigaudière A., eds., *Monnaie, fiscalité et finances au temps de Philippe le Bel* Paris, 2004, p. 269-312.

Richet D., Le Roy Ladurie E., Gordus J., Gordus A., Le Potosi et la physique nucléaire, *Annales*, vol. 27, n° 7, 1972, p. 1235-1256.

Risvaag J. A., Mints in Scandinavia: The case of Trondheim, dans La Guardia R., Masseroli S., Tibiletti T., eds., *I luoghi della moneta : le sedi delle zecche dall'antichita all'et moderna*, Milan, Italie, Comune di Milano, 2001, p. 131-140.

Roy C., *La Rochelle, son atelier monétaire, ses monnaies, 1215-1836*, La Rochelle, Imprimerie nouvelle Noel Texier, 1913, 91 p.

Sellwood D., Medieval minting techniques, *British Numismatic Journal*, vol. 31, 1962, p. 57-65.

Sellwood D., Alterations in mint technology for the Edwardian penny, dans Metcalf D. M., Oddy W. A., eds., *Metallurgy in numismatics,* Londres, Angleterre, Royal numismatic society, 1980, t. 1, p. 178-179.

Sellwood D., Early Austrian and German machine minting, dans Archibald M. M., Cowell M. R., eds., *Metallurgy in numismatics,* Londres, Angleterre, Royal numismatic society, 1993, t. 3, p. 108-117.

Spooner F. C., *L'économie mondiale et les frappes monétaires en France : 1493 -1680*, Paris, Librairie Armand Colin, coll. « Monnaie - Prix - Conjecture », 1956, XXIX pl. et 544 p.

Teboulbi A., Bompaire M., Barrandon J.-N., Etude du monnayage de Toulouse et d'Alphonse de Poitiers par analyses élémentaires, *Revue Numismatique*, vol. 164, à paraître.

Téreygeol F., *Montreuil-Bonnin, recherches sur l'atelier monétaire médiéval, Document final de synthèse*, SRA poitou-Charentes, 2005, 38 p.

Téreygeol F., *Montreuil-Bonnin, recherches sur l'atelier monétaire médiéval, Document final de synthèse*, SRA poitou-Charentes, 2006, 52 p.

Téreygeol F., *Montreuil-Bonnin, recherches sur l'atelier monétaire médiéval, Document final de synthèse*, SRA poitou-Charentes, 2007, 71 p.

Téreygeol F., Thomas N., La coupellation des alliages cuivre-argent : approche expérimentale de l'essai d'argent par voie sèche, *Revue d'Archéométrie*, vol. 27, 2003, p. 171-181.

Thompson R. H., Mechanisation at the 17th century London mint: The testominy of tokens, dans Archibald M. M., Cowell M. R., eds., *Metallurgy in numismatics,* Londres, Angleterre, Royal numismatic society, 1993, t. 3, p. 143-153.

Tobey L. B., Tobey A. G., Experiments to simulate ancient Greek coins, dans Archibald M. M., Cowell M. R., eds., *Metallurgy in numismatics,* Londres, Angleterre, Royal numismatic society, 1993, t. 3, p. 28-35.

Wailly N. D., *Mémoire sur les variations de la livre tournois depuis le règne de Saint Louis jusqu'à l'établissement de la monnaie décimale*, Paris, Imprimerie Impériale, 1857, 251 p.

Zäch B., "Werkstatt, Haus und Mûnzhof", Later medieval and early modern mints in Switzerland, Germany and Austria, dans La Guardia R., Masseroli S., Tibiletti T., eds., *I luoghi della moneta : le sedi delle zecche dall'antichita all'et moderna*, Milan, Italie, Comune di Milano, 2001, p. 129-130.

IV. Bibliographie : faux-monnayage

Ayme R., Dhenin M., Duday H., Ghilaine J., Richard J.-C., Atelier de faux-monnayeurs de XV^{e} siècle dans une grotte de Moux (Aude), *Bulletin de la Société Française de Numismatique*, vol. 31, n° 8, 1976, p. 93-94.

Beneut G., Monnaies fausses de l'époque de la Ligue, *Bulletin de la Société Française de Numismatique*, vol. 32, n° 7, 1977, p. 235-236.

Bompaire M., Geneviève V., Une imitation de gros à la fleur de lis de Philippe VI au nom d'Aimon comte de Savoie trouvée à Toulouse, *Bulletin de la Société Française de Numismatique*, vol. 55, n° 4, 2000, p. 50-53.

Bompaire M., Guerra M. F., Yves S., La grotte du Crés de la Louve, à Roquefort des Corbières : une officine de faux-monnayeur, *Bulletin de la Société d'Etudes Scientifiques de l'Aude*, vol. 46, 1996, p. 71-76.

Chareyron R., Sublet R., Imitation d'un double denier d'Aquitaine à Viviers, *Bulletin de la Société Française de Numismatique*, vol. 55, n° 4, 2000, p. 54.

Charlet C., Un faux écu monégasque au millésime 1653, *Bulletin de la Société Française de Numismatique*, vol. 48, n° 4, 1993, p. 534-535.

Cipolla M. C., *Les caprices de la fortune banquiers, commercants et manufacturiers, XIV^{e}-XVIII^{e} siècle*, Paris, Gérard Monfort, 2000, 65 p.

Clairand A., Monnaies inédites et monnaies fausses découvertes à Parthenay, *Bulletin de la Société Française de Numismatique*, vol. 47, n° 10, 1992, p. 451-454.

Clairand A., Froidevaux C., Zäch B., Carrés et procédés de fabrication de 350000 faux louis d'or fabriqués en suisse au début du XVIIIe siècle, *Bulletin de la Société Française de Numismatique*, vol. 55, n° 6, 2000, p. 132-144.

Coativy Y., De la fraude à la falsification : le faux monnayage en France à la fin du Moyen Age, dans Béaur G., Bonin H., Lemercier C., eds., *Fraude, contrefaçon et contrebande de l'Antiquité à nos jours,* Genéve, Suisse, Droz, 2006, p. 237-248.

Cockshaw P., L'atelier monétaire de Paris à la fin du règne de Charles VI : une officine de faux-monnayage ?, *Revue Numismatique*, vol. 6, n° 29, 1987, p. 184-191.

De La Sicotière L., Un atelier de fausse monnaie au XV^{e} siècle, *Revue Numismatique*, 1847, p. 281-298.

Deraisme A., *Apport de la physique à l'étude du faux-monnayage du III^{e} siècle après J.-C.*, Thèse de doctorat de Science des Matériaux de l'Université d'Orléans, Orléans, 2005, 262 p.

Dhenin M., La fausse monnaie espagnole, une industrie bien francaise, dans Leandre V., ed., *II Simposi Numismàtic de Barcelona*, Barcelone, Societat Catalana d'Estudis Numismàtics, 1980, p. 75-78 et pl. 9-10.

Dhenin M., Une opération frauduleuse au début du XVe siècle : une guénar transformé en florette, *Bulletin de la Société Française de Numismatique*, vol. 56, n° 9, 2001, p. 158-160.

Dhénin M., La monnaie, le vrai, le faux, etc., dans *Actes des Journées Numismatiques de Perpignan : Les faux en numismatique*, Perpignan, Musée Numismatique Joseph Puig, 1997, p. 5-18

Dhénin M., Fea G., Un astucieux faux-monnayeur, *Bulletin de la Société Française de Numismatique*, vol. 53, n° 9, 1998, p. 233-234.

Dhenin M., Nony D., Un atelier de faux-monnayeurs du XVII^{e} s. a Despenaperros (Jaén), *Acta Numismatica*, vol. 8, 1978, p. 207-212.

Dhenin M., Richard J.-C., Un coin de faux-monnayeur trouvé à Carcassonne (Aude), *Bulletin de la Société Française de Numismatique*, vol. 57, n° 5, 2002, p. 81-82.

Droulers F., Les fausses monnaies portant lettre R frappées sous Louis XIV dans la période 1690-1715, *Bulletin de la Société Française de Numismatique*, vol. 34, n° 4, 1979, p. 505-507.

Dumas F., Imitations et fausses monnaies durant l'antiquité et le Moyen Age, *Bulletin de la Société Française de Numismatique*, vol. 31, n° 8, 1976, p. 95-100.

Duplessy J., Douzain faux de Henri IV, de type inédit, *Bulletin de la Société Française de Numismatique*, vol. 32, n° 4, 1977, p. 189-190.

Feller L., *Faux-monnayeurs et fausses monnaies en France à la fin du Moyen Age (seconde moitié du XVe siècle)*, Paris, Editions Le Léopard d'or, 1986, 192 p.

Garnier J.-P., Niquets d'Henri V : fausses variétés, mais faux d'époque, *Bulletin de la Société Française de Numismatique*, vol. 48, n° 2, 1993, p. 490-492.

Garnier J.-P., Enigmatique douzain frappé à Paris en 1639, *Bulletin de la Société Française de Numismatique*, vol. 55, n° 8, 2000, p. 125-128.

Gordus A. A., Blet-Lemarquand M., Bompaire M., Une curieuse fausse monnaie de Henri III de l'atelier de Riom, *Bulletin de la Société Française de Numismatique*, vol. 63, n° 6, 2008, p. 99-106.

Hourlier M., Le trésor de Noroy-sur-Ourcq (Aisne) : monnaies françaises et étrangéres des XV^{e} et XVI^{e} siécle, *Trésors monétaires 11,* Paris, Bibliothèque nationale, 1889, p. 125-139 et 4 pl.

Jeanjacquot J.-C., Goy C., *Pymont, la forteresse oubliée : XIII^{e}-XV^{e} Siècle, entre les Vienne et les Chalon*, Lons-le-Saunier, Cercle Girardot, 1993, 140 p.

Kiersnowski R., Les imitations et les falsifications monétaires de l'époque du Moyen Age, dans Cahn H. A., Le Rider G., eds., *Actes du 8ème congrès international de numismatique*, New York, Association internationale des numismates professionnels, 1973, p. 423-428.

Lloansi B., La répression du faux-monnayage en Roussillon aux XVIIe-XVIIIe siècle, dans *Actes des Journées Numismatiques de Perpignan : Les faux en numismatique*, Perpignan, Musée Numismatique Joseph Puig, 1997, p. 37-69.

Mantellier M. P., Notice sur un atelier de faux-monnayeurs du XVIe siècle, *Mémoires de la Société Archéologique de l'Orléanais*, vol. 1, 1851, p. 321-366.

Martin C., De moneta fasla, *Bulletin de la Société Française de Numismatique*, vol. 32, n° 3, 1977, p. 172-174.

Minnitt S., A hoard of counterfeit Louis XI coins from Taunton, Somerset, dans Archibald M. M., Cowell M. R., eds., *Metallurgy in numismatics,* Londres, Angleterre, Royal numismatic society, 1993, t. 3, p. 99-107.

Miquel J., Pujol J., Simonin M., Un atelier de faux-monnayeur à la tour du Viala-du-pas-de-Jaux, *Vivre en Rouergue Cahier d'archéologie aveyronnaise*, vol. 16, 2002, p. 187-195.

Mitchiner M. B., Skinner A., Contemporary forgeries of English silver coins : Henry III to William III, *The numismatic chronicle*, vol. 145, 1985, p. 209-236.

Moesgaard J. C., Trouvaille de faux douzains à la croisette de François 1er à Louviers (Eure), *Bulletin de la Société Française de Numismatique*, vol. 48, n° 6, 1993, p. 560-562.

Rancoule G., Nouvian S., Souleres R., La grotte nord de Lauradieu (Commune d'Auriac, Aude) « Un atelier de faux monnayeur du XVe siècle », *Bulletin de la Société d'Etudes Scientifiques de l'Aude*, vol. 74, 1974, p. 171-176.

Salaün G., Deux faux-monnayeurs graciés par Charles de Blois, *Bulletin de la Société Française de Numismatique*, vol. 54, n° 6, 1999, p. 81-82.

Salaün G., Deux faux douzains à la couronne de Bretagne, *Bulletin de la Société Française de Numismatique*, vol. 59, n° 1, 2004, p. 12-13.

Téreygeol F., Arles A., Vivier M.-C., *Grotte de La Catette (11), Recherches sur l'atelier de faux-monnayeur, Document final de synthèse*, SRA Languedoc-Roussillon, 2007, 61 p.

Trojanowska Z., Les faux monnayeurs devant la Chambre des monnaies sous le règne de Louis XI (1461-1483), dans Gedai I., Biro-Sey, eds., *Proceedings of the international numismatic symposium*, Budapest, Akadémiai Kiado, 1980, p. 209-215.

Vivier M.-C., *Etude du faux-monnayage de la grotte de La Catette (Aude)*, Mémoire de Master 2-Pro « Méthodes physiques appliquées au Patrimoine culturel », sous la direction de F. Téreygeol et A. Arles, Bordeaux, 2007, 91 p.

V. Bibliographie : prospection géochimique

Afnor, *Caractérisation des déchets et du sol - Détermination de la composition élémentaire par fluorescence X*, 2007, 45 p.

Alfonso S., Grousset F., Masse L., Tastet J. P., A European lead isotope signal recorded from 6000 to 300 years BP in coastal marshes (SW France), *Atmospheric Environment*, vol. 35, n° 21, 2001, p. 3595-3605.

Angelini E., Grassini S., Corbellini S., Ingo G. M., De Caro T., Plescia P., Riccucci C., Bianco A., Agostini S., Potentialities of XRF and EIS portable instruments for the characterisation of ancient artefacts, *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, vol. 83, n° 4, 2006, p. 643-649.

Arrhenius A., Die Bodenanalyse im Dienst der Archäologie, *Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung und Bodenkunde, Teil B, 10 Jahrgang*, 1931, p. 427-439.

Aten C. F., Bourke J. B., Martini J. H., Walton J. C., Arsenic and lead in an orchard environment, *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, vol. 24, n° 1, 1980, p. 108-115.

Bailly-Maître M.-C., Jacob N., Analyse de la pollution minière de rivières de l'Oisans, application à l'archéologie, *Archéologie du Midi médiéval*, vol. 19, 2001, p. 67-77.

Banza A. N., Quindt J., Gock E., Improvement of the quartz sand processing at Hohenbocka, *International Journal of Mineral Processing*, vol. 79, n° 1, 2006, p. 76-82.

Baron S., Carignan J., Laurent S., Ploquin A., Medieval lead making on Mont-Lozere Massif (Cevennes-France): Tracing ore sources using Pb isotopes, *Applied Geochemistry*, vol. 21, n° 2, 2006, p. 241-252.

Baubron J. C., Durendeau B., Fourniguet G., Kieffer C., *Première évaluation de la contamination des sols en plomb et autres éléments métalliques du secteur de Neuves-Maisons (Meurthe-et-Moselle). Rapport final*, BRGM/RP-53128-FR, BRGM, 2004, 138 p.

Berna F., Behar A., Shahack-Gross R., Berg J., Boaretto E., Gilboa A., Sharon I., Shalev S., Shilstein S., Yahalom-Mack N., Zorn J. R., Weiner S., Sediments exposed to high temperatures: reconstructing pyrotechnological processes in Late Bronze and Iron Age Strata at Tel Dor (Israel), *Journal of Archaeological Science*, vol. 34, n° 3, 2007, p. 358-373.

Bernick M. B., Campagna P. R., Application of field-portable X-ray fluorescence spectrometers for field-screening air monitoring filters for metals, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 43, n° 1-2, 1995, p. 91-99.

Bernick M. B., Kalnicky D. J., Prince G., Singhvi R., Results of field-portable X-ray fluorescence analysis of metal contaminants in soil and sediment, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 43, n° 1-2, 1995, p. 101-110.

Bowie S. H. U., Burke K. C., Bisby H., Hale F. H., Electronic instruments for detecting and assaying beryllium ores, *Trans. Inst. Mining Met.*, vol. 69, 1959, p. 345-359.

Carignan J., Hild P., Mevelle G., Morel J., Yeghicheyan D., Routine analyses of trace elements in geological samples using flow injection and low pressure on-line liquid chromatography coupled to ICP-MS: A study of geochemical reference materials BR, DR-N, UB-N, AN-G and GH, *Geostandards and Geoanalytical Research*, vol. 25, n° 2-3, 2001, p. 187-198.

Cavanagh W. G., Hirst S., Litton C. D., Soil phosphate, site boundaries, and change point analysis, *Journal of Field Archaeology*, vol. 15, n° 1, 1988, p. 67-83.

Clark S., Menrath W., Chen M., Roda S., Succop P., Use of a field portable X-ray fluorescence analyzer to determine the concentration of lead and other metals in soil samples, *Ann Agric Environ Med*, vol. 6, n° 1, 1999, p. 27-32.

Cotte M., Susini J., Metrich N., Moscato A., Gratziu C., Bertagnini A., Pagano M., Blackening of Pompeian Cinnabar Paintings: X-ray Microspectroscopy Analysis, *Anal. Chem.*, vol. 78, n° 21, 2006, p. 7484-7492.

Darmendrail D., Roy S., *Impact de l'utilisation des métaux lourds sur la santé et l'environnement. Contributions du BRGM aux commissions nationales*, BRGM/RP-51045-FR, BRGM, 2001, 19 p.

De Vic C., Vaissète J., *Histoire générale de Languedoc* 16 tomes, Toulouse, Privat, t. 4, 1876, XX pl. et 1048 p.

De Vleeschouwer F., Gerard L., Goormaghtigh C., Mattielli N., Le Roux G., Fagel N., Atmospheric lead and heavy metal pollution records from a Belgian peat bog spanning the last two millenia: Human impact on a regional to global scale, *Science of The Total Environment*, vol. 377, n° 2-3, 2007, p. 282-295.

Eidt R. C., A rapid chemical field test for archaeological site surveying, *American Antiquity*, vol. 38, n° 2, 1973, p. 206-210.

Eidt R. C., Detection and examination of anthrosols by phosphate analysis, *Science*, vol. 197, n° 4311, 1977, p. 1327-1333.

Farmer J. G., Eades L. J., Mackenzie A. B., Kirika A., Bailey-Watts T. E., Stable lead isotope record of lead pollution in Loch Lomond sediments since 1630 A.D, *Environ. Sci. Technol.*, vol. 30, n° 10, 1996, p. 3080-3083.

Francek M. A., Soil lead levels in orchards and roadsides of mission peninsula, Michigan, *Water, Air, & Soil Pollution*, vol. 94, n° 3, 1997, p. 373-384.

Funtua I. I., Idris Y., Oyewale A. O., Umar I. M., Elegba S. B., Determination of tin in cassiterite ores and tailings by 241Am source X-ray fluorescence spectrometry, *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 48, n° 1, 1997, p. 103-104.

Ge L., Lai W., Lin Y., Influence of and correction for moisture in rocks, soils and sediments on in situ XRF analysis, *X-Ray Spectrometry*, vol. 34, n° 1, 2005, p. 28-34.

Gobeil C., Johnson W. K., Macdonald R. W., Wong C. S., Sources and burden of lead in St. Lawrence estuary sediments: isotopic evidence, *Environ. Sci. Technol.*, vol. 29, n° 1, 1995, p. 193-201.

Gratuze B., *Analyse non destructive d'objets en verre par des méthodes nucléaires. Application à l'étude des estampilles et poids monétaires islamiques.*, Thèse de doctorat de Sciences Physiques de l'Université d'Orléans, Orléans, 1988, 198 p.

Helmig D., Jackwerth E., Hauptmann A., Archaeometallurgical fieldwork and the use of a portable x-ray spectrometer, *Archaeometry*, vol. 31, n° 2, 1989, p. 181-191.

Idris Y., Funtua I. I., Umar I. M., Rapid analysis with energy-dispersive X-ray fluorescence spectrometry for bauxite investigation on the Mambilla Plateau, North Eastern Nigeria, *Chemie der Erde - Geochemistry*, vol. 64, n° 4, 2004, p. 385-398.

Ignatiadis I., Abou Akar A., *Outils et méthodes physiques et chimiques pour la détection des pollutions dans les sols. Dosage par fluorescence X et par colorimétrie des polluants métalliques et comparaison avec des méthodes d'analyse de laboratoire*, BRGM/RR-40312-FR, BRGM, 1998, 93 p.

Jorgensen N., Laursen J., Viksna A., Pind N., Holm P. E., Multi-elemental EDXRF mapping of polluted soil from former horticultural land, *Environment International*, vol. 31, n° 1, 2005, p. 43-52.

Karydas A. G., Kotzamani D., Bernard R., Barrandon J. N., Zarkadas C., A compositional study of a museum jewellery collection (7th-1st BC) by means of a portable XRF spectrometer, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, vol. 226, n° 1-2, 2004, p. 15-28.

Kilbride C., Poole J., Hutchings T. R., A comparison of Cu, Pb, As, Cd, Zn, Fe, Ni and Mn determined by acid extraction/ICP-OES and ex situ field portable X-ray fluorescence analyses, *Environmental Pollution*, vol. 143, n° 1, 2006, p. 16-23.

Laperche V., *Evaluation des performances du spectromètre portable de fluorescence X Niton XL723S (au laboratoire et sur le terrain)*, BRGM/RP-53377-FR, BRGM, 2005, 107 p.

Laperche V., Dictor M. C., Clozel Leloup B., Baranger P., *Guide méthodologique du plomb appliqué à la gestion des sites et sols pollués*, BRGM/RP-52881-FR, BRGM, 2004, 138 p.

Laperche V., Mossmann J. R., *Protocole d'échantillonnage des sols urbains pollués par du plomb*, BRGM/RP-52928-FR, BRGM, 2004, 27 p.

Leonardi G., Miglavacca M., Nardi S., Soil phosphorus analysis as an integrative tool for recognizing buried ancient loughsoils, *Journal of Archaeological Science*, vol. 26, n° 4, 1999, p. 343-352.

Lillios K. T., Phosphate fractionation of soils at Agroal, Portugal, *American Antiquity*, vol. 57, n° 3, 1992, p. 495-506.

Lippi R. D., Paleotopography and phosphate analysis of a buried jungle site in Ecuador, *Journal of Field Archaeology*, vol. 15, n° 1, 1988, p. 85-97.

Maravelaki-Kalaitzaki P., Black crusts and patinas on Pentelic marble from the Parthenon and Erechtheum (Acropolis, Athens): characterization and origin, *Analytica Chimica Acta*, vol. 532, n° 2, 2005, p. 187-198.

Marwick B., Element concentrations and magnetic susceptibility of anthrosols: Indicators of prehistoric human occupation in the inland Pilbara, Western Australia, *Journal of Archaeological Science*, vol. 32, n° 9, 2005, p. 1357-1368.

Matheron G., *Traité de geostatistique appliquée : le krigeage*, 2 tomes, Paris, BRGM, coll. « Mémoires du BRGM », t. 2, 1963, 171 p.

Method 6200, *Field portable X-ray fluorescence spectrometry for the determination of elemental concentrations in soil and sediment*, United States Environnemental Protection Agency, 2007, 32 p.

Morasz J.-G., Pulou R., Les meules rotatives des mines romaines de Villefranche-de-Rouergue (Aveyron) : La preuve chimique de leur usage « industriel », *Revue d'archéométrie*, n° 21, 1997, p. 141-144.

Mzyk Z., Baranowska I., Mzyk J., Research on grain size effect in XRF analysis of pelletized samples, *X-Ray Spectrometry*, vol. 31, n° 1, 2002, p. 39-46.

Nieminen T. M., Ukonmaanaho L., Shotyk W., Enrichment of Cu, Ni, Zn, Pb and As in an ombrotrophic peat bog near a Cu-Ni smelter in Southwest Finland, *The Science of The Total Environment*, vol. 292, n° 1-2, 2002, p. 81-89.

Pappalardo L., Karydas A. G., Kotzamani N., Pappalardo G., Romano F. P., Zarkadas C., Complementary use of PIXE-alpha and XRF portable systems for the non-destructive and in situ characterization of gemstones in museums, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section*

B: Beam Interactions with Materials and Atoms, vol. 239, n° 1-2, 2005, p. 114-121.

Parnell J. J., Terry R. E., Golden C., Using in-field phosphate testing to rapidly identify middens at Piedras Negras, Guatemala, *Geoarchaeology: An International Journal*, vol. 16, n° 8, 2001, p. 855-873.

Parnell J. J., Terry R. E., Sheets P., Soil chemical analysis of ancient activities in Ceren, El Salvador: A case study of a rapidly abandoned site, *Latin American Antiquity*, vol. 13, n° 3, 2002, p. 331-342.

Petit D., Mennessier J. P., Lamberts L., Stable lead isotopes in pond sediments as tracer of past and present atmospheric lead pollution in Belgium, *Atmospheric Environment (1967)*, vol. 18, n° 6, 1984, p. 1189-1193.

Petrosyan V., Orlova A., Dunlap C. E., Babayan E., Farfel M., Von Braun M., Lead in residential soil and dust in a mining and smelting district in northern Armenia: a pilot study, *Environmental Research*, vol. 94, n° 3, 2004, p. 297-308.

Ploquin A., Allée P., Bailly-Maître M.-C., Baron S., De Beaulieu J.-L., Carignan J., Laurent S., Lavoie M., Mahé-Le Carlier C., Peytavin J., Pulido M., Medieval lead smelting on the Mont-Lozère, southern France, dans *Proceedings of Archaeometallurgy in Europe*, Milan, Italie, 2 t., AIL, 2003, t. 1, p. 635-644.

Potts P. J., Ellis A. T., Kregsamer P., Marshall J., Streli C., West M., Wobrauschek P., Atomic spectrometry update. X-ray fluorescence spectrometry, *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, vol. 18, 2003, p. 1297 - 1316.

Potts P. J., Ellis A. T., Kregsamer P., Marshall J., Streli C., West M., Wobrauschek P., Atomic spectrometry update. X-ray fluorescence spectrometry, *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, vol. 19, n° 10, 2004, p. 1397-1419.

Potts P. J., Ellis A. T., Kregsamer P., Streli C., Vanhoof C., West M., Wobrauschek P., Atomic spectrometry update. X-ray fluorescence spectrometry, *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, vol. 20, n° 10, 2005, p. 1124-1154.

Potts P. J., Ellis A. T., Kregsamer P., Streli C., Vanhoof C., West M., Wobrauschek P., Atomic spectrometry update. X-ray fluorescence spectrometry, *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, vol. 21, n° 10, 2006, p. 1076-1107.

Ramin J., *La technique minière et métallurgique des Anciens*, Bruxelle, Belgique, Latomus, 1977, 224 p.

Renberg I., Persson M. W., Emteryd O., Pre-industrial atmospheric lead contamination detected in Swedish lake sediments, *Nature*, vol. 368, n° 6469, 1994, p. 323-326.

Romano F. P., Pappalardo G., Pappalardo L., Garraffo S., Gigli R., Pautasso A., Quantitative non-destructive determination of trace elements in

archaeological pottery using a portable beam stability-controlled XRF spectrometer, *X-Ray Spectrometry*, vol. 35, n° 1, 2006, 7 p.

Shalev S., Shilstein S. S., Yekutieli Y., XRF study of archaeological and metallurgical material from an ancient copper-smelting site near Ein-Yahav, Israel, *Talanta*, vol. 70, n° 5, 2006, p. 909-913.

Shotyk W., Weiss D., Appleby P. G., Cheburkin A. K., Frei R., Gloor M., Kramers J. D., Reese S., Van Der Knaap W. O., History of atmospheric lead deposition since 12,370 C14 yr BP from a peat bog, Jura Mountains, Switzerland, *Science*, vol. 281, n° 5383, 1998, p. 1635-1640.

Sjoberg A., Phosphate analysis of anthropic soils, *Journal of Field Archaeology*, vol. 3, n° 4, 1976, p. 447-454.

Stallard M. O., Apitz S. E., Dooley C. A., X-ray fluorescence spectrometry for field analysis of metals in marine sediments, *Marine Pollution Bulletin*, vol. 31, n° 4-12, 1995, p. 297-305.

Téreygeol F., *Les mines d'argent carolingiennes de Melle*, Thèse de doctorat d'archéologie de l'Université Panthéon-Sorbonne, Paris 1, 2001, 3 vol., 608 p.

Terry R. E., Hardin P. J., Houston S. D., Nelson S. D., Jackson M. W., Carr J., Parnell J. J., Quantitative phosphorus measurement: A field test procedure for archaeological site analysis at Piedras Negras, Guatemala, *Geoarchaeology: An International Journal*, vol. 15, n° 2, 2000, p. 151-166.

Vanhoof C., Corthouts V., Tirez K., Energy-dispersive X-ray fluorescence systems as analytical tool for assessment of contaminated soils, *Journal of Environmental Monitoring*, vol. 6, n° 4, 2004, p. 344-350.

Veneman P. L. M., Murray J. R., Baker J. H., Spatial distribution of pesticide residues in a former apple orchard, *Journal of Environmental Quality*, vol. 12, n° 1, 1983, p. 101-104.

Veron A., Lambert C. E., Isley A., Linet P., Grousset F., Evidence of recent lead pollution in deep north-east Atlantic sediments, *Nature*, vol. 326, n° 6110, 1987, p. 278-281.

Wagner G. A., Pernicka E., Seeliger T. C., Öztunali Ö., Baranyi I., Geologische Untersuchungen zur fruhen Metallurgie in NW-Anatolien, *Bulletin of the Mineral Research & Exploration, Turkey*, vol. 101, 1983, p. 47-81.

Weiss D., Shotyk W., Appleby P. G., Kramers J. D., Cheburkin A. K., Atmospheric Pb deposition since the industrial revolution recorded by five Swiss peat profiles: Enrichment factors, fluxes, isotopic composition, and sources, *Environmental Science & Technology*, vol. 33, n° 9, 1999, p. 1340-1352.

West M., Ellis A. T., Kregsamer P., Potts P. J., Streli C., Vanhoof C., Wobrauschek P., Atomic spectrometry update. X-ray fluorescence

spectrometry, *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, vol. 22, n° 10, 2007, p. 1304-1332.

Williams-Thorpe O., Potts P. J., Webb P. C., Field-portable non-destructive analysis of lithic archaeological samples by X-ray fluorescence instrumentation using a mercury iodide detector: Comparison with wavelength-dispersive XRF and a case study in British stone axe provenancing, *Journal of Archaeological Science*, vol. 26, n° 2, 1999, p. 215-237.

Wolz S., Fenske R. A., Simcox N. J., Palcisko G., Kissel J. C., Residential arsenic and lead levels in an agricultural community with a history of lead arsenate use, *Environmental Research*, vol. 93, n° 3, 2003, p. 293-300.

VI. Bibliographie : études des procédés d'argenture

Anheuser K., France P., Silver plating technology of the late 3 rd century Roman coinage, *Historical metallurgy*, vol. 36, 2002, p. 17-23.

Anheuser K., Northover J. P., Silver plating on Roman and Celtic coins from Britain, a technical study, *The British numismatic journal*, vol. 64, 1994, p. 22-32.

Anheuser K., The practice and characterization of historic fire gilding techniques, *JOM*, vol. 49, n° 11, 1997, p. 58-62.

Barreswil C.-L., Girard A., *Dictionnaire de chimie industrielle*, 4 tomes, Paris, Dezobry, E. Magdeleine et Cie, t. 2, 1864, 508 p.

Baumé A., *Chymie expérimentale et raisonnée*, 3 tomes, Paris, P. F. Didot le jeune, t. 3, 1773, 704 p.

Bayley J., Fell V., Making gold-mercury amalgam: the evidence from Southampton, England, dans *2nd International Conference Archaeometallurgy In Europe 2007*, Aquileia, Italie, 17 - 21 juin 2007, AIM, 2007, CdRom.

Beck L., Bosonnet S., Réveillon S., Eliot D., Pilon F., Silver surface enrichment of silver-copper alloys: a limitation for the analysis of ancient silver coins by surface techniques, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, vol. 226, n° 1-2, 2004, p. 153-162.

Biringuccio V., *La pyrotechnie, ou art du feu*, Paris, Chez Claude Fremy, 1572, 167 p.

Brillo J., Egry I., Ho I., Density and Thermal Expansion of Liquid Ag–Cu and Ag–Au Alloys, *International Journal of Thermophysics*, vol. 27, n° 2, 2006, p. 494-506.

Brissaud I., Chevallier P., Dardenne C., Deschamps N., Frontier J. P., Gruel K., Taccoen A., Tarrats A., Wang J. X., Analysis of Gaulish coins by proton induced X-ray emission, synchrotron radiation X-ray fluorescence and neutron activation analysis, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, vol. 49, n° 1-4, 1990, p. 305-308.

Condamin J., Picon M., Etude de quelques problèmes analytiques propres aux monnaies antiques (Argent - Cuivre), *Revue Numismatique*, vol. 6, 1964, p. 69-89.

Cope L. H., Surface-silvered ancient coins, dans Hall E. T., Metcalf D. M., eds., *Methods of Chemical and Metallurgical Investigation of Ancient Coinage,* London, Royal Numismatic Society, 1972, t. 8, p. 261-278.

Deraisme A., Beck L., Pilon F., Barrandon J. N., A study of the silvering process of the Gallo-Roman coins forged during the third century AD, *Archaeometry*, vol. 48, n° 3, 2006, p. 469-480.

Figuier L., *Les merveilles de la science, ou description populaire des inventions modernes*, 8 tomes, Paris, Furne, Jouvet et Cie, t. 2, 1868, 703 p.

Gale N. H., Stos-Gale Z. A., Ancient Egyptian silver, *The Journal of Egyptian Archaeology*, vol. 67, 1981, p. 103-115.

Giumlia-Mair A., Colouring treatments on ancient copper-alloys *La Revue de Métallurgie*, vol. 9, 2001, p. 767-776.

Giumlia-Mair A., On surface analysis and archaeometallurgy, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, vol. 239, n° 1-2, 2005, p. 35-43.

Guerra M. F., Barrandon J.-N., Ion beam activation analysis with a cyclotron, dans Oddy W. A., Cowell M. R., eds., *Metallurgy in numismatics,* Londres, Angleterre, Royal numismatic society, 1998, t. 4, p. 15-34.

Hall E. T., Surface-enrichment of buried metals, *Archaeometry*, vol. 4, n° 1, 1961, p. 62-66.

Horz G., Kallfass M., The treasure of gold and silver artifacts from the Royal Tombs of Sipan, Peru - a study on the Moche metalworking techniques, *Materials Characterization*, vol. 45, n° 4-5, 2000, p. 391-419.

Ingo G. M., Angelini E., Caro T. D., Bultrini G., Combined use of surface and micro-analytical techniques for the study of ancient coins, *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, vol. 79, n° 2, 2004, p. 171-176.

Ingo G. M., Balbi S., Caro T. D., Fragalà I., Riccucci C., Bultrini G., Microchemical investigation of Greek and Roman silver and gold plated coins: coating techniques and corrosion mechanisms, *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, vol. 83, n° 4, 2006, p. 623-629.

Jenkins R., The reverberatory furnace with coal fuel, 1612-1712, *Transactions of the Newcomen Society*, vol. 14, 1933, p. 67-81.

King C. E., Hedges R. E. M., An analysis of some third-century Roman coins for surface silvering and silver percentage of their alloy content, *Archaeometry*, vol. 16, n° 2, 1974, p. 189-200.

Klockenkämper R., Bubert H., Hasler K., Detection of near-surface silver enrichment on Roman imperial silver coins by X-ray spectral analysis, *Archaeometry*, vol. 41, n° 2, 1999, p. 311-320.

La Niece S., Silvering, dans La Niece S., Craddock P., eds., *Metal plating and patination: cultural, technical and historical developments,* Oxford, Butterworth-Heinemann, 1993, p. 201-210.

La Niece S., Technology of silver-plated coin forgeries, dans Archibald M. M., Cowell M. R., eds., *Metallurgy in numismatics,* Londres, Angleterre, Royal numismatic society, 1993, t. 3, p. 227-239.

Linke R., Schreiner M., Energy dispersive X-ray fluorescence analysis and electron probe microanalysis of medieval silver coins, *Mikrochim. Acta*, vol. 133, 2000, p. 165-170.

Lins P. A., Oddy W. A., The origins of mercury gildings, *Journal of Archaeological Science*, vol. 2, n° 4, 1975, p. 365-373.

Mackenzie C., *Mémorial pratique du chimiste-manufacturier*, 3 tomes, Paris, Barrois l'aîné, t. 1, 1824, XXIV-456 p.

Martinón-Torres M., Freestone I. C., Hunt A., Rehren T., Mass-produced mullite cucibles in medieval Europe: manufacture and material properties, *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 91, n° 6, 2008, p. 2071-2074.

Martinón-Torres M., Rehren T., Agricola and Zwickau: theory and practice of Renaissance brass production in SE Germany, *Historical metallurgy*, vol. 36, 2002, p. 95-111.

Martinón-Torres M., Rehren T., Post-medieval crucible production and distribution: a study of materials and materialities, *Archaeometry*, à paraître.

Mathis F., *Croissance et propriétés des couches d'oxydation et des patines a la surface d'alliages cuivreux d'intérêt archéologique ou artistique*, Thèse de doctorat de Sciences des matériaux - Métallurgie de l'Université de Paris-Sud, U.F.R. scientifique d'Orsay, Paris, 2005, 294 p.

Meyers P., Non-destructive activation analysis of ancient coins using charged particles and fast neutrons, *Archaeometry*, vol. 11, 1969, p. 67-84.

Meyers P., Production of silver in Antiquity: ore types identified based upon elemental compositions of ancient silver artifacts, dans Van Zelst L., ed., *Patterns and Process: A Festschrift in Honor of Dr. Edward V. Sayre,*

Suitland, Etats Unis, Smithsonian Center for Materials Research and Education, 2003, p. 271-288.

Oddy W. A., Cowell M. R., The techology of gilded coin forgeries, dans Archibald M. M., Cowell M. R., eds., *Metallurgy in numismatics,* Londres, Angleterre, Royal numismatic society, 1993, t. 3, p. 199-239.

Raub C., How to coat objects with gold - Pliny, Leyden X, Mappae Clavicula and Theophilus senn with a modern chemist's eyes, dans Eluère C., ed., *Outils et ateliers d'orfèvres des temps ancients*, Musée des antiquités Nationales de Saint-Germain-en-Laye, 2 t., Laboureur & Cie, 1993, t. 2, p. 101-110.

Reiff F., Bartels M., Gastel M., Ortner H., Investigation of contemporary gilded forgeries of ancient coins, *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, vol. V371, n° 8, 2001, p. 1146-1153.

Roseleur A., *Guide pratique du doreur, de l'argenteur et du galvanoplaste*, Paris, De Plazanet, 1873, 321 p.

Russo G., Sulla tecnica di produzione del numerario in lega d'argento nel mondo antico e medievale, *Rivista Italiana di Numismatica e Scienze Affini*, vol. XCVII, 1996, p. 167-181.

Smit Z., Kos P., Elemental analysis of Celtic coins, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, vol. 3, n° 1-3, 1984, p. 416-418.

Stos-Gale Z. A., Gale N. H., The sources of Mycenaean silver and lead, *Journal of Field Archaeology*, vol. 9, n° 4, 1982, p. 467-485.

Tate J., Some problems in analysing museum material by nondestructive surface sensitive techniques, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, vol. 14, n° 1, 1986, p. 20-23.

Vlachou C., McDonnell J. G., Janaway R. C., Experimental investigation of silvering in late roman coinage, dans Vandiver P. B., Goodway M., Druzik J. R., Mass J. L., eds., *Materials Issues in Art and Archaeology VI*, Boston, Massachusetts, 2002, Materials Research Society, 2001, t. 712, p. 461-469.

Weber G., Guillaume J., Strivay D., Garnir H. P., Marchal A., Martinot L., Is the external beam PIXE method suitable for determining ancient silver artifact fineness?, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, vol. 161-163, 2000, p. 724-729.

Zhu Y., Mimura K., Isshiki M., Oxidation mechanism of copper at 623-1073 K, *Materials Transactions*, vol. 43, n° 9, 2002, p. 2173-2176.

Zwicker U., Oddy A., La Niece S., Roman techniques of manufacturing silver-plated coins, dans La Niece S., Craddock P. T., eds., *Metal plating and patination: cultural, technical and historical developments,* Londres, Angleterre, Butterworth-Heinemann, 1993, p. 223-246.

Zwicky-Sobczyk C. N., Stern W. B., X-ray fluorescence and density measurements on surface-treated Roman silver coins, *Archaeometry*, vol. 39, n° 2, 1997, p. 393-405.

VII. Bibliographie non monétaire

Métallurgie des alliages à base de cuivre du XIIIe au XVe siècle en France : Reconstitution des chaînes opératoires de production des objets du quotidien, Rapport de PNRC sous la direction scientifique de Benoît P., Ministère de la Culture, 2006, 165 p.

Assal J., Hallstedt B., Gauckler L. J., Thermodynamic assessment of the silver-oxygen system, *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 80, n° 12, 1997, p. 3054-3060.

Auray J. P., Duru G., Zighed A., *Analyse des données multidimensionnelles : les méthodes de description*, 4 tomes, Lyon, Ed. Alexandre Lacassagne, t. 1, 1990, 195 p.

Basutçu M., *Contribution à l'analyse par réaction nucléaire à l'aide de particules alpha de basse énergie (< 3,5 MeV). Etude comparative du dosage de l'argent par des réactions nucléaires non destructives en numismatique*, Thèse de doctorat de Sciences Physiques de l'Université Pierre et Marie Curie, Paris 6, 1980, 166 p.

Beauchesne F., *Analyse non destructive du cuivre et de ses alliages par activation à l'aide de neutrons rapides de cyclotron*, Thèse de doctorat de Sciences Physiques de l'Université d'Orléans, Orléans, 1986, 282 p.

Beauchesne F., Barrandon J.-N., Alves L., Gil F. B., Guerra M. F., Ion beam analysis of copper and copper alloy coins, *Archaeometry*, vol. 30, n° 2, 1988, p. 187-197.

Brisset F., Repoux M., Ruste J., Grillon F., Robaut F., eds., *Microscopie électronique à balayage et microanalyses*, Les Ulis, EDP Sciences, 200, 893 p.

Carter G. F., Reproducibility of X-ray fluorescence analyses of Septimius Severus denarii, *Archaeometry*, vol. 19, n° 1, 1977, p. 67-73.

Carter G. F., Caley E. R., Carlson J. H., Carriveau G. W., Hughes M. J., Rengan K., Segebade C., Comparison of analyses of eight Roman orichalcum coin fragments by seven methods, *Archaeometry*, vol. 25, n° 2, 1983, p. 201-213.

Cotter J. P., The mystery of the Hessian wares: post-medieval triangular crucibles, dans Gaimster D., Hurst J. G., Redknap M., eds., *Everyday and exotic pottery from Europe c. 650-1900,* Londres, Angleterre, Oxbow Books Limited, 1992, p. 256-272.

De Leiris H., *Métaux et alliages*, 3 tomes, Paris, Masson et Cie, t. 1, 1971, 255 p.

De Leiris H., *Métaux et alliages*, 3 tomes, Paris, Masson et Cie, t. 3, 1971, 193 p.

Doridot A., Robbioloa L., Téreygeol F., Production expérimentale de laiton par cémentation en creuset ouvert, avec du minerai de zinc, selon les recettes médiévales et modernes, *Archéoscience revue d'archéométrie*, vol. 30, 2006, p. 15-24.

Doridot A., Téreygeol F., *Les creusets trouvés en contexte funéraire à Melle, Niort et Souché (79)*, Rapport d'étude archéométrique, 2006, 84 pl. et 34 p.

Fiche toxicologique : Mercure et composés minéraux, INRS, n° 55, 1997, 6 p.

Gale W. F., Totemeier T. C., eds., *Smithells metals reference book*, Butterworth - Heinemann, 2004, 1856 p.

Guineau B., *Glossaire des matériaux de la couleur et des termes techniques employés dans les recettes de couleurs anciennes*, édité par Pouille E., Halleux R., Turnhout, Belgique, Brepols, coll. « De diversis artibus », t. 73, 2005, 791 p.

Jacquiot J., Les jetons, les méreaux et les pions-médailles de jeu, de la renaissance au XVIIIe siècle, dans Ariès P., Margolin J.-C., eds., *Actes du XXIII Colloque international d'études humanistes : Les Jeux à la Renaissance*, Tours, Vrin J., 1980, p. 459-468.

Labrot J., Henckes J., *Une Histoire économique et populaire du Moyen Age, les jetons et les méreaux*, Paris, Edtitions Errance, coll. « Collections numismatiques », 1989, 236 p.

Lagarde A., *Rivel (Aude) et ses environs : les noms de lieux, la géographie, la tradition et l'histoire*, Carbonne, A. Lagarde, 2000, 96 p.

Lesoult G., *Solidification, cristillastion et microstructures*, n° M58, Techniques de l'Ingénieur, 1986, 28 p.

Lide D. R., ed., *CRC handbook of chemistry and physics*, 72ème ed., Boston, USA, CRC Press, 1991, 2624 p.

Lu J., *Concentration de contraintes*, n° BM5040, Techniques de l'Ingénieur, 1998, 24 p.

Massalski T. B., Okamoto H., Subramanian P. R., Kacprzak L., eds., *Binary alloy phase diagrams*, Cleveland, Etats Unis, ASM International, 1990, 3589 p.

Meillet M., Une excursion minéralogique en Limousin, *Rapport de la Société d'Agriculture, Sciences et Arts de la Vienne*, 1858, p. 22.

Mellottee H., *Combustion des métaux, prévention et lutte*, n° M580, Techniques de l'Ingénieur, 1978, 24 p.

Morineau A., Aluja-Banet T., *Analyse en composantes principales*, Montreuil, CISIA-CERESTA, 1998, 142 p.

Pastoureau M., *Jetons, méreaux et médailles*, Turnhout, Belgique, Brépols, coll. « Typologie des sources du Moyen Age occidental », 1984, 46 p.

Parlee N. A. D., Sacris E. M., The solubility of oxygen in liquid silver, *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*, vol. 233, 1965, p. 1918-1919.

Pelouze T.-J., Frémy E., *Cours de chimie générale*, 4 tomes, Paris, V. Masson, t. 2, 1848, 828 p.

Pinasco M. R., Ienco M. G., Piccardo P., Pellati G., Stagno E., Metallographic approach to the investigation of metallic archaeological objects, *Annali di Chimica*, vol. 97, n° 7, 2007, p. 553-574.

Quéré D., *Lois du mouillage et de l'imprégnation*, n° J2140, Techniques de l'Ingénieur, 2003, 15 p.

Rist A., Ancey-Moret M.-F., Gatellier C., Riboud P. V., *Equilibres thermodynamiques dans l'élaboration de la fonte et de l'acier*, n° M1730, Techniques de l'Ingénieur, 1974, 20 p.

Roos A., *Technique métallographique : Préparation des surfaces métalliques pour micrographie et macrographie*, Bayeux, Dunod, 1960, 121 p.

Sarah G., *Caractérisation de la composition et de la structure des alliages argent-cuivre par ICP-MS avec prélèvement par ablation laser. Application au monnayage carolingien*, Thèse de doctorat de Chimie de l'Université d'Orléans, Orléans, 2008, 2 volumes, 516 et 226 p.

Sarah G., Gratuze B., Barrandon J.-N., Application of laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS) for the investigation of ancient silver coins, *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, vol. 22, n° 9, 2007, p. 1163-1167.

Sorrell C. A., Anderson H. U., Ackermann R. J., Thermal expansion and the high-low transformation in quartz, *Journal of Applied Crystallography*, vol. 7, n° 5, 1974, p. 468-473.

Weast R., ed., *Handbook of chemistry and physics*, 46th ed., Cleveland, The Chemical Rubber Co, 1966.

Chapitre II. Etude bibliographique et *corpus* archéologique

La méthodologie retenue pour répondre aux problématiques de cette étude qui traite des techniques monétaires médiévales, s'appuie sur la confrontation de données mises en évidence à partir de l'étude d'objets archéologiques avec celles extraites de documents historiques. Les différentes sources utilisées ainsi que les informations qu'elles ont livrées pour définir des chaînes opératoires « théoriques » ou réglementaires, seront présentées dans une première partie qui sera suivie de l'inventaire du *corpus* archéologique caractérisé.

Partie 1. La chaîne opératoire officielle

La mise en évidence des techniques de monnayage médiévales dans les ateliers monétaires royaux français, a fixé un cadre dans lequel a été menée la recherche bibliographique. Le caractère officiel de la fabrication concernée et les règles imposées par l'autorité émettrice qui la contrôle, ont permis de facilement limiter ce travail aux opérations en vigueur dans les fabriques françaises. En revanche, la borne temporelle qui devait restreindre l'étude aux procédés en pratique au Moyen Age n'était *a priori* pas aussi stricte, compte tenu de la persistance de certaines opérations jusque dans des périodes plus récentes. De même qu'un regard critique permettra de prendre en compte des descriptions des procédés anciens, mises en évidence dans des sources plus tardives.

I. Les sources

La fabrication de la monnaie telle qu'elle était pratiquée dans les ateliers monétaires officiels médiévaux, se définit sous le terme de *monnayage au marteau*. Les différentes opérations qui lui sont associées sont régulièrement exposées dans la littérature numismatique, tant dans les manuels généraux que dans des publications plus spécialisées[29]. Cependant, il s'agit en général de simples

[29] Le Noir M., *L'art du monnayage*, *op. cit.*, p. 21-22.
Lafaurie J., Relation de Me Henry Poullain..., *op. cit.*, p. 310-311.
Blanchet J.-A. *et al.*, *Manuel de numismatique française*, *op. cit.*, t. 2, p. 21-24.
Grierson P., *Monnaies et monnayage..., op. cit.*, p. 132-146.
Dhenin M., Le vocabulaire du monnayage..., *op. cit.*, p. 275-276.
Bompaire M. *et al.*, *Numismatique médiévale..., op. cit.*, t. 7, p. 473-506.

retranscriptions de descriptions extraites de trois textes principaux[30]. Le propos de cette étude est de reprendre ces différentes données et de les considérer d'un regard critique. Dans ce but, elles ont été complétées par d'autres sources afin de disposer d'une image la plus détaillée possible des techniques de fabrication et de leurs contraintes, telles qu'elles pouvaient être constatées dans les ateliers médiévaux. En définitive, c'est la confrontation de cette collection d'informations avec les données extraites de l'étude des différents *corpus* archéologiques qui permet de déduire les opérations effectivement nécessaires à une mise en forme de monnaies au marteau.

Avant d'aborder la présentation des différentes sources utilisées pour déterminer la chaîne opératoire de fabrication en vigueur dans les ateliers monétaires médiévaux, il est nécessaire de définir précisément le cadre temporel dans lequel est inscrite cette étude. En effet, il apparaît que les techniques propres au monnayage médiéval, n'ont pas connu d'innovation notable jusqu'à des périodes plus tardives. Par ailleurs, la transition qui a vu au XVII^{e} siècle l'introduction de nouveaux procédés est particulièrement bien documentée, avec la rigueur qu'il faut attendre généralement des documents traitant des questions monétaires[31].

C'est sous le règne d'Henri II, particulièrement attentif à la qualité des monnaies produites dans les ateliers français, qu'un nouvel appareillage a été importé en France. Dans *La découverte à Augsbourg des instruments mécaniques du monnayage moderne et leur importation en France en 1550 d'après les dépêches de Charles de Marillac*, l'archiviste paléographe P. de Vaissière documente à partir d'échanges épistolaires entre le Roi et l'ambassadeur Charles de Marillac, l'introduction de machines censées améliorer la fabrication des monnaies[32]. Il apparaît qu'en Allemagne, existaient déjà en 1550 différents instruments qui permettaient de réaliser mécaniquement le monnayage. Il

[30] Estienne H., *Project du livre intitulé « De la precellence du langage françois »*, Paris, M. Patisson, 1579, 295 p.
Poullain H., Relation de Me Henry Poullain, ci-devant conseiller en la cour des monnaies, de l'épreuve de fabrication des espèces, sur certains nouveaux instruments proposés par Nicolas Briot, tailleur général des monnayes de France, faite ès présence de messieurs de Boissise et de Marillac, conseillers d'Estat, dans Mazerolle F., ed., *Les médailleurs français du XV^{e} siècle au milieu du XVII^{e}*, 3 tomes, Paris, Imprimerie nationale, 1902, t. 1, p. 319-335.
Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, XV et 243 p.
[31] De Vaissière P., *La découverte à Augsbourg des instruments mécaniques du monnayage moderne et leur importation en France en 1550 d'après les dépêches de Charles de Marillac*, Montpellier, Imprimerie Ricard Frères, 1892, 29 p.
Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 81.
[32] De Vaissière P., *La découverte à Augsbourg..., op. cit.*, 29 p.

s'agissait d'un laminoir destiné à mettre en forme les matières premières sous forme de plaques, lesquelles étaient ensuite découpées en rondelles avec un emporte-pièce, pour finalement être frappées avec une presse qualifiée de balancier[33]. Ces trois outils devaient par la suite remplacer une grande partie des opérations du monnayage au marteau. Cependant leur introduction dans les ateliers monétaires français n'a pas été immédiate.

C'est dans un premier temps, à Paris par un édit de juillet 1553 qu'Henri II impose l'utilisation de ces nouveaux instruments pour produire un monnayage d'argent. La fabrique est installée dans le jardin des Etuves près du Palais du Louvre. La technique n'est pas encore généralisée à toutes les Monnaies du royaume. Elle est en outre remise en question par Henri III qui par un édit du mois de septembre 1585, la cantonne à la fabrication de médailles et de jetons. Ce n'est que bien plus tard, sous le règne de Louis XIII, que le procédé est réintroduit pour la production monétaire. La qualité de l'ouvrage, grâce à ces instruments, est de nouveau reconnue. Elle doit permettre, comme cela devait l'être sous le règne d'Henri II, de rendre les monnaies beaucoup plus abouties qu'elles ne l'étaient et empêcher qu'elles soient rognées ou contrefaites. En 1640, un nouvel édit autorisait encore le recours à la technologie du marteau dans les ateliers monétaires qui pouvaient justifier d'un monnayage équivalent à celui résultant des nouveaux instruments. L'édit de mars 1645 impose enfin définitivement l'utilisation de ces derniers dans toutes les fabriques de France[34]. La mise en place dans la totalité des Monnaies françaises ne peut cependant pas être instantanée. A La Rochelle, par exemple, c'est en juillet 1646 que sont émises les premières espèces produites par ce monnayage novateur[35].

En 1645, il faut considérer que la technologie de mise en forme et de frappe de la monnaie au marteau a commencé à disparaître. L'introduction du nouvel appareillage, même si elle a été retardée de près d'une centaine d'années, doit être assimilée à un saut technologique. Les différents instruments n'ont pas été développés en France en 1550. Ils ont été importés d'Allemagne où ils avaient déjà fait l'objet de perfectionnements. Le monnayage français a pu disposer des trois nouveaux outils simultanément et déjà opérationnels. Ils ont remis en question une part importante de la chaîne opératoire de la fabrication monétaire. Il faut toutefois reconnaître que les changements n'interviennent pas sur la totalité des étapes de

[33] « on en coupe des morceaux avec des instruments de fer en manière d'emporte-pièces, appellez coupoirs. ».
Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 72.
[34] Constans G., *Traité de la Cour des monnoyes et de l'estendue de sa jurisdiction. Divisé en cinq parties*, Paris, S. Cramoisy, 1658, p. 234-244.
[35] Communication A. Clairand.

fabrication. Les opérations notamment de fonte ainsi que de blanchiment qui seront présentées par la suite, ne nécessitant pas de modification, elles ont été maintenues après 1645[36].

Dans la définition du cadre temporel dans lequel s'inscrit ce travail, l'année 1645 apparaît comme étant un *terminus post quem*. Toutefois, certains procédés médiévaux ayant persisté plus tardivement, l'étude bibliographique ne devait pas se limiter à la seule période qui précède cette date.

Plusieurs documents monétaires peuvent être considérés comme fondateurs dans la définition d'une chaîne opératoire théorique du monnayage médiéval. Un tel qualificatif se justifie par l'exhaustivité dont témoignent les descriptions exposées. Les auteurs de ces dernières, de par leurs professions, représentent également une assurance quant à la précision de leur discours. C'est notamment de ce *corpus* bibliographique que la littérature numismatique a tiré ses informations sur la fabrication monétaire. Dans la présente étude, ce sont ces mêmes documents qui ont été dans un premier temps considérés mais cependant par la suite complétés par d'autres sources.

La source la plus ancienne en langue française qui traite de la question de la fabrication de la monnaie est extraite d'un livre de 1579, rédigé par H. Estienne[37]. A partir d'une description de la chaîne opératoire de monnayage au marteau et en particulier du vocabulaire qui lui est associé, l'auteur souhaite mettre en évidence la précellence du langage français. Il ne s'agit pas d'un traité technique, rédigé par quelqu'un du métier qui souhaite décrire de manière exhaustive les différentes étapes de mise en forme. Cependant, ce texte est le premier qui révèle un lexique technique ainsi que la chronologie des opérations de ce monnayage. Les informations qui s'y trouvent exposées n'en sont par ailleurs pas moins justes. Elles se retrouvent pour la plupart dans d'autres sources sans relation philologique et dans une certaine mesure plus techniques. Néanmoins, plusieurs auteurs ont pu remarquer une erreur faite par H. Estienne dans la définition d'un terme de sa chaîne opératoire. Il s'agit de l'étape durant laquelle les ébauches de monnaies sont bouées. Si H. Estienne l'explique par une déformation de mise en forme visant à arrondir les futures espèces, une confrontation avec d'autres textes monétaires permettra de reconsidérer cette hypothèse dans la présentation de la chaîne opératoire théorique qui suivra.

[36] Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 82.
[37] Estienne H., *Project du livre intitulé..., op. cit.*, p. 105-110.

En avançant dans la chronologie, c'est à partir de l'année 1617 qu'un désaccord qui oppose N. Briot aux monnayeurs de la Monnaie de Paris, va être l'occasion de la rédaction de procès-verbaux dans lesquels sont consignées de nouvelles descriptions des techniques de monnayage au marteau. Les différentes pièces de cette affaire ont été compilées par F. Mazerolle dans son ouvrage sur les médailleurs français[38].

En 1615, N. Briot est le tailleur général des Monnaies, c'est-à-dire qu'il est chargé de la fabrication des matrices qui seront utilisées pour la frappe de monnaies dans les ateliers monétaires français. Il adresse alors une lettre au Roi et à son Conseil dans laquelle il décrit les avantages d'une nouvelle technique de frappe qu'il a mise au point[39]. Le savoir-faire qu'il tient de sa profession quant à la fabrication monétaire, lui a en effet permis de proposer de nouveaux instruments qui doivent aussi permettre de réduire le personnel nécessaire à la production monétaire. Dans ses propos, il n'est pas tendre avec les monnayeurs qu'il voit dans les ateliers en « *une démesurée multitude* », lesquels y étant « *à présent indifféremment admis, quoyque la plupart inexperts de la qualité dessus déclarée* [du monnayage], *afin de jouyr de privilèges*… »[40]. Le 20 août 1616, lors d'un interrogatoire retranscrit dans un procès-verbal, il affirme vouloir obtenir l'abolition de leurs privilèges[41]. La corporation de ces deniers a certainement été informée des volontés du tailleur général de remettre en question leur profession. C'est certainement l'une des raisons pour lesquelles N. Briot dut prouver la qualité de ses instruments au cours d'un exercice contradictoire. Le principe de cette évaluation était de comparer le monnayage de N. Briot à celui produit au marteau selon le procédé en vigueur dans les ateliers monétaires.

Les résultats de cette expertise qui a eu lieu entre le 23 janvier et le 20 février 1617, n'ont pas permis de mettre en évidence les qualités supposées du nouveau procédé. Il a en effet engendré beaucoup de déchets et les espèces monnayées étaient cambrées. Quant à la quantité produite, elle s'est révélée très amoindrie comparée à celle des monnayeurs déterminés à montrer la qualité de leur travail[42].

---

[38] Mazerolle F., *Les médailleurs français du XV^e siècle au milieu du XVII^e*, 3 tomes, Paris, Imprimerie nationale, t. 1, 1902, CLXXVIII et 630 p.
[39] *Ibidem*, p. 307.
[40] *Ibid.*, p. 309.
[41] *Ibid.*, p. 310.
Les principaux privilèges des monnayeurs sont présentés dans :
Blanchet J.-A. *et al.*, *Manuel de numismatique française*, *op. cit.*, t. 2, p. 15.
Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 175.
Bompaire M. *et al.*, *Numismatique médiévale..., op. cit.*, t. 7, p. 507-508.
[42] Pour l'anecdote, un monnayeur ayant préalablement frappé d'un seul coup de marteau une monnaie, l'a ensuite refrappée après l'avoir retournée, rendant ainsi indiscernables les motifs de la première frappe.

En définitive cette confrontation n'a pas entraîné la modification de la chaîne opératoire de fabrication de la monnaie au marteau, qui était à l'époque en vigueur dans les ateliers officiels français. En revanche, plusieurs procès-verbaux rendant compte des détails de l'exercice ont été rédigés à son occasion. Lors de l'épreuve imposée à la Cour des monnaies par le Roi et son Conseil, différents représentants de l'Etat et de l'administration monétaire se trouvaient présents. Deux d'entre eux ont ensuite produits leurs comptes rendus décrivant avec beaucoup de précision les étapes mises en œuvre par N. Briot d'une part et les monnayeurs d'autre part. Ils offrent deux points de vue contradictoires de procédés mis en œuvre. Les récits portant sur le travail des monnayeurs sont particulièrement intéressants pour cette étude car ils se rapportent à des fabrications de monnaies au marteau. Le plus complet est celui de H. Poullain[43]. En tant que Conseiller de la Cour des monnaies, il était le plus familier des questions de monnayage. Dans un texte, rédigé entre le 23 janvier et le 20 février 1617, intitulé *Relation de maistre Henry Poullain, cy-devant conseiller en la Cour des monnaies de l'épreuve de fabrication des espèces sur certains nouveaux instruments proposez par Nicolas Briot, tailleur général des monnoyes de France, faite ès présences de messieurs de Boissise et de Marillac, conseillers d'Estat*, sont présentées chronologiquement les opérations du monnayage au marteau, de la fonte des alliages jusqu'à la frappe des monnaies. H. Poullain met également en exergue les différences entre les opérations réellement réalisées par les ouvriers et celles qui leur sont légalement imposées. Une telle distinction n'est pas soulignée dans le procès-verbal de J. de Thumery, sieur de Boissise, Conseiller du Roi en ses Conseils d'Etat, qui s'est borné à ne décrire que les mises en forme qu'il a pu effectivement constater[44]. En tant qu'observateur plus étranger *a priori* que H. Poullain des questions de fabrications monétaires, il faut tout de même reconnaître la qualité de sa présentation.

De tels documents sont très précieux dans définition d'un inventaire des différentes techniques nécessaires au monnayage au marteau. D'autant qu'ils révèlent des informations parallèles qui pourront nourrir la discussion, notamment à propos des conditions de travail et de la qualité de ce dernier.

La troisième des sources principales de cette étude est *a priori* la plus complète puisqu'il s'agit d'un traité monétaire. En revanche, publiée pour la première fois en 1692, c'est la plus tardive. Il s'agit du *Traité des monoyes, de*

Poullain H., Relation de Me Henry Poullain..., *op. cit.*, p. 335.

[43] *Ibidem*, p. 319-335.

[44] De Thumery J., Epreuves contradictoires faites entre Nicolas Briot et les ouvriers de la Monnaie de Paris, dans Mazerolle F., ed., *Les médailleurs français du XV^e^ siècle au milieu du XVII^e^*, 3 tomes, Paris, Imprimerie nationale, 1902, t. 1, p. 335-345.

leurs circonstances et dépendances de J. Boizard qu'il a commencé à rédiger à partir de 1664 alors qu'il était Conseiller de la Cour des monnaies[45]. Dans cet ouvrage, la volonté de l'auteur est de rassembler toutes les informations nécessaires à son office[46]. Ce texte qui n'était pas à l'origine destiné à être édité, l'a finalement été après que J. Boizard ait constaté qu'il suscitait un certain intérêt. Il l'a du reste, complété pour l'occasion. La qualité des descriptions apparaît en outre, à plusieurs niveaux, tant d'un point de vue de la fabrication, qu'à propos de l'administration d'un atelier monétaire. En définitive, ce recueil est reconnu comme étant le premier écrit publié en langue française traitant de la monnaie selon un éclairage technique.

Cependant, il faut reconnaître qu'à l'époque où J. Boizard devient Conseiller à la Cour des monnaies et qu'il commence à rédiger ses observations sur la fabrication monétaire, le monnayage au marteau a déjà été remplacé. Dans son traité, J. Boizard accorde un chapitre complet à la description de l'utilisation de l'appareillage moderne[47]. Lorsqu'il commence son office en 1664, l'introduction progressive des nouvelles techniques ne se fait que depuis une vingtaine d'années. Il faut admettre que le monnayage au marteau doit encore être connu dans les ateliers monétaires. Le Conseiller à la Cour des monnaies consacre du reste dans son traité, un chapitre à la présentation de « *l'ancienne manière* »[48]. Toutefois, dans son propos, il énumère seulement les étapes principales de la chaîne opératoire. Pour pallier au manque de détails, il renvoie d'ailleurs à la relation de H. Poullain précédemment évoquée et à laquelle il a certainement emprunté une partie de ses informations[49].

Sur les questions de mise en forme au marteau proprement dite, *Le traité des monoyes…*n'apporte pas plus de renseignements que les textes préalablement présentés. Toutefois, il faut rappeler que ce monnayage ne doit pas être résumé aux seules opérations qui ont été remplacées à la suite de l'édit de 1645 par l'introduction du nouvel appareillage. En effet, J. Boizard souligne qu'il subsiste dans la chaîne opératoire en pratique à son époque, certaines techniques que l'on retrouve dans l'ancien monnayage[50]. Sur ces questions, le recueil du Conseiller à la Cour des monnaies constitue un lien entre les différentes technologies. D'autant

[45] Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, XV et 243 p.
[46] *Ibidem*, p. IV.
[47] *Ibid.*, p. 67-76.
[48] *Ibid.*, p. 81-83.
[49] « Ceux qui voudront avoir une plus ample instruction de tous les outils et ustensiles dont on se servoit pour fabriquer les espèces au marteau pourront avoir recours au procez-verbal de M. Poullain… ».
Ibid., p. 83.
[50] *Ibid.*, p. 81.

que sur ces points, le texte en question apparaît beaucoup plus exhaustif que les autres sources préalablement présentées.

De ces trois documents fondamentaux ont jusqu'à présent été extraites les principales descriptions du monnayage au marteau dont rend compte la littérature numismatique[51]. Elles ont par ailleurs, l'avantage, pour les plus complètes, d'avoir été rédigées par des hommes familiers des questions monétaires que sont H. Poullain et J. Boizard, tous deux Conseillers à la Cour des monnaies à des époques différentes. Il faut cependant reconnaître l'existence d'autres sources d'informations qualifiées à juste titre, de lacunaires dans l'ouvrage de *Numismatique médiévale*[52]. Il s'agit de documents iconographiques sur lesquels sont parfois représentées des scènes de monnayage, mais également des textes propres à l'administration monétaire qui rassemblent les textes législatifs, règlements, comptes d'ateliers, voire même certains manuscrits conservés aux archives de la Monnaie de Paris.

La documentation iconographique en général, et celle associée à la fabrication monétaire médiévale n'y fait *a priori* pas exception, doit être considérée avec précaution[53]. En effet, la finalité d'une représentation n'est pas la même que celle d'un traité technique dans lequel son auteur aura recherché la précision. L'artiste peut avoir modifié quelque peu la réalité d'une opération. Une telle concession est d'ailleurs parfois nécessaire à la seule fin de pouvoir représenter un geste car en général une seule image doit traduire une succession de plusieurs étapes. De même, il peut présenter une succession d'opérations dans un même lieu alors qu'elles sont en réalité mises en œuvre dans des espaces différents.

En définitive, l'iconographie doit être utilisée au même titre que les sources écrites. Elle sera examinée avec la volonté de mettre en évidence les illustrations d'opérations, d'outils voire même de conditions de travail préalablement décrites dans des textes.

Dans cette étude, il était tout aussi nécessaire de recourir à d'autres types de sources qui n'ont pas encore été exploitées, ou très rarement, d'un point de vue

[51] Le Noir M., *L'art du monnayage*, *op. cit.*, p. 21-22.
Lafaurie J., Relation de Me Henry Poullain..., *op. cit.*, p. 310-311.
Blanchet J.-A. *et al.*, *Manuel de numismatique française*, *op. cit.*, t. 2, p. 21-24.
Dhenin M., Le vocabulaire du monnayage..., *op. cit.*, p. 275-276.
Bompaire M. *et al.*, *Numismatique médiévale..., op. cit.*, t. 7, p. 473-506.
[52] *Ibidem*, p. 453.
[53] *Ibid.*, p. 475-481.

technique[54]. Elles rassemblent plusieurs types de documents produits dans le cadre de l'administration du monnayage. Il s'agit de documents d'archive encore relativement confidentiels car ils n'ont pas encore fait l'objet d'une édition. D'autre part, leur but initial n'étant pas de rendre compte d'opérations techniques, certaines informations se retrouvent parfois au milieu d'autres données parallèles qui ont peu d'intérêt dans cette étude.

A ces sources, il convient d'ajouter les ordonnances monétaires. Il s'agit de documents législatifs définissant certaines consignes que devaient respecter les ouvriers monétaires. Certains, plus complets, imposent même des règlements aux différentes catégories de personnels employés des ateliers. Un extrait de ce type de contrat est présenté dans l'ouvrage *Numismatique médiévale*[55]. Bien qu'il rassemble pour une grande part des prescriptions administratives, il rend compte en parallèle de certaines instructions techniques.

Par ailleurs, il existe dans les archives monétaires certains manuscrits rédigés par des monétaires à destination d'autres travailleurs de la profession. Ces textes sont particulièrement intéressants car ils s'adressent à un public qualifié, mais surtout parce qu'ils décrivent des opérations techniques. A ce jour, ces documents n'ont pas été édités. Toutefois, certains ont fait l'objet de retranscriptions[56].

Un texte conservé aux archives de la Monnaie de Paris et intitulé « *Mémoire sur la fabrication des sols de billon, ordonnée par édit du mois d'octobre 1738* », est particulièrement intéressant sur ces questions[57]. Bien qu'il ait été rédigé dans un XVIII^{e} siècle déjà avancé et que les méthodes de fabrications qui y sont présentées ne fassent pour une grande partie, plus référence au monnayage au marteau, il sera démontré que certains procédés décrits sont néanmoins directement hérités de « *l'ancienne manière* ». Ce recueil rassemble notamment des éléments inédits particulièrement précis concernant le procédé de blanchiment des espèces.

La production des ateliers monétaires étant l'une des conséquences directes des diverses opérations de mises en forme, l'étude de comptes d'ateliers peut également documenter le travail des ouvriers, en particulier sur les rythmes de fabrication. Dans ces recueils, ont parfois été systématiquement consignées, les

[54] *Ibid.*, p. 468.
[55] *Ibid.*, p. 454-469.
[56] Je remercie les numismates et historiens M. Bompaire et A. Clairand de m'avoir confié plusieurs de leurs comptes rendus d'archives qui mettent en évidence de tels recueils.
[57] Anonyme, *Mémoire sur la fabrication des sols de billon, ordonnée par édit du mois d'octobre 1738*, Monnaie de Paris, ms. f° 58, 1738, retranscription Clairand A., communication personnelle, n. p.

quantités de matières transformées durant les différentes étapes de fabrication. Les informations extraites de deux de ces comptes retranscrits par l'historien numismate M. Bompaire, ont notamment permis de discuter de la question des quantités de déchets produites au cours du monnayage[58].

Enfin, en tant que fabrication mettant en œuvre une succession d'opérations métallurgiques, il est envisageable de trouver des informations intéressantes pour cette étude dans les traités plus généraux de métallurgie. Après avoir constaté que les ouvriers monétaires sont beaucoup plus encadrés dans leur travail qu'un artisan métallurgiste, il faut reconnaître que dans certains cas, c'est le matériau qui impose la manière selon laquelle il doit être mis en forme.

En définitive, la proposition d'une chaîne opératoire théorique du monnayage au marteau en vigueur au sein des ateliers monétaires royaux au Moyen Age doit se faire par le croisement des informations extraites de différents types de sources. Evoquant la monnaie qui par définition n'a pas vocation à être produite par le commun, il n'est pas surprenant que les documents considérés ici soient dans une certaine mesure, assez inédits. Ils n'étaient pas particulièrement destinés à être publiés. La contrepartie avantageuse de cette particularité, est qu'une grande part des textes considérés, a été rédigée par des hommes familiers du monnayage.

II. La chaîne opératoire selon les sources

Tout comme il existe dans la plupart des ouvrages numismatiques un espace réservé à la description des opérations de fabrication de la monnaie, une partie du discours traite en parallèle du fonctionnement des ateliers monétaires médiévaux[59]. De même, dans son *Traité des monoyes...* J. Boizard présente la gestion de la production monétaire ainsi que les nombreux contrôles dont elle fait l'objet[60].

Le propos de cette étude n'est pas de discuter de l'administration des fabriques monétaires que comptait la France au Moyen Age. Cependant, il faut reconnaître que les règlements stricts auxquels elles devaient se conformer pouvaient avoir des conséquences sur l'organisation du travail et donc sur les processus techniques au

[58] M. Bompaire m'a confié certaines de ses retranscriptions dont il n'a publié à ce jour que des extraits.
Bompaire M., Les cadences de production..., *op. cit.*, p. 579-613.
Bompaire M. *et al.*, *Numismatique médiévale..., op. cit.*, t. 7, p. 489-492.
[59] Blanchet J.-A. *et al.*, *Manuel de numismatique française*, *op. cit.*, t. 2, p. 7-19.
Bompaire M. *et al.*, *Numismatique médiévale..., op. cit.*, t. 7, p. 454-473.
[60] Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 19-28, 35-39, 55-66, 77-80, 151-160, 173-188 et 191-233.

sein de ces entreprises particulières. En préambule d'une description détaillée des opérations de mise en forme, il apparaît nécessaire de présenter la fabrication monétaire du point de vue des hommes qu'elle emploie. Les différents contrôles auxquels ces derniers sont soumis se doivent d'être évoqués.

Représentant de forts enjeux, l'industrie monétaire a toujours fait l'objet d'un encadrement important de la part des instances politiques. Les vérifications qui sont mises en place, se présentent sous deux aspects. Le premier doit garantir la production d'objets en série, aussi identiques et standardisés que possible, autant dans leurs formes et leur masses que dans leurs titres[61]. Ceci dans un souci de garantir une monnaie forte et respectée, inspirant confiance aux usagers. L'autre aspect de ces contrôles vise à éviter les fraudes de la part des fabricants : vol de métaux précieux, fabrication de monnaies supplémentaires. Quelles sont les règles imposées dans la gestion des Hôtels de la Monnaie au Moyen Age ? De même, quels sont les moyens mis en œuvre pour vérifier leur application ?

Au Moyen Age, un atelier monétaire est une entreprise à la tête de laquelle se trouve un maître particulier (Figure 2)[62]. Il tire un bénéfice de la fabrication qu'il met en place au sein de sa fabrique à partir du droit de brassage qui lui est accordé par le Roi. C'est une somme prélevée sur les espèces fabriquées à proportion de leur quantité. Il ne s'agit pas pour le maître d'un revenu net puisqu'il permet en partie de payer les frais de fonctionnement de son entreprise qui sont à sa charge. Ils comprennent pour une part majoritaire, l'achat des matières premières et du matériel nécessaire à la production, mais également les salaires de ses ouvriers ainsi que le droit de seigneuriage que le directeur de l'atelier doit acquitter à l'autorité de laquelle il obtient le droit de monnayage[63]. Chaque maître particulier est lié par un contrat à l'Etat qui lui donne le droit de battre monnaie. Il s'agit du bail monétaire qui régit généralement les espèces à produire, en noms et en nombres, l'échéance de la commande, le salaire des ouvriers et finalement la part des profits qui doit être reversée à l'autorité émettrice.

Au sein de son atelier, le maître particulier a face à lui des ouvriers et monnayeurs, responsables de la mise en forme et de la frappe des monnaies (Figure 2). D'un autre côté, il faut aussi compter parmi le personnel de la fabrique, les responsables des contrôles. Il s'agit des gardes, contre-gardes et essayeurs. Ce

[61] Bompaire M. *et al.*, *Numismatique médiévale..., op. cit.*, t. 7, p. 485.
[62] Blanchet J.-A. *et al.*, *Manuel de numismatique française*, *op. cit.*, t. 2, p. 12.
Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 61.
Bompaire M. *et al.*, *Numismatique médiévale..., op. cit.*, t. 7, p. 466.
[63] *Ibidem*, p. 484.

sont notamment des ordonnances royales qui fixent les fonctions de chacun des différents employés[64].

Figure 2 - Représentation d'un atelier monétaire[65].

Les gardes et contre-gardes sont les représentants du roi au sein de l'atelier[66]. Ils sont chargés de contrôler et de garantir la qualité de la fabrication monétaire. Ils doivent pour cela vérifier chacune des opérations de fabrication. Ils tiennent des registres des quantités produites et veillent que les monnaies soient en conformité avec les règlements qui définissent leurs caractéristiques légales avant leur libération. Enfin, ils sont responsables de la détention et de la vérification des coins utilisés pour la frappe des monnaies.

Ils sont aidés dans leurs tâches par l'essayeur dont le rôle est d'analyser les compositions des matières premières achetées par le maître particulier, ainsi que

[64] Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 177-183.
[65] Atelier XVI^{e} siècle - Herzog Anton Ulrich-Museum - Braunschweig.
[66] *Ibidem*, p. 177-179.
Bompaire M. *et al.*, *Numismatique médiévale..., op. cit.*, t. 7, p. 466-467.

les titres des alliages des monnaies produites dans l'atelier. Il dispose pour cela de plusieurs méthodes différentes suivant les types d'alliages caractérisés.

La détermination des titres en métal précieux pour les monnaies d'argent ou de billon fait appel à un procédé à la fois relativement simple et précis à la fois, appelé coupellation[67]. Cette technique permet d'extraire d'un alliage analysé, tous les métaux qui ne sont pas de l'argent. Ayant pesé au préalable la quantité passant au feu et en effectuant une pesée après coupellation, il est possible d'en déterminer son titre en argent.

Le titre des monnaies d'or est dans la plupart des cas déterminé grâce à l'utilisation d'une pierre de touche[68]. Il est déduit par comparaison de la couleur d'une marque laissée par la monnaie d'or sur la pierre, avec celles laissées par des échantillons d'alliages de titres connus. Cette technique a l'avantage d'être très simple mais sa précision est discutée[69].

Les ouvriers et monnayeurs font dans ce contexte, l'objet de contrôles tout au long de leur travail. Outre la qualité de leur ouvrage qui est évaluée, les matériaux qui leurs sont confiés sont régulièrement pesés. A chaque fin de journée, ils doivent rendre leur brève aux gardes qui évaluent leurs productions en parallèle des masses de déchets engendrées[70]. Ces dernières sont rigoureusement vérifiées car elles doivent également respecter certains quotas réglementaires. Cette obligation de limiter une consommation trop importante de matière première sera discutée par la suite car elle intervient pour une part non négligeable dans les choix techniques mis en place dans la chaîne opératoire du monnayage[71].

Au sein de l'atelier, les gardes veillent à ce que les monnaies produites soient conformes en masse et titre[72] aux valeurs fixées par les ordonnances monétaires. Afin d'éviter un contrôle trop fastidieux et long qui consisterait à peser les monnaies une à une, il existe certaines consignes d'échantillonnage qui doivent permettre d'optimiser les évaluations. Ces dernières sont différentes selon les types monétaires considérés.

Elles consistent dans un premier temps en une pesée par lot afin d'évaluer la masse moyenne des monnaies ainsi regroupées. Dans un second temps, un

[67] Téreygeol F. *et al.*, La coupellation des alliages cuivre-argent : approche expérimentale de l'essai d'argent par voie sèche, *Revue d'Archéométrie*, vol. 27, 2003, p. 171-181.
[68] Une telle pierre a été mise au jour lors des fouilles de l'atelier monétaire de La Rochelle.
[69] Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 90.
[70] Déchets de fonte, fragments résultant des différentes découpes, ébauches ne pouvant pas être frappées.
[71] cf. Le poids des ordonnances monétaires sur le travail des monnayeurs, p. 427.
[72] C'est-à-dire la quantité de métal précieux contenu dans les monnaies.

prélèvement aléatoire est effectué à proportion des monnaies fabriquées et dans un rapport dépendant de leur type. La règle générale de ces vérifications veut que la précision des mesures suive la valeur libératoire des monnaies. En d'autres termes, plus les pièces frappées sont fortes plus elles sont contrôlées. Dans ce cadre, cette dernière impose que la pesée globale se fasse par lots de masses plus faibles et que l'échantillonnage soit multiplié. Ces opérations sont effectuées au sein de l'atelier par l'essayeur et les gardes, et consignées dans les registres de ces derniers. Ces examens se voient doublés par la conservation de certains prélèvements. Un échantillonnage de chaque production est en effet mis en boîtes scellées. Ces dernières sont par la suite régulièrement envoyées à la Cour des monnaies à Paris qui peut réaliser des vérifications supplémentaires. Il s'agit cependant de contrôles *a posteriori*, car, à l'inverse de ceux effectués par les gardes qui interviennent avant la libération des monnaies, la vérification des boîtes est effectuée après la mise en circulation des espèces échantillonnées. Elles permettent notamment de répondre aux plaintes concernant la qualité des pièces délivrées par un atelier.

Ces contrôles qui paraissent très stricts doivent tout de même être pondérés par certains écarts permis par l'autorité émettrice quant à la justesse des caractéristiques des monnaies fabriquées. L'Etat accorde en effet le droit au maître particulier et par conséquent aux ouvriers de ce dernier, une tolérance portant sur la masse et le titre en métal précieux des monnaies fabriquées. La difficulté d'une fabrication de séries devant obéir à des contraintes trop précises sur leurs masses ainsi que leurs compositions est ainsi reconnue. Des *remèdes* de loi[73] et de poids sont accordés aux ouvriers. Il s'agit d'intervalles de variations auxquels doivent appartenir les espèces qu'ils produisent[74]. De trop fortes contraintes sur les caractéristiques des monnaies augmentent d'autant le coup de leur fabrication en obligeant la refonte des espèces qui ne répondent pas strictement aux critères fixés. La reconnaissance d'écarts possibles permet de diminuer ce coût. Cependant, il était également nécessaire que l'autorité émettrice fixe des intervalles raisonnables afin que les maîtres d'ateliers n'en disposent pas pour augmenter leurs profits en économisant sur les matières premières.

Lorsqu'un écart est constaté, et qu'il est compris dans le remède, le maître de l'atelier a la possibilité de refondre ses espèces ou d'accepter de payer la différence. En revanche, si l'écart dépasse le remède, il doit payer la différence en plus d'une amende dont la valeur est fonction de l'importance de la faute[75].

[73] Sur le titre en métal de l'alliage qu'ils mettent en forme.
[74] Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 20-25.
[75] *Ibidem*, p. 21, 24.

Enfin, plusieurs symboles étaient apposés sur les monnaies pour permettre une « traçabilité » en cas de plainte après émission. Il faut distinguer les *différents*, signatures du graveur de coins et du maître de l'atelier, et le *point secret* qui sera ensuite remplacé en 1549 par une lettre représentant la ville dans laquelle se trouve l'atelier qui a frappé la monnaie considérée[76]. En cas d'écarts constatés sur une monnaie après sa mise en circulation, il était possible aux autorités de connaître l'origine de la fraude supposée à partir de la caractérisation de ces témoins systématiquement apposés sur les monnaies et de la vérification *a posteriori*, rendue possible grâce au système des boîtes dont il a été question plus haut[77].

Il apparaît que les contrôles effectués au sein des ateliers monétaires sont stricts et très nombreux. L'autorité émettrice veille par ailleurs à les mettre en place par l'intermédiaire de ses émissaires au sein de chaque atelier : les gardes, contre-gardes et essayeurs. Tout est reporté dans de nombreux registres. D'autre part, si une fraude est constatée après l'émission d'une monnaie, l'échantillonnage des boîtes conservées à l'Hôtel des monnaies de Paris et le système des *différents*, permettent d'effectuer des contrôles *a posteriori*. Il revenait aux maîtres particuliers d'administrer leurs ateliers afin d'éviter de perdre leurs bénéfices dans l'acquittement d'amendes justifiées par des productions de mauvaises qualités.

Le fonctionnement général des ateliers monétaires français définit un cadre administratif dans lequel peuvent maintenant être abordées les questions de fabrication. Et c'est notamment à partir des différentes sources présentées qu'il est possible de définir une chaîne opératoire réglementaire de production des monnaies par la technologie du marteau.

[76] A titre d'exemple, pour La Rochelle, c'est la lettre H qui était apposée.
Ibid., p. 52.
[77] Blanchet J.-A. *et al.*, *Manuel de numismatique française*, *op. cit.*, t. 2, p. 57-65.
Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 53-54.
Bompaire M. *et al.*, *Numismatique médiévale..., op. cit.*, t. 7, p. 73-79.

A. Les matières premières du monnayage médiéval français

Au Moyen Age, les métaux utilisés pour frapper de la monnaie, sont au nombre de trois : l'or, l'argent et le cuivre[78]. A partir de ces trois seuls métaux, sont réalisés les alliages monétaires dont les titres en métaux précieux sont fonction de la valeur des espèces.

L'or est toujours allié aux deux autres métaux que sont l'argent ou le cuivre. Cependant, il n'est pas à un titre plus élevé s'il est allié au métal blanc ou à une masse équivalente de cuivre, pourtant moins précieux. C'est pourquoi, il est généralement mélangé au métal le moins coûteux[79].

Dans le monnayage d'argent, le métal blanc est quant à lui, toujours allié à du cuivre. Si la quantité de ce dernier vient à dépasser les 50 % en masse, l'alliage obtenu est appelé *billon*[80]. Il sera par la suite qualifié de bas billon ou de billon noir si la proportion de métal rouge approche en masse les 90 à 95 %. Par analogie, les espèces frappées dans ce mélange sont qualifiées de monnaies noires.

A partir de 1575, sous le règne d'Henri III, alors qu'elle avait cessé au VI^e^ siècle, la frappe de monnaies de cuivre est de nouveau autorisée pour les monnaies de moindre valeur[81]. A la différence de ce qui est imposé pour l'or et l'argent, considérés comme métaux précieux, le cuivre doit être monnayé sans qu'il ne soit allié à aucun autre métal. Et s'il n'est évidemment pas question de titre pour ce métal qui n'est pas considéré comme précieux, la nécessité qu'il soit monnayé pur est souvent soulignée par des termes complémentaires. Il doit être « *pur* » ou « *fin* »[82].

---

[78] Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 15-18.
Bompaire M. *et al.*, *Numismatique médiévale..., op. cit.*, t. 7, p. 83.
[79] Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 15.
[80] *Ibidem*, p. 17.
[81] Hoffmann H., *Les monnaies royales de France depuis Hugues Capet jusqu'à Louis XVI*, Paris, Hoffmann H., 1878, p. 133.
Duplessy J., *Les monnaies françaises royales de Hugues Capet à Louis XVI (François 1er - Louis XVI)*, 2 tomes, Paris, Maastricht, Platt A.G. Van der Dussen, t. 2, 1989, p. 120.
Bompaire M. *et al.*, *Numismatique médiévale..., op. cit.*, t. 7, p. 83.
[82] *Arrest de la Cour des monoyes qui ordonne une fabrication de doubles et deniers de cuivre fin en la Monoye de Paris* Monnaie de Paris : ms. 4° 147, 8 février 1593, n. p.
Arrest de la Cour des monoyes qui permet à Alexandre Olivier de faire fabriquer des doubles et deniers de cuivre pur, Monnaie de Paris : ms. 4° 42, f° 261r°-262r°, 8 janvier 1603, n. p.
Arrest du Conseil d'Etat du roy qui ordonne qu'il sera fabriqué en la Monnoye du moulin à Paris pour trente mil livres de doubles et deniers de cuivre fin, Monnaie de Paris : ms. 4° 44, f° 221r°-222v°, 10 novembre 1607, n. p.
Arrest de la Cour des monoyes qui ordonne que la fabrication des doubles et deniers de cuivre pur sera continuée en la Monoye du moulin étably à Villeneuve Saint-André-lez-Avignon jusqu'à concurrence de 20.000 livres, Monnaie de Paris : ms. 4° 49, f° 55r°-57v°, 6 juillet 1620, n. p.

Dans son *Traité des monoyes…* J. Boizard justifie l'alliage systématique de l'or et de l'argent par plusieurs arguments qui tiennent de volontés politiques mais également de l'amélioration de leurs propriétés mécaniques[83]. La monnaie, par sa composition, représente une source de métaux précieux très facilement exploitable pour les pays étrangers. Si ces derniers se trouvent sans mines exploitables ou que leurs espèces sont frappées dans des alliages de titres inférieurs à ceux qu'utilisent leurs voisins, ils peuvent être encouragés à considérer les monnayages étrangers comme les matières premières de leurs propres fabrications monétaires.

C'est par ailleurs selon la même volonté d'éviter la refonte des monnaies à d'autres fins que les échanges monétaires, que sont justifiés les droits de brassages et de seigneuriages. Ces sommes retenues sur le monnayage ne correspondent pas au seul achat des métaux dans lesquels sont frappées les pièces. La valeur de ces dernières est supérieure à celle des matières, et notamment des métaux précieux, qui les composent. La refonte devient ainsi défavorable dans la plupart des cas[84].

Au Moyen Age en France, seuls les trois métaux qui viennent d'être présentés, peuvent être portés à l'atelier monétaire pour être monnayés. Il faut admettre cependant, que les procédés de l'époque peuvent ne pas être parfaits d'un point de vue de la pureté du métal[85]. Un métal intrus peut ne pas avoir été complètement éliminé lors de la purification des métaux utilisés dans la fabrication monétaire. A titre d'exemple, il est envisageable de trouver du plomb, lié à l'argent, étant donné qu'une grande partie du métal précieux utilisé est extraite du plomb provenant du traitement de la galène[86] argentifère. Cependant, il ne s'agit là que de faibles quantités qui doivent être considérées comme des impuretés.

Une autre source possible de métal utilisé dans le monnayage est le recyclage d'objets. Lorsque le métal précieux vient à manquer, l'argenterie qui était une forme usuelle de thésaurisation, est réquisitionnée pour battre monnaie[87]. Par

---

Lettres patentes qui ordonnent la fabrication de 10.000 livres en doubles et deniers de cuivre pur en la Monnoye de Villeneuve-lès-Avignon, Monnaie de Paris : ms. 4° 54, f° 121r°, 31 janvier 1633, n. p.

[83] Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 19.

[84] Il existe des livres de changeurs dans lesquels sont décrits les cas où il était au contraire favorable de refondre les monnaies.
Bompaire M., Un livre de changeur languedocien du milieu du XIV^{e} s., *Revue Numismatique*, vol. 6, n° 29, 1987, p. 118-183.

[85] Telle qu'elle s'entend aujourd'hui.

[86] Sulfure de plomb.

[87] Blanchet J.-A. *et al.*, *Manuel de numismatique française*, *op. cit.*, t. 2, p. 32.
Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 45-50.
Bompaire M. *et al.*, *Numismatique médiévale..., op. cit.*, t. 7, p. 422.

analogie, il est concevable que des alliages à base de cuivre comme le laiton[88] ou le bronze[89] aient également été employés pour la fabrication de la monnaie, notamment parce que légalement, il n'y est jamais fait référence. Or, s'il faut admettre les compétences du métallurgiste à reconnaître le type d'alliage qu'il est en train de travailler[90], les procédures qui visent à contrôler la composition de ce dernier, n'ont pour seul but que de déterminer la quantité de métal précieux qu'il contient. En d'autres termes, si un alliage correspond au titre de la monnaie fabriquée. Les autres métaux qui le composent n'intéressent pas l'autorité émettrice. *A contrario*, une telle information concerne l'ouvrier qui est chargé de la mise en forme d'un alliage, en particulier à cause de l'influence de sa composition sur les techniques nécessaires à sa mise en forme.

Les matières premières apportées dans un atelier royal pour être monnayées doivent parfois subir des opérations d'affinage. En règle générale, les maîtres particuliers préfèrent utiliser dans leur entreprise des alliages présentant un titre supérieur ou égal à celui qu'ils doivent respecter dans leur fabrication. A cette fin, ils achètent plus cher de tels mélanges. S'ils n'ont pas le choix de recourir à de telles qualités, ils peuvent mettre en œuvre des procédés d'affinage pour extraire la part de métal précieux d'un alliage dont le titre est trop faible pour être monnayé. Cependant, ces opérations ont un coût important. D'abord parce qu'elles demandent une consommation de charbon supplémentaire mais aussi parce qu'elles entraînent une perte de métal, non négligeable. D'autre part, ces traitements nécessitent les savoir-faire de spécialistes. C'est notamment pour ces raisons que J.-A. Blanchet et M. Bompaire supposent que l'affinage était en définitive assez rare dans la frappe de monnaies d'argent au Moyen Age[91].

Il faut cependant reconnaître que ces opérations font en quelque sorte partie du monnayage. Par ailleurs, elles n'ont pas été modifiées par l'introduction des nouvelles techniques de fabrication que sont le laminoir, le coupoir ainsi que le balancier. Sur les questions de leurs mises en œuvre, il existe de nombreux procédés décrits avec beaucoup de précision dans le *Traité de monoyes…* de J. Boizard[92]. D'autre part, dans un manuscrit du XVIII^{e} siècle conservé aux

[88] Alliage à base de cuivre et de zinc.
[89] Alliage à base de cuivre et d'étain.
[90] Il dispose pour cela de très nombreux indices que sont par exemple : la température de fonte, l'observation des fumées produites lors de cette dernière, le comportement à la mise en forme, la couleur de l'alliage…
[91] Blanchet J.-A. *et al.*, *Manuel de numismatique française*, *op. cit.*, t. 2, p. 34.
Bompaire M., *L'atelier monétaire royal de Montpellier et la circulation monétaire en bas Languedoc jusqu'au milieu du XV^{e} siècle*, Thèse de l'Ecole des Chartes, Paris, 1980, p. 46.
[92] Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 93-102.

Cabinet des médailles de la Bibliothèque nationale de France, se trouve également la présentation des diverses opérations mises en œuvre par un affineur de la Monnaie de Strasbourg.

Dans cette étude, il était difficile de considérer ces nombreuses techniques parallèlement à la mise en évidence de la chaîne opératoire du monnayage au marteau.

Après avoir présenté les trois métaux qui pouvaient être monnayés dans les ateliers médiévaux du royaume de France, il faut ici noter l'une des limitations de cette étude. Il est rapidement apparu lors des premières observations des différents objets réunis pour répondre aux différentes problématiques de fabrication monétaire, qu'aucun d'entre eux ne permettait la mise en évidence d'indices témoignant d'un travail de l'or.

En étant conscient, d'après les données bibliographiques, de l'existence de particularités propres à ce monnayage, mais aussi de l'impossibilité d'en rendre compte archéologiquement, il a été décidé de limiter cette étude aux seules mises en forme de monnaies à base d'argent et de cuivre. Dans la suite de la présentation de la chaîne opératoire décrite par les textes, seules seront développées les techniques associées à la fabrication de monnaies à partir de ces deux derniers métaux.

B. Les opérations de fonderie

Les opérations de fonderie peuvent être assimilées aux premières étapes de la chaîne opératoire du monnayage au marteau. Elles ont comme finalité de préparer les matières premières, c'est-à-dire les alliages monétaires, selon des formes initiales facilitant leur travail ultérieur. Après avoir préparé les alliages conformément aux compositions en métaux précieux prescrites par les ordonnances monétaires, ces derniers sont moulés en forme de lingots parallélépipédiques assez fins, appelés *lames*. Dans le cadre monétaire, les procédés de fonderie ne mettent pas en évidence de grandes différences avec le travail au sein d'un atelier métallurgique ordinaire, si ce n'est dans les volumes d'alliages travaillés. C'est pourquoi ne sont pas exposées dans cette partie les seules informations extraites de la littérature monétaire.

Les opérations présentées ici, n'apparaissent par ailleurs pas modifiées par les changements techniques de 1645 qui ont vu l'introduction des laminoir, coupoir et balancier. Ces trois instruments employés dans les mises en forme mécaniques ont

également demandé la production préliminaire des lames d'alliage[93]. Ils permettent de relever des informations sur les procédés de fonderie monétaire dans des textes postérieurs à la transition. Il faut néanmoins rester critique à leur égard puisque, facilitant les mises en forme, le nouvel appareillage a pu entraîner une augmentation du rythme de fabrication. Celle-ci aura impliqué un changement d'échelle des opérations de fonte, visant à la compenser.

Le coût élevé des matières premières utilisées dans le monnayage, permet de justifier une grande part des consignes disponibles dans la littérature monétaire sur les questions de fonderie. Les volumes travaillés obligent à prendre certaines précautions afin d'éviter de trop grandes pertes métalliques lors de ces étapes liminaires. Ces dernières sont propres à cette métallurgie, le travail d'alliages moins nobles ne justifiant pas la mise en place systématique de telles dispositions.

C'est dans cette volonté d'économie propre au travail des métaux précieux que se comprend la première précaution imposée aux fondeurs monétaires. Ils doivent séparer physiquement la préparation des alliages à base d'or de ceux contenant de l'argent. En pratique, la fonte de chacun de ces métaux doit être réalisée dans des fourneaux différents voire même quand cela est possible, dans des pièces différentes[94]. Une telle disposition qui prend place dès le début de la chaîne opératoire, ne voit sa justification que dans les étapes finales, voire annexes, de la fabrication. Elle concerne en effet les procédés de retraitement des déchets produits au sein de l'atelier. Ils visent à en extraire les métaux précieux afin qu'ils ne soient pas perdus. Ils seront décrits par la suite. Il est toutefois important de signaler, que le procédé qui permet de récupérer l'argent qui aurait été accidentellement allié à de l'or, n'est pas connu au Moyen Age, légitimant la mise en place de précautions dès les premières étapes de la fabrication monétaire.

La fonte des métaux est une opération métallurgique basique, c'est pourquoi il est difficile de définir un type de four qui doit être théoriquement utilisé dans le monnayage médiéval. Compte tenu de la multitude des combinaisons possibles, il faut reconnaître que sur ce point, les monétaires devaient être assez libres. La littérature permet toutefois de présenter des technologies qui ont été utilisées dans

[93] *Ibidem*, p. 82.
[94] De Bettange M., *Traité des monoyes contenant des instructions pour la partie des monoyes, un recueil des espèces d'or et d'argent fabriquées depuis Pharamond jusqu'à présent*, 2 tomes, Avignon, Jouve J. et Challiol J., t. 1, 1760, p. 117.
Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 107.
Bompaire M., Lieux de monnaie..., *op. cit.*, p. 96.

des fabriques. Il s'agit de deux types de fourneaux. Ils se distinguent par leur mode de ventilation : dans une certaine mesure artificielle dans les fours à soufflets, alors qu'elle est naturelle dans les fours à vent[95].

Les éléments constitutifs associés présentent les mêmes caractéristiques. Ces fours comptent une première chambre qui dispose de plusieurs ouvertures afin que l'air puisse pénétrer ou par lesquelles sont introduites les extrémités des soufflets. Au-dessus, se trouve un second espace où sont placés le charbon ainsi que les creusets dans lesquels sont fondus les métaux. Cette chambre est séparée de la précédente par une grille[96]. Elle doit permettre le passage des flux d'air venant de la partie inférieure ainsi que le soutirage des cendres et des charbons de trop petit calibre. Dans la suite de l'étude, chacun des deux espaces qui viennent d'être présentés, seront qualifiés de foyer, pour la chambre qui contient les charbons en combustion autour des creusets, alors que celle qui se trouve en dessous est qualifiée de cendrier dans la mesure où elle collecte les résidus de cette combustion.

Lorsque les fontes nécessitent des températures particulièrement hautes[97], il est également possible de placer une chape sur les foyers. Percée d'une petite ouverture pour ne pas gêner la circulation des gaz, elle doit permettre la réverbération de la chaleur dans le foyer.

C'est aussi une question de température qui oriente le choix de l'un ou l'autre des fourneaux qui viennent d'être présentés. L'utilisation du soufflet apparaît être la condition pour atteindre des températures de fonte les plus élevées, sans doute parce qu'elle permet de contrôler plus facilement les flux d'air qui entretiennent la réaction exothermique de combustion du charbon. Cependant, c'est dans les fourneaux à vent que les creusets en terre risquent le moins de se fissurer ou de se briser, car la température y est spatialement plus homogène[98].

Après avoir présenté les fourneaux utilisés dans la fonte des alliages monétaires, qu'en est-il des creusets qui doivent contenir les métaux durant leur fusion ? Sur les questions des dimensions des céramiques et des matériaux qui les composent, les textes monétaires les plus anciens ne sont pas particulièrement prolixes. Ce n'est que dans le *Traité des monoyes…*de J. Boizard que se trouvent

[95] Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 68-69.
[96] *Ibidem*, p. 69.
[97] J. Boizard assimile les hautes températures au travail de l'or, mais la température de fusion du cuivre étant proche de celle de ce dernier, les mêmes conditions sont requises pour fondre ce métal quand il n'est pas allié.
[98] *Id.*

les premiers renseignements[99]. Et ces derniers sont en accord avec ceux présentés plus tardivement[100]. Cependant, il faut déjà reconnaître que les contenants dont il est fait mention dans ces documents mettent en évidence peu de points communs avec les *corpus* archéologiques caractérisés dans cette étude. La principale correspondance concerne leur diamètre interne que J. Boizard situe entre 20 et 23 cm. Les différences traduisent certainement l'une des conséquences de l'introduction des nouveaux procédés dans les opérations de fonderie, notamment en ce qui concerne les quantités de métal travaillées. En effet, l'une des premières caractéristiques des creusets monétaires décrits dans la littérature, est le volume important de ces derniers. Même s'il est dans une certaine mesure limité pour éviter de trop grandes pertes de métal en cas de rupture accidentelle, J. Boizard présente des creusets de terre pouvant contenir 25 kg d'alliage[101]. Ces masses peuvent par ailleurs atteindre jusqu'à 400 kg dans des creusets de fer qui ont une tenue mécanique plus importante[102]. De telles quantités impliquent dans certains cas, que les contenants les plus volumineux ne quittent jamais les fourneaux. Le métal est dans ce cas prélevé avec une cuillère de fer lutée avec de la terre puis versé dans les moules.

La coulée à partir de creusets en terre contenant 25 kg de métal en fusion est tout de même décrite[103]. Le creuset est sorti du four et tenu avec des pinces en croissant qui permettent de maintenir la céramique en répartissant globalement les contraintes sur la terre. Toutefois, une telle masse doit être une valeur limite au-dessus de laquelle il est certainement difficile de manipuler une si grande quantité de métal en fusion avec précision et sans danger. C'est *a priori* cette technique qui devait être mise en place dans les ateliers plus anciens, comme l'indique notamment H. Poullain dans sa relation[104].

Sur les questions concernant la composition et la mise en forme des creusets de terre, les textes monétaires sont également peu explicites. J. Boizard évoque les types de matériaux employés[105]. Selon lui, ils doivent avoir une forme de pyramide ou de cône renversé. Ils sont faits de glaise, c'est-à-dire une argile grasse, à

[99] *Ibid.*, p. 67-68.
[100] De Bettange M., *Traité des monoyes..., op. cit.*, t. 1, p.24.
Anonyme, *Mémoire sur la fabrication..., op. cit.*, n. p.
[101] 100 marcs d'alliage.
[102] 1700 marcs d'alliage.
[103] 100 marcs d'alliage.
Anonyme, *Mémoire sur la fabrication..., op. cit.*, n. p.
Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 71.
[104] Poullain H., Relation de Me Henry Poullain..., *op. cit.*, p. 319-335.
[105] Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 67.

laquelle auront été ajoutés des fragments de pots de grés pilés et tamisés. Ce dernier matériau mélangé à la terre correspond au dégraissant. Il permet l'évacuation de la vapeur d'eau lors du chauffage de ces céramiques et améliore également leurs propriétés thermiques et mécaniques de ces céramiques. C'est d'ailleurs la même préparation que décrit le moine Théophile dans son traité lorsqu'il évoque les questions de fonderie de l'or et de l'agent ainsi que celle du cuivre[106]. Ce dernier est finalement plus précis dans sa description puisqu'il indique le mode de mise en forme des creusets qui doit se faire par moulage[107]. Cette recommandation se retrouve du reste plus tardivement dans le traité métallurgique de L. Ercker, édité en 1580[108]. Il n'est pas fait mention d'ajout possible de matière végétale qui est parfois prescrite pour améliorer la tenue mécanique lors de l'utilisation de ces céramiques[109].

Ne faut-il pas voir dans le peu d'informations disponibles sur les creusets utilisés dans le monnayage, un indice d'une délocalisation de leur préparation en un autre lieu que celui de l'atelier monétaire ? J. Boizard indique notamment que le creuset n'est pas cuit par le potier qui se contente seulement de le faire sécher[110]. C'est lors de sa première utilisation que la céramique est supposée être cuite. A cette occasion, elle est consciencieusement observée afin de vérifier qu'aucune fissure ne se forme.

Par ailleurs, bien que beaucoup plus récent, le *Mémoire sur la fabrication des sols de billon...*, indique l'utilisation de creusets « d'Allemagne ou d'autres fabriques, de forme ronde ou triangulaire[111] », pouvant contenir, selon leurs tailles, 12 à 24 kg d'alliage[112]. Enfin, la mise en forme des creusets par un artisan qui ne fait pas partie de l'atelier monétaire, est une possibilité. Elle est illustrée par l'étude par J.-A. Blanchet d'un compte de l'atelier de Montreuil-Bonnin daté de la

---

[106] Théophile *et al.*, *Théophile, prêtre et moine. Essais sur divers arts*, Nogent-le-Roi, Laget J., Daviaud P., Librairie des Arts et Métiers, 1977, p. 142 et 222.
[107] *Ibidem*, p. 222.
[108] Ercker L., *Treatise on ores and assaying*, édité par G. S. A. *et al.*, Chicago, Etats-Unis, University of Chicago Press, 1951, traduit de l'édition allemande de 1574, p. 180-182.
[109] Théophile *et al.*, *Essais sur divers arts..., op. cit.*, p. 107.
[110] Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 68.
[111] Cette forme est caractéristique des creusets provenant de la région de Hesse en Allemagne. Ces céramiques ont été exportées dans toute l'Europe à la fin du Moyen Age et au début de la période moderne.
Cotter J. P., The mystery of the Hessian wares: post-medieval triangular crucibles, dans Gaimster D. *et al.*, eds., *Everyday and exotic pottery from Europe c. 650-1900,* Londres, Angleterre, Oxbow Books Limited, 1992, p. 254-272.
Martinón-Torres M. *et al.*, Mass-produced mullite cucibles in medieval Europe: manufacture and material properties, *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 91, n° 6, 2008, p. 2071-2074.
Martinón-Torres M. *et al.*, Post-medieval crucible production and distribution: a study of materials and materialities, *Archaeometry*, à paraître.
[112] 50 à 100 marcs d'alliage.

fin du XIII[e] siècle[113]. Ce document indique l'achat de six de ces céramiques métallurgiques. De même dans un compte du XIV[e] siècle publié par M. Bompaire l'acquisition des creusets figure dans les dépenses de fabrication[114].

Si les textes monétaires apparaissent peu précis sur les infrastructures de fonderie, ils s'accordent sur certaines consignes propres au monnayage. Ces dernières portent en majorité sur les manières de remplir les creusets. Ces recommandations ont plusieurs finalités, principalement pratiques mais également économiques.

Il est recommandé de ne pas placer dans les creusets dès le début de la fonte tout le métal devant être utilisé[115]. Au contraire, il doit être ajouté au fur et à mesure qu'il commence à fondre. Une fois liquide, les alliages occupent un volume moins important car ils forment une masse moins aérée que celle occupée par les fragments métalliques. Il est impossible de remplir initialement les creusets avec la totalité des métaux devant être fondus. En outre, l'ajout de matière dans un bain déjà liquide, en facilite la fonte[116].

Les capacités des céramiques métallurgiques sont évaluées selon les masses de métal qu'elles peuvent contenir[117]. Dans la littérature, il n'est jamais fait mention de leur volume, ni de celui occupé par les alliages une fois fondus. Sans ces données, il n'est pas possible de déterminer le taux de remplissage des creusets. Toutefois, pour des raisons pratiques, il faut reconnaître qu'il ne peut être trop élevé. En effet, la manipulation de ces poches de fonte se faisant avec des tenailles qui viennent en saisir les bords, il est par exemple indispensable qu'elles n'entrent pas en contact avec le métal liquide. En définitive, il est admis que les céramiques métallurgiques étaient généralement remplies entre deux tiers et trois quarts de leur volume total[118].

Dans le cadre de la fabrication monétaire, une contrainte supplémentaire se voit imposée aux fondeurs. Ils ne doivent pas charger leurs creusets jusqu'à leur

---

[113] Blanchet J.-A., Comptes de l'atelier royal de Montreuil-Bonnin de 1295 à 1298, *Revue Numismatique*, 1907, p. 411-413.
[114] Bompaire M. *et al.*, *Numismatique médiévale..., op. cit.*, t. 7, p. 484.
[115] Anonyme, *Mémoire sur la fabrication..., op. cit.*, n. p.
De Bettange M., *Traité des monoyes..., op. cit.*, t. 1, p. 108.
Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 69.
[116] *Id*.
[117] Aujourd'hui encore, les poches de fonderie sont numérotées en fonction de la masse de bronze qu'elles peuvent contenir.
[118] Téreygeol F., *Montreuil-Bonnin, recherches sur l'atelier monétaire médiéval, Document final de synthèse*, SRA Poitou-Charentes, 2006, p. 42.

capacité maximale[119]. Cette consigne a plusieurs fondements. Elle permet en premier lieu d'éviter de perdre du métal précieux projeté dans le foyer au cours du mélange des alliages. Cette opération qui se définit par le terme de brassage, s'effectue avec une tige de terre cuite ou de fer parfois enduite de lut, préalablement chauffée, appelée *brassoire*[120]. Elle entraîne une perte de matière si celle-ci vient à déborder durant l'agitation. En second lieu, dans la mesure où les fondeurs ont parfois la possibilité de connaître le titre de l'alliage qu'ils sont en train de fondre, le travail avec des creusets qui ne sont pas remplis intégralement leur offre la possibilité de corriger la composition de leurs alliages en ajoutant les métaux nécessaires en proportion.

Il faut ici remarquer que la détermination du titre d'un mélange au cours de sa fonte, ne peut se faire que par la réalisation d'un essai en bain[121]. Celui-ci est en fait le même essai par coupellation évoqué précédemment, à la différence du prélèvement, effectué dans le creuset contenant l'alliage en fusion. Un tel procédé peut toutefois être mis en œuvre seulement lorsque la fonte est réalisée dans un creuset de fer qui seul dispose d'une tenue mécanique suffisante pour être maintenu dans le foyer le temps que dure la coupellation du prélèvement[122]. Lors de l'utilisation de creusets en terre, il est nécessaire de couler les alliages avant d'en faire l'essai. Ceci implique qu'ils doivent être refondus si le titre évalué n'est pas en accord avec les ordonnances monétaires.

Lors des coulées, la présence de charbons dans le bain d'alliage en fusion est gênante. Or, dans la mesure où les creusets sont placés dans un foyer rempli de charbons durant la fonte, il est conseillé d'utiliser un couvercle de terre ou de fer pour éviter qu'ils ne tombent sur les métaux en fusion. Cette mention se retrouve en outre dans la première description du monnayage que donne H. Estienne dans son ouvrage de 1579[123]. Une consigne similaire est également rapportée par J. Boizard[124]. Toutefois, dans le *Mémoire sur la fabrication des sols de billon...*, la question du charbon ne paraît pas être une contrainte particulière. *A contrario*, il est recommandé d'en ajouter ainsi que du poussier[125] au cours des brassages qui

[119] J. Boizard indique qu'il faut mettre seulement 95 marcs d'alliage dans un creuset qui peut en contenir une centaine.
Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p.68.
[120] Anonyme, *Mémoire sur la fabrication..., op. cit.*, n. p.
Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 68.
[121] Anonyme, *Mémoire sur la fabrication..., op. cit.*, n. p.
Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 71.
[122] *Id*.
[123] Estienne H., *Project du livre intitulé..., op. cit.*, p. 108.
[124] Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 69.
[125] Poudre de chardon.

précédent la coulée des alliages fondus. Une telle opération qui crée une atmosphère réductrice au niveau du bain de métal fondu n'est toutefois décrite dans aucun autre des documents monétaires consultés[126].

Lorsque les métaux sont finalement fondus suivant un alliage censé être en conformité avec les ordonnances, ils sont coulés dans des moules afin d'obtenir les lames qui seront ensuite mises en forme selon la technique du monnayage au marteau. Les ouvriers doivent veiller à ce que le métal ne refroidisse pas trop durant cette opération. Dans le *Mémoire sur la fabrication des sols de billon...*, il est recommandé d'éviter les courants d'air dans l'atelier[127]. Il y est d'ailleurs reconnu que la diminution de la température d'un bain d'alliage liquide peut modifier sa composition durant la coulée[128]. Il est préférable que les fours se trouvent dans des pièces et non dans un espace extérieur. Il est tout de même signalé que la Monnaie de Reims disposait de fourneaux dans une cour peu isolée de l'extérieur.

Sur la question des moules, la compilation des différentes informations met en évidence deux principales techniques qui ne semblent par ailleurs pas se succéder. Dans une première description du monnayage, H. Estienne indique que la coulée des lames est faite dans des moules ou sur des tuiles de fer[129]. Si la mention des moules est peu précise, il faut assimiler les tuiles de fer aux lingotières horizontales et ouvertes des textes postérieurs.

Suivant la chronologie, c'est dans le compte-rendu d'H. Poullain de l'épreuve qui a opposé N. Briot aux monnayeurs parisiens en 1617, que se trouve une seconde mention de l'utilisation de lingotière[130]. Bien qu'il ait également assisté à cet essai contradictoire, dans son procès-verbal, J. de Thumery n'a donné aucune indication sur les moules utilisés dans la fabrication des lames par les monétaires[131]. Selon, H. Poullain, les creusets contenant les alliages sont versés sur un moule de fer préalablement graissé. Ce dernier est placé sur une fournaise à proximité de celle où a lieu la fonte et légèrement penché pour faciliter la coulée du métal dans les empreintes en canaux. Les dimensions relevées font état d'une lingotière de 38 cm de long pour 25 cm de large et 2,5 cm d'épaisseur[132]. Lors d'une coulée, elle permet d'obtenir plusieurs lames.

---

[126] De Leiris H., *Métaux et alliages*, 3 tomes, Paris, Masson et Cie, t. 1, 1971, p. 229-230.
[127] Anonyme, *Mémoire sur la fabrication..., op. cit.*, n. p.
[128] *Id.*.
[129] Estienne H., *Project du livre intitulé..., op. cit.*, p. 106.
[130] Poullain H., Relation de Me Henry Poullain..., *op. cit.*, p. 328.
[131] De Thumery J., Epreuves contradictoires..., *op. cit.*, p. 335-345.
[132] 15 pouces de long, 10 de large et 1 d'épaisseur.

Vient ensuite le *Traité des monoyes…*de J. Boizard dans lequel apparaît la première mention d'une technique de fonte différente[133]. Il décrit en effet, le recours à des moules de sable monovalves pour produire les lames en grande quantité. Les empreintes en creux formées dans le sable à partir d'un modèle et qui doivent accueillir le métal en fusion, ne sont faites que dans une seule partie du moule qui en compte deux. Une telle configuration est possible grâce à la simplicité de la forme copiée. Il s'agit seulement de parallélépipèdes rectangles en cuivre. S'ils ont tous la même longueur, autour de 38 cm[134], leurs autres dimensions varient puisqu'elles correspondent à peu près à celles des différentes espèces fabriquées. Afin de retirer plus facilement les modèles du sable lors de la préparation du moule, les arêtes d'un côté sont émoussées. C'est cette même technique qui est décrite par la suite dans d'autres documents monétaires[135]. Moins complètes que celle du Conseiller à la Cour des monnaies, il y a tout de même peu de différences entre les descriptions. Toutefois, dans son encyclopédie, *Art du monnayage,* M. Le Noir qui pourtant n'a pas hésité à reprendre intégralement le traité de J. Boizard, sans y faire explicitement référence, relève l'utilisation de modèles de bois.

D'autre part, le *Mémoire sur la fabrication des sols de billon...* qui décrit également l'utilisation ponctuelle de lingotières, donne des renseignements sur les quantités de métal qui peuvent être réparties dans les moules au sable. On pouvait y couler de 3,5 kg et jusqu'à 6 kg d'alliage[136]. La préparation de plus de 400 de ces matrices est par ailleurs évoquée pour une fonte de près de 1000 kg de billon[137].

L'utilisation de lingotières qui est décrite dans les sources les plus anciennes, n'est pas abandonnée puisqu'elle qu'elle se retrouve jusqu'au XVIII^{e} siècle. Bien que cette technique n'offre pas une liberté équivalente à celle du moulage au sable quant aux dimensions des lames produites, il est ici difficile de comprendre les choix qui vont décider du recours à l'un ou l'autre des procédés.

Avant de confier aux ouvriers les lames qu'ils doivent mettre en forme, il est nécessaire de réaliser l'essai de l'alliage qui vient d'être coulé[138]. Il doit permettre de vérifier que le titre en métal précieux correspond à celui des espèces produites.

---

[133] Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 70.
[134] 15 pouces.
[135] Anonyme, *Mémoire sur la fabrication..., op. cit.*, n. p.
De Bettange M., *Traité des monoyes..., op. cit.*, t. 1, p. 7, 17, 19, 109.
Le Noir M., *L'art du monnayage*, *op. cit.*, p. 23.
[136] 14 à 25 marcs d'alliage.
[137] 4000 marcs d'alliage.
[138] Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 82.

Si ce n'est pas le cas, il est plus intéressant de refondre les mauvaises lames avant que la fabrication ne soit finalisée.

Les différentes données collectées dans les sources monétaires sont résumées dans le tableau ci-dessous.

	Caractéristiques
Creuset	
Diamètre	20 à 23 cm.
Contenance	12 à 25 kg de métal, 400 kg lorsqu'ils sont en fer.
Forme	Pyramide, cône renversé, ronde, triangulaire.
Matériau	Glaise, céramiques broyées.
Lame	38 cm de long.
Lingotière	38 cm x 25 cm x 2,5 cm.
Moule	Contient 3,5 à 6 kg de métal.

Tableau 1 - Compilation des différentes données relevées.

C. Mise en forme au marteau

A propos de cette étape principale qui constitue une grande part de la problématique de notre étude, c'est du compte-rendu de H. Poullain que peuvent être extraites les informations les plus détaillées des différentes opérations qui vont se succéder au cours de cette mise en forme[139]. Par ailleurs, s'agissant d'un procès-verbal dont le rédacteur appartient à la Cour des monnaies, il est légitime de s'attendre à une description à la fois exhaustive et fidèle de ces différentes étapes du monnayage au marteau.

De plus, grâce au vocabulaire employé, il est possible de faire le lien avec d'autres présentations, notamment celle de H. Estienne[140]. Si dans son ouvrage ce dernier ne donne pas la signification précise de chacune des opérations qu'il décrit, il les nomme et les ordonne selon les mêmes termes et la même logique que le Conseiller à la Cour des monnaies. Ce texte publié en 1579 permet de placer à la fin du XVI^{e} siècle, des procédés qui ne seront décrits précisément que quelques années plus tard par H. Poullain en 1617. C'est ce même raisonnement qui pourra par ailleurs être mené à partir d'un règlement du milieu du XV^{e} siècle dans lequel est mentionnée une référence ponctuelle à des opérations explicitées plus tard par H. Poullain.

Après avoir été moulées au sable, les lames doivent être brossées pour élever le sable présent à leur surface. Il faut en outre les ébarber, pour éliminer leurs défauts

[139] Poullain H., Relation de Me Henry Poullain..., *op. cit.*, p. 328-335.
[140] Estienne H., *Project du livre intitulé..., op. cit.*, p. 106-107.

de coulée[141]. Ces derniers résultent en général de fuites de métal en fusion aux jointures du moule qui ne peuvent être parfaites. Des telles opérations ne sont pas nécessaires dans le cadre de l'utilisation d'une lingotière, c'est pourquoi elles ne sont pas décrites par H. Poullain.

La première étape au cours de laquelle les lames vont subir des déformations est définie par le terme de *battre la chaude*[142]. Il s'agit pour les ouvriers de marteler les barres de métal sur une enclume afin d'en diminuer l'épaisseur jusqu'à approcher celle des espèces fabriquées. Bien que le nom attribué à cette opération le suggère, les ébauches n'ont pas besoin d'être chauffées pour être martelées, à l'exception des phases de recuits. Il est notamment indiqué qu'il est nécessaire de les laisser refroidir avant de les travailler de nouveau[143].

Lorsque les lames sont mises en forme à froid, le métal va progressivement s'écrouir. Les déformations subies vont entraîner la formation de défauts internes[144]. La plasticité d'un métal qui définit la possibilité pour ce dernier de se déformer, est permise par le déplacement des défauts formés. D'autre part, les défauts internes peuvent se gêner mutuellement. Certains d'entre eux vont, en effet, se repousser. Ceci diminue leur facilité de déplacement. C'est pourquoi, les déformations plastiques qui entraînent une augmentation du nombre de défauts internes provoquent un durcissement de l'alliage travaillé à mesure que leur nombre des dislocations augmente. Ce paramètre définit le taux d'écrouissage. Si ce dernier devient excessif, il est possible que le métal devenu trop dur, casse sous l'effet des contraintes. Afin d'éviter de rompre les lames avant qu'elles n'aient été assez amincies, il est prescrit de les porter à haute température lors de phases de recuit. C'est dans de telles conditions que les défauts internes formés lors des martelages sont éliminés grâce à une restauration et une recristallisation de la matière. Le premier phénomène correspond à une disparition progressive à courte distance des dislocations de sens contraire ainsi qu'au processus de polygonisation qui voit le regroupement des dislocations de même sens au niveau des joints de grains[145]. Ces transformations n'ont pas besoin d'une température importante pour commencer à se produire. Le second phénomène se traduit par la croissance de

[141] Anonyme, *Mémoire sur la fabrication..., op. cit.*, n. p.
Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 71.
[142] Poullain H., Relation de Me Henry Poullain..., *op. cit.*, p. 328.
De Thumery J., Epreuves contradictoires..., *op. cit.*, p. 341.
Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 82.
De Bettange M., *Traité des monoyes..., op. cit.*, t. 1, p. 4.
[143] Anonyme, *Mémoire sur la fabrication..., op. cit.*, n. p.
[144] Il s'agit de dislocations dans le réseau formé par les atomes qui constituent la matière.
[145] De Leiris H., *Métaux et alliages*, t.. 1, *op. cit.*, p. 63.

nouveaux grains d'alliages à partir de germes tels que des dislocations préalablement formées[146]. Contrairement au précédent, ce processus demande une température importante pour débuter. Si le matériau était travaillé à chaud, ces traitements ne seraient pas indispensables et ne seraient dans ce cas pas décrits[147].

Les températures et les durées des traitements de recuit qui suivent les phases de martelage dépendent des types d'alliages travaillés. Il n'est pas surprenant de ne pas trouver de descriptions très précises de cette opération en considérant la diversité des alliages monétaires. Il est cependant possible de relever des consignes qui rendent compte de précautions prises par les ouvriers.

En règle générale, plus la température retenue pour recuire un alliage est élevée, plus sa recristallisation est rapide, diminuant d'autant le temps nécessaire au traitement. D'autre part les ouvriers monétaires, même s'ils n'en connaissaient pas la cause, avaient également conscience que l'alliage qu'ils travaillaient pouvait « brûler », s'ils le recuisaient à une température trop élevée[148]. Les lames « brûlées » étaient cassantes. Le phénomène est aujourd'hui expliqué. Un alliage de plusieurs métaux est dans certains cas formé de plusieurs phases microscopiquement mélangées. Une ébauche peut garder sa forme alors qu'elle est portée à une température supérieure à celle correspondant à la fusion d'un composé interne. Toutefois, lors du chauffage, ce dernier ayant fondu, la cohésion interne de l'alliage est rompue sans que cela ne paraisse. Lors de nouvelles déformations, l'alliage se brise facilement. Un tel composé, dit eutectique, est notamment présent dans la plupart des alliages cuivre-argent[149]. Pour ces mélanges, il ne faut pas dépasser une température de recuit, correspondant à la fusion de ce dernier qui débute dès 780 °C[150].

En outre, pour les alliages de cuivre, un second phénomène de brûlage peut également résulter de la fusion interne des oxydes de cuivre Cu_2O également présent dans le matériau[151]. Très peu soluble dans le cuivre, ces derniers vont comme le composé eutectique, former une phase interne fusible à une température inférieure à celle de l'alliage.

Il s'agit donc pour les monnayeurs de ne pas trop chauffer la matière. La consigne est très explicite dans le *Mémoire sur la fabrication des sols de billon...* qui recommande de veiller à la température des recuits pour ne pas « brûler » les

[146] *Ibidem*, p. 36-37.
[147] Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 82.
[148] Anonyme, *Mémoire sur la fabrication..., op. cit.*, n. p.
Poullain H., Relation de Me Henry Poullain..., *op. cit.*, p. 330.
[149] Dont le titre en cuivre est compris entre 8 et 91,2 % en masse.
[150] cf. Annexe G.
[151] De Leiris H., *Métaux et alliages*, 3 tomes, Paris, Masson et Cie, t. 3, 1971, p. 6-7.

lames de billons au cours de leur mise en forme[152]. Elles sont recuites par lot, couvertes des braises d'un simple feu de bois. Dans le *Traité des monoyes…* de J. Boizard, la recommandation n'est pas explicitement formulée, mais il indique cependant un protocole similaire[153].

En ce qui concerne les déformations que subissent les lames, elles ont pour seule vocation de diminuer leur épaisseur. Globalement, elles conservent leur largeur générale puisque dès leur moulage les lames sont décrites comme étant aussi larges que les espèces fabriquées. Dans ces conditions, il faut remarquer que l'amincissement des ébauches a pour conséquence l'élongation de ces dernières. Il apparaît que si elle doit être poursuivie selon un taux de déformation important, la longueur des lames peut devenir telle, qu'elles deviennent difficiles à manipuler. Il est dans ce cas nécessaire de les couper pour terminer les mises en forme. Cependant, une telle alternative n'est évoquée que dans le *Mémoire sur la fabrication des sols de billon...* dans lequel les lames ne sont par déformées au marteau mais avec un laminoir[154].

C'est en outre dans ce seul texte que la question des fissurations de la matière est envisagée. Bien que les recuits doivent garantir qu'elles ne se produisent pas, le choix de recuire une lame au cours de son martelage intervient à l'appréciation de l'ouvrier qui l'exécute. Il est tout de même possible que la matière, parfois trop sollicitée, voit l'apparition de défauts. Cependant, aucun des textes dans lesquels sont rapportées les opérations propres au monnayage au marteau, ne fait état de consignes particulières face à une telle situation.

Lorsque les lames approchent l'épaisseur des espèces qu'elles doivent permettre de produire, elles sont confiées à des ouvriers chargés de les couper en *carreaux*. Lors de cette opération, les ébauches sont découpés en carrés avec de grandes cisailles appelées *cisoires*[155].

Dans sa relation, H. Poullain décrit avec précision cette opération au cours de laquelle chaque carreau coupé par un ouvrier est aussitôt pesé. Sa masse est comparée à celle d'un *dénéral*. Il s'agit d'un poids étalon qui est dit ici, *sur fort de*

---

[152] Anonyme, *Mémoire sur la fabrication..., op. cit.*, n. p.
Poullain H., Relation de Me Henry Poullain..., *op. cit.*, p. 330.
[153] Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 72.
[154] Anonyme, *Mémoire sur la fabrication..., op. cit.*, n. p.
[155] Estienne H., *Project du livre intitulé..., op. cit.*, p. 106.
Poullain H., Relation de Me Henry Poullain..., *op. cit.*, p. 329.
De Thumery J., Epreuves contradictoires..., *op. cit.*, p. 341.
Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 82.

l'espèce, c'est-à-dire qu'il est un peu plus lourd de 0,15 à 0,2 g par rapport à la monnaie qui doit être produite[156]. A la différence des propos de J. Boizard, il semble que les dimensions recherchées ne doivent pas être particulièrement en rapport avec celles des monnaies frappées[157]. Le paramètre principal à partir duquel est réglée la coupe, est finalement celui de la masse des carreaux cisaillés[158].

Dès lors qu'elle dépend des monnaies fabriquées, l'épaisseur des lames peut être relativement importante. C'est pourquoi leur découpe demande l'utilisation d'outils d'une grande dimension, offrant des bras de leviers appropriés. H. Poullain indique que l'un des manches des cisoires auxquelles ont recours les monnayeurs de Paris, est scellé dans le sol, l'ouvrier qui s'en sert tenant l'autre manche sous son bras[159].

Une fois coupés, les carreaux sont battus, c'est-à-dire qu'ils sont frappés individuellement à plat sur une enclume[160]. H. Poullain est le plus précis et relève que la qualité finale du monnayage dépend en partie de cette opération. Elle doit être menée par un ouvrier qualifié qui donne trois à quatre coups d'un marteau appelé *flattoir*.

Après cette première mise en forme des carreaux, ces derniers doivent subir un recuit. Comme il a été vu précédemment, la mise en œuvre de ce traitement n'obéit pas à une règle objective. C'est normalement l'ouvrier qui doit juger du moment où il doit effectuer un recuit afin de relâcher les contraintes internes qu'il a créées en déformant son matériau. C'est certainement le caractère empirique de ce jugement qui justifie que les monnayeurs aient été contraints par des ordonnances monétaires, de réaliser un recuit de leurs ébauches à chaque fois qu'elles devaient subir de nouveaux martelages[161]. Ces règlements fixés par l'autorité émettrice, imposent de réaliser de tels traitements même s'ils ne sont pas mécaniquement indispensables. Ils permettent tout de même de garantir qu'*a priori* aucune

---

[156] 3 à 4 grains.
[157] *Id*.
[158] Estienne H., *Project du livre intitulé..., op. cit.*, p. 106.
Poullain H., Relation de Me Henry Poullain..., *op. cit.*, p. 329.
[159] *Id*.
[160] *Id*
Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 82.
[161] Brisson B. *et al.*, eds., *Les basiliques ou edicts et ordonnances des rois de France*, Paris, R. Foüet, 1611, p. 954.
Poullain H., Relation de Me Henry Poullain..., *op. cit.*, p. 330.
Le Noir M., *L'art du monnayage*, *op. cit.*, p. 84.

dégradation accidentelle ne résulte des mises en forme successives. Il pourrait s'agir en quelque sorte, d'un principe de précaution.

Au cours des recuits, les ébauches sont placées dans un récipient en fer avec du charbon en combustion. Le charbon est ventilé plus ou moins fortement et longtemps selon les alliages travaillés, là aussi pour ne pas « brûler » le métal[162]. Lorsque l'ouvrier les juge assez recuits d'après leur couleur, il laisse refroidir ses carreaux sur le sol, en les séparant du charbon.

Comme lors du recuit des lames, la température est un paramètre important durant celui des carreaux. Parce qu'ils sont composés des mêmes matériaux, ils sont également confrontés au brûlage. D'autant que leurs dimensions plus restreintes apparaissent être un facteur de risque supplémentaire[163]. Il ne faut pas non plus trop les recuire car ils risquent de « s'écailler »[164].

Après leur première déformation, les carreaux subissent de nouvelles découpes. Ils sont *ajustés*, c'est-à-dire qu'un ouvrier coupe une part du métal pour atteindre la masse légale des monnaies fabriquées[165]. En préalable à toute découpe, le monétaire estime la quantité de matière qu'il doit enlever en effectuant une pesée par rapport à un dénéral dont la masse correspond à celle de l'espèce mise en forme. Si un volume important d'alliage doit être cisaillé, il faut *approcher* carreau, en taillant en premier lieu ses coins. La démarche est identique à celle de la découpe des lames et utilise les mêmes cisoires. Lorsque la masse de l'ébauche se rapproche de celle qu'elle doit atteindre, il faut les *rabaisser* en leur ôtant de moins en moins de métal, toujours en contrôlant par rapport à la référence légale. Dans cette opération, il n'est jamais explicitement indiqué qu'il y a une volonté d'obtenir une morphologie circulaire grâce aux découpes successives. Même si l'ajustage de la masse se fait par l'élimination des coins des carreaux qui se rapprochent ainsi d'un modèle un peu plus arrondi, la forme ronde des monnaies n'est pas obtenue par la découpe de cercles inscrits dans les ébauches.

Les déchets de ces ajustements sont qualifiés de *cisailles*. Ils doivent être conservés par l'ouvrier qui les produit afin qu'ils soient par la suite rendus en masse aux gardes qui contrôlent la fabrication. Bien qu'à ce stade, il s'agisse de déchets, ces derniers n'en sont pas moins composés en partie de métaux précieux facilement récupérables.

---

[162] Poullain H., Relation de Me Henry Poullain..., *op. cit.*, p. 330.
[163] Anonyme, *Mémoire sur la fabrication..., op. cit.*, n. p.
[164] *Ibidem*, n. p.
[165] Poullain H., Relation de Me Henry Poullain..., *op. cit.*, p. 330.
Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 82.

Une fois ajustés, les carreaux vont subir les déformations qui doivent leur donner la morphologie ronde des monnaies. Au cours de la première des différentes mises en forme qui vont se succéder et se répéter, les ébauches vont être *rechaussées*[166]. Elles sont pour cela tout d'abord triées en fonction de leur taille. Le rechaussage devant se faire sur un groupe carreaux, il est important qu'ils présentent des dimensions à peu près homogènes. Lors des étapes préliminaires, les ouvriers veillent principalement à harmoniser la masse des espèces qu'ils mettent en forme ; il n'est pas surprenant qu'à ce stade de la fabrication, ces dernières puissent présenter des mensurations relativement hétérogènes.

Après avoir été classées en fonction de leurs dimensions, les ébauches sont rassemblées en pile par lots de 250 à 500 g[167] pour être rechaussées, c'est-à-dire frappées sur leurs tranches avec un *rechaussoir*. Elles sont à cette occasion tenues avec une *estanque* qui est une pince propre au monnayage au marteau[168]. Très caractéristique, cette dernière est souvent représentée sur les iconographies monétaires[169]. Cette tenaille est parfaitement illustrée sur un jeton qui servait de laissez-passer aux monnayeurs de l'atelier de Châlons-en-Champagne (Figure 3). De même le rechaussoir que H. Poullain assimile à un marteau de tonnelier, la doloire, d'environ un kilogramme. Il s'agit certainement d'un outil du même type que celui qui est représenté dans le champ droit du laissez-passer.

---

[166] Estienne H., *Project du livre intitulé..., op. cit.*, p. 106.
Poullain H., Relation de Me Henry Poullain..., *op. cit.*, p. 330.
M. de Thumery fait une erreur lorsqu'il relève que les carreaux sont estanqués. Il s'agit en fait de la manière de tenir les ébauches pendant qu'elles sont rechaussées. De Thumery J., Epreuves contradictoires..., *op. cit.*, p. 341.
Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 82.

[167] 1 à 2 marcs de carreaux.

[168] *Id*.

[169] Archivolte du portail de l'église de Saint-Jacques de Carrion de los Condes, Espagne, vers 1180.
Vitrail de Werner Zentgraf, maître de la Monnaie de Schaffouse, 1563, Musée national Suisse, Zurich, LM 40 198.
Passe de monnayeur de l'atelier monétaire de Trévoux, Bibliothèque Nationale de France, Cabinet des Médailles, Paris.
Blanchet J.-A. *et al.*, *Manuel de numismatique française*, 4 tomes, Bologne, Italie, Formi Editore, t. 3, 1969, pl. VIII.
Geiger H.-U., Eine unbekannte Glasscheibe des Schaffhauser Münzmeisters Zentgraf von 1563, *Gazette numismatique suisse*, vol. 17, 1967, p. 11-114.
Feller L., *Faux-monnayeurs et fausses monnaies en France à la fin du Moyen Age (seconde moitié du XV^e siècle)*, Paris, Editions Le Léopard d'or, 1986, p. 42.
Passes des monnayeurs de Montélimar et de Rouen. : Labrot J. *et al.*, *Une Histoire économique et populaire du Moyen Age, les jetons et les méreaux*, Paris, Edtitions Errance, coll. « Collections numismatiques », 1989, p. 88.
Bompaire M. *et al.*, *Numismatique médiévale..., op. cit.*, t. 7, p. 476-480.

Comme pour les recuits, les ouvriers monétaires sont contraints par ordonnance d'effectuer un rechaussage en préalable à chaque étape de déformation qu'ils font subir à leurs espèces[170].

Figure 3 - Pince à creusets, cisoires, estanque, pelle à bouillir, marteau. Laissez-passer des monnayeurs de l'atelier de Châlons-en-Champagne, 1591[171].

Une première fois rechaussés en pile, les carreaux sont ensuite *flatis*[172]. Ils sont martelés individuellement sur leur surface, afin d'approcher des morphologies correspondant en volume et circonférence à celles des espèces fabriquées. A partir de ce moment, les ébauches arrondies sont qualifiées de *flans*, jusqu'à ce qu'elles soient frappées pour devenir des monnaies.

Le *flatoir* utilisé dans cette opération, est un marteau dont la forme est comparable à celle du rechaussoir. Il est cependant plus massif, pesant jusqu'à quatre kilogrammes[173].

---

[170] *Ordonnance portant règlement pour les fonctions des officiers des Monnoyes et justiciables d'icelles*, Trésor des chartes, ms. 4° 18, f° 188v°-196r° : Des ouvriers et monnoyers, 1423, n. p.
Brisson *et al.*, eds., *Les basiliques..., op. cit.*, p. 954.
Poullain H., Relation de Me Henry Poullain..., *op. cit.*, p. 330.
Mazerolle F., *Les médailleurs français..., op. cit.*, t. 1, p. 397.
Bompaire M. *et al.*, *Numismatique médiévale..., op. cit.*, t. 7, p. 461,468.
[171] Photo Compagnie Générale de Bourse.
[172] Estienne H., *Project du livre intitulé..., op. cit.*, p. 106.
Poullain H., Relation de Me Henry Poullain..., *op. cit.*, p. 330.
De Thumery J., Epreuves contradictoires..., *op. cit.*, p. 341.
Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 82.
[173] Poullain H., Relation de Me Henry Poullain..., *op. cit.*, p. 330.

Selon les règlements, après cette passe de déformations, les flans doivent être recuits et une nouvelle fois rechaussés. Et c'est également par ordonnance que les ouvriers sont obligés de flatir une nouvelle fois leurs ébauches, avant de les recuire et rechausser une troisième fois[174].

A la suite de ces mises en forme préalables, les flans doivent être *eslaizés*[175]. Excepté sa finalité qui est différente, cette opération est similaire à la précédente lorsque les ébauches sont flaties. Les martelages sont moins appuyés et visent principalement à redresser les flans qui auront été trop déformés notamment lors du rechaussage. Cette étape n'échappe pas aux consignes imposant qu'elle soit mise en œuvre deux fois, et à chaque fois suivie d'un recuit et d'un rechaussage[176].

Les dernières déformations que doivent finalement subir les flans avant d'être frappés, sont effectuées avec le plus massif des marteaux utilisés dans ce monnayage. Il a une forme similaire à celui du flatoir mais pèse jusqu'à huit kilogrammes[177]. Il est utilisé pour *bouer* les flans[178]. En frappant à deux mains sur une pile formée d'environ 150 grammes[179] de rondelles métalliques, cette étape doit permettre de les rendre parfaitement planes, se touchant d'assiette.

Cette étape est également soumise à ordonnance par l'autorité émettrice qui impose une triple mise en œuvre, à chaque fois complétée des recuits et rechaussages règlementaires[180]. Les ouvriers monnayeurs n'ont cependant pas obligation de rechausser leurs flans après qu'ils aient été boués une troisième fois.

---

[174] Brisson B. *et al.*, eds., *Les basiliques..., op. cit.*, p. 954.
Poullain H., Relation de Me Henry Poullain..., *op. cit.*, p. 330.
Mazerolle F., *Les médailleurs français..., op. cit.*, t. 1, p. 397.
[175] Estienne H., *Project du livre intitulé..., op. cit.*, p. 106.
Poullain H., Relation de Me Henry Poullain..., *op. cit.*, p. 331.
De Thumery J., Epreuves contradictoires..., *op. cit.*, p. 341.
Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 82.
[176] *Déclaration du roy Philippes de Valois portant règlement des différends qui estoient entre les maîtres des Monoyes et les ouvriers et monoyers du royaume*, Monnaie de Paris, ms. 4° 4, f° 101r°-108v°, 25 septembre 1327, n. p.
De Laurière E. *et al.*, eds., *Ordonnances des rois de France de la troisième race*, 22 tomes, Paris, Imprimerie royale, t. 1, 1723, p. 805.
Ordonnance portant règlement..., op. cit.
Poullain H., Relation de Me Henry Poullain..., *op. cit.*, p. 331.
Mazerolle F., *Les médailleurs français..., op. cit.*, t. 1, p. 397.
Bompaire M. *et al.*, *Numismatique médiévale..., op. cit.*, t. 7, p. 461,468.
[177] Poullain H., Relation de Me Henry Poullain..., *op. cit.*, p. 331.
[178] *Id*.
[179] Un demi marc de flans.
[180] Brisson B. *et al.*, eds., *Les basiliques..., op. cit.*, p. 954.
Poullain H., Relation de Me Henry Poullain..., *op. cit.*, p. 331.
Mazerolle F., *Les médailleurs français..., op. cit.*, t. 1, p. 397.

Avant d'être confiés à d'autres ouvriers qui doivent poursuivre la chaîne opératoire selon deux étapes supplémentaires, la politique de contrôle au sein des ateliers impose aux monétaires de *rendre leur brève* lorsqu'ils ont fini de préparer leurs flans[181]. Ils doivent confier aux gardes de la fabrique leur production ainsi que les déchets produits au cours de leur travail. A partir des pesées de chacun de ces deux ensembles, ramenées à celle de la masse de métal qui leur a été confiée, il est possible d'évaluer la quantité des cisailles produites qui correspond à la proportion de découpes qui pourront être refondues. Elles représentent de futures matières premières. Elles s'opposent à la masse de métal ayant été réellement perdue dans l'atelier au cours des différentes mises en forme. Cette dernière peut être évaluée parallèlement lors de la restitution de la brève et bien qu'il sera vu qu'une part de cette matière dispersée peut être récupérée[182], elle est considérée à cet instant comme une perte réelle, comptée dans les dépenses du maître particulier.

Une telle démarche de contrôle, correspond principalement à une volonté d'éviter les fraudes au sein de l'atelier, car elle permet de vérifier que les matières premières ne sont pas détournées par les ouvriers qui les manipulent.

En plus d'être soumis à un simple contrôle de la quantité des déchets qu'ils produisent, les ouvriers doivent respecter des quotas qui leur imposent des limites maximales à ne pas dépasser quant aux masses de métal qu'ils ne transforment pas en flans. Une telle règle peut se comprendre du point de vue des pertes de métal. En revanche, bien que moins contraignant le quota qui restreint le volume des cisailles est plus surprenant, ces dernières étant réutilisées.

Quant aux limites qui doivent être respectées elles ont été établies par l'autorité émettrice et n'ont pas changé entre le XIV^{e} et le XVII^{e} siècle.

Dans une ordonnance du 25 septembre 1327 qui fixe les droits et les devoirs des ouvriers dans les ateliers monétaires français, il est indiqué qu'ils sont autorisés à rendre deux marcs et demi de cisailles pour vingt marcs de métal mis en forme[183]. Ainsi, les déchets de leurs brèves peuvent représenter jusqu'à 12,5 % de la masse d'alliage qui aura été attribuée aux monnayeurs sans qu'ils en soient blâmés. En revanche, dans la mesure où ils ne respectent pas cette contrainte, les

[181] Estienne H., *Project du livre intitulé..., op. cit.*, p. 108.
Poullain H., Relation de Me Henry Poullain..., *op. cit.*, p. 331.
De Thumery J., Epreuves contradictoires..., *op. cit.*, p. 342.
Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 332.
[182] cf. Le retraitement des déchets, p. 105.
[183] *Déclaration du roy Philippes de Valois..., op. cit.*
De Laurière E. *et al.*, eds., *Ordonnances des rois..., op. cit.*, p. 802.

responsables sont censés dédommager le maître particulier pour la dépense de fonte supplémentaire qu'entraîne une découpe excessive[184].

Dans un règlement de 1423, c'est la proportion de perte de métal consentie qui est indiquée. Toujours sans devoir rendre de compte à leur responsable, il est permis aux ouvriers de ne pas rendre dans leur brève jusqu'à une once d'alliage par tranche de vingt marcs mis en forme, soit un déchet réellement perdu équivalent à 0,6 % de la masse totale[185]. Elle est évidemment beaucoup plus faible que la limite autorisée pour les cisailles.

Ce sont exactement les mêmes consignes qui sont reprises, parfois mot pour mot, dans des ordonnances plus tardives, notamment, par exemple, dans un règlement des maîtres généraux de 1427[186]. Enfin, c'est finalement N. Briot qui fournit la date la plus haute sur l'existence des quotas de déchets imposés aux monétaires qui travaillent au marteau. En 1619, il est interrogé par N. Rolland, Conseiller du Roi et Général en la Cour des monnaies à propos de son épreuve contradictoire de 1617[187]. Cet entretien est une nouvelle occasion pour le tailleur général de se plaindre du travail des monnayeurs de son temps. Il cite un quota d'une once de cisailles par marc monnayé que les ouvriers ne respectent pas selon lui. Or cette limite, même si elle n'est pas exactement formulée comme dans les ordonnances précédemment évoquées, correspond cependant bien aux 12,5 % de chutes déjà autorisés en 1327.

Au sein des ateliers monétaires, il faut compter un contrôle supplémentaire qui se tient lors de la remise de la brève. Sur ce point, H. Poullain est peu explicite dans sa description et c'est pour une fois J. de Thumery qui nous éclaire[188]. Il n'est pas question d'une exigence particulière pour les monnayeurs parisiens de devoir respecter des consignes spécifiques quant à la quantité de leurs cisailles. Le Conseiller d'Etat a toutefois pris la peine de relever les différentes masses rendues par les monétaires lors de l'exercice. Avec 14 % de découpes pour le monnayage d'or[189] et 17 % pour celui d'argent[190], il faut reconnaître que les ouvriers ont dépassé les limites auxquelles ils sont assujettis. Dans ce cas, N. Briot a raison

---

[184] *Déclaration du roy Philippes de Valois..., op. cit.*
Brisson B. *et al.*, eds., *Les basiliques..., op. cit.*, p. 955, 960.
De Laurière E. *et al.*, eds., *Ordonnances des rois..., op. cit.*, p. 804.
[185] *Ordonnance portant règlement..., op. cit.*
Brisson B. *et al.*, eds., *Les basiliques..., op. cit.*, p. 955.
[186] *Id*.
Bompaire M. *et al.*, *Numismatique médiévale..., op. cit.*, t. 7, p. 461, 463, 468.
[187] Mazerolle F., *Les médailleurs français..., op. cit.*, t. 1, p. 395.
[188] De Thumery J., Epreuves contradictoires..., *op. cit.*, p. 342.
[189] 3 onces 2 gros de cisailles pour 2 marcs 4 onces 3 gros de flans d'or rendus par l'ouvrier.
[190] 5 onces 2 gros de cisailles pour 2 marc 4 onces 7 gros d'alliage d'argent rendus par l'ouvrier.

quand il affirme que ses contradicteurs ne respectent pas leurs règlements[191]. H. Poullain a par ailleurs remarqué que le tailleur général a, quant à lui, produit plus de la moitié de déchets à partir de la masse de métal qui lui a été confiée pour son épreuve[192].

Du point de vue de l'autorité émettrice qui est à l'origine de ces quotas de cisailles imposés aux ouvriers, ces derniers sont difficiles à justifier étant donné que de telles précautions n'ont pas *a priori* d'incidence sur la qualité finale du monnayage. En définitive, l'intérêt principal se trouve du côté des maîtres particuliers des ateliers qui évitaient ainsi de voir augmenter leurs dépenses de refonte de déchets à la suite d'un travail négligeant des monnayeurs. Dans la suite de cette étude, il sera vérifié si ces quotas étaient respectés et s'ils avaient des conséquences sur la chaîne opératoire.

L'introduction du nouvel appareillage et en particulier le coupoir à partir de 1645, n'a géométriquement pas permis de maintenir de telles contraintes sur le monnayage[193]. Dans le *Mémoire sur la fabrication des sols de billon...* qui rend compte de l'utilisation des nouveaux instruments alors généralisée aux ateliers français, il est indiqué qu'il ne faut pas espérer transformer plus des deux tiers, voire la moitié seulement d'une lame, en flans prêts à être monnayés[194]. Les anciens objectifs de 12,5 % de cisaille n'avaient plus vocation à être maintenus.

Concernant l'organisation du travail au cours de cette mise en forme au marteau, H. Poullain décrit dans sa relation, l'utilisation de bancs sur lesquels les ouvriers sont assis à califourchon au cours de leur travail. Si le Conseiller à la Cour de monnaies est le seul rédacteur à évoquer de tels aménagements, sans que d'autres ne soient cependant décrits, l'iconographie en atteste dans de nombreuses représentations[195]. Des structures comparables se retrouvent par ailleurs également dans des illustrations d'ateliers étrangers[196]. Une telle façon de travailler

[191] Mazerolle F., *Les médailleurs français..., op. cit.*, t. 1, p. 397.
[192] Poullain H., Relation de Me Henry Poullain..., *op. cit.*, p. 335.
[193] Mazerolle F., *Les médailleurs français..., op. cit.*, t. 1, p. 395.
Brand J. D., Scissel and swarf, *op. cit.*, p. 87-98.
[194] Anonyme, *Mémoire sur la fabrication..., op. cit.*, n. p.
[195] Vitrail de la ville de Strasbourg, 1582, Collection de la Monnaie de Paris.
Bompaire M. *et al.*, *Numismatique médiévale..., op. cit.*, t. 7, p. 476-480.
[196] Archivolte du portail de l'église de Saint-Jacques de Carrion de los Condes, Espagne, vers 1180
Fresque représentant un monnayeur dans l'église Sainte-Barbe de Kutna Hora, République Tchèque, 1463.
Vitrail de Werner Zentgraf, maître de la Monnaie de Schaffouse, 1563, Musée national Suisse, Zurich, LM 40 198.
Geiger H.-U., Eine unbekannte Glasscheibe..., *op. cit.*, p. 11-114.
Gravure du XVI^{e} siècle représentant l'intérieur d'un atelier monétaire conservée au musée Herzog Anton Ulrich de Braunschweig dans La Guardia R., Masseroli S., Tibiletti T., ed., *Atti del*

s'explique certainement par le caractère répétitif du monnayage qui demande la mise en forme d'un très grand nombre d'objets. A titre d'exemple, M. Bompaire relève qu'en 1420, un ouvrier de l'atelier de Crémieu pouvait mettre en forme une moyenne journalière de 1800 flans qui a même atteint ponctuellement 4000 exemplaires lorsque deux monnayeurs se sont vus confier une double charge de travail[197].

D. Blanchiment des flans

Morphologiquement, après leur mise en forme, il ne manque que la frappe pour que les flans deviennent des monnaies. Cependant, une opération doit précéder cette dernière afin d'améliorer leur aspect esthétique. Après un ultime recuit qui doit notamment garantir que les monnaies ne se fissurent pas lors de leur frappe, les flans sont *blanchis*[198]. La finalité de ce traitement est en premier lieu d'éliminer les crasses et les oxydes qui auront été accumulés à la surface des ébauches au cours de leur mise en forme. Cependant, les réactions en jeu ont également la particularité de mettre en évidence, lorsqu'il est présent, l'argent contenu dans les alliages travaillés. Grâce à un enrichissement de surface, les flans paraissent plus argentés que leur titre en métal blanc ne permet de l'espérer. C'est notamment cette dernière conséquence du procédé qui lui a donné son nom.

Tout comme les opérations de fonderie précédemment présentées, ce traitement des flans en préalable à leur frappe, n'a pas connu de modification lors de l'introduction progressive des nouveaux instruments monétaires à partir de 1645. Les sources s'accordent sur ce point. Il y a eu une transition entre deux procédés de blanchiment différents et bien que difficile à dater, elle prend place durant la période du monnayage au marteau.

Dans une présentation chronologique, c'est le blanchiment à l'*eau forte* qui a été la première finition des flans avant frappe[199]. Selon J. Boizard, l'eau forte est une solution contenant de l'esprit de nitre et du vitriol, en d'autres termes, il s'agit

---

convegno internazionale : I luoghi della moneta. Le sedi delle zecche dall'antichità all'età moderna, Milan, Italie, Universita degli Studi, 1999, p. 15.
Bompaire M. *et al.*, *Numismatique médiévale..., op. cit.*, t. 7, p. 476-480.
[197] *Ibidem*, t. 7, p. 491.
[198] Estienne H., *Project du livre intitulé..., op. cit.*, p. 106.
Poullain H., Relation de Me Henry Poullain..., *op. cit.*, p. 333.
De Thumery J., Epreuves contradictoires..., *op. cit.*, p. 342.
De Bettange M., *Traité des monoyes..., op. cit.*, t. 1, p. 5.
Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 73.
Anonyme, *Mémoire sur la fabrication..., op. cit.*, n. p.
[199] Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 74.

d'acide nitrique et sulfurique[200]. Ce mélange permet *a priori* de dissoudre tous les métaux à l'exception de l'or[201]. Les flans étaient mis à tremper dans cette solution diluée d'eau. Une fois blanchis, ils étaient rincés et séchés. Les différents oxydes ainsi qu'une partie du cuivre de la surface des flans étaient éliminés par ce traitement. Cependant, la couche d'enrichissement en argent qui devait parallèlement résulter de cette opération, était également attaquée. Par ailleurs, les ébauches de monnaies pouvaient même devenir par force de dissolution de leur alliage, plus légères que leur masse réglementaire définie par ordonnances. C'est pour ces raisons qu'un nouveau procédé de blanchiment a été proposé[202].

La transition entre les deux traitements n'est cependant pas datée. Lorsque J. Boizard décrit dans son traité, l'utilisation de l'eau forte, elle a déjà été abandonnée depuis longtemps. C'est dans un livre de changeur, daté par M. Bompaire du milieu du XV^{e} siècle, qu'il est fait une première mention du traitement assimilable à celui qui a succédé au mélange d'acide nitrique et sulfurique[203]. Et c'est dans le *Traité des monoyes…* de J. Boizard, mais principalement dans *Mémoire sur la fabrication des sols de billon...*, que se trouve présenté le procédé qui succède à l'usage du vitriol et de l'esprit de nitre[204].

En reconnaissant, que l'utilisation de l'eau forte avait comme contrepartie de diminuer la masse des monnaies en leur soutirant également une part de l'argent qu'elles contenaient, les monétaires ont cherché à recourir à un réactif moins corrosif. Ils ont pour cela choisi d'utiliser une solution d'eau, de sel de mer et de gravelle[205]. Ce dernier composé est un sous-produit de la fermentation alcoolique.

---

[200] *Ibidem*, p.103.
Guineau B., *Glossaire des matériaux de la couleur et des termes techniques employés dans les recettes de couleurs anciennes*, édité par Pouille E. *et al.*, Turnhout, Belgique, Brepols, coll. « De diversis artibus », t. 73, 2005, p. 292 et 773.
[201] Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p.103.
[202] *Ibidem*, p. 74.
Anonyme, *Mémoire sur la fabrication..., op. cit.*, n. p.
[203] Anonyme, Bibliothèque nationale de France, Nouv. Acq. Fr. 471, n. p.
De Thoisy M., *Manuscrits "Poullain", tome 1*, Monnaie de Paris, ms. 55, f° 52r°-57v°, n. p.
Bompaire M., Un exemple de livre de changeur français du XVe siècle, le manuscrit Bibl. nat. de Fr., Nouv. Acq. Fr. 471, dans *Colloque International : Culture monétaire, aspects mathématiques, technologiques et marchands (XIIIe-XVIe siècle)*, Orléans et Paris, 2004, à paraître.
[204] Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 74.
Anonyme, *Mémoire sur la fabrication..., op. cit.*, n. p.
[205] Ce composé est également répertorié sous le nom d'arguel, d'argol, d'arguant, de bouture, de cristal de tartre, de joynsteen, de lie de vin, de pierre de vin (*vinei lapidis*), de tartre de Montpellier ou gravelé, de tartre rouge ou brut.
Théophile *et al.*, *Essais sur divers arts..., op. cit.*, p. 145, 168, 228.

Il s'agit d'un solide cristallisé, composé en majorité de bitartrate de potassium ou de sodium. Ce dernier, moins soluble dans l'alcool que dans l'eau, va précipiter dans les fûts de vieillissement de vin.

Concernant la question des proportions de chacun des produits nécessaires à la réaction, les données les plus complètes sont relevées dans le *Mémoire sur la fabrication des sols de billon...*, qui fait l'inventaire de toutes les recettes retenues dans les ateliers monétaires français alors en fonctionnement[206]. La principale information qui se dégage de ce recensement, est que les quantités et les rapports entre les constituants du mélange, ne sont pas des paramètres critiques du traitement (Tableau 2).

Ville	Gravelle (livres)	Sel (livres)	Gravelle /Sel	Marcs (kg) de flans traités	% de perte pour les flans
Paris	6	12	0,5	100 (25)	-
Troyes	6	12	0,5	100 (25)	2,5
Riom	10	15	0,67	100 (25)	2
Limoges	14	20	0,7	100 (25)	4
Poitiers	1,25	1,5	0,83	150 (38)	3 ou plus
Strasbourg	12	13	0,92	200 (50)	6
Reims	3	3	1	100 (25)	4,5
Tours	6	6	1	100 (25)	2 à 3
Bordeaux	6	6	1	100 (25)	3 à 4
Metz	7	7	1	100 (25)	3
Nantes	16,5	16,5	1	300 (75)	3
Montpellier	12	9	1,33	100 (25)	4
Amiens	18	12	1,5	150 (38)	3,5 à 4
Aix	18	12	1,5	100 (25)	3 à 4
Perpignan	10	6	1,67	300 (75)	2
Rouen	12	6	2	100 (25)	3,5
Grenoble	17	8,5	2	100 (25)	plus de 8
Lyon	10	4	2,5	300 (75)	2,5 à 3
Lille	6	2	3	-	2,5 à 3
Toulouse	2,5	0,5	5	100 (25)	1,5
Pau	lie de vin	3,25	-	100 (25)	4

Tableau 2 - Inventaire des différentes proportions de sel et de gravelle, extrait du *Mémoire sur la fabrication des sols de billon...*[207].

Agricola G., *De Re Metallica*, édité par Hoover H. *et al.*, New York, Etats Unis, Courier Dover Publications, 1950, traduit de l'édition en latin de 1556, p. 221.
Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 73.
Anonyme, *Mémoire sur la fabrication..., op. cit.*, n. p.
Guineau B., *Glossaire des matériaux..., op. cit.*, t. 73, p. 254, 353, 354, 698-700.
Bompaire M., Un exemple de livre..., *op. cit.*, à paraître.
[206] Anonyme, *Mémoire sur la fabrication..., op. cit.*, n. p.
[207] *Id*.

Pour les vingt-et-une fabriques dont les recettes suivies sont mentionnées, il existe presque autant de combinaisons, soit dix-huit proportions de sel et de gravelle différentes. Par ailleurs, l'estimation des rapports de gravelle ramenée à la quantité de sel, ne montre pas non plus une tendance préférentielle. Les deux composés peuvent être mélangés en proportions équivalentes tout comme la gravelle sera majoritaire dans certaines fabriques et minoritaire dans d'autres. Chacun des ateliers apparaît comme responsable de son propre mélange, dans le *Mémoire sur la fabrication des sols de billon...*, il est fait mention des différents essais réalisés au sein de quelques-unes des Monnaies[208].

Dans ce mémoire, il apparaît que le prix des réactifs est également l'une des variables intervenant pour une grande part dans les définitions des bains de blanchiment : « *Dans les monoyes des provinces*, […] *chacun a cherché à faire le blanchiment avec le plus d'économie…* ».

Enfin, dans aucun des textes consultés, le volume d'eau à ajouter à la solution n'est précisément évalué. Il n'est pas possible de connaître la concentration des réactifs dans le bain de blanchiment…

Le blanchiment se déroule dans une pièce différente du lieu de mise en forme[209]. C'est par ailleurs à cette occasion que les ébauches subissent leur dernier recuit[210]. Une fois refroidies suite à ce traitement thermique, elles sont placées dans un récipient, appelé *bouilloir*, où est maintenue en ébullition la solution de blanchiment. Il est nécessaire de remuer régulièrement le mélange. Après un premier bain, l'opération peut être mise en œuvre une seconde fois pour achever les réactions. C'est ce qui est appelé, *donner le bouillitoire*[211]. Le paramètre qui permet de décider de la fin du blanchiment des flans, est l'aspect de ces derniers. Ils doivent pour ceux qui contiennent de l'argent, être devenus complètement blancs[212]. La solution est ensuite passée au crible pour ne récupérer que les ébauches blanchies. Elles sont ensuite lavées avec de l'eau et frottées avec un tissu

---

[208] *Id*.

[209] Poullain H., Relation de Me Henry Poullain..., *op. cit.*, p. 333.
Pour J. Boizard, les flans sont apportés dans un lieu appelé le blanchiment : Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 73.
Anonyme, *Mémoire sur la fabrication..., op. cit.*, n. p.

[210] De Thumery J., Epreuves contradictoires..., *op. cit.*, p. 342.
Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 73.
Anonyme, *Mémoire sur la fabrication..., op. cit.*, n. p.

[211] Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 73.
Anonyme, *Mémoire sur la fabrication..., op. cit.*, n. p.

[212] Anonyme, *Nouv. Acq. Fr. 471*, *op. cit.*
De Thoisy M., *Manuscrits "Poullain"..., op. cit.*
Bompaire M., Un exemple de livre..., *op. cit.*, à paraître.
Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 73.
Anonyme, *Mémoire sur la fabrication..., op. cit.*, n. p.

pour éliminer la gravelle qui a pu se déposer sur leur surface, pour enfin être séchées au-dessus d'un feu de braises[213]. Il faut remarquer ici qu'il n'est en aucun cas fait mention d'une couleur particulièrement argentée de la surface.

A partir des différentes présentations faites de ce procédé original, il est difficile de mettre en évidence dans quelle mesure les monnayeurs étaient maîtres de leur technique. Quelles étaient leurs connaissances des réactions en jeux ? Cette réflexion devra être développée à partir de l'étude du *corpus* archéologique mais également par la mise en œuvre de reconstitutions expérimentales permettant de définir les mécanismes réactionnels impliqués.

L'étude des textes qui rendent compte de cette opération, suggère cependant une certaine lucidité des ouvriers quant aux phénomènes impliqués. En témoigne en premier lieu le changement de réactif employé afin de limiter les pertes en argent : passant de l'eau forte, solution contenant un oxydant fort, les ions nitrates, au mélange de gravelle et de sel[214]. Le blanchiment est par ailleurs reconnu comme résultant d'une attaque préférentielle du cuivre. Cette dernière implique une perte métallique qui est connue des monétaires puisqu'évaluée et assimilée aux dépenses de fabrication. C'est notamment ce dont témoigne le compte d'un atelier monétaire de 1338[215]. De même, le *Mémoire sur la fabrication des sols de billon...*, ne donne pas seulement l'inventaire des recettes de bain utilisées dans les ateliers monétaires du milieu du XVIII^{e} siècle, il liste parallèlement les quantités de déchets, en d'autres termes les pertes de métal résultant des différents traitements (Tableau 2).

Cette opération au cours de laquelle la masse des flans va diminuer, est mise en place après que les ouvriers aient rendu leur brève. La pesée de leur production ayant lieu au préalable, ils ne peuvent pas être tenus pour responsables de la perte de matière qui résulte de ce traitement de surface.

Plusieurs mentions relevées dans le *Mémoire sur la fabrication des sols de billon...*, font également état de l'influence des recuits subis par les flans au cours de leur mise en forme, sur la qualité du résultat obtenu après le bain de blanchiment[216]. Il ne faut pas trop chauffer les ébauches qui risquent de « s'écailler » et de ne pas être bien blanchies par la suite. C'est dans ce même texte

[213] Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 73.
Anonyme, *Mémoire sur la fabrication..., op. cit.*, n. p.
[214] Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 74.
De Thumery J., Epreuves contradictoires..., *op. cit.*, p. 342.
[215] Bompaire M. *et al.*, *Numismatique médiévale..., op. cit.*, t. 7, p. 484.
[216] Anonyme, *Mémoire sur la fabrication..., op. cit.*, n. p.

que le procédé retenu dans la Monnaie de Poitiers apparaît comme particulier[217]. Il attribue une grande importance au recuit, dans la mesure où le premier bain de blanchiment des flans est suivi d'un ultime traitement thermique avant qu'ils soient une dernière fois blanchis.

Enfin, les instruments utilisés sont très caractéristiques. Que ce soit la bouilloire, dans laquelle sont mis à blanchir les flans, ou le crible utilisé pour les récupérer une fois traités ainsi que les différentes pelles et crochets nécessaires pour brasser le mélange réactionnel, tous sont en cuivre[218]. Le recours à une spatule en bois est également indiqué. En revanche, il n'est jamais fait mention d'un quelconque outillage en fer, alors que ce métal se rencontre tout au long des mises en forme qui précédent, ne serait-ce que les poêles dans lesquelles sont réalisés les recuits. Ces précautions indiquent certainement que l'utilisation d'instruments de fer doit avoir des conséquences négatives sur les réactions mises en jeu. Il s'agit de phénomènes électrochimiques dont il faudra tenir compte dans les futures discussions.

E. Frappe au marteau

Après avoir été décrassés et blanchis, les flans peuvent être apportés aux ouvriers monnayeurs pour être empreints des motifs monétaires et devenir finalement des monnaies. Le principe de cette opération est de battre, ou frapper, avec un marteau chacune des pièces d'alliage entre les *coins monétaires*. Ce sont ces matrices d'acier trempé sur lesquelles sont gravées, ou poinçonnées en creux, les figures et légendes qui doivent être imprimées en plein sur les espèces fabriquées[219].

Le maillet de fer utilisé dans cet ultime martelage n'est pas nécessairement d'une masse importante. H. Poullain estime que celui utilisé par les monnayeurs de Paris pèse seulement 1,5 kg[220]. Les coins quant à eux sont au nombre de deux. Dans le ceppeau, cette souche de bois scellée au sol à l'extrémité d'un banc de monnayeur, est enfoncée la *pile* qui est fixe. C'est le coin dormant. La seconde matrice est à l'inverse mobile, il s'agit du *trousseau*. Lors de la frappe, il faut

[217] *Ibidem*, n. p.
[218] Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 73.
Anonyme, *Mémoire sur la fabrication..., op. cit.*, n. p.
De Bettange M., *Traité des monoyes..., op. cit.*, t. 1, p. 5.
[219] Estienne H., *Project du livre intitulé..., op. cit.*, p. 106.
Poullain H., Relation de Me Henry Poullain..., *op. cit.*, p. 333.
De Thumery J., Epreuves contradictoires..., *op. cit.*, p. 342.
Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 82-83.
[220] Trois livres.
Poullain H., Relation de Me Henry Poullain..., *op. cit.*, p. 334.

marquer avec le trousseau et la pile le flan qui est placé sur cette dernière. Les auteurs qui décrivent cette opération s'accordent pour relever qu'elle est faite par un ouvrier assis qui peut donner entre deux et quatre coups de marteau pour battre ses monnaies[221].

Dans la mesure où la frappe se fait en plusieurs fois, il est obligatoire pour le monnayeur de ne pas décaler son trousseau, ni le flan qu'il est en train de marquer afin de ne pas doubler les motifs imprimés. Toutefois, si par accident, l'ébauche se trouve déplacée ou qu'à la suite d'une frappe le monnayeur estime que sa monnaie n'est pas assez marquée, il peut essayer de la *rengréner* avant de la battre une nouvelle fois[222]. Il va chercher à la replacer au même endroit entre ses matrices en s'aidant des motifs déjà esquissés qui doivent se replacer dans les reliefs gravés. Il existe cependant des exemples, bien connus des numismates, de monnaies présentant des figures dédoublées. Parce qu'il n'aura pas remarqué le décalage de sa pièce, ou qu'il l'aura mal rengrénée avant une nouvelle frappe, un monnayeur peut obtenir une monnaie tréflée qui présente plusieurs motifs décalés résultant des multiples marquages[223].

Le nombre de coups de marteau dépend en premier lieu de la dureté de l'alliage monnayé laquelle est en partie fonction de sa composition. Or, compte tenu des nombreuses variétés de mélanges qui ont été prescrites par les ordonnances dans la fabrication de monnaie, il est impossible de supposer *a priori* de la facilité d'une frappe. Toutefois, le billon lorsqu'il contient peu d'argent, est décrit comme étant un matériau particulièrement dur et difficile à mettre en forme[224]. Il est à ce titre responsable d'une usure plus rapide des coins monétaires utilisés dans sa frappe[225].

Bien que le trousseau soit mobile, il est parfois observé sur certains types monétaires, une correspondance entre les deux faces marquées d'une monnaie. C'est ce qui est défini par l'axe des coins[226]. En effet, le droit et le revers d'une pièce ont parfois une orientation préférentielle. Dans ce cas, le monnayeur aura veillé à toujours placer ses coins de la même manière en regard l'un de l'autre. Peu de remarques significatives ont été faites à ce sujet à partir des espèces médiévales.

---

[221] Vitrail de la ville de Strasbourg, 1582, Collection de la Monnaie de Paris.
Id.
Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 82.
Bompaire M. *et al.*, *Numismatique médiévale..., op. cit.*, t. 7, p. 476-480.
[222] Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 83.
De Bettange M., *Traité des monoyes..., op. cit.*, t. 1, p. 24.
[223] Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 83.
[224] Anonyme, *Mémoire sur la fabrication..., op. cit.*, n. p.
[225] Dumas F., Sur la frappe monétaire au XV^{e} siècle, *Bulletin de la Société Française de Numismatique*, vol. 51, n° 4, 1996, p. 75.
[226] Bompaire M. *et al.*, *Numismatique médiévale..., op. cit.*, t. 7, p. 83.

Lorsqu'elles sont mises en évidence, il faut certainement voir dans ces régularités, une habitude de frappe, peut-être associée à un atelier donné, car il n'y a à l'époque considérée, aucune consigne particulière de la part de l'autorité émettrice[227].

Du point de vue de la fabrication des matrices, les motifs monétaires sont préalablement gravés ou matricés dans un acier non encore durci. Il est par ailleurs nécessaire de produire plusieurs coins identiques d'un même type monétaire, afin de pouvoir les remplacer suivant leur usure croissante. Compte tenu de la redondance de certains motifs[228], les graveurs ont parfois recours à des poinçons de motifs gravés en pleins pour les imprimer en creux sur les coins qu'ils préparent. Une fois que les figures, les légendes et les multiples différents nécessaires aux contrôles, sont imprimés à froid dans l'acier à monnayer, cette surface de frappe est chauffée à haute température pour être ensuite trempée. Ainsi durcis par ce traitement, les motifs sont moins rapidement déformés lors des percutions répétées contre les flans. En outre, si un coin témoigne au cours de son utilisation d'une bonne tenue mécanique alors que sa surface gravée présente une usure importante qui nuit à la qualité des motifs imprimés sur les monnaies, il est parfois restauré. Dans la mesure où il est possible de regraver les figures les plus détériorées, il n'est pas nécessaire de fabriquer intégralement une nouvelle matrice.

Ce sont à l'origine des orfèvres qui étaient chargés de la production des coins monétaires par les maîtres particuliers des ateliers. A partir de 1547, une ordonnance amorce une centralisation de la production au niveau de toute la France, avec la nomination d'un *tailleur* général[229]. Il devient le seul responsable de la fabrication des différents poinçons utilisés par les tailleurs particuliers au sein de chaque Monnaie.

Une fois monnayées, les pièces sont rendues aux gardes chargés d'en effectuer la délivrance. Ils doivent toutefois, comme il a été présenté plus haut, effectuer les derniers contrôles des monnaies avant d'autoriser leur émission. Par un échantillonnage dont la fréquence augmente avec la valeur libératoire des espèces, les représentants de l'autorité émettrice vérifient la qualité du monnayage produit,

[227] *Ibidem*, p. 84.
[228] Les lettres notamment.
[229] Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 80.

notamment en relevant les paramètres légaux que sont la masse et le titre en métal précieux des pièces.

Une observation générale des monnaies médiévales permet de constater que leurs imperfections semblent augmenter à mesure que leur valeur diminue[230]. Cette constatation va d'ailleurs à l'encontre des règlements monétaires. Dans un entretien qui a suivi son épreuve de 1617, N. Briot affirme que les monnayeurs travaillant au marteau produisent des pièces « *les unes demi rondes, les autres triangulaires, autres carrées et toutes cornues* »[231]. Il faut toutefois rappeler que le tailleur général portait peu de respect aux monnayeurs[232]. Ses propos pouvaient *a priori* être légèrement exagérés. Cependant, plusieurs exemples de monnaies témoignent du bien-fondé de cette affirmation. A titre d'exemple, il suffit de considérer le trésor de florettes de Maisonnais. Ces dernières pourtant frappées dans des ateliers différents, présentent des morphologies correspondant pour la plupart à des étapes de mise en forme peu avancées[233]. De même l'observation d'un double tournois délivré par l'atelier de La Rochelle en 1593 offre un témoignage similaire (Figure 4).

Figure 4 - Double tournois de La Rochelle, 1593[234].

Cette pièce de cuivre présente une morphologie angulaire, très éloignée de celle qui caractérise normalement une monnaie. Par ailleurs, une telle forme n'est pas la conséquence d'un potentiel rognage. Cette opération frauduleuse qui vise à collecter des métaux précieux en découpant des fragments de monnaies, ne se justifie pas ici étant donné qu'il s'agit d'une espèce de cuivre pur. Ce denier tournois a effectivement été émis ainsi par l'atelier de La Rochelle. La surface offerte pour imprimer les figures monétaires, n'est en outre pas suffisante pour que la légende y soit intégralement marquée. D'un autre côté, cette espèce a

[230] Brisson B. *et al.*, eds., *Les basiliques..., op. cit.*, p. 956.
[231] Mazerolle F., *Les médailleurs français..., op. cit.*, t. 1, p. 395.
[232] *Ibidem*, p. 309.
[233] Clairand A., Le trésor de Maisonnais, dans Cavaillès M. *et al.*, eds., *Argent caché..., et retrouvé, les trésors monétaires découverts en Deux-Sèvres,* Parthenay, Musée municipal de Parthenay, 2007, p. 132-134.
[234] Photo Compagnie Générale de Bourse.

certainement été délivrée car ses 3,3 g sont tout à fait en accord avec la masse légale de 3,1 g de ce type monétaire et qu'elle ne contient pas de métal précieux.

Un tel constat doit certainement être mis en relation avec le coup de fabrication qui définit le bénéfice des maîtres d'atelier. Pour les monnaies rapportant le moins et afin d'augmenter leur gain ils pouvaient encourager leur ouvriers à produire plus d'espèces au détriment de leur qualités esthétique. Les excès étant alors dans une certaine mesure prévenus par le contrôle des gardes. C'est pourquoi, les écarts se constatent pour les monnaies de faible valeur.

F. Le retraitement des déchets

Le monnayage est une activité métallurgique qui, de par le coût élevé des matières premières qu'elle transforme, impose la mise en place de contraintes particulières au sein de la fabrique. Dans la présentation qui vient d'être faite de la chaîne opératoire, plusieurs consignes respectées par les monnayeurs ont permis d'évoquer la volonté générale de minimiser et de récupérer les différents déchets produits.

Dès les premières opérations de fonderie, l'organisation du travail se trouve conditionnée par les retraitements ultérieurs qui doivent être mis en place. Au Moyen Age, l'affinage de par cémentation l'or est maîtrisé mais les métaux qui en sont extraits ne sont pas récupérés. Si de l'argent venait à être allié à ce métal précieux, les métallurgistes ne connaissent pas de procédés qui leur auraient permis d'extraire le métal blanc. Lors de la préparation des lames, il est imposé aux fondeurs de séparer physiquement les métallurgies de l'or et de l'argent[235]. Cette consigne permet d'éviter les mélanges accidentels de ces deux métaux. Ce n'est que plus tard, avec le développement de la chimie moderne qu'il est devenu possible de récupérer l'argent contenu dans l'or[236]. Toutefois, le coût supplémentaire qu'impose une telle opération par ailleurs complexe, a encouragé les monétaires à maintenir la séparation qu'ils avaient mise en place au cours de leurs différentes métallurgies des précieux[237].

De même, lorsque les ouvriers rendent leurs brèves, ils ont obligation de restituer les déchets qu'ils ont produits. Cette démarche permet dans un premier temps aux gardes de vérifier qu'il n'y a pas de détournement des métaux. Mais la finalité principale est évidemment la récupération des chutes de découpe pour qu'elles soient de nouveau traitées en tant que matières premières. Même si les quotas auxquels sont soumis les monnayeurs doivent d'un autre côté garantir

[235] cf. La chaîne opératoire selon les sources : Les opérations de fonderie, p. 75.
[236] Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 100-106.
[237] De Bettange M., *Traité des monoyes..., op. cit.*, t. 1, p. 117.

qu'une mise en forme bâclée n'augmente pas inutilement les dépenses du maître de l'atelier à cause des fontes supplémentaires nécessaires au retraitement de trop de déchets[238].

Par ailleurs, il faut rappeler que lors de l'évaluation de la brève, la quantité de métal effectivement perdue par les ouvriers au cours de leur travail est également estimée. La part de cette perte est soumise à des règlements qui la limitent à 0,6 % de la masse de métal monnayé. Cependant, il ne s'agit pas encore réellement d'une perte nette du point de vue du maître particulier qui est responsable de l'atelier. De la quantité des pertes évaluées lors de la remise de la brève par les monétaires, il faut retrancher ce qui est récupéré lors du traitement des *terres de lavure* dont il va être question maintenant.

Certaines contraintes imposées aux fondeurs lors de la préparation des lames à partir des alliages monétaires, doivent prévenir une partie des pertes accidentelles de métal au cours des différentes opérations. Le fait, par exemple, de ne pas remplir complètement les creusets participe de cette volonté. Cependant, malgré ces dispositions, il peut tout de même y avoir des projections de métal fondu hors du creuset dans le foyer ou lors des coulées[239]. Il est ainsi demandé aux fondeurs de récupérer les gouttes d'alliages qu'ils peuvent trouver autour de leur fourneau[240]. Toutefois, cette méthode de collecte manuelle a une limite. Elle définit obligatoirement un compromis. Si le temps passé à rassembler les projections augmente rapidement avec la diminution de la taille de ces dernières, le gain à espérer de ce travail suit d'un autre côté une progression de moins en moins rapide. En d'autres termes, cette technique perd rapidement sa rentabilité.

De même, le métal en fusion peut avoir tendance à former des dépôts parfois importants sur les surfaces avec lesquelles il est en contact. Il s'agit en particulier des creusets dans lesquels sont fondus les alliages monétaires, et aussi, dans une proportion différente, des couvercles préconisés lors des fontes.

C'est pour ces raisons, que les différents éléments qui se trouvent au sein des fabriques monétaires pouvant contenir des restes de métaux précieux involontairement perdus ou déposés, sont collectés. Il faut compter dans cet ensemble, les creusets céramiques ainsi que les couvercles jugés inutilisables, les briques et les parois de four ou les scories qui s'y forment, mais également les balayures des sols d'atelier ainsi que les cendres des foyers. Une fois broyé, le

[238] cf. La chaîne opératoire selon les sources : Mise en forme au marteau, p. 84.
[239] Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 107.
De Bettange M., *Traité des monoyes..., op. cit.*, t. 1, p. 15.
[240] *Ibidem*, p. 109.

mélange obtenu constitue ce que J. Boizard appelle les terres de lavures qualifiées parallèlement de *vieilles terres* par M. de Bettange[241].

Afin d'extraire les métaux contenus dans ces terres, deux étapes se succèdent au sein des ateliers monétaires. La première est relativement simple puisqu'il s'agit d'une séparation mécanique. A l'image de ce qui est mis en place lors des opérations minéralurgiques qui se retrouvent en métallurgie extractive, le premier traitement subi par les terres de lavure est une concentration gravimétrique sous l'action d'un fluide. En ajoutant de l'eau au mélange considéré et en le versant progressivement, celle-ci entraîne les particules selon un compromis entre leur volume et leur masse[242]. Pour tous les matériaux, ces deux paramètres sont reliés par le terme de masse volumique qui leur est propre. En définitive, pour une même taille de référence, ce sont les éléments les moins denses qui sont au fur et à mesure emportés par le liquide. A l'inverse, les composés métalliques qui doivent être récupérés, sont peu à peu concentrés compte tenu de leurs masses volumiques élevées. La part de matière conservée à la fin de ce traitement représente un équilibre établi entre les différents composés. Ainsi, les métaux ne sont pas encore complètement séparés d'autres matériaux n'offrant aucun intérêt de récupération (constituants des creusets ou des parois de four).

Pour s'affranchir de cette dernière part des terres de lavure, une seconde séparation doit être mise en place. Chez J. Boizard et M. de Bettange, elle met en jeu une réaction chimique. Le mélange traité est introduit dans un moulin de fer avec de l'eau et du mercure. Celui-ci, tout au long du broyage va progressivement former un amalgame avec les particules métalliques qui doivent être recyclées[243]. Dans le *Traité des monoyes...*, cette opération apparaît comme très longue[244].

Lorsque le mercure a pu s'amalgamer avec toutes les parties métalliques[245], il est facile de séparer cette phase très dense, des parties minérales qui ne s'y incorporent pas. La masse récupérée est ensuite filtrée dans une peau de chamois ou à travers une toile pour extraire le mercure qui n'est pas allié. Pour achever la

[241] Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 107.
Anonyme, *Mémoire sur la fabrication..., op. cit.*, n. p.
De Bettange M., *Traité des monoyes..., op. cit.*, t. 1, p. 28, 117.
[242] Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 107.
De Bettange M., *Traité des monoyes..., op. cit.*, t. 1, p. 117.
[243] Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 108.
De Bettange M., *Traité des monoyes..., op. cit.*, t. 1, p. 117-120.
[244] Une quatrième fois est exceptionnelle. Elle n'est nécessaire que si elle doit permettre d'espérer un gain plus important que la dépense de la paye des ouvriers qu'elle occupe.
Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 108.
[245] Il est possible d'en rajouter au mélange au cours du traitement s'il y a beaucoup de particules métalliques.

séparation, l'amalgame est porté à haute température. L'utilisation d'une cornue permet de récupérer d'une part les métaux monnayables et d'autre part le métal liquide qui aura été le vecteur de la séparation. Les propriétés thermodynamiques de ce dernier sont telles qu'il se vaporise à des températures relativement basses alors que les autres métaux auxquels il s'est amalgamé sont encore solides. Une fois en phase gazeuse, il est liquéfié dans la zone de condensation de la cornue. Ainsi récupéré, il est à nouveau utilisable[246]. Cette méthode de traitement des lavures a une conséquence parallèle intéressante. En effet, le cuivre utilisé dans le monnayage est présent dans les terres de lavure. Il pourrait former un amalgame avec le mercure mais son oxydation rapide durant le processus l'en empêche[247]. L'or et l'argent récupérés par ce procédé se trouvent ainsi affinés, c'est-à-dire à un titre plus élevé que celui auquel ils se trouvaient initialement[248]. Ils sont de nouveau utilisables comme matière première dans le monnayage.

Chronologiquement un texte plus tardif que ceux qui viennent d'être présentés rend compte d'un second procédé utilisé dans le traitement des terres de lavures. Dans un manuscrit du XVIII[e] siècle, Delaguerre alors affineur de l'atelier monétaire de Strasbourg présente différents procédés qu'il met en pratique[249]. Dans un paragraphe intitulé « *Opération pour fondre les crasses*[250]*, terres, cendres, laveurs provenant des fonderies ou autres travaux* », le monétaire évoque la possibilité de traiter les déchets collectés par une opération de fonderie. Dans sa description, elle paraît plus simple à mettre en œuvre que le traitement précédemment exposé, faisant intervenir une amalgamation. En effet, la voie métallurgique retenue ici, doit permettre de regrouper dans une seule phase métallique liquide toutes les particules de métal auparavant dispersées dans l'ensemble des déchets. C'est une séparation au cours de laquelle la phase minérale fondue forme une scorie, moins dense que le métal en fusion sur lequel elle surnage. Pour aider à la fonte du mélange, l'affineur indique par ailleurs l'utilisation de matériaux qu'il faut qualifier de *fondants*. Il s'agit de chaux et de différents déchets d'affinage de l'argent, composés pour une grande part d'oxyde de plomb[251]. Une fois coulés, les monétaires peuvent facilement séparer les

[246] *Ibidem*, p. 109.
[247] Le cuivre se réduit en crasses.
Ibid., p. 108.
[248] *Ibid.*, p. 109.
[249] Delaguerre, Bibliothèque nationale de France, Cabinet des Médailles, Rés. ms. 17004 PRI 8°, retranscription Clairand A., communication personnelle, n. p.
[250] Déchets de fonderie.
[251] L'affineur relève l'utilisation de *glette* et de *casse*. Le premier des deux fondants, se compose des oxydes de plomb formés au cours des opérations d'affinage de l'argent. Quant à la casse, c'est le nom donné à la sole des fourneaux utilisés dans ce même traitement et qui a la propriété de

différents constituants et notamment la masse métallique représentant un alliage de toutes les particules métalliques perdues au sein de l'atelier au cours de la collecte des terres de lavure. Après avoir été analysé par l'essayeur de la fabrique, il est de nouveau introduit dans le monnayage avec d'autres matières premières.

Compte tenu des descriptions restreintes, disponibles dans les textes monétaires, des opérations de récupération des métaux précieux, il est difficile de définir si les deux procédés qui viennent d'être présentés se sont succédé ou s'ils ont été utilisés de façon indépendante et parallèle. La simplicité de la séparation métallurgique se voit dans une certaine mesure contrebalancée par l'efficacité du traitement à base de mercure. Par ailleurs, ce dernier contribue parallèlement à l'affinage des métaux.

Enfin, pour les creusets de fer également utilisés dans le monnayage, la démarche n'est pas très différente de celle qui vient d'être décrite. Finalement, c'est l'opération de broyage des terres qui doit dans ce cas être remplacée, la fin du traitement n'étant pas modifiée. Afin de récupérer la plupart des dépôts métalliques qui se déposent à leur surface au cours de leur fonctionnement, ces creusets doivent être battus. Une fois qu'ils sont déclarés inutilisables, ils sont chauffés sur un fourneau pour être ensuite martelés. De cette opération résulte une exfoliation d'écailles de fer dont certaines présentent des résidus de métaux monnayés[252]. Ces derniers sont ensuite traités de la même manière que les terres de lavures.

III. Remarques sur la chaîne opératoire réglementaire du monnayage au marteau

Au terme de la présentation de cette chaîne opératoire de mise en forme de la monnaie au marteau et résumée sur la figure 5, il apparaît qu'une succession d'un très grand nombre d'opérations doit être mise en œuvre. Certaines d'entre elles demandent plus de travail que d'autres puisqu'elles obligent à traiter individuellement les nombreuses ébauches de monnaies[253]. En définitive, en comptant toutes les étapes qui doivent être effectuées, plusieurs fois pour la plupart, en suivant les ordonnances, la seule mise en forme des flans à partir des lames préalablement martelées comprend vingt-six manipulations de martelages ou de recuits.

---

participer à l'affinage en absorbant une partie de glettes formées. Elle contient donc également des quantités importantes de litharge.

[252] Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 68.
De Bettange M., *Traité des monoyes..., op. cit.*, t. 1, p. 13.

[253] Notamment lorsque les carreaux sont battus, ajustés, flatis ou eslaizés.

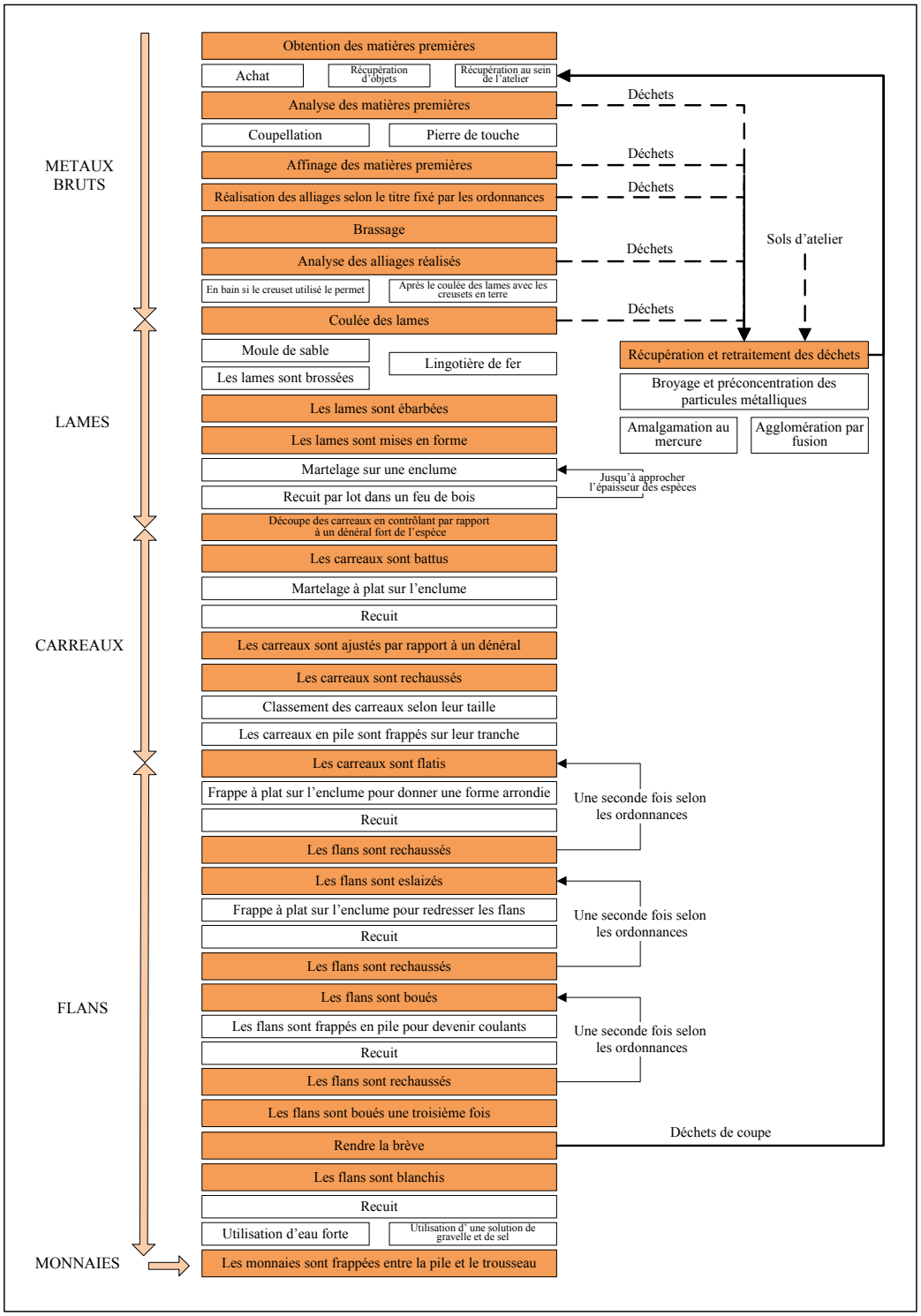


Figure 5 - La chaîne opératoire réglementaire de monnayage au marteau selon les sources monétaires.

Dans le procès-verbal d'épreuve de J. de Thumery qui a assisté à la même fabrication que celle décrite par H. Poullain, il n'est toutefois pas fait mention d'un aussi grand nombre d'opérations. Le Conseiller H. Poullain reconnaît également à la fin de sa relation que les ouvriers monnayeurs n'ont finalement pas respecté la totalité des ordonnances. Bien qu'ils aient mis en œuvre chacune des différentes opérations nécessaires à la préparation des flans, ils n'ont, en revanche, pas répété plusieurs fois ces dernières, alors que les règlements les y contraignent. Finalement, leur mise en forme se concentre en quatorze étapes. Un tel comportement des monnayeurs qui n'est par ailleurs pas caché à H. Poullain, prête à discussion. En particulier parce qu'il s'agit d'une épreuve contradictoire officielle et qu'en tant que Conseiller à la Cour des monnaie, H. Poullain est un représentant de l'autorité émettrice ayant fixé les consignes qui n'ont pas été respectées.

Le but de l'épreuve dont il est ici question, est d'évaluer la qualité du monnayage fait avec un nouvel appareillage proposé par le tailleur général N. Briot, en comparaison de celui fait par la technique du marteau alors en vigueur dans tous les ateliers monétaires français. Les instruments considérés sont censés produire plus facilement et rapidement, des monnaies de meilleure qualité. L'enjeu pour les monnayeurs qui défendent leur procédé, est d'abord de produire des espèces en conformité avec les ordonnances, c'est-à-dire respectant les critères légaux que sont le titre en métal précieux ainsi que la masse. Mais elles devaient *a priori* exhiber également un aspect général revendiquant l'excellence de leur fabrication sur celles produites par les nouvelles machines. Le paramètre temporel n'a pas de raison d'intervenir en première intention pour les monnayeurs. Dans un seul but d'accélérer leur fabrication, ils n'ont certainement pas renoncé à des étapes indispensables, risquant ainsi la production d'un monnayage de mauvaise qualité.

Ces comptes rendus étant dans une certaine mesure révélateurs de certaines pratiques, il est cependant difficile de formuler des hypothèses générales sur le travail au sein des ateliers monétaires à partir de ces données particulières. L'épreuve dont il est question ne peut pas être totalement assimilée au fonctionnement d'une fabrique dans des conditions habituelles. C'est pourquoi, cette discussion portant sur le respect des ordonnances ainsi que sur leurs implications sur la production monétaire sera développée par la suite à la lumière de la caractérisation d'objets archéologiques ainsi que de reconstitutions expérimentales.

Un autre point qu'il faut évoquer ici concerne l'organisation du monnayage au sein des ateliers monétaires. La définition de la chaîne opératoire à partir des sources monétaires permet de rendre compte du manque de précision propre à certaines étapes de la fabrication. L'épaisseur présentée par les lames avant d'être coupées en carreaux, constitue par exemple une donnée particulièrement incertaine. Selon les textes, ces barres d'alliages doivent être à peu près aussi épaisses que les espèces qui en résulteront. Or, une fois découpées, les ébauches subissent de nombreux martelages qui vont de nouveau les amincir. Celles-ci risquent de devenir trop fines. Une telle éventualité se voit cependant pondérée par le contrôle régulier au cours de leur mise en forme. Finalement, la masse et le diamètre de la monnaie fabriquée vont imposer son épaisseur finale.

De même, concernant les recuits que doivent réaliser régulièrement les ouvriers, les informations sont assez imprécises, notamment sur les durées et les conditions de traitement[254]. Il a été vu que ces omissions ne sont pas surprenantes. Les traitements doivent finalement être adaptés aux différents types d'alliages travaillés.

En définitive, les éléments qui viennent d'être évoqués constituent des degrés de liberté pour les ouvriers monétaires. Une fois définis pour une production précise, ces paramètres n'ont pas besoin d'être modifiés. Lors de la fabrication d'un nouveau type monétaire, la morphologie des flans produits ainsi que leur composition, sont généralement modifiés. Il est envisageable qu'une période d'adaptation soit nécessaire aux monnayeurs pour reconsidérer les conditions optimales de leur mise en forme. Considérant le monnayage au marteau, aucun des textes monétaires consultés n'a rendu compte d'une telle démarche. Nous n'avons donc aucune idée du temps d'adaptation d'un monnayeur à une nouvelle espèce.

Une telle démarche d'optimisation est toute de même décrite pour un autre monnayage que celui qui utilise le marteau. Et il est raisonnable de la transposer dans la chaîne opératoire médiévale. En 1617, lors de l'épreuve contradictoire de N. Briot, présentée plus haut, ce dernier réserve une partie du temps de sa fabrication pour faire plusieurs réglages[255]. Cette méthode est décrite seulement parce que le tailleur général se trouve confronté à la production de types monétaires qu'il ne connaît pas. Il doit notamment déterminer l'épaisseur optimale de ses lames, qui, une fois découpées à l'emporte-pièce permettront d'obtenir des flans de masse réglementaire. D'un autre côté, ces opérations ne sont pas mises en œuvre par les monnayeurs qui produisent parallèlement par la technologie du

[254] Les couleurs des braises, des creusets voire des parois, renseignaient les ouvriers sur les conditions de température à l'intérieur des fours.
[255] Poullain H., Relation de Me Henry Poullain..., *op. cit.*, p. 319-325.

marteau, des espèces équivalentes. Ils n'ont pas besoin d'y recourir s'agissant de pièces qu'ils ont l'habitude de fabriquer dans le cadre de leur travail quotidien. D'un point de vue général, il n'est jamais reproché à N. Briot d'avoir occupé une partie de son temps à la définition des paramètres de sa fabrication, et ce, même si ces opérations ont abouti à une production de déchets supplémentaires.

Finalement, la logique impliquant une période d'adaptation de la chaîne opératoire lors des changements de types monétaires est attestée à une époque où le monnayage au marteau est encore en vigueur. Mécanisation ou non, un temps d'adaptation apparaît comme nécessaire lors de changements d'espèces à produire.

L'étude qui sera présentée par la suite, doit permettre de définir la chaîne opératoire du monnayage au marteau telle qu'elle est mise en œuvre dans les ateliers monétaires officiels. Elle s'appuie pour cela sur la caractérisation archéométrique de deux *corpus* archéologiques. La part de l'expérimentation paléométallurgique est également importante dans la mesure où elle valide les hypothèses formulées lors de l'étude des objets archéologiques. D'autant qu'elle permet parallèlement de retrouver les gestes pratiqués qui ne se lisent pas directement dans la matière.

Partie 2. Le faux-monnayage au Moyen Age et au début de la période moderne

Dans une étude sur les techniques de la fabrication monétaire médiévale, la question du faux-monnayage a toute sa place. La monnaie, pour ce qu'elle représente donne lieu à contrefaçon au Moyen Age également. L'objet de cette partie ne peut être la présentation d'une chaîne opératoire réglementaire de production de fausses monnaies, comme cela vient d'être fait pour le monnayage officiel. Dans le cadre de cette activité par définition illégale, il faut reconnaître qu'il est impossible de proposer des « normes ».

Toutefois, à partir de la compilation de différentes informations notamment extraites des études historiques et numismatiques qui ont abordé ce sujet, il est possible de proposer une présentation générale de cette activité illégale au cours du Moyen Age jusqu'au début de la période moderne. Après avoir caractérisé notamment les nombreux crimes assimilés à celui de « falsa moneta », une grande part du discours sera consacrée aux différentes techniques qui ont pu être utilisées par les faussaires médiévaux pour fabriquer leurs monnaies. Elles illustreront notamment les savoir-faire de ces faussaires en regard des risques encourus à les mettre en œuvre dans une telle fabrication.

Au Moyen Age, le faux-monnayage est un crime de lèse-majesté. En frappant une monnaie sans y être autorisé par le roi, le faussaire attaque l'autorité suprême. C'est d'abord le cadre législatif qui permet de rendre compte de cette activité illégale. De nombreuses ordonnances définissent les multiples délits assimilés par les autorités à du faux-monnayage. Ce sont ensuite évidemment les sources judicaires qui témoignent d'une variété de cas associés à ces activités frauduleuses. Parmi celles-ci, il faut citer les registres criminels de la Chambre des Monnaies, chargée d'instruire les procès liés aux affaires monétaires[256]. Les lettres de rémissions parfois accordées aux accusés, destinées à gracier certains faussaires, illustrent également et de façon assez précise, différents cas soumis à l'appréciation des juges[257].

[256] Trojanowska Z., Les faux monnayeurs devant la Chambre des monnaies sous le règne de Louis XI (1461-1483), dans Gedai I. *et al.*, eds., *Proceedings of the international numismatic symposium*, Budapest, Akadémiai Kiado, 1980, p. 209.
Clairand A. *et al.*, Carrés et procédés de fabrication de 350000 faux louis d'or fabriqués en suisse au début du XVIIIe siècle, *Bulletin de la Société Française de Numismatique*, vol. 55, n° 6, 2000, p. 132-144.
[257] Feller L., *Faux-monnayeurs..., op. cit.*, 192 p.

D'un point de vue numismatique et archéologique, les monnaies de par leurs compositions témoignent des techniques retenues par les contrefacteurs pour assurer leurs productions. Cependant, les données qu'il est possible de mettre en évidence à partir de l'étude d'une seule fausse monnaie sont relativement pauvres et ne renseignent de ce point de vue que sur une technique de fabrication avec une représentativité limitée[258]. Les découvertes de trésors, voire d'ateliers de faux-monnayeurs, permettent en revanche de disposer d'un aperçu plus complet en ajoutant à la caractérisation des procédés de fabrication employés, l'évaluation de l'ampleur des productions associées[259].

Le faux-monnayage médiéval rassemble différents délits plus ou moins directement liés à cette activité dans la mesure où sa définition n'était pas exclusivement limitée à la fabrication de contrefaçons monétaires[260]. Parmi les crimes associés, le *rognage* ou le *trébuchage* des espèces, ainsi que toutes

---

Cockshaw P., L'atelier monétaire de Paris à la fin du règne de Charles VI : une officine de faux-monnayage ?, *Revue Numismatique*, vol. 6, n° 29, 1987, p. 184-191.
Salaün G., Deux faux-monnayeurs graciés par Charles de Blois, *Bulletin de la Société Française de Numismatique*, vol. 54, n° 6, 1999, p. 81-82.

[258] Duplessy J., Douzain faux de Henri IV, de type inédit, *Bulletin de la Société Française de Numismatique*, vol. 32, n° 4, 1977, p. 189-190.
Beneut G., Monnaies fausses de l'époque de la Ligue, *Bulletin de la Société Française de Numismatique*, vol. 32, n° 7, 1977, p. 235-236.
Droulers F., Les fausses monnaies portant lettre R frappées sous Louis XIV dans la période 1690-1715, *Bulletin de la Société Française de Numismatique*, vol. 34, n° 4, 1979, p. 105-107.
Dhénin M. *et al.*, Un astucieux faux-monnayeur, *Bulletin de la Société Française de Numismatique*, vol. 53, n° 9, 1998, p. 233-234.
Bompaire M. *et al.*, Une imitation de gros à la fleur de lis de Philippe VI au nom d'Aimon comte de Savoie trouvée à Toulouse, *Bulletin de la Société Française de Numismatique*, vol. 55, n° 4, 2000, p. 50-53.
Chareyron R. *et al.*, Imitation d'un double denier d'Aquitaine à Viviers, *Bulletin de la Société Française de Numismatique*, vol. 55, n° 4, 2000, p. 54.
Salaün G., Deux faux douzains à la couronne de Bretagne, *Bulletin de la Société Française de Numismatique*, vol. 59, n° 1, 2004, p. 12-13.
Gordus A. A. *et al.*, Une curieuse fausse monnaie de Henri III de l'atelier de Riom, *Bulletin de la Société Française de Numismatique*, vol. 63, n° 6, 2008, p. 99-106.

[259] Rancoule G. *et al.*, La grotte nord de Lauradieu (Commune d'Auriac, Aude) « Un atelier de faux monnayeur du XV^{e} siècle », *Bulletin de la Société d'Etudes Scientifiques de l'Aude*, vol. 74, 1974, p. 171-176.
Ayme R. *et al.*, Atelier de faux-monnayeurs de XV^{e} siècle dans une grotte de Moux (Aude), *Bulletin de la Société Française de Numismatique*, vol. 31, n° 8, 1976, p. 93-94.
Dhenin M. *et al.*, Un atelier de faux-monnayeurs du XVII^{e} s. a Despenaperros (Jaén), *Acta Numismatica*, vol. 8, 1978, p. 207-212.
Bompaire M. *et al.*, La grotte du Crés de la Louve, à Roquefort des Corbières : une officine de faux-monnayeur, *Bulletin de la Société d'Etudes Scientifiques de l'Aude*, vol. 46, 1996, p. 71-76.
Miquel J. *et al.*, Un atelier de faux-monnayeur à la tour du Viala-du-pas-de-Jaux, *Vivre en Rouergue Cahier d'archéologie aveyronnaise*, vol. 16, 2002, p. 187-195.

[260] Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 161-162.
Trojanowska Z., Les faux monnayeurs..., *op. cit.*, p. 221.

possessions en plus ou moins grandes quantités de fausses monnaies sont interdits au même titre que leur production.

Le rognage est une pratique qui consiste à découper ou gratter la tranche des monnaies afin d'en collecter une partie du métal précieux[261]. Les monnaies ont même été parfois traitées dans un bain d'acide afin de les dissoudre partiellement, mais uniformément, pour ensuite revendre le métal extrait de cette solution[262]. Ce crime se rapporte davantage à un vol de matière précieuse simplement pratiqué sur la monnaie, plus qu'à une contrefaçon.

Le trébuchage qui consiste à peser les espèces pour les classer en fonction de leur masse est également réprimé au titre du faux-monnayage. Malgré les contrôles effectués dans les ateliers monétaires, ces derniers ne pouvaient garantir que les monnaies émises soient toutes homogènes du point de vue pondéral. Les variations ponctuelles se voyaient partiellement masquées par les échantillonnages plus ou moins fréquents et les pesées par lots ne traduisaient que la tendance moyenne des productions. D'autre part, les remèdes de poids accordés par l'autorité émettrice autorisaient une relative hétérogénéité. Dans ce cadre, il pouvait être intéressant pour un particulier de différencier parmi les monnaies qu'il possédait, les plus lourdes des plus légères. Ces dernières étaient conservées pour les échanges monétaires, alors que les plus massives étaient thésaurisées ou refondues. Ce sont les études métrologiques de trésors qui permettent de rendre compte de cette pratique pourtant interdite[263].

Toute détention de fausse monnaie est également assimilée au faux monnayage. Et ce, du simple particulier qui ne peut expliquer d'où provient l'unique monnaie qu'il a en sa possession jusqu'au trafic à plus grande échelle qui vise à écouler une grande quantité de monnaies, parfois importées de l'étranger[264].

Il faut toutefois reconnaître que la majorité des délits associés au faux-monnayage portent sur la fabrication à proprement parler. Différents critères

---

[261] Feller L., *Faux-monnayeurs..., op. cit.*, p. 25-28.
Coativy Y., De la fraude à la falsification : le faux monnayage en France à la fin du Moyen Age, dans Béaur G. *et al.*, eds., *Fraude, contrefaçon et contrebande de l'Antiquité à nos jours,* Genéve, Suisse, Droz, 2006, p. 238.
[262] Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 23.
Bompaire M., *L'atelier monétaire royal..., op. cit.*, p. 110.
[263] Coativy Y., De la fraude..., *op. cit.*, p.239.
[264] Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 161.
Kiersnowski R., Les imitations et les falsifications monétaires de l'époque du Moyen Age, dans Cahn H. A. *et al.*, eds., *Actes du 8ème congrès international de numismatique*, New York, Association internationale des numismates professionnels, 1973, p. 425.
Trojanowska Z., Les faux monnayeurs..., *op. cit.*, p. 221.
Feller L., *Faux-monnayeurs..., op. cit.*, p. 53-127.

devaient permettre de définir la légalité d'une production de monnaies[265]. En premier lieu, celle-ci devait être autorisée par l'autorité émettrice et être mise en œuvre seulement dans les ateliers monétaires. Ces deux seuls critères interdisent de nombreuses fabrications différentes en les assimilant au faux-monnayage.

Dans le monnayage de contrefaçon, le faussaire va chercher à copier un type monétaire en utilisant des matières premières moins coûteuses. Il existe pour cela plusieurs procédés métallurgiques dont la finalité est de travestir la réalité de la composition de la fausse monnaie[266]. Le gain retiré d'une telle fabrication provient principalement de l'économie réalisée sur l'achat des métaux précieux. Toutefois, outre le fait d'avoir été organisée sans autorisation, une telle fabrication transgresse une seconde loi interdisant la production d'espèces fausses par leurs matières[267].

Une seconde pratique était au Moyen Age également assimilée au crime de faux-monnayage. A l'inverse de celle qui vient d'être décrite, il n'y a pas dans ce cas une volonté particulière de contrefaire une monnaie. Il s'agit au contraire, de la copier le plus précisément possible, par son type ainsi que par ses caractéristiques légales que sont sa masse et son titre en métal précieux. C'est pour ces raisons qu'aujourd'hui les numismates différencient cette fabrication, dite d'imitation, de celle du faux-monnayage de contrefaçon[268]. D'autant que la finalité d'une telle

---

[265] Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 161.

[266] Mantellier M. P., Notice sur un atelier de faux-monnayeurs du XVI[e] siècle, *Mémoires de la Société Archéologique de l'Orléanais*, vol. 1, 1851, p. 321.
Trojanowska Z., Les faux monnayeurs..., *op. cit.*, p. 213.
Feller L., *Faux-monnayeurs..., op. cit.*, p. 49-53.
Clairand A., Monnaies inédites, et monnaies fausses découvertes à Parthenay, *Bulletin de la Société Française de Numismatique*, vol. 47, n° 10, 1992, p. 451-454.
Garnier J.-P., Niquets d'Henri V : fausses variétés, mais faux d'époque, *Bulletin de la Société Française de Numismatique*, vol. 48, n° 2, 1993, p. 490-492.
Minnitt S., A hoard of counterfeit Louis XI coins from Taunton, Somerset, dans Archibald M. M. *et al.*, eds., *Metallurgy in numismatics,* Londres, Angleterre, Royal numismatic society, 1993, t. 3, p. 102-103.
Moesgaard J. C., Trouvaille de faux douzains à la croisette de François 1er à Louviers (Eure), *Bulletin de la Société Française de Numismatique*, vol. 48, n° 6, 1993, p. 560-562.
Coativy Y., De la fraude..., *op. cit.*, p. 242.

[267] Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 161.

[268] Kiersnowski R., Les imitations et les falsifications..., *op. cit.*, p. 423-428.
Dumas F., Imitations et fausses monnaies durant l'antiquité et le Moyen Age, *Bulletin de la Société Française de Numismatique*, vol. 31, n° 8, 1976, p. 95-100.
Martin C., De moneta fasla, *Bulletin de la Société Française de Numismatique*, vol. 32, n° 3, 1977, p. 172-174.
Dhénin M., La monnaie, le vrai, le faux, etc., dans *Actes des Journées Numismatiques de Perpignan : Les faux en numismatique*, Perpignan, Musée Numismatique Joseph Puig, 1997, p. 5-18.
Bompaire M. *et al.*, *Numismatique médiévale..., op. cit.*, t. 7, p. 109-123.

production ainsi que leurs responsables sont tout aussi différents. L'objectif principal d'imiter un monnayage qui dispose d'une renommée et d'une certaine reconnaissance, est de pouvoir intégrer les marchés dans lesquels circule le type copié. C'est pourquoi, les imitateurs ne se trouvent pas dans la même population que les contrefacteurs. Ce sont en général les seigneurs voire certains souverains qui s'octroient ce droit pour commercer avec leurs voisins[269].

Finalement, cette production se voit assimilée à du faux-monnayage dans la mesure où elle n'est pas tolérée par l'autorité émettrice qui ne touche pas dans ce cas la taxe de seigneuriage dont doivent normalement s'acquitter les maîtres particuliers à la tête des ateliers monétaires.

La chaîne opératoire associée à la fabrication d'imitation n'a finalement pas vocation à être différente de celle en pratique dans les fabriques officielles. Il n'y a pas nécessité, comme c'est le cas pour les contrefaçons, de pallier aux manques de ressemblances avec les modèles originaux grâce à des procédés métallurgiques. D'un point de vue d'une discussion sur techniques associées au faux-monnayage, l'imitation ne présente pas d'intérêt particulier.

Sur la question des techniques uniquement utilisées dans la contrefaçon de monnaies, il faut reconnaître que peu d'études s'y sont intéressées. D'un autre côté, la consultation des sources judiciaires ainsi que des différents *corpus* archéologiques permettent de dresser un inventaire de différents procédés auxquels ont pu recourir les faussaires. Compte tenu du nombre de possibilités envisageables, il ne peut s'agir ici de proposer un relevé exhaustif. Il témoigne cependant de la variété des procédés retenus. D'un point de vue général, le niveau de technicité mis en œuvre dans les différentes productions, va de pair avec la qualité finale du monnayage, diminuant d'autant les risques pour le faussaire d'être arrêté.

Le procédé le plus simple utilisé au Moyen Age par quelques faux-monnayeurs est la production de copies de monnaies d'argent à partir d'un moulage réalisé avec des alliages à base de plomb et d'étain[270]. Cette fabrication ne demande ni connaissances techniques ni équipement ou matériaux particuliers. Outre leur

---

[269] Bompaire M. *et al.*, Une imitation de gros..., *op. cit.*, p. 50-53.
Bompaire M. *et al.*, *Numismatique médiévale..., op. cit.*, t. 7, p. 119-120.
Chareyron R. *et al.*, Imitation d'un double..., *op. cit.*, p. 54.

[270] De La Sicotière L., Un atelier de fausse monnaie au XV^e^ siècle, *Revue Numismatique*, 1847, p. 286.
Trojanowska Z., Les faux monnayeurs..., *op. cit.*, p. 213.
Feller L., *Faux-monnayeurs..., op. cit.*, p. 49-53.
Coativy Y., De la fraude..., *op. cit.*, p. 242.

aspect assez proche de celui de l'argent, l'intérêt des métaux choisis ici réside notamment dans leurs températures de fusion particulièrement basses qui n'imposent pas le recours à un fourneau. Avec une fusion débutant à 328 °C pour le plomb et 232 °C pour l'étain, un simple foyer suffit pour travailler les alliages de ces deux métaux[271]. Les moules sont pour leur part constitués d'argile ou de plâtre, voire même d'ardoise[272]. Il s'agit cependant d'un procédé très fruste qui ne permet pas de produire des copies très convaincantes. Du reste, les témoignages les plus nombreux attestant de la mise en œuvre de ce procédé proviennent de sources judicaires rendant compte de l'arrestation des criminels[273]. Les preuves archéologiques qui auraient pu indiquer un réel usage économique de ces monnaies sont finalement très rares[274].

L'utilisation d'alliages à base de cuivre pour constituer l'âme de fausses monnaies est une technique plus efficace pour produire des contrefaçons de meilleure qualité. Contrairement à ce qui est constaté pour les espèces moulées, les comptes rendus de procès ou les lettres de rémissions ne constituent pas l'essentiel des témoignages attestant de cette pratique. De nombreux exemplaires archéologiques sont décrits par les numismates[275]. L'utilisation dans ces monnayages de cuivre, de laiton ou de bronze, oblige le faussaire à mettre en place une chaîne opératoire particulière. C'est notamment ce qui justifie partiellement la qualité de ces espèces, elles doivent être frappées comme le sont celles émises par les ateliers officiels. Cependant, l'analogie se limite essentiellement à ce point. D'un point de vue de la mise en forme des flans, il semble que les faussaires se contentent en général d'une seule opération : découper leurs rondelles dans des

[271] Gale W. F. *et al.*, eds., *Smithells metals reference book*, Butterworth - Heinemann, 2004, p. **14**-10.
[272] Feller L., *Faux-monnayeurs..., op. cit.*, p. 49-50.
Coativy Y., De la fraude..., *op. cit.*, p. 242.
[273] Trojanowska Z., Les faux monnayeurs..., *op. cit.*, p. 213.
Feller L., *Faux-monnayeurs..., op. cit.*, p. 49-53.
[274] De La Sicotière L., Un atelier de fausse monnaie..., *op. cit.*, p. 286.
Coativy Y., De la fraude..., *op. cit.*, p. 242.
[275] De La Sicotière L., Un atelier de fausse monnaie..., *op. cit.*, p. 283.
Mantellier M. P., Notice sur un atelier..., *op. cit.*, p. 321.
Mitchiner M. B. *et al.*, Contemporary forgeries of English silver coins : Henry III to William III, *The numismatic chronicle*, vol. 145, 1985, p. 213, 222-224.
Clairand A., Monnaies inédites..., *op. cit.*, p. 551-554.
Charlet C., Un faux écu monégasque au millésime 1653, *Bulletin de la Société Française de Numismatique*, vol. 48, n° 4, 1993, p. 534-535.
Garnier J.-P., Niquets d'Henri V..., *op. cit.*, p. 490-492.
Minnitt S., A hoard of counterfeit..., *op. cit.*, p. 102-103.
Moesgaard J. C., Trouvaille de faux douzains..., *op. cit.*, p. 560-562.

plaques de métal[276]. Une telle différence avec ce qui a pu être vu dans le monnayage royal pose question. Les procédés retenus par les faux-monnayeurs devaient, du moins pour les questions de mise en forme, être plus rapides.

C'est par ailleurs en remplaçant les métaux précieux qui composent normalement les monnaies par des alliages autrement moins coûteux, que le faussaire peut espérer tirer un bénéfice de sa fabrication. Il doit cependant dissimuler sa fraude par des procédés qui marquent de nouvelles différences avec le monnayage officiel. La technique générale consiste à recouvrir la surface de l'âme constituée d'un alliage vil d'une pellicule de métal précieux ou d'une qui en a l'aspect. Cette dernière démarche peut être notamment réalisée par une réaction d'étamage durant laquelle une couche d'étain vient recouvrir la fausse monnaie pour lui donner un aspect argenté[277]. La qualité finale de cette fabrication n'est cependant pas tout à fait ressemblante étant donné la tendance de l'étain à s'oxyder plus rapidement que l'argent. Afin de se soustraire à ce problème, il est plus intéressant pour les faussaires de mettre en place des procédés de dorure ou d'argenture qui, bien qu'ils soient plus coûteux, ont l'avantage de donner un aspect très proche de l'original[278]. La technique, très souvent mise en œuvre, consiste à déposer sous forme d'amalgame les métaux précieux sur les surfaces à traiter, ou plus simplement, les coller en feuilles.

Il faut cependant remarquer que les faux-monnayeurs n'ont parfois pas besoin de recourir à de telles techniques métallurgiques. S'ils choisissent par exemple, de contrefaire une monnaie de bas billon, ils peuvent simplement utiliser du cuivre pur qui aura sensiblement le même aspect sans traitement particulier[279]. Bien

---

[276] Rancoule G. *et al.*, La grotte nord de Lauradieu..., *op. cit.*, p. 171.
Ayme R. *et al.*, Atelier de faux-monnayeurs..., *op. cit.*, p. 93-94.
Dhenin M. *et al.*, Un atelier de faux-monnayeurs..., *op. cit.*, p. 208, 210.
Minnitt S., A hoard of counterfeit..., *op. cit.*, p. 100.
Miquel J. *et al.*, Un atelier de faux-monnayeur..., *op. cit.*, p. 187.
Téreygeol F. *et al.*, *Grotte de La Catette (11), Recherches sur l'atelier de faux-monnayeur, Document final de synthèse*, SRA Languedoc-Roussillon, 2007, p. 44.
[277] Mitchiner M. B. *et al.*, Contemporary forgeries..., *op. cit.*, p. 213.
Minnitt S., A hoard of counterfeit..., *op. cit.*, p. 103.
[278] Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 23.
De La Sicotière L., Un atelier de fausse monnaie..., *op. cit.*, p. 291-292.
Rancoule G. *et al.*, La grotte nord de Lauradieu..., *op. cit.*, p. 171.
Ayme R. *et al.*, Atelier de faux-monnayeurs..., *op. cit.*, p. 93-94.
Minnitt S., A hoard of counterfeit..., *op. cit.*, p. 100.
Oddy W. A. *et al.*, The techology of gilded coin forgeries, dans Archibald M. M. *et al.*, eds., *Metallurgy in numismatics,* Londres, Angleterre, Royal numismatic society, 1993, t. 3, p. 200-203, 206.
Téreygeol *et al.*, *Grotte de La Catette..., op. cit.*, p. 44.
[279] Dhenin M. *et al.*, Un atelier de faux-monnayeurs..., *op. cit.*, p. 207-212.
Miquel J. *et al.*, Un atelier de faux-monnayeur..., *op. cit.*, p. 190.
Téreygeol F. *et al.*, *Grotte de La Catette..., op. cit.*, p.51.

qu'une telle fabrication soit dans un sens plus économique puisqu'elle n'emploie pas de métaux précieux, la faible valeur des monnaies ainsi produites ne permet pas d'espérer un gain conséquent à court terme.

Outre les différents procédés de dorure et d'argenture qui demandent des savoir-faire métallurgiques assez élevés, les coins nécessaires pour imprimer les figures monétaires sur les fausses monnaies, ne sont pas non plus des instruments qu'il est facile de se procurer ou de fabriquer. Il faut reconnaître que les matrices permettant de battre les espèces *a priori* les plus semblables aux modèles originaux sont celles provenant des ateliers officiels ! Il existe quelques exemples où les faussaires ont eu recours à ce type d'outils. Compte tenu de la gestion des coins, il a dans certains cas été plus aisé de mettre en place une fraude au sein même de fabriques royales[280]. C'est notamment ce qui a eu lieu au sein de la Monnaie de Paris à la fin du règne de Charles VI[281]. D'autre part, il apparaît également que les représentants de l'autorité émettrice n'ont pas pu empêcher dans certains cas le vol de matrices officielles qui ont ensuite pu être utilisées à des fins de faux-monnayage[282]. Le recours à de semblables instruments, bien que préférable, est cependant limité à un personnel monétaire.

Toutefois, il faut reconnaître que la majorité des faussaires ne pouvait se prévaloir d'une telle position ou de simples relations qui auraient permis de leur fournir les instruments de leurs délits. Ils devaient dans ce cas les fabriquer eux-mêmes[283]. A partir des très rares modèles retrouvés, il apparaît que deux techniques ont été retenues pour répondre à ce besoin. La première est celle qui doit *a priori* permettre de produire des copies parfaitement équivalentes à une monnaie officielle dans la mesure où la matrice est moulée à partir de l'une d'elles. Il n'existe cependant à ce jour qu'un seul exemple d'une telle production. Il s'agit d'un coin retrouvé à Carcassonne[284]. Il est décrit comme étant de bronze et moulé sur un véritable blanc à l'Agnus Dei de Jean I[er], roi de Castille et de Léon, entre 1379 et 1390.

---

[280] Bompaire M. *et al.*, *Numismatique médiévale..., op. cit.*, t. 7, p. 122.
Coativy Y., De la fraude..., *op. cit.*, p. 240-242.
[281] Cockshaw P., L'atelier monétaire de Paris..., *op. cit.*, p. 184-191.
[282] Bompaire M., *L'atelier monétaire royal..., op. cit.*, p. 56.
[283] De La Sicotière L., Un atelier de fausse monnaie..., *op. cit.*, p. 286-291.
Mantellier M. P., Notice sur un atelier..., *op. cit.*, p. 322.
Dhenin M., La fausse monnaie espagnole, une industrie bien francaise, dans Leandre V., ed., *II Simposi Numismàtic de Barcelona*, Barcelone, Societat Catalana d'Estudis Numismàtics, 1980, p. 75-78.
[284] Dhenin M. *et al.*, Un coin de faux-monnayeur trouvé à Carcassonne (Aude), *Bulletin de la Société Française de Numismatique*, vol. 57, n° 5, 2002, p. 81-82.

En revanche, de plus nombreux témoignages attestent de coins gravés dans des masses de fer[285]. Cette technique est assimilable à celle retenue pour les productions officielles, parallèlement à l'emploi de poinçons[286]. Bien qu'elle semble plus généralisée, cette fabrication n'en reste pas moins l'une des plus complexes. Outre la nécessité de recourir à un outillage spécialisé, il faut par ailleurs avoir une maîtrise suffisante de la méthode pour pouvoir reproduire les figures et légendes parfois très fines des monnaies. Enfin, compte tenu du travail important que représente le façonnage d'une matrice, une telle production doit *a priori* être associée à un faux-monnayage conséquent. Il est en effet aberrant de graver une paire de coins pour frapper seulement quelques contrefaçons.

Afin de s'affranchir de ces opérations trop complexes ou contraignantes à mettre en œuvre, certains faux-monnayeurs ont fait preuve d'originalité. Plusieurs faussaires ont pu multiplier leur capital en profitant des ressemblances existant entre des types monétaires correspondant néanmoins à des sommes différentes : il leur a parfois suffi de regraver partiellement une espèce pour doubler, voire tripler, sa valeur[287]. Dans certains cas où il était impossible pour les fraudeurs de profiter d'une aussi simple opportunité de détournement, ils ont choisi de se servir de monnaies comme de matières premières pour frapper des valeurs plus élevées[288]. Il s'agit en quelque sorte de réformations comme celles mises en place à partir de 1689 sous le règne de Louis XIV. De nouvelles espèces ont alors été produites par une simple refrappe d'anciennes pièces afin de s'affranchir des refontes coûteuses[289]. Dans une même démarche basée sur des similitudes monétaires, une seconde technique consiste non pas à modifier les légendes et figures d'une pièce mais de simplement lui donner l'aspect extérieur d'un type de plus grande valeur en appliquant une couche de dorure ou d'argenture[290]. Le faussaire profite dans ce cas de la qualité de la frappe officielle en évitant le travail de mise en forme.

---

[285] De La Sicotière L., Un atelier de fausse monnaie..., *op. cit.*, p. 286-291.
Mantellier M. P., Notice sur un atelier..., *op. cit.*, p. 322.
Dhenin M., La fausse monnaie..., *op. cit.*, p. 76.
Trojanowska Z., Les faux monnayeurs..., *op. cit.*, p. 213.
[286] cf. La chaîne opératoire officielle : Frappe au marteau, p. 101.
[287] Dhénin M. *et al.*, Un astucieux faux-monnayeur, *op. cit.*, p. 233-234.
Garnier J.-P., Enigmatique douzain frappé à Paris en 1639, *Bulletin de la Société Française de Numismatique*, vol. 55, n° 8, 2000, p. 125-128.
Dhenin M., Une opération frauduleuse au début du XVe siècle : une guénar transformé en florette, *Bulletin de la Société Française de Numismatique*, vol. 56, n° 9, 2001, p. 158-160.
Coativy Y., De la fraude..., *op. cit.*, p. 239-240.
[288] Dhenin M. *et al.*, Un atelier de faux-monnayeurs..., *op. cit.*, p. 212.
Bompaire M. *et al.*, La grotte du Crés..., *op. cit.*, p. 75.
[289] *Edit du roy pour la fabrication de nouvelles espèces d'or et d'argent et la réformation de celles qui ont cours à présent*, Léonard F., 1689, 7 p.
[290] Mitchiner M. B. *et al.*, Contemporary forgeries..., *op. cit.*, p. 213, 221.

Les jetons et méreaux médiévaux ont également pu servir de matière première au faux-monnayage. Il s'agit d'objets utilisés pour compter[291], pour servir de contremarques afin par exemple de différer le paiement d'une somme, voire même pour jouer[292]. De par leur aspect monétiforme, ils pouvaient être aisément transformés en contrefaçons monétaires. Et même, si cette éventualité était prise en compte par l'imposition sur quelques-uns de ces jetons, de légendes très explicites[293], elles n'ont pas découragé les fraudeurs. Tout comme ce qui a pu être fait à partir de pièces authentiques, les faussaires ont regravé ou doré ces instruments de compte pour en faire des fausses monnaies[294].

Enfin, plusieurs auteurs, notamment anglais, évoquent des cas de faux-monnayage dont la technique retenue n'est comparable à aucune de celles qui viennent d'être évoquées. Il s'agit du « cliché process » qui correspond à la fabrication de monnaies « fourrées » décrite par les numismates français[295]. Cependant, ce procédé n'a pas encore été rencontré dans la contrefaçon médiévale française.

L'inventaire des nombreux procédés qui ont été utilisés à des fins de fraudes monétaires rend compte d'une très grande diversité des méthodes retenues. Par ailleurs, il est apparu que celles qui permettent d'obtenir les meilleurs résultats, diminuant d'autant les risques d'être arrêté pour le faussaire, sont également celles qui demandaient les savoir-faire les plus importants. S'il apparaît que le personnel monétaire dispose dans une certaine mesure de telles qualifications, c'est finalement chez les professionnels du métal que se rencontrent les faux-monnayeurs[296]. Les autorités judiciaires étaient, du reste, conscientes de l'aptitude

---

Dhénin M., La monnaie..., *op. cit.*, p. 12.

[291] A l'image du boulier asiatique.

[292] Blanchet J.-A. *et al.*, *Manuel de numismatique française*, *op. cit.*, t. 3, p. 203-221.
Jacquiot J., Les jetons, les méreaux et les pions-médailles de jeu, de la renaissance au XVIII[e] siècle, dans Ariès P. *et al.*, eds., *Actes du XXIII Colloque international d'études humanistes : Les Jeux à la Renaissance*, Tours, Vrin J., 1980, p. 458.
Pastoureau M., *Jetons, méreaux et médailles*, Turnhout, Belgique, Brépols, coll. « Typologie des sources du Moyen Age occidental », 1984, p. 15.

[293] « Je ne suis pas d'argent », « Je suis fau et (de) mauvès(e) na(ture) ».
Blanchet J.-A. *et al.*, *Manuel de numismatique française*, *op. cit.*, t. 3, p. 205.
« Je suis de leton ».
Jacquiot J., Les jetons, les méreaux..., *op. cit.*, p. 458.

[294] Blanchet J.-A. *et al.*, *Manuel de numismatique française*, *op. cit.*, t. 3, p. 205.
Coativy Y., De la fraude..., *op. cit.*, p. 242.
Pastoureau M., *Jetons, méreaux et médailles*, *op. cit.*, p. 25.

[295] Mitchiner M. B. *et al.*, Contemporary forgeries..., *op. cit.*, p. 232-235.
Dhénin M., La monnaie..., *op. cit.*, p. 11.

[296] Trojanowska Z., Les faux monnayeurs..., *op. cit.*, p. 213.

plus grande des artisans métallurgistes à être de potentiels faussaires. C'est pour cette raison que ces derniers étaient punis plus sévèrement lorsqu'ils étaient appréhendés et que leurs grâces étaient moins fréquentes[297].

Quant aux peines encourues par ceux qui se sont trouvés accusés de faux-monnayage, elles peuvent être très dures et se traduire par la mort du coupable de diverses manières selon les régions où le crime est jugé[298]. La plus commune est celle au cours de laquelle le contrefacteur est bouilli dans un chaudron. Cependant, bien qu'il s'agisse d'un crime de lèse-majesté, les jugements tiennent compte de l'ampleur des délits reprochés et ne prescrivent pas obligatoirement la peine capitale. En effet, les techniques de fabrication ont permis de mettre en évidence des qualités différentes et des niveaux de production plus ou moins importants pris en compte par les juges. Quand le faussaire n'est pas exécuté, il peut être condamné à des peines graduées : amendes, sévices corporels, bannissement. Enfin, bien que la fabrication, qui est par définition un acte prémédité, soit généralement plus réprimée, certains faux-monnayeurs ont tout de même pu obtenir des lettres de rémission, les exonérant de leur crime[299].

Le contexte économique a également eu une part importante dans la répression du faux-monnayage ainsi que dans l'évaluation des peines infligées pour ce crime[300]. La fabrication de fausses monnaies a pu parfois prospérer à la faveur de pénuries monétaires. Lorsque les métaux venaient à manquer à la suite par exemple de conflits, le monnayage se voyait affaibli[301]. Or, les premiers types

---

Feller L., *Faux-monnayeurs..., op. cit.*, p. 43, 148, 152.
Coativy Y., De la fraude..., *op. cit.*, p. 242, 245.
[297] Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 165.
Feller L., *Faux-monnayeurs..., op. cit.*, p. 176.
[298] Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 162-168.
Trojanowska Z., Les faux monnayeurs..., *op. cit.*, p. 214-215.
Lloansi B., La répression du faux-monnayage en Roussillon aux XVIIe-XVIII siècle, dans *Actes des Journées Numismatiques de Perpignan : Les faux en numismatique*, Perpignan, Musée Numismatique Joseph Puig, 1997, p. 59-70.
Coativy Y., De la fraude..., *op. cit.*, p. 245.
[299] Feller L., *Faux-monnayeurs..., op. cit.*, p. 176.
Bompaire M. *et al.*, *Numismatique médiévale..., op. cit.*, t. 7, p. 121.
[300] Kiersnowski R., Les imitations et les falsifications..., *op. cit.*, p. 427.
Dumas F., Imitations et fausses..., *op. cit.*, p. 96.
Feller L., *Faux-monnayeurs..., op. cit.*, p. 9.
Bompaire M. *et al.*, *Numismatique médiévale..., op. cit.*, t. 7, p. 120.
Cipolla M. C., *Les caprices de la fortune banquiers, commercants et manufacturiers, XIV^{e}-XVIII^{e} siècle*, Paris, Gérard Monfort, 2000, p. 20.
Miquel *et al.*, Un atelier de faux-monnayeur..., *op. cit.*, p. 194.
[301] Day J., The great bullion famine of the fifteenth century, *Past & Present*, vol. 79, 1978 , p. 13.

monétaires à faire l'objet de diminutions étaient ceux pour lesquels les ateliers monétaires tiraient les plus maigres bénéfices de leurs droits de brassage. C'est ainsi que la fabrication des monnaies de faible valeur, de bas billon ou de cuivre pur n'était parfois plus du tout assurée[302]. Or, ce sont précisément ces espèces qui étaient les plus utilisées dans les échanges de la vie courante. Et bien que les maîtres particuliers soient obligés par les baux monétaires qu'ils ont signés, de maintenir ces fabrications, les nombreux rappels à l'ordre qui leur ont été adressés témoignent du non respect des termes du contrat[303]. Les faussaires pouvaient profiter de ce marché potentiel pour écouler leur production. Ils trouvaient dans ces conditions une certaine impunité car ils étaient moins blâmés par la population qui avait besoin de leurs contrefaçons.

Le faux-monnayage de monnaies étrangères suit une logique similaire qui doit soustraire celui qui le pratique à des jugements trop sévères. En effet, même si leurs circulations étaient généralement interdites, il apparaît que les espèces provenant d'autres pays pouvaient avoir cours en France, notamment dans les zones frontalières. De même, dans les foires commerciales où étaient échangées des marchandises venant de l'extérieur du territoire, des ordonnances royales reconnaissaient le droit aux acheteurs et aux commerçants, d'utiliser en ces lieux tous les types monétaires sans aucune restriction ni contrôle[304]. Certains faussaires ont ainsi choisi de produire des pièces étrangères espérant certainement pouvoir les écouler plus facilement grâce à la méconnaissance de ces espèces par le public[305]. Par ailleurs, ils ne pouvaient pas *a priori* être accusés de commettre le crime de lèse-majesté puisqu'ils ne portaient pas directement préjudice au roi[306].

Les fouilles d'ateliers de faux-monnayeurs renseignent par ailleurs sur les lieux susceptibles d'abriter des fabrications de fausses monnaies. Plusieurs cas ont été précédemment présentés faisant état de contrefaçons monétaires au sein même de villes, dans des ateliers monétaires ou d'orfèvres[307]. Cependant, d'une manière

[302] Feller L., *Faux-monnayeurs..., op. cit.*, p. 21.
[303] Bompaire M. *et al.*, *Numismatique médiévale..., op. cit.*, t. 7, p. 120.
[304] Mantellier M. P., Notice sur un atelier..., *op. cit.*, p. 334.
[305] *Ibidem*, p. 322.
Kiersnowski R., Les imitations et les falsifications..., *op. cit.*, p. 424, 426.
Dhenin M., La fausse monnaie..., *op. cit.*, p. 75-78.
Trojanowska Z., Les faux monnayeurs..., *op. cit.*, p. 214.
Feller L., *Faux-monnayeurs..., op. cit.*, p. 45.
Téreygeol F. *et al.*, *Grotte de La Catette..., op. cit.*, p. 27.
[306] Feller L., *Faux-monnayeurs..., op. cit.*, p. 59.
Cipolla M. C., *Les caprices..., op. cit.*, p. 20.
[307] Cockshaw P., L'atelier monétaire de Paris..., *op. cit.*, p. 184-191.

générale les faussaires ont tout de même préféré préserver la clandestinité de leurs délits dans des lieux éloignés des habitations[308]. Il n'est pas surprenant qu'ils aient choisi de s'installer dans des grottes qui constituent des abris souvent difficiles d'accès et isolés[309]. De même, les forteresses ont aussi abrité des faux-monnayeurs[310]. Elles constituaient des lieux fermés garantissant le secret des activités qui pouvaient y être mises en œuvre.

Par ailleurs, les zones proches des frontières, certainement parce qu'elles appartiennent aux domaines permettant la circulation de monnaies étrangères, constituaient des zones stratégiques pour la mise en place d'ateliers clandestins. Plusieurs des fabriques qui ont fait l'objet de fouilles, se trouvent dans des zones frontalières[311].

Finalement, le faux-monnayage au Moyen Age se définit selon un spectre d'activités et de techniques assez large. L'étude bibliographique qui vient d'être présentée témoigne de cette pluralité qui se retrouve à de nombreux niveaux. D'abord dans les types de fraudes monétaires qui ne se limitent pas à la fabrication de fausses espèces. Egalement dans les motivations qui poussent les faussaires, à mettre en œuvre leurs délits. Dans le cas du monnayage d'imitation, il a été vu qu'il n'y a pas une réelle fraude sur l'objet mais *a contrario* une volonté de profiter de la reconnaissance d'un type monétaire pour pouvoir pénétrer un marché. La diversité des techniques employées pour fabriquer des contrefaçons est en outre impressionnante. Toutefois, la qualité des différentes productions relevées est variable. Elle est corrélée avec la pérennité d'une fraude. Les procédés de fabrications retenus traduisent les savoir-faire et parfois les professions des

---

Coativy Y., De la fraude..., *op. cit.*, p. 240-241.

[308] Trojanowska Z., Les faux monnayeurs..., *op. cit.*, p. 213.

[309] Rancoule G. *et al.*, La grotte nord de Lauradieu..., *op. cit.*, p. 171-176.
Ayme R. *et al.*, Atelier de faux-monnayeurs..., *op. cit.*, p. 93-94.
Bompaire M. *et al.*, La grotte du Crés..., *op. cit.*, p. 71-76.
Téreygeol F. *et al.*, *Grotte de La Catette..., op. cit.*, 61 p.

[310] Mantellier M. P., Notice sur un atelier..., *op. cit.*, p. 321.
Jeanjacquot J.-C. *et al.*, *Pymont, la forteresse oubliée : XIII^e^-XV^e^ Siècle, entre les Vienne et les Chalon*, Lons-le-Saunier, Cercle Girardot, 1993, p. 140.
Miquel J. *et al.*, Un atelier de faux-monnayeur..., *op. cit.*, p. 187-195.
La fortification de Plein-Mont (Hargnies, Ardennes) semble avoir abrité un atelier de faux-monnayeur au XIII^e^ siècle. La fouille du site a été réalisée par la Société Archéologique du Sillon Mosan, mais n'a pas été publiée.

[311] Rancoule G. *et al.*, La grotte nord de Lauradieu..., *op. cit.*, p. 171-176.
Bompaire M. *et al.*, La grotte du Crés..., *op. cit.*, p. 71-76.
Trojanowska Z., Les faux monnayeurs..., *op. cit.*, p. 213.
Téreygeol F. *et al.*, *Grotte de La Catette..., op. cit.*, p. 6, 39.
L'atelier de la fortification de Plein-Mont est également situé à proximité de la Belgique.

différents faussaires. Les métallurgistes, sans être les seuls coupables, disposent des connaissances et des méthodes idéales pour *a priori* produire des fausses monnaies plus facilement.

La suite de l'étude sera notamment consacrée à la caractérisation de deux *corpus* archéologiques correspondant à deux cas de fraudes monétaires médiévales mettant en évidence des démarches *a priori* différentes.

Partie 3. Présentation du *corpus* de l'étude

Dans cette étude, ce sont des approches notamment métrologique, archéométrique et expérimentale qui ont été choisies pour répondre aux différentes questions associées aux techniques de monnayage médiévales tant officielles qu'illégales. C'est pourquoi, une démarche préliminaire a consisté à rassembler plusieurs *corpus* représentatifs permettant de traiter ces problématiques distinctes.

Dans un premier temps, les ensembles considérés proviennent de sites ayant fait l'objet d'interventions archéologiques : le mobilier de l'atelier monétaire de la place de Verdun à La Rochelle pour traiter du monnayage royal et celui découvert dans la grotte de Lauradieu (Aude) pour illustrer un exemple de faux-monnayage.

La possibilité de confronter les premiers résultats obtenus à d'autres références a rapidement été envisagée. Une telle démarche présente un intérêt particulier d'un point de vue de l'étude de la chaîne opératoire officielle, dans la mesure où cette dernière fait l'objet de règlements ordonnés par l'autorité émettrice, fixant *a priori* un cadre général commun à toutes les fabriques de monnaies du royaume. Ce n'est finalement qu'en comparant les données de plusieurs ateliers qu'il est possible de rendre compte du respect des ordonnances imposées par cette autorité.

Jusqu'au début de cette étude, le mobilier de La Rochelle représentait le seul *corpus* monétaire médiéval mis au jour en France et facilement accessible. Plusieurs campagnes de prospections archéologiques aux abords du château de Montreuil-Bonnin, ont été mises en place afin de compléter ce premier ensemble. Elles ont de plus, permis de développer une nouvelle démarche prospective appliquée à la recherche de sites paléométallurgiques dont font notamment partie les fabriques monétaires.

Par ailleurs, la découverte fortuite dans une grotte de l'Aude de matériel manifestement associé à une activité de faux-monnayage de la fin du Moyen Age, a été l'occasion de mettre en place la fouille de l'espace considéré. Le premier lot de matériel ayant été prélevé sans considération de sa distribution au sein de la grotte, il ne permettait pas de discuter d'une potentielle organisation du travail au sein de l'atelier clandestin. Outre la possibilité de compléter le *corpus* préalablement mis au jour, une intervention archéologique devait collecter des informations spatiales, complétant l'approche menée seulement à partir de l'étude du mobilier.

I. Sites précurseurs

Il s'agit ici de présenter les deux *corpus* archéologiques qui ont été mis au jour pour l'un au début des années soixante-dix, et au cours de deux fouilles de sauvetage menées dans les années quatre-vingt-dix pour le second. Chacun des ensembles est associé à une fabrication monétaire particulière.

A. Monnayage royal : La Rochelle (Charente-Maritime)

Dans les années quatre-vingt-dix, le creusement d'un parking souterrain au niveau de la place de Verdun dans le centre ville de La Rochelle (Figure 6 et Figure 7), a mis au jour les vestiges d'un château parallèlement à ceux d'un atelier monétaire royal. L'étude des sources écrites ainsi que des plans du XVII^{e} siècle, avait préalablement permis de cerner les emplacements présumés de ces anciennes constructions dans l'emprise des travaux. La forteresse de La Rochelle se trouve citée pour la première fois dans un texte de 1214. Elle a presque entièrement disparu à la fin du XIV^{e} siècle. Toutefois, seuls les vestiges associés à l'atelier monétaire royal sont intéressants pour notre propos, ce dernier ayant été en activité entre la fin du XIV^{e} et la fin du XVII^{e} siècle.

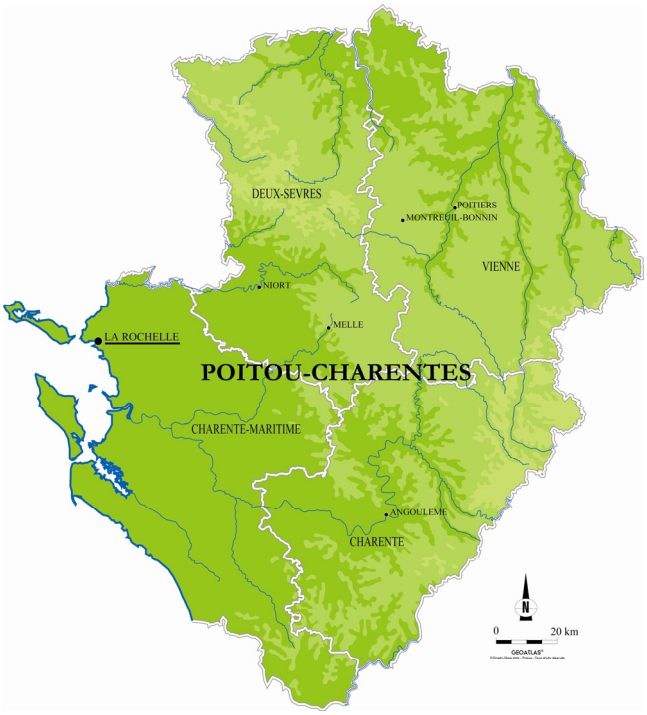


Figure 6 - La Rochelle en Poitou-Charentes.

A la fin des années quatre-vingt, une première campagne de sondages de l'AFAN[312], atteste la présence des vestiges supposés tout en rendant compte de leur conservation ainsi que de l'épaisseur des stratigraphies associées. A partir de ces diagnostics les secteurs présentant un intérêt archéologique plus important ont pu être définis afin d'en proposer des fouilles de sauvetage. Celui correspondant à la fabrique monétaire se trouve au milieu de la place de Verdun.

Les informations qui vont être maintenant exposées sont principalement extraites des fiches stratigraphies renseignées durant les fouilles ainsi que des deux rapports rédigés après les interventions archéologiques qui se sont succédé[313]. A ce jour, la découverte des vestiges de l'atelier monétaire a fait l'objet de deux articles assez généraux[314]. Toutefois, une publication plus complète doit être éditée prochainement.

1 - Les fouilles

En France, durant la période médiévale peu de villes ont le privilège de battre monnaie pour le roi, La Rochelle en faisant partie. Une ordonnance de François 1er du mois de janvier 1549, montre qu'il n'existe à cette époque que 27 ateliers monétaires royaux[315]. Généralement situés en contexte urbain, il n'est pas surprenant que l'hôtel de la Monnaie de La Rochelle soit à ce jour, l'unique atelier monétaire qui ait pu être fouillé en France. Il constitue un témoignage unique de l'organisation et des techniques de fabrication monétaire, en particulier dans le cadre d'une mise en forme au marteau.

Trois ateliers monétaires se sont succédé dans la ville. Le plus ancien dont les premières émissions sont datées de 1359, se situait Cour des Grolles[316]. Il est

---

[312] Association pour les Fouilles Archéologiques Nationales qui correspond aujourd'hui à l'Institut National de Recherches Archéologiques Préventives (INRAP).

[313] Bocquet A. *et al.*, *La Rochelle Place de Verdun, Fouille préventive AFAN, octobre 1994 Juillet 1995*, Document final de synthèse, SRA Poitou-Charentes, Poitiers, 1995, n. p.
Nibodeau J.-P., *Rapport de sauvetage urgent AFAN, 2ème campagne : La Rochelle Place de Verdun, septembre 1996 mars 1997*, Document final de synthèse, SRA Poitou-Charentes, Poitiers, 1997, 77 p.

[314] Bocquet A. *et al.*, Les fouilles du second atelier monétaire de La Rochelle (XV^{e}-XVII^{e} siècle), *Bulletin de la Société Française de Numismatique*, vol. 53, n° 9, 1998, p. 237-240.
Bocquet A. *et al.*, L'hôtel de la Monnaie de La Rochelle, dans Cavaillès M. *et al.*, eds., *Argent caché..., et retrouvé, les trésors monétaires découverts en Deux-Sèvres,* Parthenay, Musée municipal de Parthenay, 2007, p. 39-42.

[315] Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 52.

[316] De Saulcy F., *Histoire monétaire de Jean le Bon roi de France*, Paris, C. L. Van Peteghem 1880, p. 95.

ensuite transféré place du château (Figure 7), actuelle place de Verdun, à la fin du XIV^{e} siècle. Ce second établissement disparaît en 1689 lors de l'agrandissement de la place. Ce n'est qu'en 1691 qu'est ouvert le dernier hôtel de la Monnaie de La Rochelle, rue Royale-des-Carmes qui ne fermera qu'un siècle et demi plus tard, en 1836[317].

Les différentes interventions archéologiques qui ont été menées lors des travaux de la place de Verdun, ont permis de caractériser certains vestiges du second atelier monétaire de La Rochelle. En parallèle du premier secteur ayant révélé une partie de l'hôtel de la Monnaie, c'est dans un second espace dégagé que plusieurs structures de l'ancien château de La Rochelle ont été mises au jour.

D'un point de vue de l'organisation des interventions archéologiques, les deux rapports rendus au terme des opérations de terrain, font état de difficultés auxquelles ont été confrontés les archéologues. Les principales contraintes étaient liées au temps qui leur a été accordé pour réaliser les fouilles de l'ancien château de La Rochelle ainsi que de l'atelier monétaire. A la suite des sondages préliminaires, le potentiel archéologique de l'espace concerné par les travaux, a été largement sous-estimé. Un grand nombre de vestiges inattendus ont finalement été mis au jour. Cette situation a plusieurs fois perturbé l'organisation des diagnostics qui devait par ailleurs s'accorder avec les exigences du chantier de construction du parking souterrain, à l'origine de la mise en place des fouilles.

La première campagne de fouilles de sauvetage s'est déroulée entre octobre 1994 et juillet de l'année suivante. Elle a été menée sous la direction des deux chargés d'études AFAN, A. Bocquet et P. Mille. La fouille du secteur de l'atelier monétaire a duré trois mois : de novembre 1994 à janvier 1995. Elle a employé une moyenne de cinq à huit archéologues professionnels l'un d'eux étant exclusivement chargé de l'enregistrement du mobilier. A la suite de cette intervention, un document final de synthèse a été rédigé[318].

Roy C., *La Rochelle, son atelier monétaire, ses monnaies, 1215-1836*, La Rochelle, Imprimerie nouvelle Noel Texier, 1913, p. 9.

[317] *Ibidem*, p. 10.

[318] Bocquet A. *et al.*, *La Rochelle..., op. cit.*, n. p.

Figure 7 - La Rochelle et sa place du château en 1575[319].

L'expertise archéologique a ensuite été poursuivie au cours d'une seconde campagne, entre septembre 1996 et mars 1997. Le responsable d'opération était alors l'ingénieur AFAN J.-P. Nibodeau. Durant la période du 17 décembre 1996 au 21 janvier 1997, une équipe de cinq archéologues professionnels a pu dégager de nouveaux vestiges de l'atelier monétaire dans un élargissement de l'emprise initiale. Au terme de ce chantier, un second rapport a été rendu[320].

[319] Braun G. *et al.*, eds., *Civitates Orbis Terrarum*, 6 tomes, t. 2, 1575.
[320] Nibodeau J.-P., *Rapport de sauvetage..., op. cit.*, 77 p.

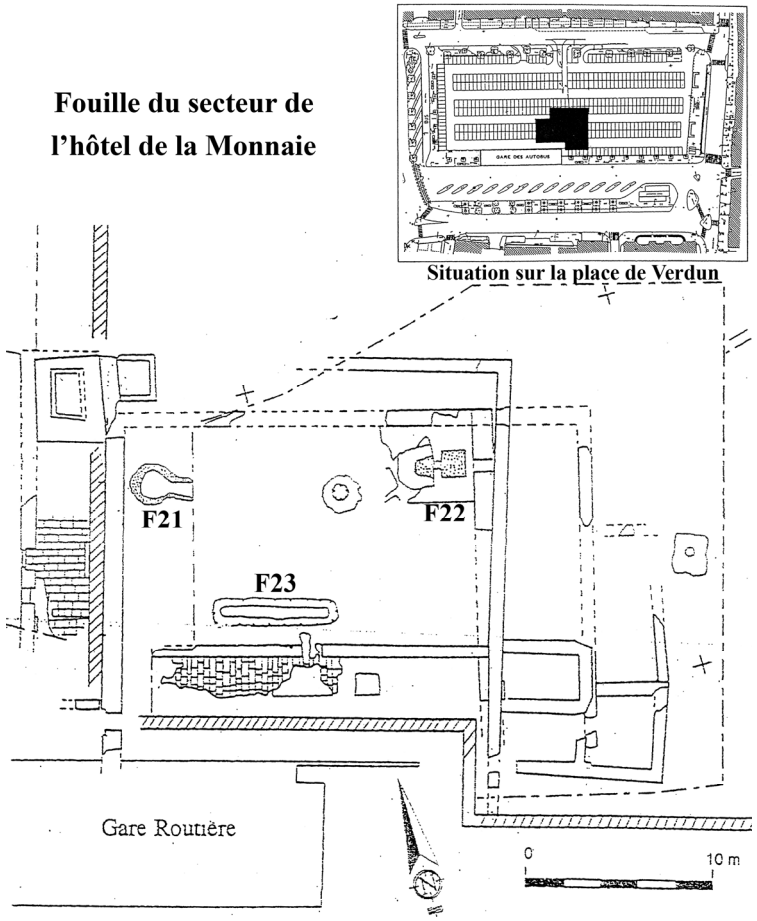


Figure 8 - Relevé des deux campagnes de fouilles de l'atelier monétaire (dessin E. Bayen)[321].

En 1994, au cours de la première intervention, 900 m² du secteur correspondant à l'atelier monétaire ont été décapés à la pelle mécanique selon un carré d'environ 30 mètres de côté se situant au milieu de l'actuelle place de Verdun (Figure 8). Cette surface a par la suite été élargie vers le sud-ouest au cours de la seconde campagne de fouilles. Les deux interventions archéologiques n'ont cependant pas caractérisé l'ensemble de l'atelier. Il se prolonge, comme le suggère le dépouillement des plans existants de la fabrique monétaire, sous un espace occupé aujourd'hui par une gare routière. Cette zone n'était pas concernée par les travaux de construction du parking souterrain. Si la totalité de la surface couverte par l'atelier monétaire n'a pu être fouillée, en revanche l'ensemble de la stratigraphie correspondant au fonctionnement de ce dernier a pu être caractérisée avec la découverte surprenante de mobilier qui permet de décrire l'ensemble de la chaîne opératoire du monnayage au marteau. Compte tenu des réorganisations successives de l'espace de travail au sein de la fabrique durant son activité, il a été

[321] *Ibidem*, p. 9.

possible de disposer d'un échantillonnage assez complet d'objets résultant des différentes étapes de la fabrication. En effet, la stratigraphie de l'emprise de la fouille témoigne des changements d'affectation des espaces de production. Ces derniers suivent par ailleurs l'ordre de la chaîne de fabrication étant donné que les niveaux de fonderie se trouvent dans les contextes les plus anciens auxquels ont succédé les étapes de mise en forme puis celles de la frappe des monnaies.

Le sous-sol de la place, n'ayant pas été bouleversé par une urbanisation dense, a conservé des structures complètes et de nombreux niveaux d'occupations sur de grandes surfaces. Les deux interventions archéologiques ont mis en évidence une chronologie en six phases qui retrace la succession des aménagements de ce secteur de la place depuis le XIII^{e} jusqu'au XX^{e} siècle :

Phase I : occupation entre le XIII^{e} et le XIV^{e} siècle, antérieure à l'installation de la Monnaie.
Phase II : installation de l'hôtel de la Monnaie à la fin du XIV^{e} siècle et première occupation au XV^{e} siècle.
Phase III : réaménagement de l'atelier monétaire au début du XVI^{e} siècle.
Phase IV : occupation de l'atelier entre la seconde moitié du XVI^{e} et le début du XVII^{e} siècle.
Phase V : dernière occupation de la fabrique durant la seconde moitié du XVII^{e} siècle, avec la destruction de l'atelier en 1689.
Phase VI : la place entre le XVIII^{e} et le XX^{e} siècle.

Les fouilles révèlent que l'atelier monétaire a été installé dans une zone à l'intérieur de l'enceinte du château alors détruit. Le domaine royal est simplement délimité par un mur de clôture. La fabrique semble avoir réinvesti dans un premier temps certains bâtiments de la cour de la forteresse sans qu'il soit possible d'identifier leur fonction première. Ces derniers ont par la suite été modifiés lors des différentes réorganisations dont a fait l'objet l'officine monétaire.

La fonderie de l'atelier monétaire à la fin du XIV^{e} siècle

Lors de leurs travaux, les archéologues ont pu atteindre les niveaux les plus anciens associés au fonctionnement de la fabrique monétaire. Ils ont mis en évidence une salle correspondant *a priori* à la fonderie de la première période d'activité de l'atelier. Plusieurs fours y ont été construits successivement. Il s'agit

d'un espace couvert, comme en témoignent les fragments d'ardoise observés dans les contextes de démolition.

Deux structures particulièrement importantes témoignent de la toute première phase de production de la fabrique monétaire, datée de la fin du XIV^e^ au premier quart du XV^e^ siècle. La première est la moins bien conservée des deux. Elle correspond au four F22 et se situe à l'angle nord-est d'une grande salle (Figure 8). Il s'agit d'une construction circonscrite dans une maçonnerie carrée d'environ quatre mètres de côté. Sa partie interne qui ne témoigne pas de traces résultant d'une utilisation métallurgique, met en évidence une aire circulaire correspondant à un foyer de 1,8 à 2 mètres de diamètre. De telles dimensions sont trop importantes pour assimiler cette structure à des opérations de fonderie. Elles correspondent en revanche à celles de fours d'affinage. Compte tenu du fonctionnement de ce type de fourneau, l'absence de résidus métallurgiques dans la zone foyère dégagée renforce cette hypothèse. Celle-ci n'a en définitive pas l'occasion de recevoir du métal étant donné qu'elle se situe sous la coupelle dans laquelle les alliages traités sont fondus.

Le deuxième four[322] a été mis au jour lors de la seconde campagne de fouilles, après que l'emprise de celle-ci ait été élargie dans la partie sud-est. Ce fourneau ne laisse en revanche aucun doute quant à sa finalité. Compte tenu de sa forme, des nombreuses traces de déchets métalliques et de rubéfaction qu'il présente, il était très certainement utilisé pour la fonte de métaux. Il semble être le plus ancien vestige du fonctionnement de l'atelier. C'est à partir d'une reconstitution expérimentale de cette structure archéologique que seront abordées les problématiques liées aux opérations de fonderie monétaire de cette étude. C'est pourquoi, elle doit faire l'objet d'une description plus détaillée au sein de cette présentation générale.

La construction mise au jour, présente des dimensions relativement importantes. Sa longueur dans l'œuvre est de 2,80 m, elle est composée d'un cendrier de 1,30 m de diamètre qui s'ouvre sur une fosse de décendrage s'élargissant sur une longueur d'un 1,20 m (Figure 9). Les parements internes ne subsistent que sur une hauteur maximale de 0,30 m (Figure 10 et Figure 11).

[322] Four F21.

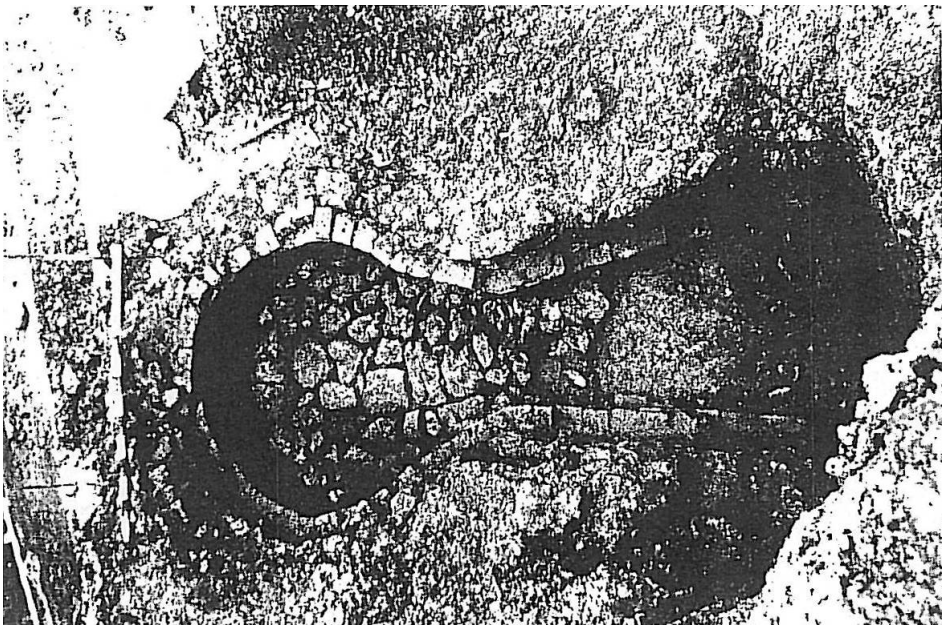


Figure 9 - Photo d'ensemble du four en trou de serrure, atelier monétaire royal de La Rochelle (cliché P. Ernaux, AFAN, n° 35-13)[323].

La jonction entre le cendrier et la fosse de décendrage se fait par l'intermédiaire d'une section, de 40 cm de longueur. Cette disposition confère à ce four, un plan en forme de « trou de serrure ». La structure est installée dans une grande fosse de 1,90 m de largeur pour une profondeur de 75 cm. Le fond de la fosse repose sur le sol naturel. Une couche de grosses pierres plates sert de radier au cendrier à l'extrémité ouest de la fosse de décendrage.

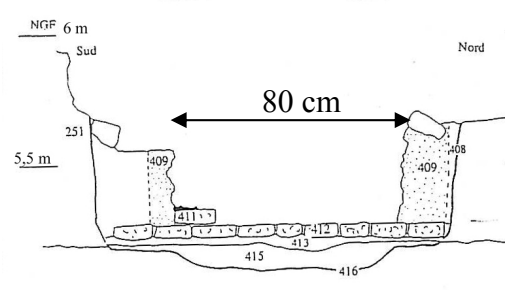


Figure 10 - Coupe de l'entrée de fosse de décendrage[324].

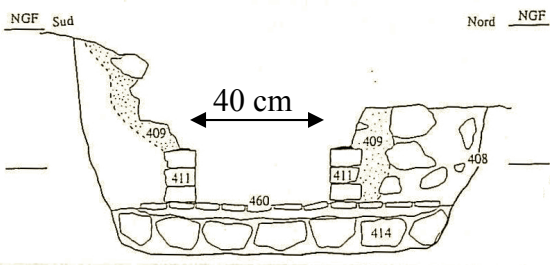


Figure 11 - Coupe de l'entrée de la salle de chauffe du four[325].

[323] Relevé P. Bâty, dessin E. Bayen.
Nibodeau J.-P., *Rapport de sauvetage..., op. cit.*, p. 62.
[324] Relevé P. Bâty, dessin E. Bayen.
Ibidem, p. 62.
[325] *Ibid.*, p. 63.

Le reste de la fosse de décendrage repose sur une couche d'argile grisâtre. Il y a une différence de traitement des sols des deux parties du four. Celui de la fosse de décendrage est constitué d'un pavage de briques scellées dans une chape d'argile jaune orangé. Les briques de couleur jaune à rouge sont de même module : 20 x 10 x 5 cm et sont posées à plat. Dans le cendrier, le pavage repose sur une chape épaisse et fortement rubéfiée.

Figure 12 - Plan de détail du four en trou de serrure, atelier monétaire royal de La Rochelle[326].

La découverte parmi les scories métalliques d'un niveau cendreux, d'un lot de florettes du Dauphin au nom de Charles VI perdu lors d'une refonte a permis aux archéologues de dater le fonctionnement du four durant la période qui succéda au décri de ces monnaies en 1422[327].

Le pavement et les parois du four sont constitués par des carreaux et briques de remploi, ces dernières étant liées par de l'argile. Les traces de rubéfaction, de calcination, mais également de coulures et d'oxydes métalliques, décrivant une gamme de couleurs entre le vert et le noir, traduisent très nettement l'utilisation de la structure. Aucun aménagement dans la structure ou autour de celle-ci ne

[326] Relevé P. Bâty, dessin E. Bayen.
Ibid., p. 60.
[327] De Vilevault L.-G. *et al.*, eds., *Ordonnances des rois de France de la troisième race*, 2 tomes, Paris Imprimerie royale, t. 11, 1769, p. 163-164.
Bocquet A. *et al.*, Les fouilles du second..., *op. cit.*, p. 238.

témoigne d'un recours à une ventilation forcée. La reconstitution expérimentale de ce fourneau devra vérifier s'il peut fonctionner en ventilation naturelle.

Entre la seconde moitié du XV^e^ et le début du XVI^e^ siècle, l'intérieur de la fonderie est réorganisé avec la construction de deux nouvelles fournaises.

Un four carré[328] est installé à l'emplacement de la structure F22. Ses murs sont conservés sur 1 mètre de hauteur. Ils délimitent un foyer d'1,3 mètre de côté au devant duquel une fosse de décendrage de 40 cm de large est ouverte sur une aire de travail. Les parements sont constitués principalement de galets et de quelques briques, liés par un mortier d'argile jaune.

La réorganisation voit également l'installation d'une structure métallurgique particulière. Il s'agit d'un four oblong présentant un foyer de combustion de 5,85 mètres de long et 50 cm de large dont les parois sont percées de quinze tuyères de ventilation, équidistantes. Compte tenu de sa taille, une telle structure suppose le travail d'une grande quantité de matériaux. Cependant, la finalité d'une telle structure s'inscrit difficilement dans le cadre d'une fabrication monétaire[329]. C'est ce que doit proposer J.-C. Leblanc qui en réalise l'étude.

En définitive, les fours qui viennent d'être évoqués occupent un espace qui leur est dédié au sein de l'atelier. Il s'agit d'une pièce particulière qui garantit que les coulées de métal en fusion soient réalisées à l'abri des courants d'air. L'étude bibliographique à notamment rendu compte de l'intérêt d'une telle organisation.

La salle de mise en forme au marteau du XVI^e^ siècle

Au début du XVI^e^ siècle l'atelier monétaire subit une restructuration. La fonderie est désaffectée et l'espace réorganisé. Il voit la création d'une cour et d'une nouvelle salle. Elle apparaît destinée à la fabrication monétaire proprement dite, comme en témoigne la quantité d'objets monétaires caractérisant différentes étapes du monnayage au marteau. Ces derniers ont notamment été découverts en grand nombre dans plusieurs fosses. Elles ont été assimilées par les archéologues à des structures dans lesquelles les ébauches étaient mises à refroidir après leur recuit, à cause notamment de la poudre de charbon et des cendres qui constituaient une partie de leur remplissage.

[328] Four F23.
[329] Son étude est actuellement réalisée par J.-C. Leblanc (UTAH, UMR 5608 et Laboratoire de minéralogie et de cristallographie, UMR 5563, Université Paul-Sabatier, Toulouse).

La salle de frappe du XVII^e siècle

Au XVII^e siècle, l'organisation spatiale de la zone couverte par l'intervention est de nouveau modifiée pour finalement être dédiée à l'ultime opération de la fabrication monétaire qui est la frappe des espèces. Cette hypothèse est justifiée par la quasi absence de matériel associé aux étapes préliminaires de mise en forme, alors qu'il était extrêmement conséquent dans les niveaux plus anciens. Par ailleurs, à la fin de la première moitié du XVII^e siècle, cette pièce voit l'installation d'un balancier destiné à mécaniser la frappe monétaire. Du point de vue de cette étude, ces niveaux marquent la transition vers l'appareillage qui succède à la technologie du marteau.

2 - Le matériel archéologique

Au cours des deux campagnes de fouilles une grande quantité de matériel numismatique a été mis au jour. Il illustre globalement l'ensemble de la chaîne opératoire de fabrication de la monnaie. Toutefois, les multiples étapes sont réparties sur différentes périodes de fonctionnement. En tenant compte de cette limite, le *corpus* de l'atelier monétaire de La Rochelle constitue néanmoins une remarquable collection permettant de développer les problématiques associées à la production de la monnaie au Moyen Age dans le cadre d'une fabrique royale. Il se divise en deux principaux ensembles, avec d'un côté le mobilier céramique et de l'autre, un *corpus* très conséquent d'objets métalliques à différents stades de mise en forme. Les observations morphologiques, métallographiques ainsi que les études métrologiques et analytiques de ces derniers constituent la base de la réflexion technique portant sur le monnayage médiéval au marteau tel qu'il était mis en œuvre dans cet atelier monétaire.

En préambule de la description des principaux *corpus* considérés dans la suite de l'étude, il faut signaler qu'ils ne constituent pas l'essentiel du matériel numismatique révélé par les fouilles. D'autres vestiges sont très caractéristiques de la fabrication monétaire rochelaise. Il est important de les évoquer même s'ils n'ont pas été étudiés ici. Ces d'objets sont particulièrement associés aux opérations de contrôle au cours de la fabrication. Il s'agit dans un premier temps de quatre coupelles de cendre employées pour la coupellation des alliages monétaires[330]. Les oxydes de plomb denses qu'elles contiennent indiquent qu'elles ont été utilisées.

[330] Les coupelles de cendre de l'atelier monétaire de La Rochelle sont actuellement analysées et étudiées par M.-P. Guirado dans le cadre de sa thèse sur les problématiques de l'essai et de l'affinage de l'argent au Moyen Age, sous la direction de P. Fluzin et F. Téreygeol.

Intervenant également dans une démarche de vérification, un dénéral ainsi que plusieurs éléments d'une balance ont été, par ailleurs, mis au jour par les archéologues dans des contextes datés du XVII^{e} siècle.

Enfin, deux objets relativement remarquables ont été découverts dans les niveaux du milieu du XVII^{e} siècle. Il s'agit de deux carrés de fer qui, après avoir été gravés de motifs monétaires, devaient servir de matrices pour la frappe des monnaies au balancier[331]. Ils témoignent de la transition technologique qui a eu lieu au sein de la fabrique de La Rochelle.

a. Les céramiques métallurgiques

L'étude morphologique des fragments de creusets mis au jour à La Rochelle est développée dans le premier rapport de fouilles[332]. Les différentes observations relevées sont exposées ici afin d'être comparées au *corpus* mis au jour sur un autre site monétaire médiéval également étudié.

Sur les 220 fragments de creusets découverts lors des fouilles, 173 proviennent des phases II, III et IV. Les autres ont été mis au jour lors des décapages de la phase V et VI où ils sont isolés et résiduels. Les 173 individus se divisent en deux ensembles. Le premier regroupe des tessons découverts dans des contextes de remblais et d'occupation des phases II et III, ils sont datés du XV^{e} siècle. Ceux retrouvés dans des niveaux d'épandage de la phase IV sont, quant à eux, datés du XVI^{e} siècle.

Les 99 fragments recueillis dans les contextes du XV^{e} siècle, appartiennent tous à de grands creusets à fond globulaire et munis d'un bec verseur (Figure 13, n° 1 à 5). D'un point de vue général, ils constituent un ensemble homogène. Le diamètre estimé de leur ouverture varie entre 15 et 21 cm. Les hauteurs évaluées sont comprises, quant à elles, entre 22 et 32 cm. Les bords droits et arrondis sont relativement épais avec 1,7 à 1,9 cm d'épaisseur. Il en est de même pour les fonds dont les épaisseurs dépassent pour certains 3 cm. Les panses en revanche sont plus fines, en moyenne autour d'1 cm. Un seul objet est archéologiquement complet, il mesure 22,5 cm de hauteur et 18 cm de diamètre (Figure 13, n° 2). Son volume total est de 3,3 litres et sa capacité utile est évaluée à 2,2 litres. En définitive, ces creusets pouvaient contenir entre 1,5 et 4 litres de matière.

[331] Bocquet A. *et al.*, Les fouilles du second..., *op. cit.*, p. 237-240.
[332] Bocquet A. *et al.*, *La Rochelle..., op. cit.*, n. p.

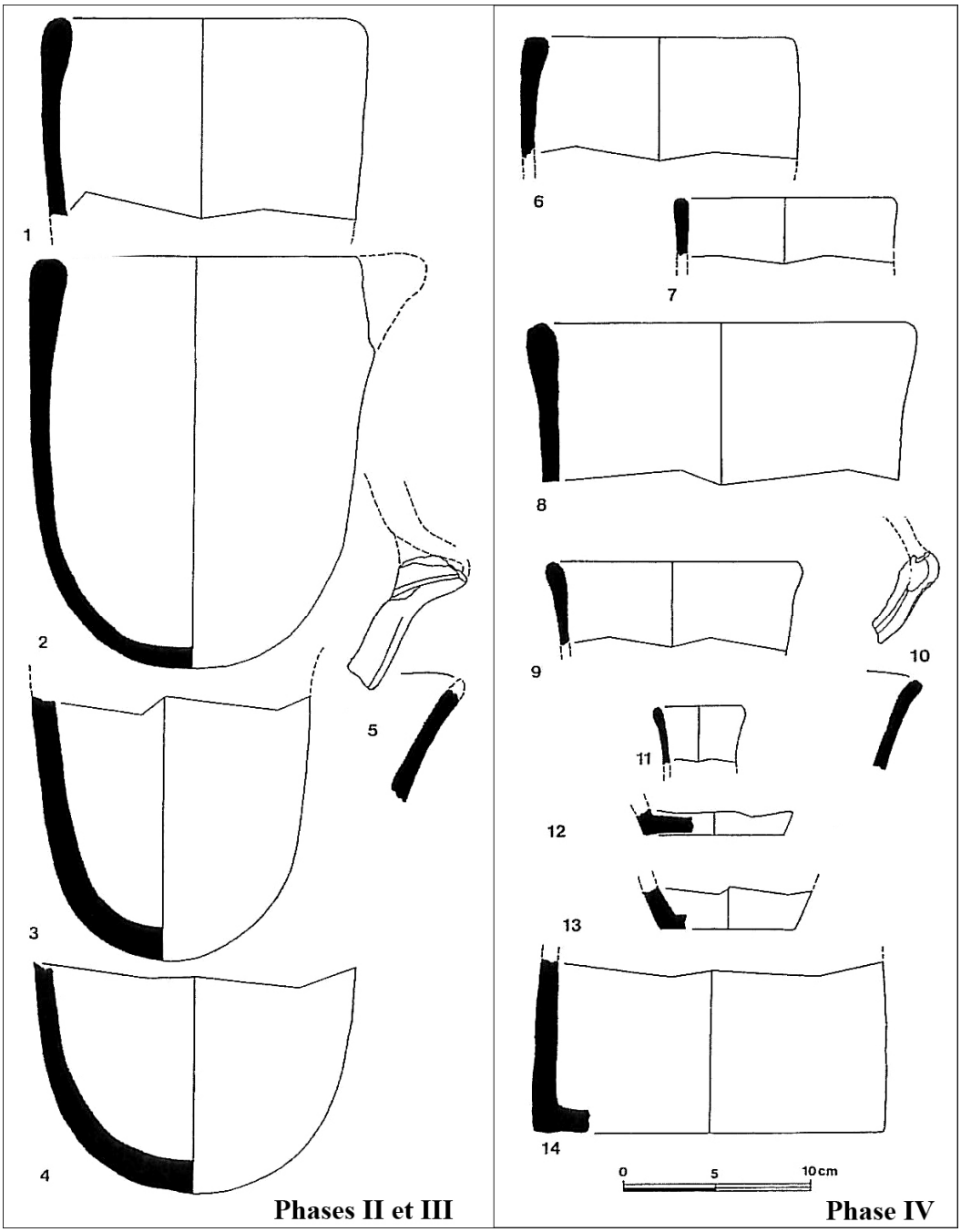


Figure 13 - Typologies des creusets de La Rochelle selon les contextes de découverte[333].

D'un point de vue de leur mise en forme, les faces internes de nombreux fragments présentent des marques caractéristiques d'une mise en forme au tour. Ces indices ne sont en revanche pas observables sur les surfaces externes qui ne montrent que des traces de lissages également relevées à l'intérieur des creusets.

[333] Dessins A. Bocquet et S. Seguin.
Ibidem, n. p.

Enfin, aucune glaçure n'a été appliquée sur ces céramiques. Ces poches de coulées présentaient un bec de versement fait par une déformation du bord, sans ajout de matière (Figure 13, n° 5).

La pâte utilisée pour leur fabrication est constituée d'une argile blanche préalablement dégraissée par un ajout de grains de quartz de taille millimétrique ou inférieure. Ni chamotte, ni matière organique n'ont été employées.

L'aspect extérieur de ces fragments apparaît en revanche très propre, les tessons présentent quelques traces carbonées qui peuvent résulter autant d'une utilisation métallurgique que de la cuisson des creusets. Exceptées ces quelques marques, les tessons n'ont aucune vitrification, ni dépôt métallique superficiel.

Dans les niveaux plus récents 74 fragments de creusets datés du XVI^{e} siècle ont été mis au jour. Ils forment un *corpus* beaucoup plus hétérogène que celui qui vient d'être décrit. Les différences sont marquées par les formes en présence, mais également parce que certains tessons mettent en évidence des traces importantes résultant de l'utilisation métallurgique des céramiques.

Du point de vue de leurs morphologies, deux typologies distinctes se dégagent. Certaines témoignent de fonds plats alors que d'autres ont des fonds globulaires (Figure 13, n° 6 à 14). Dans l'ensemble, les creusets sont de petite taille et de faible ouverture, avec une moyenne se situant entre 9 et 14 cm de diamètre. Les plus petits ont un module de 5,2 cm seulement. Quelques individus témoignent de plus grands diamètres entre 16 et 19 cm. Cet ensemble ne présente pas de forme archéologiquement complète, si bien, que la dimension réduite des fragments ne permet pas de supposer la hauteur originale des creusets. La plupart des bords ont des profils arrondis. Leurs épaisseurs sont en rapport avec la diminution générale des diamètres de céramiques, avec des sections plus fines, autour de 6 à 8 mm, atteignant seulement 1 à 1,5 cm pour les plus épaisses. Les becs de coulée étaient ajoutés comme pour les exemplaires plus anciens, par une déformation des bords sans ajout de matière.

Du point de vue des pâtes céramiques relevées, le *corpus* apparaît également particulièrement hétérogène. Certaines des pâtes apparaissent très siliceuses rose-orangé, sans dégraissant particulier. D'autres, présentent des sections noires et grises avec des grains de quartz de taille submillimétrique. Les dernières enfin, ont été montées à partir d'une argile plus claire et dégraissée très grossièrement avec des grains de quartz de plusieurs millimètres.

Enfin, si les fragments retrouvés dans les contextes du XV^{e} siècle montraient peu de traces d'une utilisation métallurgique, en revanche, ceux du XVI^{e} siècle

sont beaucoup plus marqués. En effet, certains individus voient leur surface extérieure recouverte de vitrifications particulièrement massives, certaines atteignant jusqu'à un demi centimètre d'épaisseur. D'autres tessons témoignent de la présence d'oxydes métalliques sur leur face interne.

Finalement, le XVI^{e} siècle apparaît comme une période de transition dans la typologie des creusets employés pour la fonte des alliages monétaires de l'atelier. Au XV^{e} siècle, les seules formes observables sont celles de poches de coulée aux fonds hémisphériques. Au XVII^{e} siècle, bien que peu nombreux et fragmentaires, les tessons rendent comptent de fonds plats. C'est durant la période intermédiaire du XVI^{e} siècle que les profils globulaires semblent disparaître au profit des fonds plats. Cette morphologie qui n'existait pas au Moyen Age, ne commence à être décrite qu'à partir du XVI^{e} siècle[334]. Ces changements morphologiques doivent par ailleurs se faire parallèlement à la modification des types de fours employés. Si un fond hémisphérique est intéressant pour disposer un creuset dans un foyer rempli de charbon, cela est beaucoup plus difficile avec un fond plat. L'utilisation de telles formes est imposée par l'utilisation de fourneaux à réverbère où les céramiques sont posées directement sur la sole.

b. Le mobilier numismatique métallique

L'étude bibliographique des règles en vigueur dans les ateliers monétaires médiévaux, a rendu compte des contrôles auxquels étaient soumis les ouvriers monétaires. Dans une volonté compréhensible d'éviter les détournements des métaux précieux, de même que pour prévenir le faux-monnayage, une comptabilité des quantités d'alliage confiées aux monétaires étaient normalement tenue par les gardes de la fabrique. Une telle gestion aurait dû interdire, ou du moins limiter, la découverte de mobilier numismatique en cours de mise en forme lors des fouilles de La Rochelle. Seuls de rares objets ayant été perdus durant les étapes successives de fabrication devaient pouvoir être retrouvés. Il est remarquable que les différentes interventions archéologiques qui ont caractérisé une partie seulement de l'atelier de La Rochelle aient mis au jour un *corpus* de matériel monétaire décrivant différentes opérations de fabrication. Un classement morphologique provisoire met en évidence des lames, des carreaux et des flans mais également plusieurs objets assimilables à des déchets de coupe (Figure 14 et Figure 22).

[334] Agricola G., *De Re Metallica*, *op. cit.*, p. 229.

En revanche, parmi l'ensemble des monnaies mises au jour, seuls trois doubles tournois ont pu être identifiés avec certitude comme la production de cet atelier. Les métaux correspondant à ce monnayage sont exclusivement l'argent et le cuivre.

Figure 14 - Exemples de lame, carreaux, flans et déchets de coupe mis au jour lors des fouilles de l'atelier monétaire de La Rochelle.

Si certains artefacts se rapportent à des pertes lors de la mise en forme du métal, ils ne constituent pas au premier abord, une majorité. En considérant les différentes distributions en nombre et en masse des objets selon leurs positions dans la chaîne opératoire (Figure 15 et Figure 16), les rapports associés aux déchets de coupe apparaissent en définitive peu importants. Si l'ensemble des objets découverts lors de fouilles résultait d'une perte effective au sein de l'atelier au cours des mises en forme, il faut admettre que le taux des résidus de coupe aurait été majoritaire. Dans la mesure où ces derniers présentent un intérêt moindre par rapport aux carreaux et flans, ils devaient *a priori* être moins recherchés après une perte dans l'atelier.

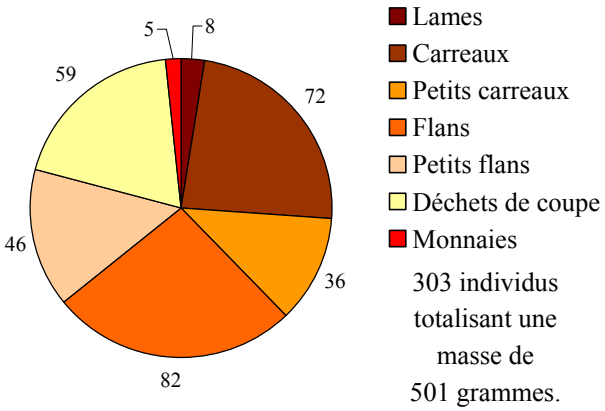


Figure 15 - Répartition en nombre du *corpus* métallique[335].

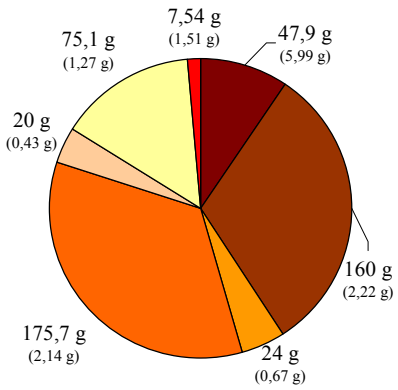


Figure 16 - Répartition en masse du *corpus* métallique[336].

Il faut toutefois reconnaître que les conditions difficiles dans lesquelles se sont déroulées les deux campagnes de fouilles peuvent également avoir influencé la collecte du *corpus*. Celui-ci regroupe seulement des objets métalliques de dimension assez importante étant donné que les plus petits d'entre eux ont des tailles se situant autour du centimètre. Les fragments résultant par exemple de la découpe des carreaux notamment lors de l'opération d'ajustage[337], présentent *a priori* des formats plus restreints. Compte tenu de la taille des flans mis au jour, la plupart de ces résidus de coupe ne devaient pas voir leurs plus grands côtés dépasser cinq millimètres. En conjuguant les phénomènes de corrosion auxquels ont été soumis ces résidus durant leur enfouissement, il apparaît que seul un tamisage systématique des déblais de fouille aurait permis de mettre en évidence ce type de déchets. Cependant, l'importance de l'emprise du chantier archéologique, sa durée limitée ainsi que le nombre restreint de personnels accordés pour l'intervention, interdisait la mise en place d'un tel protocole. Il faut admettre qu'une partie de l'information se voit ici tronquée. C'est notamment ce dont témoigne la masse des déchets de coupe découverts. En moyenne, ils pèsent environ 1,3 g. Cette masse n'est pas très éloignée de celle des carreaux ou des flans alors que notre expérience tant en fouille que d'un point de vue expérimental permet d'affirmer que ces derniers devraient être en comparaison beaucoup plus lourds.

Les contraintes archéologiques ne sont néanmoins pas les seules causes de l'hétérogénéité du *corpus* numismatique métallique. En effet, d'autres observations trahissent également une origine propre au fonctionnement de

[335] Mise en évidence des populations par catégories.
[336] Mise en évidence des masses moyennes par catégories.
[337] cf. *supra*, p. 89

l'atelier. Dans les ensembles regroupant d'un côté les carreaux et de l'autre les flans, il apparaît que certains individus montrent de grandes similitudes (Figure 11). Certains ont par ailleurs été découverts en lots dans une fosse[338]. D'autres proviennent de mêmes unités stratigraphiques[339].

En préalable à son étude, le mobilier métallique a été restauré et stabilisé afin d'éviter la poursuite des réactions de corrosion (Figure 17). Ces traitements ont consisté principalement en un décapage mécanique des couches d'oxydes superficielles qui s'étaient formées au cours de l'enfouissement. La technique utilisée consiste à réaliser une abrasion de la surface pour éliminer la majorité des produits de corrosion. Cependant, si le cœur métallique de la plupart des échantillons a été révélé par ce procédé, d'autres en revanche présentent toujours une patine superficielle. De plus, si la forme générale des fragments est globalement conservée, la méthode utilisée a parfois laissé des marques sur la surface (Figure 18). Ces dernières ne doivent pas être assimilées à des stigmates résultant de la mise en forme initiale des différents artefacts. Après avoir été décapé, l'ensemble des lames, carreaux, flans et déchets de coupe, a été recouvert d'un vernis qui devait prévenir toute reprise de corrosion. Certains échantillons présentent déjà des traces de reprise des réactions dégradantes, sous la couche protectrice (Figure 19).

Figure 17 - Carreau non restauré.

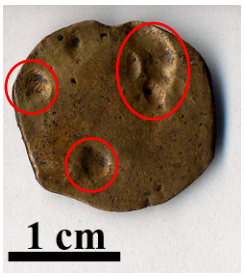


Figure 18 - Stigmates de restauration.

Figure 19 - Flan restauré, reprise de corrosion.

Le *corpus* numismatique finalement rassemblé au terme de la restauration, compte 303 objets métalliques qui représentent une masse d'environ 500 grammes. L'ensemble a été intégré à cette étude technique.

Les deux campagnes de fouilles de sauvetage menées place de Verdun ont rendu compte d'une modification de l'organisation du travail au sein de l'atelier

[338] Elle constitue l'unité stratigraphique 1067.
[339] Notamment les unités stratigraphiques 1021 et 3009.

monétaire. C'est dans les niveaux correspondant à la 4ème phase chronologique définie dans l'emprise de l'intervention archéologique, que sont apparus les vestiges d'opérations liées à la mise en forme des flans. C'est ce dont témoigne la figure 20 avec la répartition stratigraphique du *corpus* numismatique métallique.

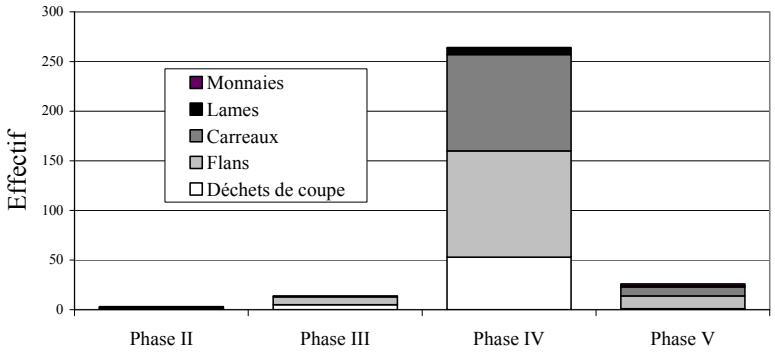


Figure 20 - Répartition stratigraphique du *corpus* numismatique métallique.

Les carreaux, flans et déchets de coupe, mis au jour à La Rochelle, proviennent pour l'essentiel des contextes datés de la seconde moitié du XVIe au début du XVIIe siècle. D'un point de vue technologique, cette période d'activité atteste que l'ensemble du *corpus* étudié est associé à un monnayage au marteau, bien que ce second atelier rochelais ait connu la frappe au balancier, comme en témoignent les vestiges découverts lors des fouilles[340]. En revanche, l'emprise des travaux archéologiques n'a pas caractérisé les niveaux de préparation des flans correspondant à cette dernière période de fonctionnement de la fabrique.

Figure 21 - Carreau présentant des découpes nettes de ses coins.

Ceci explique que les morphologies observées dans le *corpus* ne sont pas en relation avec les formes caractéristiques de l'utilisation de laminoirs, coupoirs et balanciers. Ces instruments étaient censés garantir des formes beaucoup plus régulières et circulaires que celles résultant des opérations de mise en forme à la

[340] Les premières émissions résultant de la frappe au balancier à La Rochelle, sont datées de 1646 : communication A. Clairand.

cisaille et au marteau (Figure 21). L'ensemble des objets rassemblés constitue donc une collection de référence pour discuter des techniques du monnayage au marteau en pratique dans un atelier monétaire royal.

Une considération préliminaire est nécessaire pour définir un premier classement typologique. Une telle démarche doit amorcer les futures discussions métrologiques mais aussi permettre d'établir un protocole d'analyse. En effet, certains moyens analytiques retenus pour cette étude devant être différents selon le taux d'argent dans les échantillons caractérisés[341], il était indispensable de proposer un classement préparatoire. Celui-ci a, dans un premier temps, été mis en œuvre d'un point vue typologique global. Il est basé notamment sur la couleur des alliages qui composent les différents échantillons. Ces derniers ayant été préalablement restaurés, leur nuance est *a priori* en rapport avec la composition des alliages utilisés (Figure 23 et Figure 24). L'ensemble des objets métalliques mis au jour à La Rochelle se répartit selon cinq groupes principaux : les alliages jaunes, argentés, vert foncé et cuivrés (Figure 22). Ce dernier ensemble homogène par sa couleur a finalement été divisé en deux sous-catégories compte tenu des importantes différentes morphologiques constatées en son sein.

Ce premier classement sera globalement confirmé par les différentes méthodes d'analyses mises en œuvre par la suite. Il permet déjà de formuler plusieurs remarques sur la composition de ce *corpus*. Elles viennent à la fois confirmer et éclairer le classement.

Figure 22 - Flans présentant après leur restauration, un aspect argenté et cuivreux.

La séparation du groupe des cuivreux en deux sous-ensembles est justifiée par la comparaison des poids statistiques des catégories retenues. Si elles rassemblent à peu près le même nombre d'individus (Figure 23), les masses moyennes constatées sont inégales et influencent leurs répartitions massiques (Figure 24). Les masses moyennes estimées au sein de ces deux groupes sont tout aussi explicites puisque les individus appartenant au premier ensemble des alliages cuivreux sont environ deux fois plus lourds que ceux du second qui rassemble les objets de petite dimension.

[341] cf. Annexe B.

C'est également une masse plus importante des échantillons argentés, avec une moyenne autour de 3,06 g, qui explique l'augmentation de l'influence de ce groupe dans la répartition massique, alors qu'il est moins bien représenté en nombre.

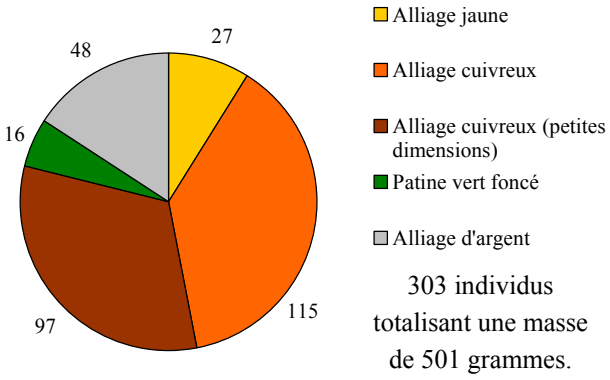


Figure 23 - Répartition en nombre du *corpus* métallique[342].

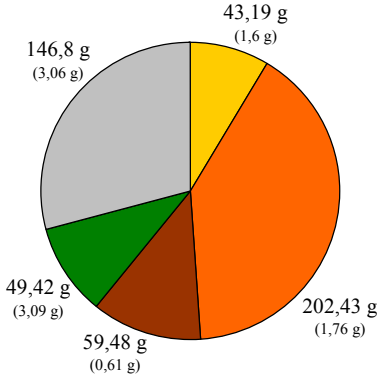


Figure 24 - Répartition en masse du *corpus* métallique[343].

De même, de par leur masse moyenne de 1,6 g, les alliages jaunes sont à rapprocher du groupe cuivreux, alors que les objets présentant une patine vert foncé sont plus lourds. Avec 3,09 g de moyenne, ils sont à comparer à l'ensemble des alliages d'argent.

Dans la mesure où cette classification est basée sur des caractéristiques qui dérivent de la composition ainsi que de la forme des échantillons, ces premières observations devront être rappelées dans les futures discussions métrologiques et analytiques. A cette occasion, la pertinence de ce classement préliminaire sera finalement peu remise en question. Le cas du monnayage d'argent doit être particulièrement évoqué. Le nombre d'individus pour l'instant reconnus comme étant constitués de tels d'alliages, apparaît plus limité dans l'ensemble du *corpus*. Faut-il voir dans une telle représentation, les seules conséquences d'une attention particulière portée aux mises en forme de ce métal précieux ?

Parallèlement à cet ensemble d'objets métalliques mis en forme, la fouille de la fabrique a également livré une seconde collection de résidus métalliques beaucoup plus frustes (Figure 25). Ils ne présentent pas de profils caractéristiques d'une préparation particulière et correspondent plus à des résidus de fontes. Ils exposent par ailleurs des surfaces corrodées auxquelles se sont agglomérés des sédiments au

[342] Mise en évidence des populations par type d'alliage.
[343] Mise en évidence des masses moyennes par type d'alliage.

cours de leur enfouissement. La couleur verte des concrétions suggère des composés à base de cuivre. Contrairement au précédent *corpus*, celui-ci n'a pas fait l'objet d'une restauration.

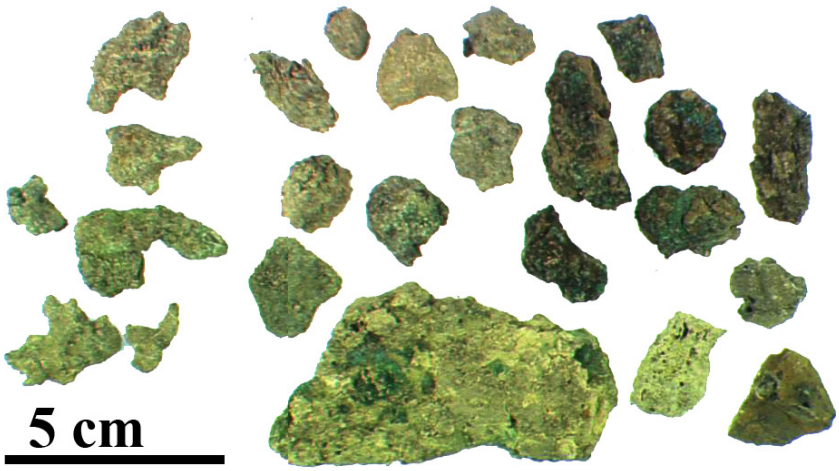


Figure 25 - Exemples de résidus métalliques (US 3009).

La relation de ces résidus avec les opérations du monnayage n'est pas explicite. Ils n'ont pas été découverts dans les seuls niveaux de la fonderie du XV^{e} siècle, caractérisées par les fouilles. Il ne s'agit pas uniquement *a priori*, de déchets résultant de la préparation des alliages monétaires. Certains par exemple, ne sont que des agglomérats de sédiments contenant des composés cuivreux. Ils pourraient être assimilés à des sols d'atelier. L'analyse élémentaire de prélèvements réalisés au sein de ce *corpus* doit permettre de comprendre l'origine de ces résidus.

Au terme de cette présentation du mobilier métallique mis au jour lors des fouilles de l'atelier monétaire de la place du château à La Rochelle, deux particularités apparaissent. Dans un premier temps, il faut souligner que les travaux archéologiques ne semblent pas avoir mis au jour de témoignage du monnayage de l'or, alors que ce dernier a effectivement existé à La Rochelle durant la période considérée[344]. Même si ces observations préliminaires sont à confirmer par des analyses, elles suggèrent déjà plusieurs hypothèses visant à justifier cette absence. Compte tenu du coût élevé de cette matière première, il est évident que son travail ait fait l'objet d'une attention particulière de la part des

[344] De Saulcy F., *Eléments de l'histoire des ateliers monétaires du royaume de France depuis Philippe-Auguste jusqu'à François Ier inclusivement*, Paris, C. L. Van Peteghem, 1877, p. 24-27.
Roy C., *La Rochelle, son atelier monétaire..., op. cit.*, p. 22, 25, 26.

ouvriers. Néanmoins, même s'il y a une différence importante de coût entre l'or et l'argent, il faut reconnaître que ce dernier n'en est pas moins un métal précieux, or il a tout de même été retrouvé lors des fouilles de l'atelier. Comme il est attesté que l'ensemble de l'espace alloué à la fabrication monétaire, n'a pu être caractérisé par les interventions archéologiques, il faut admettre que les pièces où étaient rassemblées les opérations du monnayage de l'or n'ont pas été mises au jour. Cette observation confirme finalement les consignes dont rendent compte les sources monétaires indiquant la séparation du travail de ce métal de celui de l'argent[345].

Enfin, le *corpus* des monnaies découvertes dans l'atelier monétaire apparaît très limité compte tenu du nombre d'espèces ayant effectivement été frappées dans cette fabrique. Parmi les 98 pièces mises au jour, trois à cinq seulement sont associées à la fabrique rochelaise. Si les archéologues ont rendu compte de la fouille de niveaux correspondant à des espaces dévolus à la frappe monétaire, les étapes précédant cette ultime mise en forme monétaire, sont en revanche autrement plus représentées par un mobilier retrouvé dans des contextes plus anciens. Une telle répartition est *a priori* le résultat de contrôles plus importants en phase finale de la production.

Les fouilles menées sur la place de Verdun à La Rochelle ont ainsi mis au jour une partie des vestiges du second atelier monétaire royal de la ville qui était en activité entre la fin du XIV^{e} et le milieu du XVII^{e} siècle. Les structures métallurgiques découvertes sont autant de témoignages inédits de la fabrication monétaire.

Le mobilier rassemblé décrit *a priori* l'ensemble des étapes de fabrication correspondant à la technologie du monnayage au marteau. Si la mise en place d'une presse à balancier dans la dernière période de fonctionnement du second hôtel de la Monnaie de La Rochelle est attestée par la découverte des imposantes fondations de cette machine ainsi que par une paire de carrés non gravés, aucun objet métallique mis au jour ne résulte de l'utilisation de cette nouvelle technologie. Le matériel archéologique retrouvé doit fournir après son étude une somme d'informations remarquables pour la compréhension des techniques associées au monnayage au marteau dans un cadre officiel. Les futures discussions devront toutefois tenir compte du fait que l'ensemble de la chaîne opératoire est répartie sur différentes périodes de fonctionnement. Dans l'emprise des travaux archéologiques, les étapes de fonderie se voient particulièrement représentés dans

[345] cf. *supra*, p. 76.

les niveaux les plus anciens, l'espace étant par la suite dédié à la mise en forme de flans pour enfin devenir une salle de frappe des monnaies.

B. Faux monnayage : la grotte de Lauradieu (Aude)

Après avoir présenté la fouille d'un site occupé par une fabrique officielle de monnaie, cette partie sera consacrée à la description des travaux archéologiques qui ont mis au jour un atelier clandestin.

Au début des années soixante-dix, à la suite d'un sondage prospectif, le célèbre préhistorien J. Guilaine mettait au jour du matériel métallique dans une grotte située à proximité de la commune d'Auriac (Figure 26). Ce matériel se présente sous la forme de rondelles ainsi que de fragments de découpe. En 1974, la cavité est fouillée sous la direction de G. Rancoule. Cette intervention a complété la précédente avec du mobilier métallique du même type. Très caractéristique, il a été rapidement associé à une activité de faux-monnayage médiévale. Conservé au dépôt archéologique de Limoux (Aude), l'ensemble des objets liés à cette production de fausses monnaies m'a été confié pour étude.

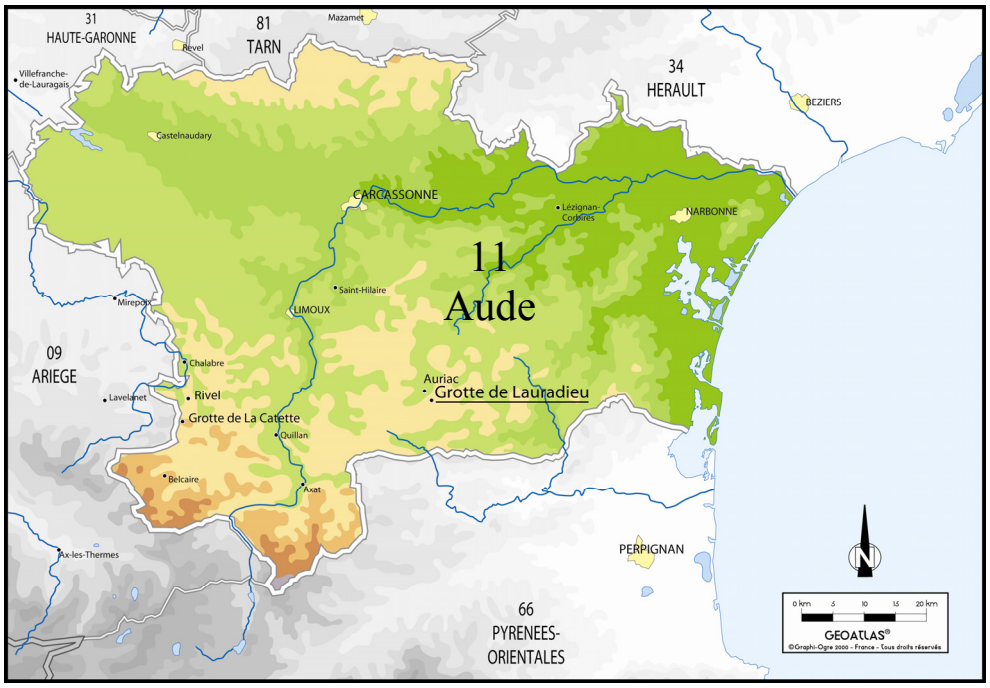


Figure 26 - Grotte de Lauradieu dans l'Aude (11).

1 - La fouille

Les informations présentées ici sont extraites de la publication de la fouille dans le Bulletin de la Société d'Etudes Scientifiques de l'Aude[346]. Elles ont pu être complétées par la consultation des minutes levées par G. Rancoule lors de son intervention archéologique.

La cavité où s'est organisée l'activité de faux-monnayage médiévale est assez petite. Il s'agit d'une unique salle de dix mètres de profondeur sur quatre à sept mètres de large. Au début de la fouille, la hauteur de la voûte se situe à 2,30 mètres au point le plus élevé, pour s'abaisser au niveau des parois (Figure 27). L'entrée de la grotte est partiellement barrée par les vestiges de murs en pierre sèche, dont il subsiste un mètre d'élévation. Ils n'ont cependant pas été datés.

Le carroyage mis en place lors de la fouille a repris celui choisi par les préhistoriens lors de leur premier sondage. Il délimite des zones d'un mètre de côté, ce qui doit permettre de révéler les différentes organisations au sein de la cavité. L'emprise de l'expertise s'étend sur la partie centrale de la grotte (Figure 27). Elle n'a pas caractérisé les zones les plus proches des parois dont les hauteurs sous voûte étaient peu élevées[347]. Toutefois, le carroyage proposé initialement a tout de même été élargi au cours de l'intervention lorsqu'il est apparu que l'occupation s'étendait en dehors des limites préalablement fixées. Selon les responsables de l'opération archéologique, la surface sondée aura finalement caractérisé intégralement l'occupation médiévale à laquelle est associée l'activité de faux-monnayage.

La stratigraphie relevée est assez simple décrivant seulement trois couches sur une profondeur d'investigation comprise entre 1 et 1,30 mètre. Les niveaux les plus anciens ont été datés de *l'âge des métaux* et du Bas-Empire, à partir du mobilier restreint qu'ils ont révélé. Les vestiges associés à l'occupation médiévale qui ont vu s'organiser la production de fausses monnaies, ont quant à eux, été retrouvés dans les premiers centimètres de la couche supérieure. Cette dernière a fait l'objet d'un remaniement très général postérieur à l'activité du faussaire.

[346] Rancoule G. *et al.*, La grotte nord de Lauradieu..., *op. cit.*, p. 171-176.
[347] Inférieures à un mètre.

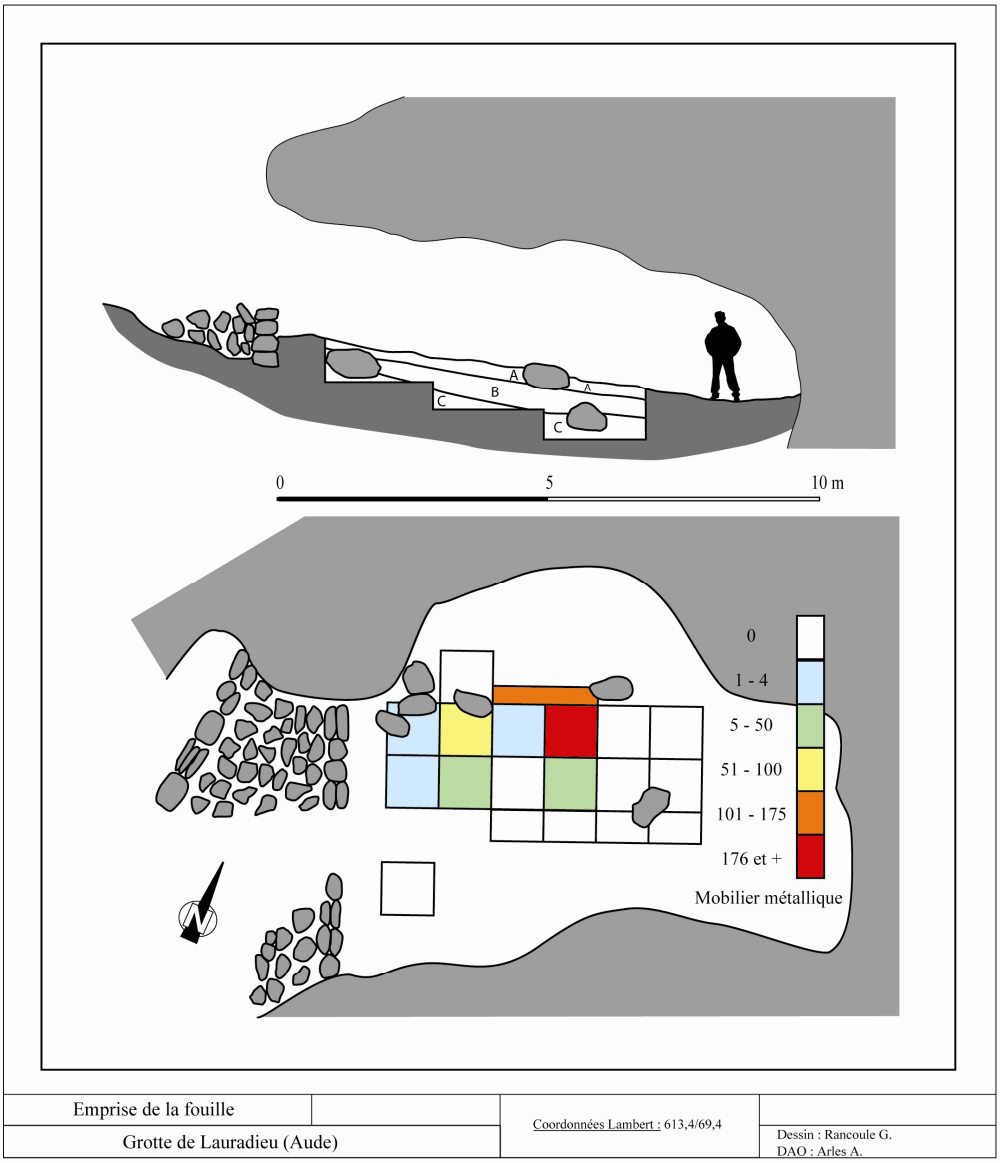


Figure 27 - Répartition du mobilier métallique de faux-monnayage au sein de la grotte de Lauradieu (Aude).

Sur la totalité de la surface couverte par l'intervention archéologique, aucun foyer n'a été mis au jour. Les quelques fragments de céramique grise médiévale retrouvés n'ont pas été utilisés dans des opérations métallurgiques. Cependant, il faut signaler que le porche de la cavité n'a pas été sondé. Or, il est probable que cet endroit constitue un lieu privilégié pour mettre en place un foyer.

La technique de fouille retenue est assez précise, comme en témoigne la taille des plus petits objets mis au jour par les archéologues[348]. Elle permet de supposer que le mobilier retrouvé rassemble une très grande partie du matériel métallique perdu ou laissé par le faux-monnayeur, à la fois en nombre mais aussi en types d'objets. D'un point de vue d'une réflexion sur une chaîne opératoire, ce *corpus* devrait permettre de décrire toutes les étapes de fabrication.

Une partie du matériel archéologique a été mis au jour au cours du démontage progressif des couches en tenant compte du carroyage. Toutefois, considérant que l'intervention était menée au sein d'une grotte, que le mobilier métallique d'une couleur sombre se trouvait dans une couche de terre noire et que certains objets présentaient des dimensions très restreintes, les déblais rassemblés ont été également tamisés. Cette opération a notamment révélé 230 fragments de métal supplémentaires.

La fouille en carrés a mis en évidence une répartition spatiale du mobilier au sein de la grotte. En ne considérant ici que l'activité de faux-monnayage, le recours à une telle méthode est nécessaire pour discuter d'une organisation potentielle du travail. En définitive, les archéologues ont relevé les répartitions de quatre classes d'objets métalliques : les flans pour certains argentés, les fragments de plaques, les copeaux. Cependant, les différentes distributions constatées n'ont pas de différences marquées. Elles sont toutes semblables à celle de la figure 27 qui présente la disposition de l'ensemble du mobilier métallique associé à la production de fausses monnaies. Cette carte témoigne d'une localisation d'opérations de fabrication monétaire au niveau de deux principaux espaces. Regroupant des fragments de mêmes types, il s'agit finalement de deux stations de travail non différenciées par les étapes de production.

Les archéologues ont par ailleurs constaté que ces aires de travail sont éclairées par le soleil, l'après-midi.

2 - Le matériel archéologique associé à la production de fausses monnaies

Dans l'ensemble du mobilier archéologique mis au jour au cours des fouilles de la grotte de Lauradieu, une très grande quantité de fragments métalliques a pu être associée à l'activité de faux-monnayage médiévale. Toutefois, parallèlement à cet ensemble conséquent qui regroupe principalement des déchets de production,

[348] cf. Figure 35 : Rognures de rectification, p. 160.

l'espace fouillé n'a pas révélé d'autres indices métallurgiques liés à cette fabrication clandestine.

Dans le cadre d'une recherche traitant des techniques de fabrications monétaires médiévales et notamment des questions propres au faux-monnayage, le *corpus* de la grotte de Lauradieu est un ensemble remarquable car il décrit *a priori* l'intégralité des étapes de fabrication. Il m'a été confié pour étude par G. Rancoule, responsable du dépôt archéologique de Limoux (Aude), où ce matériel était jusqu'ici conservé.

Les conditions d'humidité au sein de la cavité ainsi que le milieu d'enfouissement, n'ont pas entraîné d'importants phénomènes d'oxydation à la surface des échantillons métalliques. Ils n'ont été ni restaurés ni stabilisés. D'un point de vue analytique, afin de limiter les contaminations extérieures, il a simplement été décidé pour cette étude de faire un léger nettoyage : les objets ont été placés dans un bain à ultrasons d'eau distillée jusqu'à ce que la solution de rinçage, régulièrement changée, ne soit plus troublée.

Outre son lieu de découverte, tout à fait cohérent avec la clandestinité nécessaire à une fabrication illégale, le matériel mis au jour est caractéristique de cette production. Il totalise 441 objets métalliques pour une masse de 242 grammes. Il regroupe plusieurs classes morphologiques.

Elles comptent dans un premier temps, deux monnaies (Figure 28) dont l'une présente une argenture partielle. C'est notamment à partir de cette dernière qu'il a été possible de juger du caractère frauduleux de l'activité associée. Ces deux espèces constituent par ailleurs d'excellents jalons temporels pour dater l'occupation clandestine[349].

[349] cf. Datation du faux-monnayage de la grotte de Lauradieu, p. 513.

Figure 28 - Monnaies découvertes dans la grotte de Lauradieu (Aude).

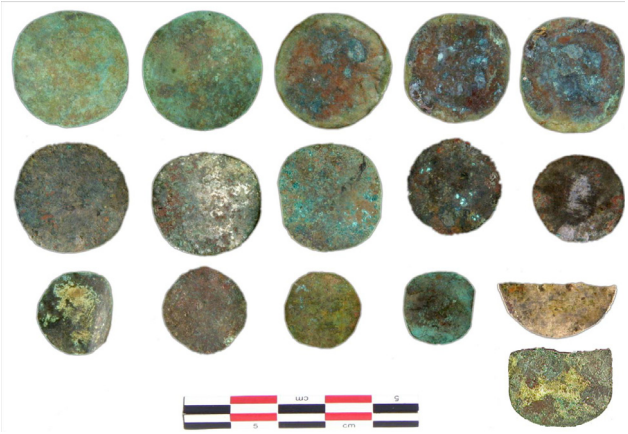


Figure 29 - Flans mis au jour dans la grotte de Lauradieu (Aude).

Parmi les objets retrouvés, il faut compter une collection de seize flans (Figure 29) dont les morphologies rappellent celles des monnaies découvertes. Deux d'entre eux sont fragmentés et recouverts d'une couche d'argenture visible.

Le reste du *corpus* constitue la majorité des fragments métalliques mis au jour au cours de la fouille (Figure 36 et Figure 37). Il s'agit pour la plupart des déchets de fabrication présentant différentes morphologies qui correspondent *a priori* à des mises en forme successives.

Une part des chutes découvertes résulte de la découpe de tôles métalliques, correspondant certainement aux restes des lames utilisées comme matière première dans cette fabrication. Soixante-douze d'entre elles ont été découvertes (Figure 30). Elles mettent en évidence certaines homogénéités dimensionnelles qui seront discutées par la suite. La question des perforations relativement grossières que présentent certains fragments, devra également être évoquée. Celles-ci sont particulièrement surprenantes dans la mesure où elles ont entraîné la déformation des tôles ainsi que des déchirures du métal.

Figure 30 - Tôles métalliques découvertes dans la grotte de Lauradieu (Aude).

Une seconde catégorie de déchets de fabrication est particulièrement caractéristique de cette activité de contrefaçons. Il s'agit de chutes de métal résultant de la découpe de flans (Figure 31 à Figure 34). La méthode de coupe retenue par le faussaire, implique que les chutes produites se présentent sous quatre formes. La morphologie arrondie finale est obtenue par l'élimination plus ou moins progressive des coins d'un carré de métal. Le *corpus* compte différentes populations de cisaillements pouvant éliminer jusqu'à quatre coins simultanément[350].

Figure 31 - Chutes correspondant à la découpe d'un seul coin des carreaux.

Figure 32 - Chutes correspondant à la découpe simultanée de deux coins.

[350] Il faut remarquer que la rupture de certains échantillons a pu intervenir au cours de leur enfouissement.

Figure 33 - Chutes correspondant à la découpe simultanée de trois coins.

Figure 34 - Chutes correspondant à la découpe simultanée de quatre coins.

Figure 35 - Rognures de rectification.

C'est notamment à partir de ces résidus de coupe qu'il sera possible d'évaluer l'importance de l'activité de faux-monnayage à laquelle ils sont associés.

Enfin, dans sa fabrication, le faussaire a dû parfois rectifier ses ébauches produisant à cette occasion des déchets de dimensions très restreintes. Soixante-et-un d'entre eux ont pu être collectés lors de la fouille (Figure 35).

D'un point de vue de la représentativité de chacune des classes morphologiques qui viennent d'être décrites, il apparaît que le *corpus* mis au jour est constitué pour une grande part de déchets de coupes à la fois en nombre (Figure 36), mais également en masse (Figure 37).

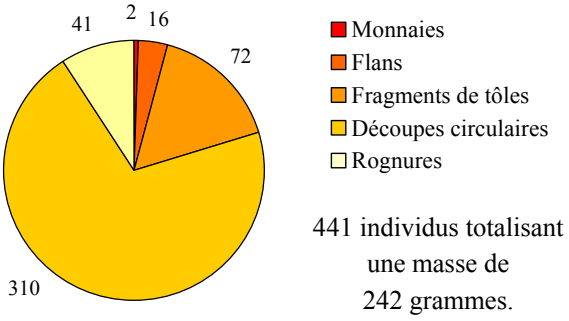


Figure 36 - Répartition en nombre du *corpus*[351].

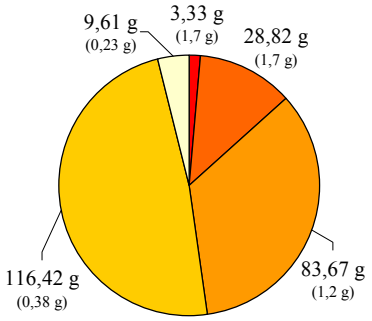


Figure 37 - Répartition en masse du *corpus*[352].

Le faussaire n'a pas particulièrement cherché à récupérer ses déchets de fabrication qui représentent toutefois une importante quantité de matière. Ce qui laisse penser, comme l'absence de céramique métallurgique et de foyer de fonte, que la préparation des alliages n'est pas de son fait.

[351] Mise en évidence des populations par catégories.
[352] Mise en évidence des masses moyennes par catégories.

II. Les sites issus de fouilles récentes

Les deux sites qui viennent d'être présentés constituent le *corpus* de base de cette étude. Ils permettent de traiter des questions liées aux techniques de fabrication dans un cadre officiel ainsi que dans un cadre illégal. Toutefois, il a été évoqué précédemment l'intérêt de disposer de données provenant de sites équivalents. Elles participent à une généralisation des hypothèses. De plus, cette démarche de confrontation doit permettre de vérifier si le monnayage royal est effectivement soumis à des règlements centralisés.

Les caractérisations préliminaires des mobiliers archéologiques découverts à La Rochelle ainsi qu'au sein de la grotte de Lauradieu, ont mis en évidence certaines limites liées à une réflexion technique menée à partir de ces types de *corpus*. Le fait de ne pas maîtriser toute les étapes qui précédent l'analyse des échantillons, notamment leur inventaire ou leur restauration, peut entraîner une perte d'informations[353].

Afin de s'affranchir dans une certaine mesure de ces inconvénients, mais également parce que les vestiges de La Rochelle constituaient alors le seul site de référence témoignant du monnayage médiéval royal, il a été décidé de mettre en place des opérations de prospections et de fouilles de deux autres sites témoins d'activités monétaires.

Par ailleurs, considérant que les vestiges recherchés étaient associés à des traitements métallurgiques, les interventions mises en œuvre ont permis d'expérimenter une méthode de prospection inédite, basée sur des dosages *in situ* de prélèvements de sédiments.

A. La recherche des sites

Les principaux arguments qui justifient la rareté de la découverte de vestiges liés à la fabrication monétaire médiévale, se comprennent principalement par la rareté intrinsèque de ce genre de site. En France, durant la période médiévale peu de villes possèdent un hôtel de la Monnaie. On rappellera également l'ordonnance de François 1er du mois de janvier 1549, qui atteste de l'existence à cette époque de 27 ateliers monétaires royaux seulement[354]. Par ailleurs, la production de monnaies représente des enjeux importants qui justifient que leur démantèlement soit effectué avec soin afin d'éviter une potentielle réutilisation des ateliers monétaires à des fins de faux-monnayage. Par ailleurs, généralement situés dans des contextes urbains, la fouille de ces vestiges est d'autant plus difficile. Il était

[353] cf. Faux monnayage : la grotte de La Catette (Aude), p. 242.
[354] Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 52.

nécessaire de tenir compte de ces paramètres pour définir un site pouvant faire l'objet de prospections archéologiques.

A contrario, la reconnaissance de sites de fabrication de fausses monnaies est moins soumise à ces difficultés. La clandestinité recherchée par les faussaires pour commettre leurs délits leur aura imposé de se mettre à l'écart des espaces urbains[355]. En outre, l'arrêt d'une activité de faux-monnayage ne demande pas non plus un soin particulier.

1 - Le choix des sites

Le choix des sites susceptibles de faire l'objet de prospections pour mettre au jour de nouveaux vestiges de référence liés à des fabrications monétaires, a suivi deux démarches qui dépendaient des types d'activités recherchées.

Dans le cadre du monnayage officiel, il était nécessaire de proposer une zone d'expertise dans un contexte compatible avec l'obtention d'autorisations en vue de potentielles fouilles ultérieures. Toute intervention dans un périmètre urbain était donc à exclure. Par ailleurs, même s'il est en général difficile de le présupposer, il était préférable que le site retenu, n'ait pas fait l'objet d'un démantèlement rigoureux.

L'atelier monétaire médiéval de Montreuil-Bonnin (Vienne) satisfaisait aux deux principaux critères de sélection. Bien qu'il ne reste aujourd'hui aucune structure visible témoignant de cette industrie passée, la forteresse à laquelle elle était associée, est encore bien conservée et ses abords directs n'ont pas fait les frais d'une urbanisation poussée. Par ailleurs, c'est à la suite d'un siège du château par les Anglais que la fabrique monétaire fut pillée, interrompant définitivement sa production. Cette conjugaison de circonstances favorables augmentait les possibilités de mettre au jour les vestiges de cette officine médiévale. Située dans le département de la Vienne, elle appartient à une zone géographique voisine de celle de l'atelier de La Rochelle.

D'un point de vue des sources historiques, l'existence de la fabrique de Montreuil-Bonnin est assez bien documentée. Plusieurs comptes conservés font

[355] Mantellier M. P., Notice sur un atelier..., *op. cit.*, p. 321.
Trojanowska Z., Les faux monnayeurs..., *op. cit.*, p. 213.
Rancoule G. *et al.*, La grotte nord de Lauradieu..., *op. cit.*, p. 171-176.
Ayme R. *et al.*, Atelier de faux-monnayeurs..., *op. cit.*, p. 93-94.
Jeanjacquot J.-C. *et al.*, *Pymont, la forteresse oubliée..., op. cit.*, p. 140.
Bompaire M. *et al.*, La grotte du Crés..., *op. cit.*, p. 71-76.
Miquel J. *et al.*, Un atelier de faux-monnayeur..., *op. cit.*, p. 187-195.

état d'une production très importante[356]. Cependant, les informations concernant la localisation précise d'éventuels vestiges associés à cette industrie sont beaucoup plus rares. En préalable à toute fouille, il était nécessaire d'établir un protocole de prospection afin de limiter l'étendue de l'intervention archéologique.

Parallèlement à cette recherche de témoignages du monnayage royal et à la suite d'une découverte « fortuite » au sein de la grotte de La Catette (Aude), il a été envisagé de mettre en place la fouille de cette cavité ayant abrité une fabrication de fausses monnaies. Une étude préliminaire du mobilier mis au jour par le premier inventeur du site, a rendu compte de l'intérêt d'organiser un chantier archéologique au sein de la grotte. Outre l'opportunité de compléter le *corpus* jusqu'alors collecté, cette intervention devait également apporter des informations sur l'organisation du travail au sein de l'atelier clandestin. Ce dont il était impossible de rendre compte précédemment puisque le premier inventeur n'avait pas documenté sa découverte par des informations topographiques et encore moins stratigraphiques.

Bien que l'espace de ce site soit plus limité que celui considéré à Montreuil-Bonnin, il était également nécessaire de mettre en place des relevés prospectifs préliminaires pour définir le périmètre de la fouille.

2 - Les moyens usuels de prospection

L'opération préliminaire réalisée sur chacun des deux sites sélectionnés a consisté à mettre en œuvre des relevés topographiques à l'aide d'un tachéomètre. Une telle démarche permet de disposer d'une carte sur laquelle peuvent être reportés les résultats obtenus par les autres moyens de prospection. La réalisation d'une cartographie fine participe également à la discussion portant sur la localisation de potentiels vestiges. Les micro-reliefs mis en évidence par cette méthode, peuvent avoir une origine anthropique d'autant plus probable qu'elle se voit corrélée avec les résultats d'autres données prospectives. C'est pourquoi, tous les relevés ont été effectués selon un maillage relativement fin qui rend rendre compte de variations spatiales très limitées. Il faut toutefois remarquer que l'échelle des sites étudiés intervient également dans le choix de la finesse des mesures. Il existe un compromis entre les surfaces à traiter et la précision recherchée sur les vestiges. Plus une topographie est fine plus elle demande un nombre important de relevés, augmentant d'autant la durée de la prospection.

[356] Bompaire M., La production monétaire en France au XIIIe siècle, *Gaceta Numismatica*, vol. 165, 2007, p. 5-32.

Le site de Montreuil-Bonnin a également fait l'objet de plusieurs campagnes de mesures géophysiques. Elles ont toutes été réalisées et traitées par G. Bonnamour de la société Arkémine[357]. Les méthodes de prospection magnétique et électrique, couramment utilisées en archéologie, ont été retenues.

Considérant que les vestiges recherchés sont associés à des opérations métallurgiques permettant d'envisager la présence de fours, il était intéressant de mettre en place des sondages magnétiques. Ces derniers, croisés avec des relevés topographiques, définissent des cartographies qui peuvent être utilisées dans le cadre de prospections archéologiques. Les phénomènes physiques impliqués dans cette technique d'investigation la rendent très sensible à la présence d'objets métalliques enfouis ainsi qu'à celle de structures en terre cuite ayant subi des températures élevées, comme les fourneaux, les cheminées, les zones d'incendies etc. Cependant, cette sensibilité dépend, en parallèle, de la profondeur d'enfouissement. Elle définit l'une des limites de cette méthode. En effet, les objets métalliques récents enfouis peu profondément, perturbent la lecture des cartographies obtenues. Ils provoquent des signaux équivalents à ceux de structures pourtant beaucoup plus imposantes mais cependant recouvertes d'une épaisseur plus importante de sédiments. C'est l'expérience du spécialiste qui traite les informations collectées qui intervient ici dans la discrimination des structures potentiellement intéressantes par rapport aux signaux parasites.

Cette méthode est également perturbée par l'environnement de surface. La présence de structures métalliques telles que les lignes électriques, ainsi que les toitures métalliques rendent parfois impossible la mise en œuvre de sondages magnétiques.

La prospection électrique, selon le modèle pôle-pôle, est la seconde méthode géophysique qui a été utilisée aux abords de la forteresse de Montreuil-Bonnin. Le principe de cette technique est de réaliser une cartographie de la résistivité apparente du sous-sol de la zone caractérisée. Ce paramètre est fonction de la nature des matériaux situés sous le point de mesure. Les structures bâties, composées de blocs de roches, beaucoup plus résistantes que le milieu dans lequel elles sont enfouies, vont être mises en évidence. Contrairement à ce qui vient d'être vu pour la méthode magnétique, les données physiques obtenues en mode électrique ne sont pas perturbées par l'environnement de surface, ni par des éléments parasites, ce qui en fait une méthode très fiable. Toutefois, les

[357] Arkemine, SARL agréée en archéologie préventive spécialisée notamment dans l'étude des mines, des carrières, des sites métallurgiques et minéralurgiques.

qualifications de l'expérimentateur chargé du traitement des informations obtenues, doivent lui permettre de discriminer les données archéologiques, des renseignements géologiques apparaissant également sur les cartographies établies.

La profondeur caractérisée par cette méthode est corrélée avec l'espacement entre les deux électrodes de mesure. Aujourd'hui couramment utilisée en archéologie, cette méthode de prospection électrique est en général réalisée avec un unique écartement d'électrodes préalablement fixé, ne renseignant dans ce cas que sur une seule profondeur du sous-sol étudié. Dans le cas présent, il a été fait le choix original de travailler avec trois écartements différents : 50 cm, 1 m et 2 m. La superposition des informations obtenues par ces trois sondages différents, donne une première vision stratigraphique. L'interprétation de ces données est cependant dans une certaine mesure plus complexe étant donné que la précision des cartes de résistivité apparente diminue avec l'éloignement des électrodes. Les différentes images obtenues du sous-sol sont plus « floues » à 2 m de profondeur.

Ces moyens de prospection ont mis en évidence des informations qui ont participé à la réflexion sur la localisation potentielle des vestiges recherchés. Cependant, elles ont également montré leurs limites entraînant certaines incertitudes.

Les sites étudiés ayant été les lieux d'opérations métallurgiques plus ou moins importantes, il était opportun de l'intégrer dans le développement d'une méthode inédite de prospection archéologique améliorant d'autant la qualité des données préalablement recueillies.

3 - Le développement d'une nouvelle méthode : la prospection géochimique de sites de métallurgie des métaux non ferreux

Les développements récents apportés aux appareils d'analyse par spectroscopie de fluorescence X ont permis de disposer de modèles portables permettant une utilisation hors du laboratoire. C'est notamment à ce type d'instruments qu'a recours l'industrie minière pour la recherche de zones exploitables. Il s'agit ici d'en présenter une utilisation dans le cadre d'une démarche inédite de prospection archéologique. A partir de la caractérisation de sédiments prélevés dans un périmètre d'intérêt, le caractère polluant des opérations métallurgiques impliquées devient un paramètre discriminant. Le protocole proposé ainsi permet de détecter la présence de vestiges d'activités de traitement des métaux non ferreux. Après la définition d'un protocole général, son application à l'étude de sites métallurgiques différents, a permis de révéler son efficacité ainsi que ses limites.

a. Etude bibliographique

1. Le développement de spectromètres portables d'analyse par fluorescence X

Comme pour les techniques de prospections géophysiques aujourd'hui employées en archéologie, c'est dans un premier temps pour des problématiques géologiques qu'un besoin de disposer de moyens analytiques portables s'est révélé nécessaire. Dans une réflexion sur la compréhension de l'organisation et de la formation d'un sous-sol, les informations extraites de la caractérisation de prélèvements interviennent pour une grande part. L'utilisation d'un appareillage permettant d'obtenir ces données directement sur le terrain permet aux géologues d'étudier de façon plus raisonnée de plus grandes surfaces. Les progrès qu'apporte une telle approche ont particulièrement favorisé les développements techniques de nouveaux analyseurs portables.

Parmi la gamme des différentes méthodes utilisées en prospection géologique, et notamment la recherche des gîtes métallifères, c'est l'analyse par spectrométrie de fluorescence X qui est très généralement employée. Dans le domaine de la caractérisation des solides, cette technique analytique présente de nombreux avantages qui encouragent à en proposer des applications en dehors d'un laboratoire. La simplicité du phénomène physique employé permet d'obtenir rapidement des informations concernant la composition d'un échantillon. Si l'obtention de données quantitatives demande la mise en place de procédures

d'étalonnage, la lecture d'un spectre révèle dans un premier temps des informations élémentaires qualitatives sans traitement complexe. De plus, c'est une technique de caractérisation non destructive qui ne nécessite pas une préparation particulière des échantillons analysés.

Les appareillages les plus courants sont constitués de trois parties indépendantes qui peuvent chacune faire l'objet d'améliorations : la source excitatrice de production de rayons X auxquels sont soumis les échantillons, le détecteur qui permet de mesurer la désexcitation de fluorescence, propre aux éléments analysés, ainsi que l'analyseur de ce signal. C'est sur les deux premiers modules que portent les recherches les plus récentes, afin d'en proposer des miniaturisations. Quant aux améliorations apportées au troisième composant, plus que de gagner en portabilité, elles sont dirigées dans un sens d'optimisation de la qualité des analyses.

La première étape vers la conception d'appareils portables prend place au début des années 90 : le développement de microprocesseurs puissants permettant de traiter les signaux produits. Il s'en est suivi la mise au point de détecteurs à semi-conducteurs, refroidis électroniquement par effet Pelletier[358]. Jusqu'alors leur refroidissement était réalisé par contact avec un réservoir rempli d'azote liquide. Celui-ci volumineux et difficilement transportable empêchait le déplacement des appareils d'analyse sur le terrain.

Des améliorations récentes ont été apportées par la suite aux technologies des sources de rayonnement X. Les premières utilisées étaient constituées de différents isotopes radioactifs artificiels émetteurs de rayons X. Aujourd'hui, les éléments généralement employés sont le cadmium 109, l'américium 241 et le fer 55 qui permettent selon l'isotope choisi, de faire varier l'énergie du rayonnement incident et ainsi la gamme des éléments détectés. Bien que cette technologie se retrouve encore sur des appareillages récents, elle implique certains inconvénients, notamment dus à l'utilisation de composés radioactifs. Ils obligent en particulier une conception matérielle permettant un confinement des radiations et interdisant les dispersions d'éléments radiogènes. D'autre part, compte tenu de la décroissance radioactive des sources employées, les émissions de celles-ci sont, pour la plupart, instables dans le temps. Avec des périodes de demi-vie[359] de 432,2, 2,73 et 1,27 années, respectivement pour l'américium 241, le fer 55 et le cadmium 109, les deux derniers radioisotopes peuvent voir rapidement diminuer

[358] Phénomène physique de déplacement de chaleur en présence d'un courant électrique au contact de deux matériaux différents.
[359] Durée au cours de laquelle la radioactivité d'un isotope décroît de moitié.

l'intensité de leurs rayonnements. Ces variations impliquent d'être corrigées par les programmes d'analyses, ce qui augmente l'incertitude de l'analyse. Et cette même décroissance nécessite aussi le changement des sources ayant trop perdu de leur capacité à émettre des rayons X. Or, excepté l'immobilisation de l'appareil durant cette opération, celle-ci implique aussi un coût non négligeable étant donné qu'elle doit être effectuée par des organismes qualifiés pour manipuler et traiter des déchets radioactifs. On comprend alors l'intérêt porté à l'utilisation d'une seconde technologie de source de rayonnement X, moins contraignante. C'est la miniaturisation des composés électroniques et le développement de tubes de rayon X basse tension qui ont permis de s'affranchir des inconvénients propres aux sources radioactives. Avec la mise au point d'appareillages fonctionnant sur batterie, on dispose de générateurs radiogènes stables dans le temps qui permettent d'optimiser les programmes de calculs améliorant la qualité des analyses quantitatives. De même, d'un point de vue de radioprotection, le risque est plus limité, puisque la production de rayonnement X n'intervient que lorsque l'appareil est sous tension.

Aujourd'hui, il existe sur le marché des spectromètres de fluorescence X de masse inférieure à deux kilogrammes développés spécialement pour une utilisation sur le terrain. Ils sont d'une utilisation très simple, notamment grâce à l'automatisation du traitement des résultats. En effet, avec les programmes spécifiques aux différentes classes de matériaux analysés (minerais, métaux et alliages, matériaux en couches minces…), l'opérateur peut choisir de relativement peu intervenir dans le traitement des données analytiques. Il s'agit d'algorithmes de calcul et de modèles d'autocalibration qui permettent de corriger les erreurs d'analyses possibles, propres à chaque type de matériau. Cette facilité d'utilisation a encouragé la généralisation de l'emploi de ces nouveaux appareils dans différentes industries. Adopté à l'origine par le domaine minier pour la prospection de zones potentiellement exploitables, cette technologie s'est généralisée aux contrôles au cours de l'extraction, avec des analyses sur les fronts de taille, ainsi que pour la surveillance de la qualité du minerai traité[360]. Si le nombre restreint d'articles récents propres à cette industrie traduit justement l'assimilation de la

[360] Bowie S. H. U. *et al.*, Electronic instruments for detecting and assaying beryllium ores, *Trans. Inst. Mining Met.*, vol. 69, 1959, p. 345-359.
Funtua I. I. *et al.*, Determination of tin in cassiterite ores and tailings by 241Am source X-ray fluorescence spectrometry, *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 48, n° 1, 1997, p. 103-104.
Idris Y. *et al.*, Rapid analysis with energy-dispersive X-ray fluorescence spectrometry for bauxite investigation on the Mambilla Plateau, North Eastern Nigeria, *Chemie der Erde - Geochemistry*, vol. 64, n° 4, 2004, p. 385-398.
Banza A. N. *et al.*, Improvement of the quartz sand processing at Hohenbocka, *International Journal of Mineral Processing*, vol. 79, n° 1, 2006, p. 76-82.

technique, d'un autre côté, ce sont les problématiques environnementales qui semblent faire l'objet, aujourd'hui, d'études qui généralisent l'emploi des nouveaux analyseurs portables.

Les nouvelles réglementations en matière de suivi des pollutions liées à des industries, présentes mais aussi passées, obligent à mettre en place des démarches de contrôle qui reposent en grande partie sur des mesures *in situ*, à proximité des activités à risques potentiels. Après avoir imposé des limites à respecter en termes de pollution, on comprend que les législateurs doivent proposer des protocoles pour évaluer le respect de leurs prescriptions, par l'intermédiaire d'organismes gouvernementaux. Pour la France, c'est notamment le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) qui réalise ces études à l'initiative du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable[361]. Elles permettent de définir les normes fixant les prescriptions qui interviennent dans le cadre des expertises environnementales[362]. L'*United States Environnemental Protection Agency* (USEPA) a, par ailleurs, formulé des consignes similaires pour le territoire américain[363] .

En parallèle de ces prescriptions législatives, de nombreuses études tentent de développer des stratégies similaires, visant à déterminer des concentrations en métaux lourds, dans des sédiments, avec des problématiques de santé publique, mais aussi de suivi des pollutions[364]. C'est notamment le plomb qui en est

---

[361] Ignatiadis I. *et al.*, *Outils et méthodes physiques et chimiques pour la détection des pollutions dans les sols. Dosage par fluorescence X et par colorimétrie des polluants métalliques et comparaison avec des méthodes d'analyse de laboratoire*, BRGM/RR-40312-FR, BRGM, 1998, 93 p.
Baubron J. C. *et al.*, *Première évaluation de la contamination des sols en plomb et autres éléments métalliques du secteur de Neuves-Maisons (Meurthe-et-Moselle). Rapport final*, BRGM/RP-53128-FR, BRGM, 2004, 138 p.
Laperche V. *et al.*, *Protocole d'échantillonnage des sols urbains pollués par du plomb*, BRGM/RP-52928-FR, BRGM, 2004, 27 p.
Laperche V., *Evaluation des performances du spectromètre portable de fluorescence X Niton XL723S (au laboratoire et sur le terrain)*, BRGM/RP-53377-FR, BRGM, 2005, 107 p.
[362] Afnor, *Caractérisation des déchets et du sol - Détermination de la composition élémentaire par fluorescence X*, 2007, 45 p.
[363] Method 6200, *Field portable X-ray fluorescence spectrometry for the determination of elemental concentrations in soil and sediment*, United States Environnemental Protection Agency, 2007, 32 p.
[364] Kilbride C. *et al.*, A comparison of Cu, Pb, As, Cd, Zn, Fe, Ni and Mn determined by acid extraction/ICP-OES and ex situ field portable X-ray fluorescence analyses, *Environmental Pollution*, vol. 143, n° 1, 2006, p. 16-23.
Bernick M. B. *et al.*, Application of field-portable X-ray fluorescence spectrometers for field-screening air monitoring filters for metals, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 43, n° 1-2, 1995, p. 91-99.
Clark S. *et al.*, Use of a field portable X-ray fluorescence analyzer to determine the concentration of lead and other metals in soil samples, *Ann Agric Environ Med*, vol. 6, n° 1, 1999, p. 27-32.

généralement l'objet, à cause de sa toxicologie et ses utilisations dans de nombreux domaines[365]. Or, même si des prescriptions visent aujourd'hui à en diminuer les usages, ils sont encore non négligeables. Par ailleurs, si certains emplois sont révolus, leurs conséquences sont encore mesurables dans l'environnement[366].

L'archéométrie est aussi un domaine dans lequel la spectrométrie de fluorescence X est généralement utilisée, en particulier pour le caractère non destructif de l'analyse. Le développement d'appareillages portables ne peut que représenter une nouvelle voie très précieuse. Les caractérisations au sein des musées est ainsi possible. Ce qui est particulièrement intéressant pour la connaissance des objets archéologiques jusqu'alors jamais analysés car trop précieux, fragiles ou volumineux pour être déplacés dans un laboratoire. Par ailleurs, après consultation des inventaires bibliographiques du *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, il apparaît que l'archéométrie y occupe une place importante[367]. Les recherches généralement décrites sont associées à des problématiques de provenances de matériaux, notamment lithiques, mais traitent aussi d'analyses réalisées sur des tableaux et des fresques, pour des questions liées

---

Petrosyan V. *et al.*, Lead in residential soil and dust in a mining and smelting district in northern Armenia: a pilot study, *Environmental Research*, vol. 94, n° 3, 2004, p. 297-308.
Stallard M. O. *et al.*, X-ray fluorescence spectrometry for field analysis of metals in marine sediments, *Marine Pollution Bulletin*, vol. 31, n° 4-12, 1995, p. 297-305.
Vanhoof C. *et al.*, Energy-dispersive X-ray fluorescence systems as analytical tool for assessment of contaminated soils, *Journal of Environmental Monitoring*, vol. 6, n° 4, 2004, p. 344-350.
Jorgensen N. *et al.*, Multi-elemental EDXRF mapping of polluted soil from former horticultural land, *Environment International*, vol. 31, n° 1, 2005, p. 43-52.

[365] Il a été par exemple employé, et l'est encore parfois, dans les carburants automobiles, les peintures, les batteries, les pesticides…
Darmendrail D. *et al.*, *Impact de l'utilisation des métaux lourds sur la santé et l'environnement. Contributions du BRGM aux commissions nationales*, BRGM/RP-51045-FR, BRGM, 2001, 19 p.

[366] Wolz S. *et al.*, Residential arsenic and lead levels in an agricultural community with a history of lead arsenate use, *Environmental Research*, vol. 93, n° 3, 2003, p. 293-300.

[367] Potts P. J. *et al.*, Atomic spectrometry update. X-ray fluorescence spectrometry, *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, vol. 18, 2003, p. 1297-1316.
Potts P. J. *et al.*, Atomic spectrometry update. X-ray fluorescence spectrometry, *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, vol. 19, n° 10, 2004, p. 1397-1419.
Potts P. J. *et al.*, Atomic spectrometry update. X-ray fluorescence spectrometry, *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, vol. 20, n° 10, 2005 p. 1124-1154.
Potts P. J. *et al.*, Atomic spectrometry update. X-ray fluorescence spectrometry, *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, vol. 21, n° 10, 2006, p. 1076-1107.
West M. *et al.*, Atomic spectrometry update. X-ray fluorescence spectrometry, *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, vol. 22, n° 10, 2007, p. 1304-1332.

aux techniques picturales et de contrôles au cours de restaurations[368]. Cependant, les appareils portables de spectrométrie utilisés dans la majorité des études décrites ne sont pas véritablement des instruments de terrain à la différence de ceux employés en prospection minière. Il s'agit d'instrumentations transportables[369] souvent qualifiées de laboratoires mobiles, néanmoins incompatibles avec un fonctionnement sur un site archéologique. Ce choix d'utiliser préférentiellement les configurations transportables par rapport aux portables, tient en grande partie à la dimension de la surface d'analyse désirée. La réalisation de microanalyses est généralement indispensable à la compréhension de beaucoup de problématiques archéométriques. Cependant, compte tenu des systèmes utilisés, optimisés dans un but de miniaturisation, les appareils de terrain ne permettent pas de caractérisations aux échelles microscopiques. Ces dernières imposent, comme rayonnement incident, l'utilisation de microfaisceaux. Or, les technologies nécessaires à leur production sont très absorbantes pour les rayons X (en particulier celles utilisant des collimateurs). Seuls les appareillages transportables et de laboratoire disposent de sources assez puissantes (grâce en particulier à leurs volumineux générateurs de haute tension) pour produire des flux de photons X assez importants pour ne pas être trop atténués.

En archéologie, l'utilisation d'appareils portables d'analyse par spectrométrie de fluorescence X a été proposée pour des caractérisations sur le terrain dans un but d'aide à l'échantillonnage et à la compréhension des différentes phases

---

[368] Williams-Thorpe O. *et al.*, Field-portable non-destructive analysis of lithic archaeological samples by X-ray fluorescence instrumentation using a mercury iodide detector: Comparison with wavelength-dispersive XRF and a case study in British stone axe provenancing, *Journal of Archaeological Science*, vol. 26, n° 2, 1999, p. 215-237.
Karydas A. G. *et al.*, A compositional study of a museum jewellery collection (7th-1st BC) by means of a portable XRF spectrometer, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, vol. 226, n° 1-2, 2004, p. 15-28.
Pappalardo L. *et al.*, Complementary use of PIXE-alpha and XRF portable systems for the non-destructive and in situ characterization of gemstones in museums, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, vol. 239, n° 1-2, 2005, p. 114-121.
Romano F. P. *et al.*, Quantitative non-destructive determination of trace elements in archaeological pottery using a portable beam stability-controlled XRF spectrometer, *X-Ray Spectrometry*, vol. 35, n° 1, 2006, p. 1-7.
Maravelaki-Kalaitzaki P., Black crusts and patinas on Pentelic marble from the Parthenon and Erechtheum (Acropolis, Athens): characterization and origin, *Analytica Chimica Acta*, vol. 532, n° 2, 2005, p. 187-198.
Angelini E. *et al.*, Potentialities of XRF and EIS portable instruments for the characterisation of ancient artefacts, *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, vol. 83, n° 4, 2006, p. 643-649.
Cotte M. *et al.*, Blackening of Pompeian Cinnabar Paintings: X-ray Microspectroscopy Analysis, *Anal. Chem.*, vol. 78, n° 21, 2006, p. 7484-7492.
[369] Les masses des appareils transportables sont de l'ordre de 20 à 50 kg.

d'activités. Dans le cadre de prospections réalisées sur des sites paléométallurgiques, la mise en évidence de multiples classes de composition de scories permet de définir des exploitations ou des technologies distinctes[370].

La démarche de prospection qui sera définie par la suite, est assimilable à celles que l'on retrouve en exploration minière ou dans le cadre de caractérisation de sites pollués. Elle repose sur une approche géochimique d'un site archéologique. Elle part du principe qu'une activité métallurgique ancienne, en tant qu'industrie polluante, aura laissé dans le sol des résidus de son fonctionnement. La localisation de sources de pollutions dans une zone de prospection doit donc permettre de localiser les vestiges archéologiques potentiels enfouis qui en sont l'origine.

2. L'utilisation de données géochimiques en archéologie

La considération de données géochimiques en archéologie n'est pas une démarche inédite. Elle se définit par la recherche, dans les sols d'une zone d'intérêt, d'anomalies de composition résultant d'une activité anthropique. Les premières études publiées décrivant ce type de prospection révélaient l'occupation humaine d'un espace par une augmentation du taux de phosphore dans le sol. C'est A. Arrhenius qui, au cours de ses travaux visant à réaliser des cartographies de composition de sol pour une entreprise sucrière suédoise, remarque le premier une augmentation du taux de phosphore dans les zones à proximité de sites archéologiques d'occupation médiévale[371]. La variation du taux de cet élément dans un substrat permet de supposer une activité anthropique. Fixé sous forme de phosphate, le phosphore est très peu mobile dans les sols, sa quantité tendra à diminuer dans les terres agricoles qui ne sont pas fertilisées, tandis qu'elle augmentera dans les espaces occupés par l'homme à la suite notamment d'emplois d'engrais organiques ou à cause de stockages de déchets. De même que, présent en concentration importante dans les os ou le sang, on en rencontrera des taux supérieurs à la normale au voisinage de lieux d'inhumation. A partir de ces paramètres simples, de nombreuses études ont pu localiser, dans une démarche prospective, des occupations humaines dans des espaces qui ne présentaient *a priori* aucun indice visible[372]. Si une récente étude recommande l'utilisation de la

[370] Wagner G. A. *et al.*, Geologische Untersuchungen zur fruhen Metallurgie in NW-Anatolien, *Bulletin of the Mineral Research & Exploration, Turkey*, vol. 101, 1983, p. 47-81.
Helmig D. *et al.*, Archaeometallurgical fieldwork and the use of a portable x-ray spectrometer, *Archaeometry*, vol. 31, n° 2, 1989, p. 181-191.
[371] Arrhenius A., Die Bodenanalyse im Dienst der Archäologie, *Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung und Bodenkunde, Teil B, 10 Jahrgang*, 1931, p. 427-439.
[372] Sjoberg A., Phosphate analysis of anthropic soils, *Journal of Field Archaeology*, vol. 3, n° 4, 1976, p. 447-454.

spectrométrie de fluorescence X pour évaluer la quantité de phosphore dans les sols, puisqu'elle permet de disposer de limites de détection plus basses, les protocoles généralement utilisés sont construits à partir d'analyses chimiques réalisées dans un laboratoire[373]. D'un autre côté, il existe des démarches de prospection basées sur des caractérisations *in situ* établies à partir de réactions chimiques colorimétriques. De mise en place simple, elles ont été en particulier proposées pour la définition de procédures de terrain permettant l'analyse des échantillons de sols à proximité des zones de prélèvements[374]. Après une extraction du phosphate contenu dans un échantillon par un réactif liquide, celui-ci est ensuite mélangé à une solution dont la réaction avec le phosphore induit un changement de couleur dont l'intensité est fonction de la quantité de ce dernier. Ces protocoles ont révélé l'intérêt pour les archéologues d'utiliser ces moyens de terrain. En effet, ils offrent des informations instantanées directement comparables aux autres approches de prospection, facilitant l'établissement de stratégies de fouilles[375].

Dans le domaine de l'archéologie minière et métallurgique, J.-G. Morasz et R. Pulou exposent une démarche voisine à celle qui vient d'être décrite[376]. En effet, lors de prospections réalisées sur des sites miniers et métallurgiques médiévaux, il est possible de découvrir des meules de pierre. Or, il est en général

---

Eidt R. C., Detection and examination of anthrosols by phosphate analysis, *Science*, vol. 197, n° 4311, 1977, p. 1327-1333.
Cavanagh W. G. *et al.*, Soil phosphate, site boundaries, and change point analysis, *Journal of Field Archaeology*, vol. 15, n° 1, 1988, p. 67-83.
Lippi R. D., Paleotopography and phosphate analysis of a buried jungle site in Ecuador, *Journal of Field Archaeology*, vol. 15, n° 1, 1988, p. 85-97.
Lillios K. T., Phosphate fractionation of soils at Agroal, Portugal, *American Antiquity*, vol. 57, n° 3, 1992, p. 495-506. Parnell J. J. *et al.*, Soil chemical analysis of ancient activities in Ceren, El Salvador: A case study of a rapidly abandoned site, *Latin American Antiquity*, vol. 13, n° 3, 2002, p. 331-342.

[373] Marwick B., Element concentrations and magnetic susceptibility of anthrosols: Indicators of prehistoric human occupation in the inland Pilbara, Western Australia, *Journal of Archaeological Science*, vol. 32, n° 9, 2005, p. 1357-1368.
Leonardi G. *et al.*, Soil phosphorus analysis as an integrative tool for recognizing buried ancient loughsoils, *Journal of Archaeological Science*, vol. 26, n° 4, 1999, p. 343-352.

[374] Terry R. E. *et al.*, Quantitative phosphorus measurement: A field test procedure for archaeological site analysis at Piedras Negras, Guatemala, *Geoarchaeology: An International Journal*, vol. 15, n° 2, 2000, p. 151-166.

[375] Eidt R. C., A rapid chemical field test for archaeological site surveying, *American Antiquity*, vol. 38, n° 2, 1973, p. 206-210.
Terry R. E. *et al.*, Quantitative phosphorus measurement..., *op. cit.*, p. 151-166.
Parnell J. J. *et al.*, Using in-field phosphate testing to rapidly identify middens at Piedras Negras, Guatemala, *Geoarchaeology: An International Journal*, vol. 16, n° 8, 2001, p. 855-873.

[376] Morasz J.-G. *et al.*, Les meules rotatives des mines romaines de Villefranche-de-Rouergue (Aveyron) : La preuve chimique de leur usage « industriel », *Revue d'archéométrie*, n° 21, 1997, p. 141-144.

difficile pour les archéologues de conclure avec certitude à une utilisation alimentaire (meules à grain) ou minéralurgique (meules à minerai). La méthode exposée par Morasz et Pulou permet de déterminer les pierres ayant été utilisées dans une chaîne opératoire de production de l'argent. Si elles ne présentent à leur surface aucun reste visible des matériaux qu'elles ont servi à broyer, il est cependant possible d'y révéler de faibles concentrations de plomb, marqueur de leur utilisation métallurgique. Ce métal est mis en évidence par un réactif changeant de couleur à son contact. Il s'agit d'un test très simple réalisable sur le terrain et permettant d'obtenir instantanément des résultats qualitatifs avec de bonnes limites de détection. Enfin, en perspective de cette étude, les auteurs proposent son utilisation dans une recherche de sites métallurgiques en caractérisant la présence de plomb dans des sédiments. Cette démarche est à rapprocher de celle qui sera présentée par la suite. Toutefois, le caractère qualitatif du protocole présenté apparaît *a priori* comme limitant. Il suffit en effet, de considérer l'exemple d'un site minier où il sera impossible, sans disposer d'informations quantitatives, de révéler une anomalie géochimique d'origine potentiellement archéologique, dans un bruit de fond local et naturel déjà élevé trouvant sa raison dans la proximité d'un gisement à l'origine même de la mise en place de l'exploitation.

Egalement dans le cadre d'études archéologiques de sites de production de l'argent, certains auteurs abordent des problématiques liées aux périodes de fonctionnement de ces activités d'un point de vue géochimique différent. A partir d'études de coupes stratigraphiques de zone de forte sédimentation comme celles que représentent par exemple les tourbières, il est possible par une approche multi-disciplinaire, de dater et d'évaluer la durée de fonctionnement d'activités métallurgiques. En effet, après avoir révélé dans une séquence stratigraphique, des pollutions associables au traitement de la galène argentifère et du plomb, une approche palynologique ou par datation au carbone 14 permettra de les situer sur un axe temporel. Parallèlement, leur analyse isotopique, évaluant notamment les quantités des différents isotopes du plomb, permet de localiser l'origine des éléments polluants détectés. Cette approche permet ici aux chercheurs de travailler au niveau local d'un district minier, définissant des époques de production et d'exploitation de différents filons, mais elle offre aussi un point de vue plus général en s'attachant à définir des chronologies de pollutions à l'échelle d'un pays[377].

[377] Nieminen T. M. *et al.*, Enrichment of Cu, Ni, Zn, Pb and As in an ombrotrophic peat bog near a Cu-Ni smelter in Southwest Finland, *The Science of The Total Environment*, vol. 292, n° 1-2, 2002, p. 81-89.

Enfin, un dernier aspect de l'utilisation de données géochimiques en archéologie doit être assimilé aux différentes études présentées précédemment. C'est d'ailleurs à ce type de démarche que sera apparenté le nouveau protocole de prospection décrit par la suite. Il s'agit de méthodes appliquées à la recherche de sites archéologiques de métallurgie des métaux non ferreux qui vont chercher à mettre en évidence dans les sols, des concentrations anormales d'éléments métalliques. Elles supposent que ces anomalies géochimiques témoignent *a priori* d'activités anthropiques. On y reconnaît ici une démarche similaire à celles décrites pour les problématiques du phosphore. Dans les sédiments d'une zone expertisée, la mise en évidence de fortes concentrations en métaux lourds doit permettre de proposer la localisation des lieux où s'établissaient les opérations à l'origine des pollutions constatées. Dans l'article de M.-C. Bailly-Maître et N. Jacob, la mise en place de cette méthode apparaît limitée par la technique analytique choisie qui oblige un retour au laboratoire, introduisant un décalage temporel entre les observations de terrain et les résultats analytiques intervenant *a posteriori*[378]. Alors que l'emploi d'appareils d'analyse par spectrométrie de fluorescence X décrit dans deux récentes publications semble faciliter la compréhension *in situ* d'un site archéologique orientant instantanément une prospection[379].

Dans sa thèse, F. Téreygeol a considéré l'impact environnemental des activités minières et métallurgiques associé à l'exploitation des mines carolingiennes de

---

Ploquin A. *et al.*, Medieval lead smelting on the Mont-Lozère, southern France, dans *Proceedings of Archaeometallurgy in Europe*, Milan, Italie, 2 t., AIL, 2003, t. 1, p. 635-644.
Baron S. *et al.*, Medieval lead making on Mont-Lozere Massif (Cevennes-France): Tracing ore sources using Pb isotopes, *Applied Geochemistry*, vol. 21, n° 2, 2006, p. 241-252.
Farmer J. G. *et al.*, Stable lead isotope record of lead pollution in Loch Lomond sediments since 1630 A.D, *Environ. Sci. Technol.*, vol. 30, n° 10, 1996, p. 3080-3083.
Shotyk W. *et al.*, History of atmospheric lead deposition since 12,370 C14 yr BP from a peat bog, Jura Mountains, Switzerland, *Science*, vol. 281, n° 5383, 1998, p. 1635-1640.
Weiss D. *et al.*, Atmospheric Pb deposition since the industrial revolution recorded by five Swiss peat profiles: Enrichment factors, fluxes, isotopic composition, and sources, *Environmental Science & Technology*, vol. 33, n° 9, 1999, p. 1340-1352.
Alfonso S. *et al.*, A European lead isotope signal recorded from 6000 to 300 years BP in coastal marshes (SW France), *Atmospheric Environment*, vol. 35, n° 21, 2001, p. 3595-3605.
De Vleeschouwer F. *et al.*, Atmospheric lead and heavy metal pollution records from a Belgian peat bog spanning the last two millenia: Human impact on a regional to global scale, *Science of The Total Environment*, vol. 377, n° 2-3, 2007, p. 282-295.

[378] Bailly-Maître M.-C. *et al.*, Analyse de la pollution minière de rivières de l'Oisans, application à l'archéologie, *Archéologie du Midi médiéval*, vol. 19, 2001, p. 67-77.

[379] Shalev S. *et al.*, XRF study of archaeological and metallurgical material from an ancient copper-smelting site near Ein-Yahav, Israel, *Talanta*, vol. 70, n° 5, 2006, p. 909-913.
Berna F. *et al.*, Sediments exposed to high temperatures: reconstructing pyrotechnological processes in Late Bronze and Iron Age Strata at Tel Dor (Israel), *Journal of Archaeological Science*, vol. 34, n° 3, 2007, p. 358-373.

Melle[380]. Bien que son objectif initial n'ait pas été la définition d'une nouvelle méthode de prospection, la démarche suivie lui a finalement permis de l'envisager. En effet, la mise en place d'une stratégie d'échantillonnage dictée par les localisations de vestiges archéologiques a révélé des compositions différentes selon la proximité des sources de pollutions et les types d'activités. Cependant, là aussi, la méthode utilisée, l'analyse par spectrométrie d'absorption atomique, empêchait une interactivité efficace avec les observations de terrain puisque finalement les différentes études se sont poursuivies sur deux années.

b. Protocole de prospection géochimique pour la mise en évidence de sites archéologiques de métallurgie

1. Introduction

Dans le cadre d'une recherche de vestiges archéologiques associé à une activité de production et de traitement de métaux, les pollutions engendrées par cette industrie peuvent devenir un paramètre de prospection. Celle-ci vise à mettre en évidence dans le sol des anomalies de compositions associées à d'anciennes activités métallurgiques et aux déchets qu'elles ont pu produire. En considérant une chaîne opératoire générale minéralurgique et métallurgique, il est possible de lister les différents résidus successivement produits, susceptibles de devenir les indices d'activités aujourd'hui révolues.

En amont du processus, au cours de l'extraction et du traitement de la matière minérale issue d'un gisement métallifère, les étapes qui interviennent ont pour but de séparer le minerai des « roches stériles » dans lesquelles il est inclus. Le résultat d'opérations de triage, concassage, broyage et lavage, est la production de plusieurs types de déchets. Ceux-ci sont intéressants en terme de prospection car si la finalité des précédentes opérations minéralurgiques est d'extraire les minéraux de valeur exploités de la gangue qui les entoure, cette séparation n'est jamais parfaite. Il subsiste une certaine quantité de minerai qui se retrouve dans les déchets[381]. Ces dernières peuvent également avoir concentré des éléments qui n'ont pas été exploités[382]. Les résidus minéralurgiques présentent donc une

[380] Téreygeol F., *Les mines d'argent carolingiennes de Melle*, Thèse de doctorat d'archéologie de l'Université Panthéon-Sorbonne, Paris 1, 2001, p. 398-408.
[381] *Ibidem*, p. 390-392.
[382] Le cas de l'exploitation médiévale des gisements plomb, zinc, argent permet d'illustrer cette proposition. A cette époque, les procédés nécessaires à l'obtention de zinc métal à partir du minerai extrait de ces gîtes n'étaient pas connus. Les composés qui en contenaient, n'étaient donc pas retenus lors des opérations minéralurgiques. Ils entraînaient alors par leur composition, un enrichissement de zinc dans les dépôts de déchets.

composition propre, *a priori* différente de celle du milieu où ils sont déposés. Ils constituent alors un paramètre de prospection.

Dans la chaîne d'élaboration des métaux vient ensuite la métallurgie extractive correspondant aux étapes de fusion. Dans cette problématique archéologique, seuls les procédés les plus anciens seront évoqués. Ils correspondent à des opérations métallurgiques par voie sèche, ou pyrométallurgie[383]. Ils peuvent se résumer à des réactions de grillage, calcination, fusion, réduction où d'oxydation. Elles aussi vont produire des déchets, notamment sous forme de scories. Celles-ci sont constituées en majorité des éléments fondus de roches stériles qui n'ont pas été séparés du minerai lors des étapes minéralurgiques. Elle accumule aussi les sous-produits des réactions qui ne présentent pas d'intérêt à être récupérés ainsi que certains éléments métalliques n'ayant pas réagi. Dans certains cas, elle permet également d'évacuer des réactifs intentionnellement ajoutés pour permettre les transformations chimiques. Comme on l'a vu précédent pour les opérations minéralurgiques, il apparaît ici que les étapes de production des métaux vont, elles aussi, signer leur présence par une formation de déchets dont la composition est explicite. A ces derniers, s'ajoutent par ailleurs les résidus des structures et objets utilisés dans ces processus, principalement constitués des fragments de céramiques métallurgiques comme architecturales. Ils constituent, une fois usagés, des éléments pollués et, à leur tour, polluants.

La mise en forme des objets à partir des métaux préalablement produits intervient finalement à l'extrémité de la chaîne. Elle se résume sous le terme de métallurgie secondaire qui regroupe à la fois les activités de fonte, d'affinage et de travail du métal qu'il soit liquide ou solide. Elles représentent les dernières étapes dans le processus d'élaboration. Et compte tenu des coûts importants en main d'œuvre et matériaux des opérations d'obtention de la matière première métallique qui viennent d'être évoquées, elles doivent par conséquent limiter le plus possible leur production de déchets métalliques. Les rejets résultent en majorité des activités de fontes et vont regrouper principalement les fragments de creusets, de moules usagés, sables de fonderie, ainsi que les parois de fours. Ici, c'est le contact avec le métal en fusion et, dans certains cas, de possibles réactions locales, qui induisent des pollutions sur les surfaces des différents résidus. Ces derniers sont cependant restreints, de même que le volume global des déchets rejetés est plus limité que ceux qui se retrouvent en exploitation minière et métallurgie extractive.

[383] S'il existe des métallurgies dites par voie humide, l'hydrométallurgie, où les réactifs réagissent en solution après leur dissolution, celles-ci correspondent aux procédés les plus récents.

Parallèlement aux différentes étapes qui se succèdent dans la chaîne de production et d'élaboration d'objets métalliques, certaines opérations de retraitement des déchets métallurgiques peuvent avoir été mises en place. Elles produiront dans ce cas d'autres formes de rejets. Dans le cadre de la métallurgie extractive, la production d'argent à partir de galène argentifère en offre une illustration. Les scories formées dans cette industrie font l'objet d'un broyage afin d'en extraire les billes de plomb-argent qui y ont été emprisonnées[384]. Cette opération permet sans une mise en œuvre difficile de récupérer un peu plus de matière qui aurait été perdue. De même, dans la continuité de la chaîne opératoire, c'est la fabrication monétaire au Moyen Age qui fournit une seconde illustration de la mise en place de politiques de récupération. Compte tenu du coût élevé des métaux employés dans cette industrie, en particulier l'or et l'argent, il est possible d'attester de l'existence de différents procédés de récupération des métaux involontairement rejetés[385].

Enfin, un paramètre n'a pas encore été pris en compte alors qu'il se retrouve à chacune des étapes. En tant qu'activités industrielles polluantes, celles-ci vont avoir d'autres impacts mesurables qui ne sont pas directement associés à la production de déchets. Un autre type de résidu peut intervenir dans une recherche archéologique : la pollution engendrée par l'occupation des sols au cours d'opérations métallurgiques. Les éléments qui la composent et qui pourraient être résumés sous le terme de « sols d'ateliers », représentent un marqueur très pertinent. Il s'agit des poussières ou des petits fragments de déchets qui vont être accumulés et progressivement sédimentés au niveau des zones de travail. S'il a lieu, le nettoyage de ces espaces, ne sera *a priori* jamais rigoureux au point d'éliminer la totalité des sédiments déposés. A l'inverse, des déchets produits lors de ces mêmes opérations, qui sont déplacés compte tenu de leur volume, pour être rassemblés dans des zones de décharges, les « sols d'atelier » constituent des marqueurs très précis des lieux de mise en œuvre des opérations auxquelles ils sont associés.

A partir de l'impact environnemental localisé d'une activité métallurgique passée, mais aussi des déchets qu'elle a produits, il est en définitive possible de définir une approche prospective qui lui est propre. De compositions fondamentalement différentes de celles des milieux dans lesquels ils ont été enfouis, les résidus des multiples opérations impliquées caractérisent des anomalies géochimiques. La définition d'un protocole permettant leur mise en

[384] *Id*.
[385] cf. Le retraitement des déchets, p. 105.

évidence dans un espace prospecté, constitue la base d'une méthode d'expertise archéologique. La localisation dans le sol de taux d'éléments métalliques anormaux permet de supposer la présence de structures paléométallurgiques. C'est en définitive cette même démarche qui a été envisagée dans la recherche de sites d'occupation humaine, à partir du dosage du phosphore dans le sol[386]. Et si de précédentes études en ont proposé des adaptations appliquées à la reconnaissance de vestiges métallurgiques, elles ont montré leurs limites en définissant des protocoles incompatibles avec une expertise de terrain[387]. Leur principal inconvénient provient des méthodes analytiques prescrites. En exigeant un retour des échantillons au laboratoire, elles diminuent l'interactivité des résultats obtenus avec les observations de terrain. Par ailleurs, leur coût et le temps important nécessaire à la préparation pré-analytique peuvent conduire à limiter le nombre de prélèvements et dès lors la précision de la compréhension d'un espace.

Le recours à un appareil d'analyse portable permettant un dosage des échantillons à proximité de la zone prospectée et dont le coût de fonctionnement peu élevé autorise la multiplication des prélèvements définit ici une démarche inédite.

Dans le cadre de cette recherche de sites paléométallurgiques, ce sont notamment les éléments tels que l'antimoine, l'argent, l'arsenic, le cuivre, le mercure, le plomb ou le zinc qui sont particulièrement recherchés.

2. Un protocole inédit de prospection archéologique

Le principe général de la méthode de cette prospection est de chercher à révéler la présence potentielle de vestiges liés à une activité métallurgique à partir de la caractérisation d'anomalies métalliques dans un sol. La démarche se décompose en deux grandes étapes successives : dans un premier temps, le prélèvement sur le terrain d'échantillons de sédiments, et dans un deuxième temps l'analyse dans un laboratoire de campagne.

Cette méthode nécessite peu de matériel. Elle est présentée sur la figure 38, elle se déroule selon une succession d'étapes simples.

---

[386] Sjoberg A., Phosphate analysis of anthropic soils, *op. cit.*, p. 447-454.
Eidt R. C., Detection and examination..., *op. cit.*, p. 1327-1333.
Cavanagh W. G. *et al.*, Soil phosphate..., *op. cit.*, p. 67-83.
Lippi R. D., Paleotopography and phosphate..., *op. cit.*, p. 85-97.
Lillios K. T., Phosphate fractionation..., *op. cit.*, p. 495-506.
Parnell J. J. *et al.*, Soil chemical analysis..., *op. cit.*, p. 331-342.
[387] Bailly-Maître M.-C. *et al.*, Analyse de la pollution..., *op. cit.*, p. 67-77.
Téreygeol F., *Les mines d'argent carolingiennes..., op. cit.*, p. 398-408.

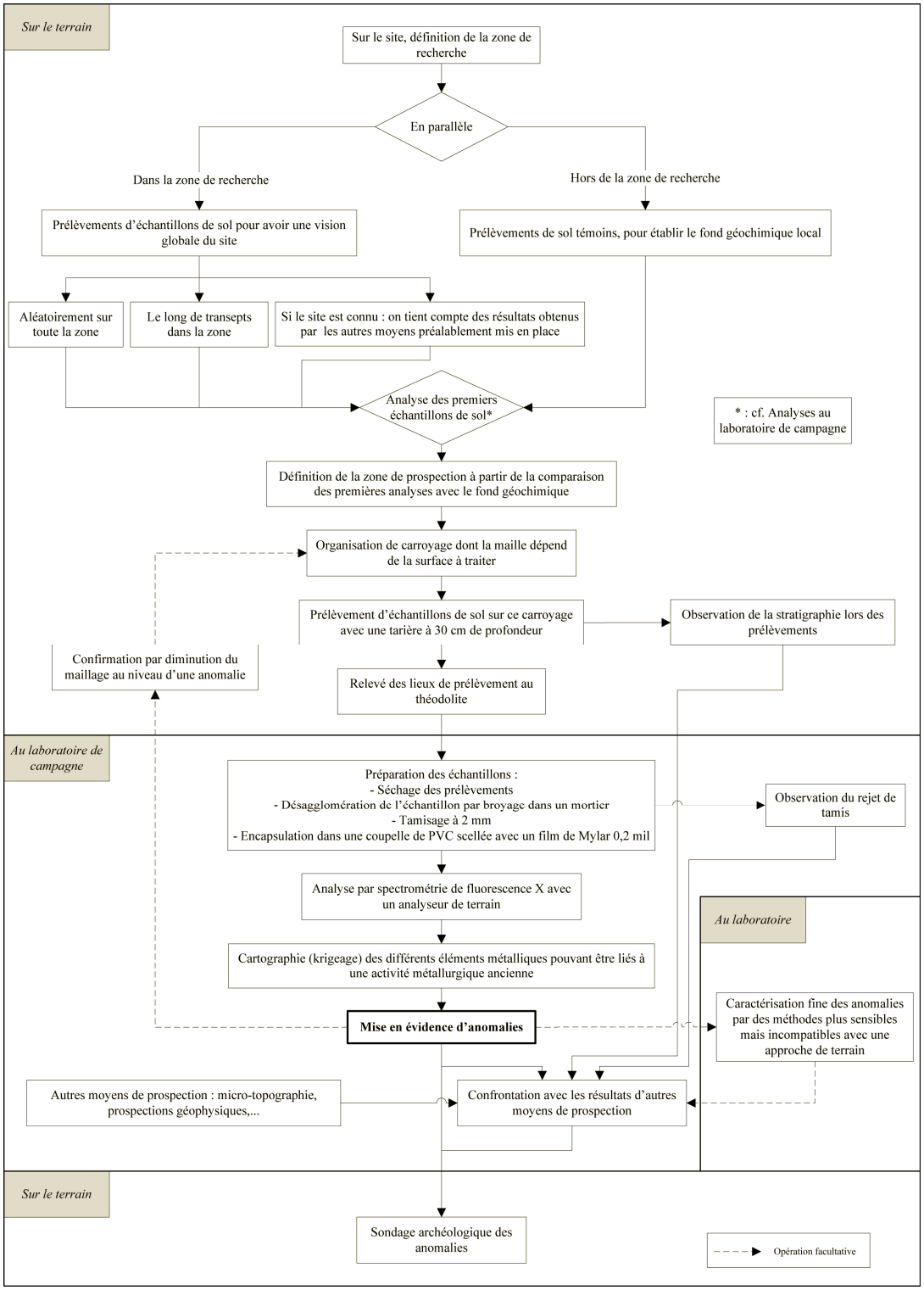


Figure 38 : Prospection archéologique géochimique.

2.1. Stratégie d'échantillonnage

En préalable à tout prélèvement et, *a fortiori,* toute analyse, les étapes préliminaires du protocole correspondent à l'étude globale du terrain où doit s'organiser la prospection en parallèle d'une recherche bibliographique. Ce n'est qu'à partir de ces premières informations qu'est établie la stratégie d'échantillonnage.

2.1.1. Définition de la zone de recherche

Avant toute prospection archéologique, il est indispensable de définir la zone d'intérêt dans laquelle les vestiges potentiels sont susceptibles d'être enfouis. Le recours à différentes sources d'informations, bibliographiques ou topographiques par exemple, doit permettre de limiter le plus possible la surface finale prospectée. De même, elles renseignent sur les pollutions qui pourront être rencontrées par la suite, suivant les types d'activités impliquées. Un premier espace défini, est de nouveau restreint à partir d'observations de terrain. Les zones sur lesquelles l'industrie recherchée ne peut *a priori* pas s'être implantée doivent être éliminées.

Ces premières hypothèses nécessitent d'être posées avec rigueur à partir d'une réflexion archéologique car elles constituent la base de la définition de la stratégie de prospection. C'est à partir de ces premiers postulats que le périmètre d'intervention est limité à une surface moins importante permettant d'augmenter l'efficacité de l'expertise. Si cette étape apparaît déterminante, elle peut aussi s'appuyer sur d'autres techniques de prospection menées en parallèle, voire préalablement mises en place[388].

Enfin, le moyen analytique retenu pour caractériser les échantillons de cette étude peut également contribuer à lever une incertitude quant à la définition de la zone d'échantillonnage. Les résultats de la prospection étant obtenus à très court terme et à proximité directe du site sondé, il est possible d'effectuer des analyses complémentaires rapidement et facilement. C'est pourquoi, elle doit encourager la mise en place de nouveaux prélèvements lorsque l'intérêt d'un espace est discuté. Cependant, si doute il y a sur la nécessité de mettre en place une prospection dans une zone définie, il ne sera définitivement levé que dans les cas, *a priori* minoritaires, de résultats positifs révélant une pollution. Dans le cas contraire où les analyses supplémentaires n'auront pas trahi d'anomalies, il ne sera pas possible

[388] Il est par exemple possible d'avoir recours à des prospections géophysiques ou pédestres, comme à des sondages archéologiques.

de conclure définitivement à l'absence de vestiges. C'est pour ces raisons que cette démarche doit intervenir en complément d'autres informations obtenues par des approches croisées.

2.1.2. Définition du fond géochimique local

Afin de pouvoir définir une pollution liée à une activité métallurgique, il est nécessaire d'établir quels sont les domaines de composition correspondant à des variations géochimiques d'origine anthropique. En effet, un sol présentera parfois naturellement des concentrations élevées d'éléments définis comme polluants, l'anomalie ne doit pas être associée, de fait, à une action humaine. Aux abords d'un site minier d'extraction de minerais métalliques, par exemple, le sol concentre des quantités naturellement élevées des mêmes composés ayant été exploités. Les irrégularités détectées résultent ici d'anomalies géologiques parfaitement naturelles.

Pour s'affranchir dans une certaine mesure de ces possibles interférences amenées à perturber la prospection, il faut définir le fond géochimique local associé à chaque site prospecté. Il s'agit de la composition du sol n'ayant pas été pollué par l'activité métallurgique qui est l'objet de la recherche. Cette référence est évaluée à partir de prélèvements réalisés en dehors et à une distance éloignée de plusieurs dizaines de mètres de la zone de recherche. Celle-ci est par définition supposée comme étant le seul espace où peuvent être mis en évidence les pollutions effectivement d'origine anthropique. C'est à partir de la moyenne des analyses de plusieurs prélèvements qu'est établie la composition représentative d'un sol non perturbé. Le nombre des échantillonnages requis n'augmente pas *a priori* avec l'importance de la surface à caractériser. Cependant, la multiplication de ces derniers permet d'améliorer le degré d'analogie du modèle de sol défini, avec les sédiments véritablement non pollués. La zone dans laquelle sont prélevées les références, résulte du postulat initial définissant les localisations possibles de pollutions. Il est donc hasardeux de minimiser le nombre d'échantillons-étalons car en cas d'erreur dans la définition de la zone de recherche, il pourrait conduire à la définition d'un fond géochimique plus pollué qu'en réalité.

La collecte des sédiments pour évaluer le fond géochimique ainsi que leurs analyses, sont réalisées selon les mêmes protocoles que ceux suivis dans les autres étapes de la prospection. Il faut à chacun des différents stades de la démarche veiller à favoriser la reproductibilité des analyses. Seul le respect de conditions expérimentales identiques autorise la comparaison des résultats. Un prélèvement de sol sera en définitive supposé comme pollué à cause d'une activité anthropique

si les composés caractéristiques de cette dernière s'y retrouvent dans des concentrations supérieures à celles du fond géochimique préalablement établi.

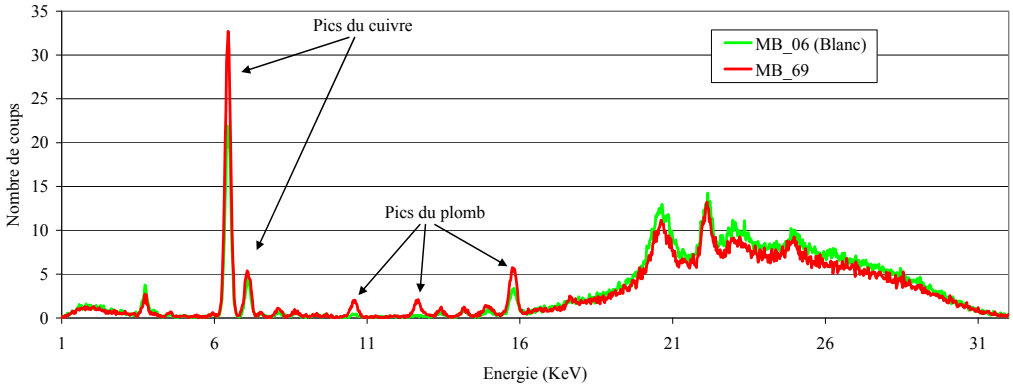


Figure 39 - Comparaison d'un échantillon pollué avec un blanc.

La figure ci-dessus permet de comparer les spectres d'un blanc (MB_06) comparé à un échantillon définit comme pollué (MB_69).

2.1.3. Analyses préliminaires

Suivant l'importance de la surface de la zone de recherche, il est parfois nécessaire de réaliser des analyses préliminaires de sédiments. Ces dernières, réalisées en même temps que l'évaluation du fond géochimique, doivent permettre d'aider à la définition de la zone de prospection qui doit intervenir par la suite.

La démarche de prélèvement est organisée selon différentes stratégies qui dépendent de la connaissance et de la configuration du site. En effet, les informations obtenues par d'autres types de prospections préalables doivent être prises en compte. Elles peuvent dans certains cas influencer certains échantillonnages. *A contrario*, si le site n'est pas connu, il faut mettre en place une démarche différente. S'il présente, par exemple, de grandes étendues planes, la définition d'axes le long desquels sont réalisés les prélèvements aide à caractériser au mieux la surface. Alors que si l'espace considéré montre une organisation topographique complexe, c'est un protocole de collecte aléatoire qui doit être retenu.

Même si il ne s'agit pas encore ici d'une étape réelle de la prospection puisqu'elle ne permet pas de supposer de la présence de vestiges enfouis, elle participe néanmoins à l'efficacité de l'expertise en révélant les pollutions présentant un plus grand intérêt à être étudiées. Aussi, comme pour l'établissement du fond géochimique, il est obligatoire de suivre toujours le même protocole de collecte et d'analyse.

2.1.4. Définition de la zone de prospection géochimique

La confrontation des résultats des analyses préliminaires avec la composition du fond géochimique local permet de mettre en évidence les échantillons pollués. Le croisement de ces nouvelles informations avec celles déjà obtenues par d'autres démarches préalables, conduit à la définition de la zone de prospection géochimique. C'est dans ce périmètre que sont ensuite réalisés les prélèvements de sol dont la caractérisation doit permettre de construire les conclusions de l'évaluation.

2.1.5. Organisation d'un carroyage

Afin de rationaliser l'expertise, la stratégie d'échantillonnage est réglée par la mise en place d'un carroyage. Il s'agit d'une partition de l'espace à traiter en carrés dont la longueur des côtés résulte du compromis à trouver entre la surface couverte et le temps accordé à l'étude. C'est ensuite dans les coins du réseau de quadrilatères matérialisés, si besoin par des décamètres, que sont réalisés les différents prélèvements.

2.1.6. Prélèvements des échantillons

Le protocole de prélèvement de sol décrit ici est celui mis en place à différentes étapes de la démarche globale de la prospection. Il est suivi en particulier, lors de la prospection géochimique mais aussi au cours des étapes préliminaires d'évaluation du fond géochimique ou de définition de la zone d'étude.

Dans une recherche d'indices géologiques d'une présence potentielle de vestiges métallurgiques enfouis, il faut définir la profondeur d'échantillonnage. Cependant à ce stade de la prospection, l'épaisseur du substrat accumulé sur les dernières couches en relation avec l'activité métallurgique ne peut pas être supposée, d'autant plus que cette sédimentation est un phénomène propre à chaque site. Dans une première approche, il a été choisi de faire abstraction de la stratigraphie locale puisqu'elle n'est pas encore connue. Suivant une finalité, qui pourra être discutée, de normalisation du protocole, tous les prélèvements de sol sont collectés à la même profondeur de trente centimètres. Le choix de cette valeur n'est pas arbitraire puisqu'elle doit *a priori* permettre de s'affranchir d'une grande part des pollutions les plus récentes pouvant interférer avec les plus anciennes[389]. La présence de plomb dans les strates les moins profondes du sol en est un

[389] Eidt R. C., A rapid chemical field..., *op. cit.*, p. 207.

exemple caractéristique. Elle résulte du dépôt des émissions atmosphériques de combustion des carburants automobiles qui contenaient ce métal lourd jusqu'au 1er janvier 2000. Même si il n'est pas considéré comme un élément mobile dans le sol, ce plomb constitue un bruit de fond gênant s'il n'est pas pris en compte[390]. Pour cette même raison, il faut éviter les prélèvements trop proches de routes.

Par ailleurs, le recours à la détermination d'un fond géochimique local, doit justement permettre de minimiser les interférences les plus récentes.

L'échantillonnage en profondeur s'effectue, quand cela est possible, à l'aide d'une tarière manuelle. En creusant progressivement dans les sédiments superficiels, l'opérateur relève parallèlement la stratigraphie au niveau du point de sondage. Il doit rendre compte de la couleur, ainsi que de la texture des sols qu'il rencontre, tout comme des matériaux naturels comme anthropiques qui y sont inclus. Les échantillons, de 50 à 100 grammes de sols, sont finalement collectés à une trentaine de centimètres de profondeur. Ils sont stockés et inventoriés dans des sachets de prélèvement hermétiques.

Dans certains cas, la nature du terrain (végétation, roche...) ou les sédiments rencontrés au cours du forage empêchent le prélèvement au point défini par le carroyage, obligeant dans ce cas à le décaler jusqu'à atteindre une zone qui peut être échantillonnée.

2.1.7. Topographie des points de prélèvement

La finalité de la prospection étant la localisation de vestiges potentiels, il est nécessaire de disposer d'informations topographiques. Le relevé au tachéomètre des coordonnées spatiales des points de prélèvement permet par la suite d'établir les cartographies locales de chacune des pollutions détectées.

Les opérations de terrain proprement dites se terminent donc *a priori* par l'obtention de ces données géographiques. Rappelons que la méthode retenue dans cette démarche prospective a été définie afin d'avoir un traitement des informations recueillies à proximité de la zone étudiée. L'intérêt principal d'une telle configuration est qu'elle doit favoriser le retour sur site en cas de mise en

[390] Petit D. *et al.*, Stable lead isotopes in pond sediments as tracer of past and present atmospheric lead pollution in Belgium, *Atmospheric Environment (1967)*, vol. 18, n° 6, 1984 p. 1189-1193.
Veron A. *et al.*, Evidence of recent lead pollution in deep north-east Atlantic sediments, *Nature*, vol. 326, n° 6110, 1987, p. 278-281.
Renberg I. *et al.*, Pre-industrial atmospheric lead contamination detected in Swedish lake sediments, *Nature*, vol. 368, n° 6469, 1994, p. 323-326.
Gobeil C. *et al.*, Sources and burden of lead in St. Lawrence estuary sediments: isotopic evidence, *Environ. Sci. Technol.*, vol. 29, n° 1, 1995, p. 193-201.
Alfonso S. *et al.*, A European lead isotope..., *op. cit.*, p. 3595-3605.

évidence d'incertitudes à partir des résultats obtenus. C'est en particulier grâce à la possibilité de disposer rapidement d'informations complémentaires à partir de nouveaux prélèvements que la méthode présentée ici se distingue de celles présentées auparavant[391].

L'un des exemples concrets de l'interactivité de ce protocole se résume à la possibilité d'améliorer la précision d'une localisation supposée. Il suffit dans ce cas de diminuer le maillage du premier carroyage, notamment au niveau d'une anomalie préalablement détectée.

2.2. Préparation des échantillons au laboratoire de campagne

En préalable à leurs analyses, les prélèvements de sol doivent subir différentes étapes de préparation dont le but principal est de normaliser les conditions expérimentales, afin que les résultats obtenus à partir de chacun des échantillons soient comparables. Par ailleurs, elles permettent de s'affranchir de certaines interférences qui peuvent nuire aux analyses par spectrométrie de fluorescence X (humidité de l'échantillon, taille des particules, géométrie d'analyse, effet de pépite)[392].

Pour éviter toute contamination des échantillons entre eux, il faut veiller au nettoyage du matériel entre chaque nouvelle préparation.

2.2.1. Séchage du prélèvement

Certaines études ont montré que l'humidité d'un échantillon de sol pouvait, dans certains cas, perturber l'analyse par spectrométrie de fluorescence X[393]. Elle est la cause d'une absorption des rayons X incidents et de fluorescence entraînant une diminution de la sensibilité de la méthode. Les limites de détection sont donc moins basses et les quantifications moins précises (erreurs d'analyses plus élevées). Toutefois, compte tenu du mécanisme impliqué, seules les caractérisations des éléments les plus légers (dont le numéro atomique est inférieur à celui du fer[394]) semblent altérées. Or, les composés recherchés dans une prospection d'activité métallurgique sont nombreux : l'antimoine, le cuivre, l'étain, le mercure, l'or, le plomb, le zinc, voire le fer. Il s'agit de métaux lourds qui, excepté le fer, sont hors du domaine critique. Par ailleurs, les phénomènes

[391] Bailly-Maître M.-C. *et al.*, Analyse de la pollution..., *op. cit.*, p. 67-77.
Téreygeol F., *Les mines d'argent carolingiennes..., op. cit.*, p. 398-408.
[392] Method 6200, *Field portable X-ray..., op. cit.*, p. 5-7.
[393] Ge L. *et al.*, Influence of and correction for moisture in rocks, soils and sediments on in situ XRF analysis, *X-Ray Spectrometry*, vol. 34, n° 1, 2005, p. 28.
Method 6200, *Field portable X-ray..., op. cit.*, p. 5.
[394] Le fer a son numéro atomique égal à 26.

parasites semblent négligeables pour des échantillons qui contiennent jusqu'à 20 % d'humidité, les erreurs les plus importantes intervenant seulement en cas de saturation en eau[395].

D'un point de vue de la qualité des analyses, un séchage préalable des échantillons n'apparaît donc pas strictement indispensable. Cependant, si le lieu choisi pour l'établissement du laboratoire de campagne permet de réaliser ce traitement, il doit être effectué. D'abord parce qu'il garantit la reproductibilité des analyses, nécessaire à leur confrontation. Mais surtout, parce que ce séchage préalable facilite les étapes de préparations ultérieures, *a contrario* indispensables.

Le matériel utilisé pour ce traitement, dans le cadre d'un laboratoire de campagne, sera dans la plupart des cas un four domestique dont le thermostat aura été réglé pour que la température ne dépasse pas 105 °C. Cette limite doit permettre de s'affranchir des possibles pertes des composés les plus volatiles, le mercure notamment[396]. Le recours à un four à micro-ondes est proscrit, certaines études ayant révélé qu'il avait une influence sur les résultats d'analyses par spectrométrie de fluorescence X portable[397]. Enfin, dans la configuration où il est impossible de disposer d'un four, le séchage est effectué à l'air mais le temps indispensable à la prospection se voit augmenté.

2.2.2. Désagrégation des prélèvements

Une fois séchés, les échantillons de sols sont broyés manuellement dans un mortier à l'aide d'un pilon. Plus qu'un réel broyage, il s'agit d'une désagrégation de la matière. Elle vise à individualiser les différents types de particules agglomérées et à les séparer des matières organiques et des plus gros agrégats minéraux qui sont éliminés par la suite, avant tout dosage. Il est par ailleurs attesté que les différences de taille entre les particules qui composent un échantillon, sont, dans une certaine mesure, une source d'erreur lors d'analyses par spectrométrie de fluorescence X[398]. Une variation de la granulométrie des composés analysés peut notamment induire une modification de leur distribution lors de la mise en forme définitive des échantillons[399]. Dès lors que la méthode d'analyse retenue ne permet de caractériser qu'une partie d'un échantillon, il apparaît qu'une répartition hétérogène au sein de celui-ci conduit à l'obtention d'une information tronquée, ne

[395] Ge L. *et al.*, Influence of and correction..., *op. cit.*, p. 28.
[396] Bernick M. B. *et al.*, Results of field-portable X-ray fluorescence analysis of metal contaminants in soil and sediment, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 43, n° 1-2, 1995, p. 104.
[397] Method 6200, *Field portable X-ray..., op. cit.*, p. 5.
[398] Mzyk Z. *et al.*, Research on grain size effect in XRF analysis of pelletized samples, *X-Ray Spectrometry*, vol. 31, n° 1, 2002, p. 39.
[399] Les particules les plus fines peuvent se voir mécaniquement séparées des plus grosses.

correspondant qu'à une certaine classe morphologique. Le broyage en uniformisant la taille moyenne des particules participe à la diminution de ces erreurs d'analyse.

Cette préparation mécanique permet aussi une homogénéisation globale de la composition du prélèvement de sol.

Il faut remarquer ici qu'un taux d'humidité trop élevé dans un isolat va nuire à l'efficacité de cette opération de désagrégation, plus que de fausser les résultats de la caractérisation.

2.2.3. Tamisage des prélèvements

Compte tenu de l'hétérogénéité des composés qu'il est possible de rencontrer dans un échantillon de sol (matériaux organiques, particules minérales, sédiments…), un tamisage élimine les plus gros éléments. La persistance des plus grosses particules, de par leur importance volumique, induit une dilution de l'information réellement représentative de la composition d'un sol. Le choix d'une taille de maille de 2 mm (9 mesh[400]) semble être le meilleur compromis pour isoler la fraction la plus représentative d'un prélèvement[401].

Par ailleurs, une observation simple du rejet de tamis, c'est-à-dire la part de l'échantillon qui subsiste après le tamisage, permet de relever des indices macroscopiques marqueurs d'activités métallurgiques. En effet, les fragments de minerai, de scories, voire de céramiques sont facilement repérables. De telles informations viennent enrichir l'expertise.

Tout comme la précédente opération de broyage, le tamisage renforce l'homogénéité de l'échantillon.

2.2.4. Encapsulation des échantillons

Une fraction du volume de chaque échantillon finalement préparé est placée dans des coupelles individuelles[402], en veillant à ne pas favoriser une distribution hétérogène de la taille des particules lors du remplissage. Les capsules sont ensuite

[400] Classification des maillages de tamis.
[401] Bernick M. B. *et al.*, Results of field-portable..., *op. cit.*, p. 104.
Vanhoof C. *et al.*, Energy-dispersive X-ray..., *op. cit.*, p. 345.
Laperche V. *et al.*, *Guide méthodologique du plomb appliqué à la gestion des sites et sols pollués*, BRGM/RP-52881-FR, BRGM, 2004, p. 55.
Kilbride C. *et al.*, A comparison of..., *op. cit.*, p. 17.
[402] Le volume sélectionné correspond à celui d'une capsule d'analyse.

scellées par un film de mylar de 5,1 µm d'épaisseur[403]. Ce polymère, dit transparent aux rayons X, permet une absorption minimale des rayonnements.

L'utilisation de ces contenants participe à la normalisation des analyses : surface caractérisée, position des échantillons par rapport à la source excitatrice. Les résultats obtenus sont dans ce cas comparables entre eux.

2.3. Analyse des échantillons : le spectromètre de fluorescence X portable Niton Xlt 700

L'aspect novateur de la prospection géochimique décrite ici repose sur l'utilisation d'une technique analytique simple qu'est la spectrométrie de fluorescence X déclinée sur un modèle d'analyseur portable. La préparation des échantillons mais surtout leur analyse sont alors réalisées à proximité de la zone de prélèvement dans un espace quelconque, aménagé en laboratoire de campagne.

Les développements récents apportés à de nouveaux types de spectromètres de fluorescence X portables ont justifié leurs utilisations dans de nombreuses études de terrain. Certaines démarches suivies, notamment pour des études géologiques, minières et environnementales, ont révélé l'intérêt du recours à cette gamme d'appareillage. Elles devaient inciter à en proposer une application archéologique inédite, dans le cadre d'une prospection de vestiges d'origine paléométallurgique.

2.3.1. Caractéristiques techniques

C'est le spectromètre de fluorescence X portable Niton Xlt 700 qui a été choisi pour réaliser les analyses de sédiments de cette étude. De la marque Fondis Electronic, cet instrument d'analyse regroupe dans un même appareil un générateur de rayon X, un détecteur de rayonnement de fluorescence X, ainsi qu'un module de traitement des données. Ce dernier permet de disposer d'informations quantitatives à partir des spectres de fluorescence X mesurés.

Avec une masse totale de 1,6 kg et fonctionnant sur batteries, cet analyseur est l'un des appareils de terrain qui convient le mieux pour cette prospection.

Dans cet appareil, les rayonnements d'excitation sont produits par un tube générateur de rayon X à anode en argent[404]. La fenêtre de sortie du faisceau est en béryllium, d'une épaisseur de 0,127 mm. Le flux de photons X est filtré par deux

[403] Qui correspont en fait à l'épaisseur de 0,2 mil. Le mil est une unitée utilisée dans l'industrie des polymères.

[404] Références du tube : tension maximale de 35 kV, intensité maximale de 10 µA, puissance maximale de 1,7 W.

écrans d'aluminium et de fer épais de 1,5 mm et 70 µm[405]. L'énergie du faisceau incident permet de caractériser chacun des éléments dont le numéro atomique est compris entre 19 (potassium) et 94 (plutonium), donc, chacun des composés métalliques pouvant intervenir dans des pollutions paléométallurgiques. Par ailleurs, la fenêtre d'analyse de 11 par 23 mm [406] permet de disposer d'une composition moyenne sur la surface couverte, plutôt que d'une information ponctuelle. Dans ce cas la valeur mesurée représente mieux l'ensemble du prélèvement.

Le détecteur de rayonnement X refroidi par effet Pelletier permet une haute résolution[407] du signal, d'environ 200 eV, diminuant ainsi les interférences entres éléments voisins.

Afin de pouvoir proposer des résultats quantitatifs le signal de fluorescence est traité pour s'affranchir de plusieurs phénomènes perturbants[408]. S'ils ne sont pas pris en compte, les résultats quantitatifs obtenus sont faussés. Le fabricant de l'analyseur a donc développé différents algorithmes permettant de les corriger. Ce sont en particulier les interférences dues à l'effet de matrice qui doivent être compensées (absorption du signal et rayonnements secondaires). Pour garantir les meilleures corrections, plusieurs modèles de calcul existent qui dépendent du type des échantillons caractérisés. Dans le cadre des analyses de sols avec le Niton Xlt 700, trois modes sont disponibles : *Standard Soil Mode*, *Industrial Bulk Cu/Zn/Pb Testing Mode* et *Industrial Bulk Ta/Hf/Re Testing Mode*. En laissant de côté ce dernier qui ne présente pas d'intérêt pour une recherche de pollutions paléométallurgiques, il est nécessaire de choisir l'un des deux premiers. Les différences propres à chacun d'entre eux portent sur les modèles de correction appliqués. Le mode *Industrial Bulk Cu/Zn/Pb* semble convenir à l'analyse de prélèvements de sols *a priori* associés à d'anciennes activités métallurgiques, les compensations de l'effet de matrice se faisant par la méthode des paramètres fondamentaux[409]. Cependant, ce modèle n'est réservé qu'à l'analyse de

[405] Ils éliminent le rayonnement de basse énergie, notamment les raies L et M du spectre incident produit par le tube. Celles-ci sont gênantes dans la mesure où il est nécessaire que les analyses soient réalisées avec un rayonnement excitateur le plus monochromatique possible, c'est-à-dire présentant une énergie excitatrice majoritaire.

[406] La taille du spot proposée par le fabricant est d'environ 20 mm de diamètre. Les valeurs présentées ici, sont celles qui ont été mesurées au laboratoire Pierre Süe avec une plaque photosensible. Le maximum de l'intensité est par ailleurs mesuré sur la partie inférieure de la fenêtre d'analyse.

[407] Environ 200 eV.

[408] Effet de matrice, pics d'interférence : pic de fuite, pic d'empilement.
cf. Annexe C.

[409] cf. Annexe C.

prélèvements présentant des concentrations d'éléments polluants préférentiellement supérieures au pourcent massique. Or, les premiers essais de caractérisation d'échantillons collectés dans les mêmes conditions que lors d'une prospection, ont montré que l'ensemble des éléments dosés révélait des compositions, dans une majorité des cas, inférieures à la limite du pourcent. Le modèle finalement choisi est le *Standard Soil Mode*. Ce dernier a été développé pour la mise en évidence de contaminants dans un sol, présentant de faibles concentrations (< 1 % massique). Les compensations appliquées pour corriger l'effet de matrice, sont estimées à partir du signal *Compton* produit au cours de l'analyse. Il s'agit du rayonnement réfléchi à la suite de collisions inélastiques des photons X incidents. Les chocs inélastiques voient leur statistique augmenter avec la moyenne des numéros atomiques des éléments présents. La mesure de ce signal *Compton* permet d'évaluer le type d'une matrice analysée. A partir de cette information, l'importance des interférences principales perturbant les quantifications est modélisée puis compensée par le programme pour calculer la composition d'un échantillon[410].

Dans le cadre de la prospection, le spectromètre est installé en station, c'est-à-dire placé sur un support fixe. Cette configuration permet principalement de normaliser la géométrie d'analyse. Les échantillons sont alors disposés toujours à la même distance et selon la même orientation par rapport au détecteur et à la source de rayons X. Cette standardisation est l'une des conditions obligatoires pour pouvoir comparer les résultats obtenus.

2.3.2. La présentation des résultats

L'énergie du faisceau de rayons X incidents permet de qualifier toute la gamme des éléments dont le numéro atomique est compris entre 19 et 94. En revanche, le mode de quantification des sols choisi se limite à certains composés particuliers. En présupposant d'une composition moyenne d'un sol, le constructeur a optimisé le programme de correction pour quatorze éléments : l'arsenic, le cérium, le cobalt, le cuivre, le fer, le manganèse, le mercure, le molybdène, le nickel, le plomb, le rubidium, le strontium, le zinc et le zirconium. Ce module ne permet pas de fournir de données quantitatives sur les concentrations d'autres métaux pouvant *a priori* intervenir dans des pollutions paléométallurgiques, comme l'argent, l'étain, ou même l'or. Cette limite tient notamment de la technologie utilisée dans l'appareillage, en particulier la source de rayons X à

[410] Afnor, *Caractérisation des déchets..., op. cit.*, p. 12.

anode d'argent. Compte tenu de la réflexion d'une partie des rayonnements incidents, les spectres obtenus présentent tous les raies caractéristiques de l'argent, même si les échantillons caractérisés n'en contiennent pas. L'incertitude sur l'étain provient quant à elle des interférences qui existent avec l'argent au niveau de ses raies L qui constituent les deux seules raies mesurables en fonction de l'énergie d'excitation[411]. Quant à l'or, il faut croire que le fabricant n'a pas jugé nécessaire d'inclure ce métal rare dans son module de quantification des sols.

A chaque donnée quantitative est associé l'intervalle de confiance 2σ (95 %) correspondant[412]. Il permet d'estimer la précision de la mesure. Une analyse pour laquelle un élément de teneur très faible voit son domaine de confiance se développer fortement vers les valeurs négatives sera considérée avec précaution.

Enfin, il est difficile sur cet appareillage d'estimer les corrections appliquées par le spectromètre lors des dosages. Il a donc été décidé de vérifier la capacité de ce dernier à analyser les échantillons propres à cette étude. Cette calibration sera présentée par la suite[413].

2.3.3. Durée d'analyse

Compte tenu de l'amélioration de la statistique du signal, la sensibilité d'une analyse augmente avec le temps de mesure d'un échantillon, notamment en termes de limite de détection et précision du résultat. D'un autre côté, l'article de C. Kilbride *et al.* a montré dans une étude d'évaluation du Niton Xlt 700, que la qualité des quantifications était améliorée significativement entre 60 et 120 secondes de mesure et que les gains de précision devenaient négligeables au-delà[414].

D'autre part, le fabricant fournit à titre indicatif les valeurs de limites de détection mesurables pour différents éléments d'un sol. Elles permettent ici, d'avoir une estimation des concentrations les plus faibles qu'il est normalement possible de mesurer dans certaines conditions avec le Niton Xlt 700. Elles mettent aussi en évidence l'influence de la matrice sur la qualité des mesures puisque sont présentés les résultats obtenus de l'analyse de deux matériaux standards de

[411] Il n'est pas possible d'observer les raies K de l'étain puisqu'elles se situent à des énergies supérieures à l'énergie d'excitation.
[412] Il s'agit ici d'une valeur définissant un intervalle autour de la quantité estimée, auquel cette dernière a une probabilité d'appartenir de 95 %.
[413] cf. Fiabilité de la méthode, p. 197.
[414] Kilbride C. *et al.*, A comparison of..., *op. cit.*, p. 21.

référence NIST : une matrice de silice (sable)[415] et un échantillon représentant une composition de sol « normale »[416]. Le protocole de mesure est celui de l'*United States Environnemental Protection Agency* pour lequel ces concentrations minimales doivent être affichées avec un degré de confiance de 99,7 %. Pour une durée d'analyse de 60 secondes, les limites de détection (DL) sont présentées dans le tableau 3, ci-dessous :

Elément	DL matrice siliceuse	DL matrice NIST	Elément	DL matrice siliceuse	DL matrice NIST
Cr	250 ppm	350 ppm	Zn	40 ppm	75 ppm
Mn	150 ppm	250 ppm	As	10 ppm	15 ppm
Fe	150 ppm	250 ppm	Pb	12 ppm	20 ppm
Co	30 ppm	200 ppm	Hg	12 ppm	20 ppm
Ni	60 ppm	100 ppm	Rb	5 ppm	15 ppm
Cu	100 ppm	125 ppm	Sr	15 ppm	25 ppm

Tableau 3 - Limites de détection dans deux sols de références, 60 s d'analyse, 99,7 % de degré de confiance (données Niton).

Les valeurs présentées varient selon les éléments caractérisés et les matrices dans lesquelles ces derniers sont dispersés. D'un point de vue général, ces limites sont très basses et définissent une sensibilité supérieure à celle *a priori* nécessaire à cette étude[417]. Il apparaît que si la durée d'analyse influe notablement sur la sensibilité de la méthode, c'est aussi un paramètre qu'il est possible d'optimiser. Afin de multiplier le nombre des dosages sans perdre trop de précision, la durée d'analyse retenue dans le protocole de prospection a été fixée à 30 s. L'étude de calibration présentée par la suite, met en évidence la validité de ce choix pour mettre en évidence des pollutions dans des sols[418].

2.3.4. Coût de la méthode

Dans le protocole de prospection, c'est l'achat du spectromètre portable qui représente l'engagement financier le plus important. Il est de l'ordre de cinquante mille euros suivant le type de contrat souscrit. Toutefois, si l'investissement initial est élevé, le coût de fonctionnement est très faible puisqu'il ne compte que l'achat du matériel d'encapsulation (film Mylar et capsule). Il est estimé à deux euros par analyse environ. Dans le cadre d'une prospection archéologique au cours de

[415] NIST #81a.
[416] NIST #2709.
[417] Cette hypothèse sera par ailleurs confirmée par les résultats des premières expertises archéologiques.
[418] cf. Fiabilité de la méthode, p. 197

laquelle il est important de multiplier les analyses, une telle caractéristique est à prendre en compte particulièrement.

2.4. Exploitation des résultats : mises en évidences d'anomalies géochimiques

Après avoir analysé chacun des échantillons de sol collectés lors des prospections, les résultats sont examinés dans leur ensemble.

Dans un premier temps, ils sont comparés à la composition moyenne du fond géochimique local préalablement déterminée. Cette confrontation donne un aperçu des variations de composition. Cependant, cette simple comparaison est difficile à interpréter.

En considérant individuellement les résultats analytiques de chaque prélèvement, par rapport au référentiel non pollué, il est envisageable de supposer une anomalie potentiellement métallurgique à partir d'un unique prélèvement, défini comme positif. Le danger de ce raisonnement est d'attribuer prématurément trop de d'importance à cette information.

Si une variation importante des concentrations en éléments métalliques dans un sol peut signifier la présence de vestiges métallurgiques, il s'agit toutefois d'un indice et non d'une certitude. Seule une intervention archéologique invasive (sondage ou fouille) pourra permettre de s'assurer de leur existence. Les contraintes financières et temporelles imposent de définir avec soin les zones qui feront l'objet de travaux archéologiques. Il n'est pas possible de décider de telles interventions pour chaque surface de terrain ayant révélée une anomalie ponctuelle. Partant du principe que les vestiges recherchés présentent des dimensions importantes, il a été décidé de ne prendre en compte que les zones d'intérêts révélées par plusieurs prélèvements voisins, positifs d'un point de vue des pollutions métalliques. C'est pourquoi, le recours à une représentation cartographique des résultats est particulièrement efficace.

A partir des relevés topographiques des prélèvements et de leurs analyses, il est possible d'établir différentes cartes de chacune des variations élémentaires. Elles définissent une échelle qui permet de juger de l'intérêt à associer à une anomalie caractérisée. Le raisonnement complexe mené à partir des données brutes d'analyse se voit simplifié et rationalisé.

L'application cartographique n'est pas surprenante puisque la finalité reste la localisation de vestiges supposés. Le modèle de représentation idéal associe à un changement de composition sédimentaire, une variation de couleur sur une carte de la zone prospectée. Or, les informations obtenues à partir des différents

prélèvements définissent un canevas discret qui ne permet pas normalement d'établir de tels schémas. Il est tout de même possible de s'affranchir de ce problème en appliquant aux données analytiques un modèle statistique d'interpolation spatiale. Ce dernier permet à partir d'informations ponctuelles de disposer d'une estimation continue des variations en tous points de la surface étudiée.

Dans cette prospection, c'est une représentation par krigeage[419] qui apparaît comme la solution la plus performante. D'abord parce que les problématiques pour lesquelles il a été à l'origine développé sont similaires à celles dont il est question ici. Mais aussi parce qu'il est emprunté aux recherches prospectives minières et géophysiques dans lesquelles il est très généralement utilisé[420].

Concrètement, les différentes cartes élémentaires sont produites à partir du logiciel commercial de cartographie Surfer[421]. Il permet dans un premier temps de réaliser une représentation spatiale de l'espace prospecté, sur laquelle sont ensuite reportées les informations élémentaires préalablement interpolées par l'algorithme de krigeage du programme. Pour chacun des éléments caractérisés par spectrométrie de fluorescence X, une modélisation continue à l'échelle de la surface est calculée. Sur les cartes établies, les différences de concentration sont représentées par une variation de couleur (Figure 40).

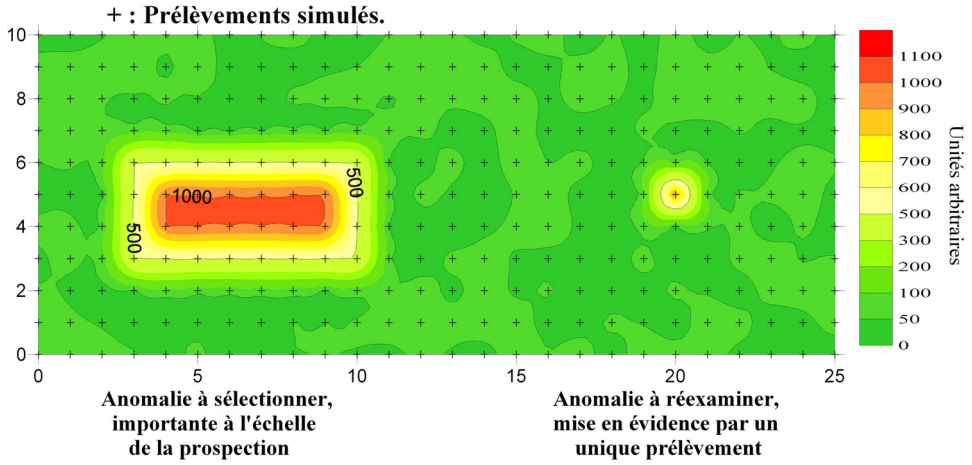


Figure 40 - Exemple de cartographie (simulation).

[419] Matheron G., *Traité de geostatistique appliquée : le krigeage*, 2 tomes, Paris, BRGM, coll. « Mémoires du BRGM », t. 2, 1963, 171 p.
[420] L'utilisation dans cette étude de ce modèle géostatistique a été suggérée par N. Florsch, professeur de géophysique.
[421] Logiciel édité par la société Golden Software. C'est la version 8 qui est utilisée.

A partir des cartes élémentaires obtenues, il est simple de circonscrire les anomalies de composition dans le sol d'un espace prospecté. Elles se caractérisent par des zones, dont la couleur imposée par la représentation, est différente de celle attribuée aux valeurs références du fond géochimique. Les variations de concentration sont positives pour les éléments potentiellement associables à une activité métallurgique. Toutefois, elles peuvent également être négatives pour les composés du fond géochimique local qui ne sont pas associés aux pollutions. Par un effet de dilution lors de l'accumulation des matières étrangères, les taux correspondant aux éléments naturels vont diminuer localement.

Parallèlement à ce paramètre de variation de composition, il faut également considérer celui de la dimension des périmètres délimités. D'un point de vue de la probabilité de présence de vestiges, les plus grandes surfaces sont à préférer, en particulier de par l'échelle potentiellement importante des activités qui sont l'objet de la recherche. D'autre part, il n'est pas envisageable de supposer de l'intérêt d'une anomalie à partir d'un seul prélèvement caractérisant une pollution.

Après avoir appliqué ces deux niveaux de sélection à chacun des éléments analysés, les zones retenues sont ensuite confrontées entre elles pour déterminer celles qui peuvent témoigner de la présence de potentiels vestiges paléométallurgiques. Dans cette étape, une valeur plus importante est associée aux pollutions métalliques en rapport avec l'activité métallurgique qui fait l'objet de la prospection.

De plus, à ce stade du protocole, il existe toujours la possibilité d'éclairer la réflexion quand cela est nécessaire, par un retour sur le terrain étudié. Sa proximité avec le laboratoire de campagne est voulue pour l'encourager. La mise en place de nouveaux prélèvements sur un carroyage resserré mais dont la maille est plus fine permet d'affiner un contour suspect. Par ailleurs, en cas de doute quant à l'intérêt d'une anomalie, notamment parce qu'elle est trop peu étendue, l'analyse de sédiments voisins permet de lever l'incertitude.

Finalement, avant de conclure la prospection, il faut, si possible, appliquer un dernier filtre. Il se résume par une confrontation ultime des résultats avec la totalité des informations collectées jusqu'alors sur le site prospecté tant celles connues en amont de l'intervention que celles, parallèles, collectées durant l'intervention. Les relevés stratigraphiques enregistrés lors des prélèvements de sols ainsi que les différentes observations des rejets de tamis consignées au cours de la préparation

des échantillons sont autant de renseignements supplémentaires qui permettent de renforcer les hypothèses.

Au terme de ce processus de confrontation des données, il est finalement possible de définir un certain nombre d'anomalies géochimiques dont l'origine est posée comme potentiellement métallurgique. Elles témoignent donc *a priori* de la présence de vestiges paléométallurgiques et suggèrent la prescription d'interventions archéologiques, de type sondage ou fouille, pour en vérifier la présence effective. Une telle démarche permet de réduire les opérations invasives en les focalisant sur des zones présentant une plus forte probabilité d'indices métallurgiques.

Enfin, il faut signaler ici, qu'une démarche similaire à celle qui vient d'être décrite peut également être envisagée durant une fouille. En effet, en effectuant des prélèvements au sein des différentes couches mises en évidence, il est possible d'associer les unités stratigraphiques polluées à de potentielles phases d'activités paléométallurgiques.

3. Fiabilité de la méthode

Lors de l'analyse, les interventions de l'opérateur sur le traitement des résultats, se bornent quasiment à choisir le mode du programme de quantification. Une telle simplification voulue par le fabricant se comprend dans la mesure où cet appareillage est par ailleurs utilisé dans l'industrie pour des contrôles de routine. Cependant, de telles restrictions apparaissent contraignantes dans le cadre du développement d'une nouvelle utilisation moins conventionnelle comme lors d'une prospection de sites archéologiques. Les corrections apportées par le logiciel de quantification n'étant pas explicites, il est difficile de vérifier la fiabilité des résultats proposés. C'est pourquoi, il est apparu indispensable de mettre en place une évaluation du protocole d'analyse. Elle vise d'abord à estimer la capacité du spectromètre à caractériser avec une bonne sensibilité les échantillons rencontrés dans une recherche de sites paléométallurgiques. D'autre part, elle validera le protocole opératoire défini (mode et durée d'analyse). Elle n'a en revanche pas vocation à être mise en place à chaque nouvelle prospection. Selon ses résultats, elle sera établie une fois pour toute en attestant de la qualité des dosages réalisés.

Le protocole normal d'évaluation d'une méthode analytique consiste à doser avec cette dernière des échantillons de compositions connues, puis de vérifier la qualité des résultats en les comparant avec les données de références.

Les étalons à privilégier dans ce type d'études sont ceux qui se rapprochent le plus par leurs compositions et textures, des échantillons qui seront par la suite analysés. Dans le cadre de cette étude, il n'existe pas de sols standards commerciaux dont les compositions certifiées sont assimilables à celles mesurables à partir de sédiments prélevés sur des sites paléométallurgiques. Dans cette configuration défavorable, les références ont été remplacées par une sélection de sols extraits de notre *corpus* de sédiments pollués par composés métalliques. Et ce n'est qu'après leurs analyses par une méthode de référence, qu'ils deviennent des étalons pour l'évaluation de la fiabilité du spectromètre. Le domaine de vérification a tout de même dû être défini à partir des résultats préliminaires donné par le spectromètre portable. La précision des caractérisations était *a priori* suffisante pour une telle sélection.

Les prélèvements de sols choisis pour cette évaluation ont été collectés, préparés et analysés selon le même protocole que celui suivi lors d'une prospection. Ils ont ensuite été analysés par des méthodes qui ne sont pas sensibles aux mêmes interférences que celles rencontrées en spectrométrie de fluorescence X.

Dans cette évaluation, deux études comparatives se sont succédé. La première méthode de référence choisie ayant montré une sensibilité trop basse pour évaluer les concentrations de certains éléments, dont le cuivre, une seconde technique d'analyse utilisée très largement pour le dosage de sols a dû être utilisée par la suite.

Dans chacun des cas, la faible statistique des échantillons analysés, permet seulement d'évaluer le protocole analytique prescrit pour la prospection, il ne s'agit pas d'une démarche de calibration et de certification des résultats. Cette évaluation sera par ailleurs limitée au domaine de concentration associé à la gamme d'étalons choisie.

3.1. Développement d'un protocole d'analyse de sol par activation aux neutrons rapides de cyclotron (ANRC)

L'évaluation du spectromètre de fluorescence X Niton Xlt 700 ayant dans un premier temps été mise en place au Centre Ernest-Babelon, il était possible, dans le cadre de la convention de ce laboratoire avec le CEMHTI (Conditions Extrêmes et Matériaux : Haute Température et Irradiation), de proposer le développement d'un protocole d'analyse de sol par activation aux neutrons rapides de cyclotron (ANRC).

Les analyses de sol généralement faites par spectroscopie d'émission atomique ou de masses, couplées à un plasma inductif (ICP AES ou ICP-MS) demandent une préparation complexe de mise en solution des échantillons. Ces étapes qui demandaient l'élaboration d'un protocole de dissolution adapté aux échantillons analysés, sont beaucoup plus simples dans le cadre de l'ANRC. De plus, compte tenu du type et de l'énergie importante des rayonnements en jeu, les interférences dues à la matrice qui perturbent les analyses par spectrométrie de fluorescence X, sont ici, inexistantes.

Le recours à cette technique d'analyse ne nécessitait qu'un étalonnage préalable ainsi qu'une adaptation du programme de calcul développé au Centre Ernest-Babelon pour l'analyse d'alliages monétaires ou de verres[422].

3.1.1. Principe de la méthode

Le principe est le même que celui suivi au laboratoire pour l'analyse d'alliages à base cuivre avec cependant un étalonnage différent[423].

Cette méthode est aujourd'hui utilisée en routine au laboratoire pour la caractérisation de métaux. Les compositions des objets métalliques généralement analysés se résument à deux grands types suivant le métal majoritaire présent : les alliages à base cuivre et ceux à base argent. Ces types de matériaux présentant une faible variabilité de composition, le laboratoire a pu développer un protocole de quantification de l'ensemble des éléments. Dans cette configuration, c'est la méthode de l'étalon interne a pu être retenue pour le calcul des concentrations massiques[424].

Dans le cadre d'une analyse de sédiments, le recours à une telle méthode d'étalonnage n'était pas envisageable. Elle aurait nécessité de développer un protocole de quantification permettant de doser tous les éléments présents dans les sols alors que par ailleurs les informations collectées ne sont pas indispensables dans cette étude. Or, contrairement aux alliages monétaires précédemment évoqués analysés au laboratoire, la composition des sols peut varier de manière importante suivant le lieu de prélèvement. Ce constatation ne concerne d'ailleurs pas

---

[422] Beauchesne F., *Analyse non destructive du cuivre et de ses alliages par activation à l'aide de neutrons rapides de cyclotron*, Thèse de doctorat de Sciences Physiques de l'Université d'Orléans, Orléans, 1986, 282 p.
Gratuze B., *Analyse non destructive d'objets en verre par des méthodes nucléaires. Application à l'étude des estampilles et poids monétaires islamiques.*, Thèse de doctorat de Sciences Physiques de l'Université d'Orléans, Orléans, 1988, 198 p.

[423] Les phénomènes physiques impliqués ainsi que leur détection sont présentés en Annexe B.

[424] Gratuze B., *Analyse non destructive..., op. cit.*, p. 89.

uniquement les éléments en faible quantité dans les sols mais peut également caractériser les éléments majoritaires. Un sol dit calcaire sera composé en majorité de calcium alors que ce sera le silicium pour des sédiments argileux. Pour la quantification d'éléments métalliques en faibles proportions dans des sols constituant une matrice majoritaire, le protocole des étalons en feuilles minces couplées à des moniteurs de flux était plus intéressant.

Cette méthode consiste à préalablement irradier avec des neutrons rapides de cyclotron une collection des différents éléments qui seront par la suite dosés dans les échantillons analysés. Les étalons sont purs et de masse connue. Ils sont sous forme de feuille mince[425] afin de limiter des phénomènes d'absorption du flux de neutron.

Si ces derniers étaient irradiés en même temps qu'un échantillon de sol analysé, le pourcentage d'un élément X serait donné par la formule :

$$\%\, d'élément\ X = \frac{Activité\ de\ l'échantillon}{Masse\ de\ l'échantillon} \times \frac{Masse\ de\ l'étalon}{Activité\ de\ l'étalon} \times 100 \quad (1)$$

où les activités sont celles d'un radioisotope de l'élément X, à un instant t_0, correspondant à la fin de l'irradiation par les neutrons rapides. Elles sont calculées à partir de mesures de spectrométrie gamma, faites à des instants, t, correspondant à différentes durées de décroissance de l'échantillon[426].

Un tel protocole est très couteux en étalons puisqu'il est obligatoire d'en utiliser de nouveaux pour chacun des échantillons de sédiments analysés.

Afin de limiter le nombre d'étalons, il est possible d'utiliser un moniteur de flux. Il permet de normaliser les conditions d'irradiation rendant compte d'une mesure de la valeur du flux de neutrons. Ainsi, les étalons ne sont irradié qu'une seule fois. Les sols sont par la suite irradiés sans étalons. C'est le moniteur de flux qui permet de faire relier les étalons aux les échantillons. Le principe consiste à irradier dans un premier temps une masse connue d'un composé qui constitue le moniteur de flux avec la collection d'étalons nécessaires à l'analyse des sédiments. Les activités des étalons ainsi que celle d'un radioisotope du moniteur de flux sont évaluées et normalisées par leurs masses respectives.

[425] Ou sous forme de poudre quand l'étalon n'existe pas en feuille mince.
[426] Programme de calcul développé au sein du Centre Ernest-Babelon.

L'échantillon analysé est par la suite également irradié avec une masse connue de moniteur de flux. Après mesures des activités résultantes de cette irradiation des différents radioisotopes formés, celle du moniteur de flux permet de les corriger pour qu'elles correspondent aux valeurs qui auraient été obtenues si l'échantillon avait été irradié en même temps que les étalons.

Le facteur de correction k est alors :

$$k = \frac{Activité\ moniteur\ étalons}{Masse\ moniteur\ étalons} \times \frac{Masse\ moniteur\ analyse}{Activité\ moniteur\ analyse} \qquad (2)$$

D'où :

$$Activité\ corrigée\ d'un\ élément\ X = k \times Activité\ mesurée\ d'un\ élément\ X \qquad (3)$$

Ces nouvelles activités corrigées sont finalement utilisées dans l'équation (1) pour calculer les concentrations massiques des éléments de l'échantillon. Il n'est pas nécessaire de quantifier tous les composés présents. Seuls ceux nécessaires à l'étude de calibration ont été étalonnés pour déterminer par la suite leur concentration massique.

Le moniteur de flux choisi pour cette étude est l'aluminium car la courte période du radioisotope sélectionné pour évaluer le flux de neutron, permet une réutilisation après une vingtaine de jours de décroissance.

Les éléments initialement sélectionnés pour évaluer la fiabilité des mesures du spectromètre de fluorescence X portable sont : l'argent, l'arsenic, le cuivre, le fer, le mercure, le manganèse, l'or, le plomb et le zinc. Les deux métaux précieux ont été considérés à titre indicatif dans le cadre de perspectives possibles de la méthode bien qu'ils ne soient pas caractérisés par le mode de quantification du Niton.

3.1.2. Protocole expérimental

Dans la séquence d'étalonnage, un empilement de feuilles minces de métaux purs[427] entouré par le moniteur de flux est irradié dans un faisceau de neutrons de 7,5 MeV d'énergie moyenne[428]. La durée d'irradiation est la même que celle choisie pour les analyses de sols, c'est-à-dire dix minutes. La mesure des activités de chaque feuille mince et du moniteur, est ensuite faite par spectrométrie gamma pendant une durée minimum de trois heures. Ces mesures sont réalisées après une durée de décroissance comparable à celle qui intervient lors des analyses de sols. Un intervalle de deux jours est imposé pour permettre notamment la décroissance d'un radioisotope du sodium présent dans les échantillons de sol, dont la radioactivité élevée peu de temps après l'irradiation, diminue la précisions des premières mesures en saturant partiellement le détecteur de rayonnement gamma[429].

Afin de normaliser les paramètres géométriques des échantillons analysés dans le flux de neutrons ainsi que lors des mesures de spectrométrie gamma, ils sont préalablement mis sous forme de pastilles cylindriques de 13 mm de diamètre et d'environ 5 mm d'épaisseur (environ 2,5 g de matière). Cette étape implique l'utilisation d'une presse hydraulique pour compresser les sédiments jusqu'à une pression de 300 bars. Par ailleurs, cette préparation est nécessaire d'un point de vue de radioprotection. Même si les échantillons sont scellés dans un emballage hermétique, leur compactage limite les potentielles dispersions de poussières radioactives après leur irradiation.

Une fois préparés, les sédiments et leurs moniteurs de flux sont irradiés dans un flux de neutrons rapides comme les étalons pendant dix minutes. Après deux jours de décroissance, l'activité des moniteurs de flux est mesurée pendant une durée minimum de trois heures. Puis celle des échantillons est relevée pendant une période qui excède huit heures. Une deuxième mesure plus longue que la première intervient ensuite pour améliorer la précision de la quantification après une diminution du bruit de fond.

Après avoir corrigé les valeurs d'activité avec celles des moniteurs de flux, il est possible de calculer les concentrations massiques de chaque élément étalonné.

[427] Sauf pour l'arsenic utilisé sous forme de poudre et le mercure sous forme de sulfure.
[428] Beauchesne F., *Analyse non destructive..., op. cit.*, p. 38.
[429] cf. Annexe B.

3.1.3. Résultats analytiques

Après avoir analysé quatorze échantillons prélevés sur différents sites paléométallurgiques permettant de décrire plusieurs compositions-types de sols, la comparaison des résultats obtenus a permis de disposer d'une première évaluation de la sensibilité du spectromètre portable. Cependant, l'évaluation de la fiabilité n'a pu être validée que pour deux éléments seulement : le plomb et le zinc.

En effet, différentes limitations ont été rencontrées lors de la quantification des autres composés :

- Pour le cuivre, la période de désintégration extrêmement longue du radioisotope utilisé pour son analyse (cobalt 60, T = 5,272 années) à laquelle s'ajoutent ses faibles teneurs dans les échantillons analysés, ne permettent pas d'avoir une statistique de désintégrations nucléaires du radioisotope suffisante pour être mesurée durant le temps imparti (entre 8 et 24 heures). Il est possible d'estimer la limite de détection de cette méthode en calculant la quantité d'un élément dont l'activité mesurée serait de l'ordre de trois fois la racine carrée du bruit de fond évalué à l'énergie du radioisotope considéré. Cette valeur correspond à la limite à partir de laquelle le pic d'émission isotopique est discernable du bruit de fond. L'estimation de cette limite donne pour le cuivre des concentrations de l'ordre de 500 à 600 ppm, soit bien au-dessus de celles mesurées par le Niton Xlt 700.

- Pour le mercure, bien que les périodes de désintégrations des isotopes choisis pour la quantification soient bien inférieures à celle du ^{60}Co, c'est ici *a priori* la très faible concentration déjà estimée par spectrométrie de fluorescence X (23 ± 11 ppm (2σ)) dans le seul échantillon analysé qui justifie cet échec.

- Le fer et le manganèse n'ont pu être quantifiés car ils forment les mêmes radioisotopes à l'énergie d'irradiation choisie. Il est impossible de les compter séparément, dans les conditions d'analyse de cette étude.

- Les concentrations obtenues par activation pour l'arsenic sont très inférieures à celles données par le Niton. Après avoir dans un premier temps remis en question la pureté de la poudre de référence utilisée lors l'étalonnage[430], cette hypothèse a été finalement pondérée par les résultats obtenus à partir d'une seconde méthode d'analyse présentée plus loin[431]. Elle permettra de proposer une nouvelle hypothèse justifiant les différences constatées.

Afin d'évaluer la fiabilité du spectromètre portable dans le cadre de la prospection, il faut comparer ses résultats à ceux obtenus avec la méthode de

[430] Fragment d'arsenic prélevé sur un bloc massif.
[431] cf. Analyse des références par le Service d'Analyse des Roches et des Minéraux, p. 207.

référence choisie. La correspondance des données est déterminée à partir d'une régression linéaire mais surtout du coefficient de corrélation (R^2) qui lui est associé. Il témoigne de la validité de la relation calculée et de la fiabilité des dosages effectués avec le Niton Xlt 700 sur le domaine de concentration. C'est ce paramètre qui conditionne la qualité des futures prospections géochimiques. Ces dernières, plus que d'être dévolues à la détermination des concentrations précises des prélèvements de sols, cherchent plus particulièrement à en évaluer les évolutions de compostions. La mise en évidence d'une relation de proportionnalité avec un indice de corrélation élevé permet d'attester de la réalité des variations relevées. C'est à partir d'une telle configuration qu'il est possible de réaliser les différentes cartographies élémentaires qui doivent rendre de compte des contrastes de compositions.

A l'approche des limites de détection liées aussi bien à la spectrométrie de fluorescence X qu'à l'ANRC, les concentrations déterminées sont, sans qu'il soit possible d'évaluer dans quelle mesure, moins précises. Elles imposent de limiter leur poids dans l'estimation du rapport de proportionnalité entre les deux méthodes. C'est pour cela qu'une ordonnée nulle à l'origine a été imposée pour le calcul des droites de régression.

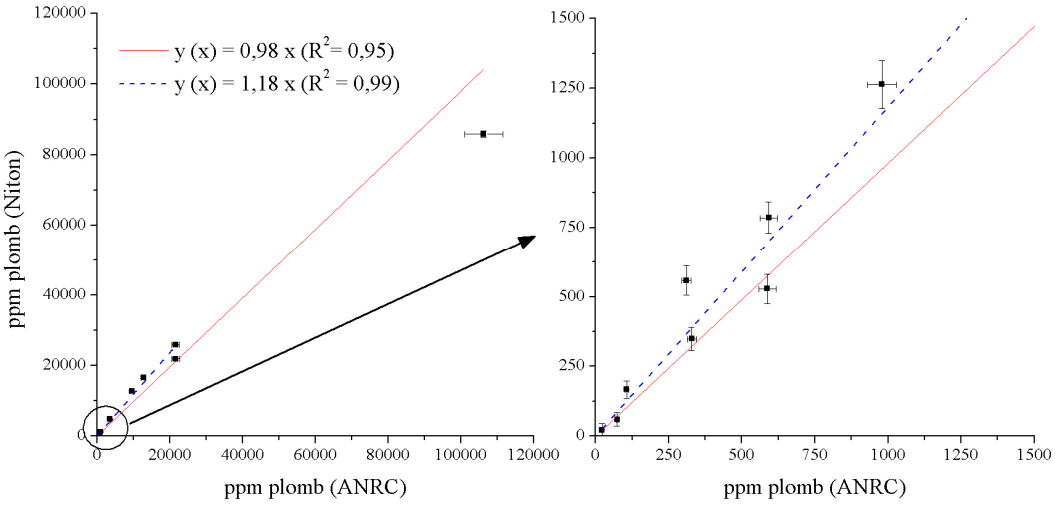


Figure 41 - Courbes de calibration du plomb (ANRC-Niton).

Les résultats obtenus pour le plomb (figure 41 : droite rouge) font état d'un facteur de proportionnalité très proche de un (0,98) qui traduit l'équivalence des deux méthodes dans le domaine de concentration d'étalonnage (20 à 115000 ppm). Par ailleurs, avoisinant aussi l'unité (0,95) le coefficient de corrélation indique une très bonne correspondance entre les données. Il faut toutefois remarquer que dans

l'intervalle de concentration choisi, les dosages sont particulièrement rassemblés autours des faibles valeurs (< 20000 ppm). Un unique échantillon constitue l'extrémité haute du domaine. Il doit être considéré avec réserve compte tenu de sa teneur en plomb près de huit fois supérieure au critère d'application du mode de quantification prescrit pour la prospection (*Standard Soil Mode*). En éliminant ce point de la régression (figure 41 : droite bleue), ramenant l'intervalle entre 20 et 20000 ppm, la corrélation se voit améliorée (R^2=0,99) avec néanmoins une diminution de la réciprocité des méthodes puisque le coefficient de proportionnalité devient 1,18. L'écart constaté pour l'échantillon qui présente le taux le plus important de plomb montre que l'effet de matrice est difficilement pris en compte par le modèle de quantification. Une partie des rayons X incident et de fluorescence est absorbée par l'échantillon ce qui entraîne une sous-évaluation du métal lourd.

Le spectromètre Niton Xlt 700 semble donc offrir de très bonnes sensibilités pour le plomb, du moins sur le domaine d'application de modèle de quantification (< 10000 ppm), avec des limites de détection très faibles (jusqu'à 20 ppm). Les quantifications situées en dehors de cet intervalle seront caractérisées dans la seconde étude de corrélation. De plus, bien que l'effet de matrice perturbe l'application du modèle de quantification choisi lorsque le taux de plomb devient important, il faut reconnaître que les résultats obtenus n'en sont pas moins exploitables dans le cadre de la prospection. Même si les teneurs en plomb sont sous-estimées, le domaine de concentration trahis ici des taux important qui trahissent des pollutions significatives. Les écarts de concentrations subis ne sont pas préjudiciables à la prospection.

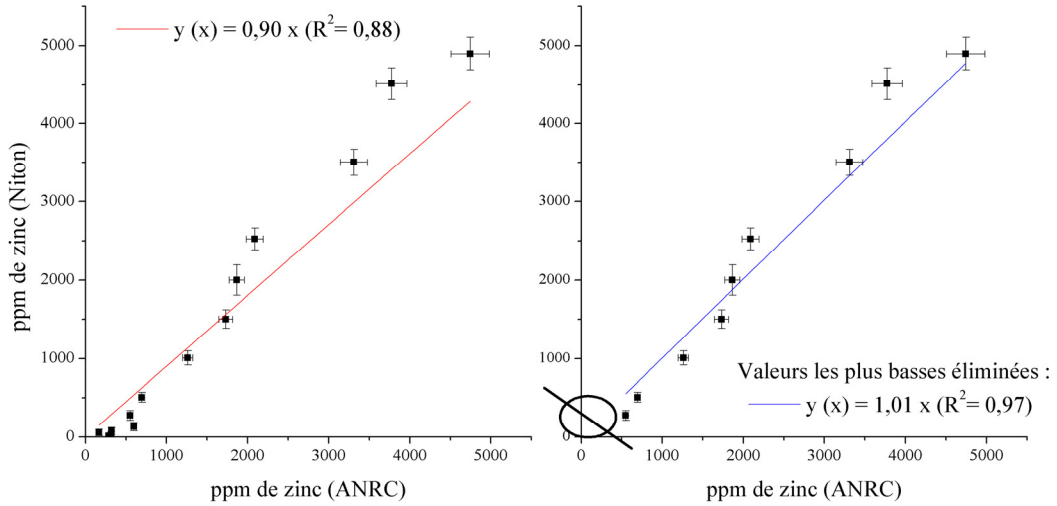


Figure 42 - Courbes de calibration du zinc (ANRC-Niton).

En ce qui concerne le zinc (figure 42 : droite rouge), de par le coefficient R^2 calculé et la pente de la régression linéaire, la correspondance entre les deux méthodes semble moins bonne que celle liée au plomb. D'un autre côté, bien qu'elle soit ici inconnue, la limite de détection de cet élément est estimable à partir des données fournies par le fabricant[432]. Après les trente secondes d'analyse prescrites dans la prospection, elle est *a priori,* pour le zinc, supérieure aux 75 ppm estimées par le fabricant pour soixante secondes de dosage d'un sol de référence. Il apparaît ici, que certains échantillons présentent des concentrations proches de cette valeur, voire mêmes inférieures. En éliminant les références présentant les plus faibles teneurs (< 130 ppm), un nouveau calcul de corrélation atteste de la capacité du Niton Xlt 700 à doser le zinc dans des sols pollués sur un domaine de concentration compris entre 250 et 5000 ppm avec des durées d'analyse de 30 s.

La conclusion de cette première évaluation de la fiabilité du Niton, montre pour les deux éléments qui ont pu être considérés, une très bonne corrélation entre les résultats obtenus avec le spectromètre portable et ceux de la méthode de référence, du moins sur les domaines de concentrations de 20 à 20000 voire 115000 ppm pour le plomb et 250 à 5000 ppm pour le zinc. Dans l'ensemble, il y ait une quasi équivalence des dosages entre les deux méthodes avec des rapports de proportionnalité proches de un, la méthode est dans ce cas quantitative. De plus, elle est fiable puisque les coefficients de corrélation avoisinent l'unité dans chacun des cas.

Ces analyses ont aussi souligné les sensibilités différentes de la méthode selon les éléments dosés. Si le zinc semble être mesuré jusqu'à des teneurs de 250 ppm, elles peuvent descendre à 20 ppm pour le plomb. Le Niton Xlt 700 est donc particulièrement performant pour l'analyse de sédiments contenant ce métal lourd. Cette efficacité est liée à l'anode du tube de rayon X de l'appareillage. Le plomb est plus sensible que le zinc aux énergies des raies excitatrices de l'argent. Le choix de ce type de source traduit finalement l'une des applications de ce spectromètre. Il est en effet employé par des organismes de contrôle, dans un cadre législatif, pour des problématiques de santé publique concernant les pollutions au plomb.

[432] cf. Durée d'analyse, p. 192.

Le Centre Ernest-Babelon où a été réalisée cette étude de calibration, dispose d'une expérience reconnue dans le domaine de l'analyse par irradiation aux neutrons rapides de cyclotron et d'un accès privilégié aux rares instruments nécessaires pour réaliser ce type de caractérisation. Il était dans ce cas *a priori* envisageable de proposer un protocole d'analyse de sédiments profitant de ces savoir-faire et infrastructures. Toutefois, bien qu'encourageants, les résultats obtenus au terme de ce processus d'analyse, n'ont pas permis de vérifier la validité des quantifications du Niton Xlt 700 pour la totalité des éléments recherchés. Seuls le plomb et le zinc ont pu être considérés. Finalement, le matériau sédimentaire par sa composition, diffère dans une trop grande mesure de ceux généralement analysés au laboratoire. Il était complexe de supposer les différents phénomènes qui ont empêché la caractérisation de tous les composés étudiés. Plus qu'adapter un protocole analytique déjà existant, il aurait fallu en définitive, en développer un nouveau, optimisé pour les échantillons de sol. Or, à titre d'exemple, la mise en place de telles méthodes adaptées à d'autres types d'échantillons, comme les métaux ou le verre, ont constitué différents sujets de thèses du Centre[433]. Une telle démarche n'était en aucun cas envisageable dans cette étude.

Il a donc été décidé de s'appuyer sur une seconde méthode d'analyse pour vérifier la calibration du Niton Xlt 700. Cependant, afin de s'affranchir d'un développement de méthode supplémentaire, les analyses ont été réalisées par un laboratoire spécialisé dans la caractérisation de sédiments pour une nouvelle gamme de références.

3.2. Analyse des références par le Service d'Analyse des Roches et des Minéraux

Le Service d'Analyse des Roches et des Minéraux (SARM) est un laboratoire de service du CNRS. Il a pour but de mettre à disposition de la communauté géochimique française, le potentiel analytique du Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques (CRPG) dont il fait partie.

Le coût des analyses du SARM étant plus élevé que celui de celles faites par ANRC, le nombre de références a été limité à neuf échantillons seulement. Pour composer au mieux avec cette statistique réduite, la sélection des sédiments d'étalonnage s'est faite selon un protocole séquencé. Il devait permettre de disposer pour un grand nombre d'éléments, d'une gamme de composition la plus large possible. Disposant d'informations préliminaires pour le plomb et le zinc, il était important de s'attacher à déterminer la qualité des résultats fournis pour le

[433] Beauchesne F., *Analyse non destructive..., op. cit.*, 282 p.
Gratuze B., *Analyse non destructive..., op. cit.*, 198 p.

cuivre. Après avoir défini un ordre de priorité de sélection des éléments : le cuivre, le zinc, le plomb et finalement le fer et le manganèse, le choix des étalons a été fait par éliminations successives des prélèvements pollués d'un *corpus* préalablement analysé avec le Niton Xlt 700. A la collection de huit échantillons de sol retenus, un neuvième présentant une faible teneur de mercure a été finalement ajouté.

3.2.1. Protocole analytique

Les prélèvements préparés et analysés selon le même protocole que celui de la prospection géochimique, sont broyés jusqu'à une granulométrie inférieure à 80 µm avant d'être envoyés au SARM.

Après leur fusion alcaline ($LiBO_2$) et leur mise en solution acide, les échantillons sont analysés selon le mode opératoire décrit par J. Carignan *et al*.[434]. Différentes méthodes de caractérisation sont mises en place suivant les types et les teneurs des éléments dosés :

- Spectrométrie d'émission atomique couplée à un plasma inductif (ICP-OES) pour le dosage des éléments majoritaires et minoritaires des sols : SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 total, MnO, MgO, CaO, Na_2O, K_2O, P_2O_5, TiO_2.
- Spectrométrie de masse couplée à un plasma inductif (ICP-MS), pour l'évaluation des traces, notamment : l'arsenic, le cuivre, le nickel, le plomb et le zinc[435].
- Dosages mono-élémentaires chimiques pour les éléments exceptionnellement présents dans des échantillons de sols naturels : Ag, Hg.

En définitive, seuls douze éléments ont pu être comparés compte tenu que le mode de quantification du Niton Xlt 700, propose le dosage de quinze composés seulement et que les données disponibles pour les étalons n'étaient pas exploitables pour trois d'entre eux (cobalt, molybdène et sélénium).

Le dosage de l'argent a par ailleurs été demandé, car même s'il n'intervient pas directement dans la calibration puisqu'il n'est pas quantifié par le spectromètre portable, il sera utilisé dans le cadre de nos perspectives pour cette méthode de prospection.

---

[434] Carignan J. *et al.*, Routine analyses of trace elements in geological samples using flow injection and low pressure on-line liquid chromatography coupled to ICP-MS: A study of geochemical reference materials BR, DR-N, UB-N, AN-G and GH, *Geostandards and Geoanalytical Research*, vol. 25, n° 2-3, 2001, p. 187-198.

[435] Le protocole d'analyse dose également les éléments suivants : Ba, Be, Bi, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Dy, Er, Eu, Ga, Gd, Ge, Hf, Ho, In, La, Lu, Mo, Nb, Nd, Pr, Rb, Sb, Sm, Sn, Sr, Ta, Tb, Th, Tm, U, V, W, Y, Yb, Zn, Zr.

3.2.2. Résultats analytiques

Comme pour les analyses obtenues par ANRC, les résultats des différents éléments caractérisés par le SARM ont été confrontés à ceux relevés par le Niton Xlt 700. Pour chacun d'entre eux, les droites de régression passant par l'origine ainsi que leurs coefficients de corrélation ont été calculés.

Cuivre

Les résultats obtenus pour cet élément sont présentés sur la figure 43. Sur l'intervalle de calibration, la régression linéaire met en évidence une quasi équivalence des deux méthodes avec un facteur de proportionnalité proche de un. La pertinence de cette représentation est par ailleurs confirmée par le coefficient de corrélation R^2=0,985.

La qualité des dosages du cuivre dans des sols pollués par le Niton Xlt 700 est donc attestée pour une gamme de concentrations comprises entre des teneurs très faibles (35 ppm) et pouvant aller jusqu'à 800 ppm.

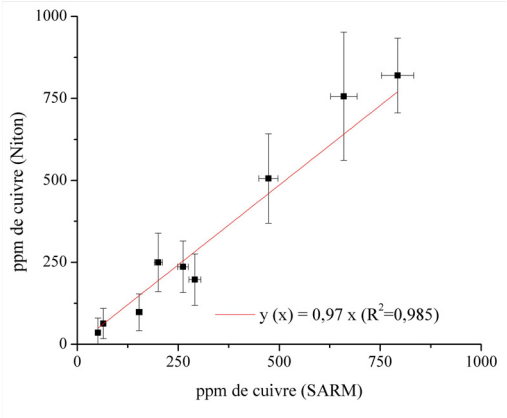


Figure 43 - Courbes de calibration du cuivre (SARM-Niton).

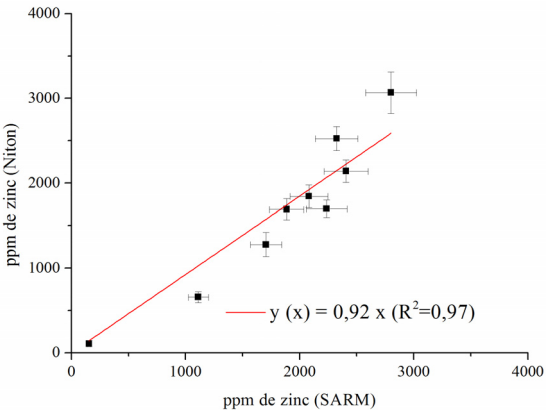


Figure 44 - Courbes de calibration du zinc (SARM-Niton).

Zinc

Les données comparées du zinc (figure 44) confirment les premières conclusions formulées à partir des analyses par activation avec une corrélation élevée mais cependant une moins bonne équivalence entre les deux méthodes.

Plomb

Les analyses par activation ayant attesté de la qualité des dosages du Niton pour les plus faibles teneurs, il a été choisi de déplacer le domaine de concentrations de référence vers les valeurs les plus hautes. En effet, dans le cadre d'une prospection, il est envisageable que certains échantillons révèlent pour certains éléments, des taux qui imposent normalement de changer de modèle de quantification. Considérant qu'il est indispensable d'utiliser toujours le même mode de dosage afin de pouvoir confronter entre eux tous les résultats d'une même campagne de mesure, il était nécessaire de vérifier la qualité des résultats obtenus lorsque les teneurs des échantillons se placent dans une certaine mesure en dehors du critère d'application du modèle de quantification (*Standard Soil Mode*).

Avec ces configurations d'analyses limites, il n'est pas surprenant de constater une dérive entre les résultats du Niton par rapport aux données certifiées (Figure 45). Les dosages du spectromètre portable ont tendance à être sous-évalués par rapport aux valeurs attestées par le SARM. Cependant cet écart avec les données théoriques est acceptable compte tenu du très bon coefficient de corrélation de la régression calculée (R^2=0,99). Bien que les données soient décalées, les variations mesurées dans la composition des sols varient de manière linéaire. Or, c'est sur ce dernier paramètre que repose la démarche de prospection puisque qu'elle veut mettre en évidence des gradients de concentration. Il est par ailleurs envisageable, connaissant le rapport de proportionnalité entre les deux méthodes, de corriger les dosages du Niton Xlt 700. Toutefois, le nombre d'analyses trop limité de cette étude interdit pour l'instant d'appliquer ce type de rectification.

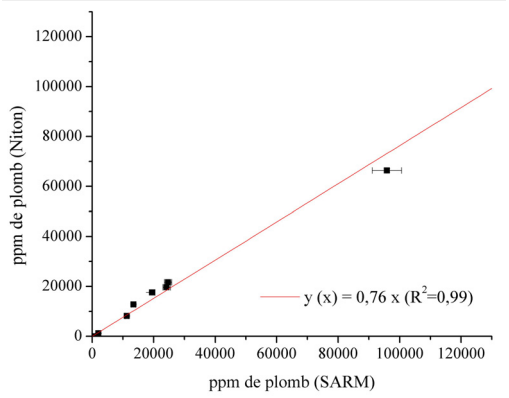


Figure 45 Courbes de calibration du plomb (SARM-Niton).

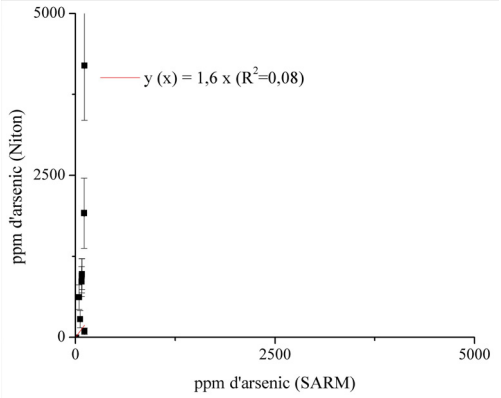


Figure 46 - Courbes de calibration de l'arsenic (SARM-Niton).

Arsenic

La comparaison des données obtenues pour l'arsenic montre une très large surestimation des teneurs par le spectromètre portable (figure 46). En considérant la totalité des échantillons caractérisés dans les deux études de calibration, ces mauvaises mesures semblent corrélées avec les fortes concentrations de plomb (figure 47). Or, si ces deux éléments sont souvent liés géologiquement, il ne s'agit pas ici de ce type de relation compte tenu de la diversité des échantillons qui ne proviennent pas de la même zone. L'explication de cette surévaluation tient certainement à la quasi équivalence énergétique de la raie de fluorescence Kα de l'arsenic (10,53 keV) avec la Lα du plomb (10,55 keV). Le dosage de l'arsenic étant *a priori* estimé à partir de sa raie de fluorescence la plus importante, en l'occurrence la Kα. La résolution d'environ 200 eV du détecteur de rayons X de ne permet pas la distinction des deux raies d'énergies proches et la raie Lα du plomb est comptée pour la Kα de l'arsenic lors de la quantification.

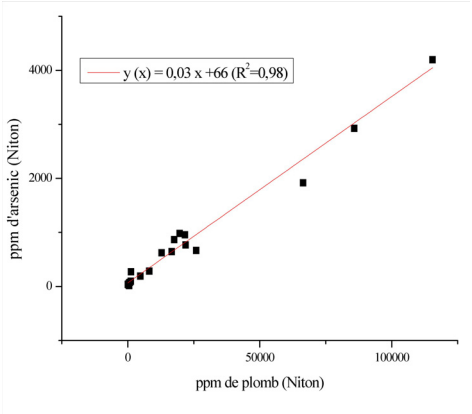


Figure 47 - Courbes de corrélation de l'arsenic avec le plomb (Niton).

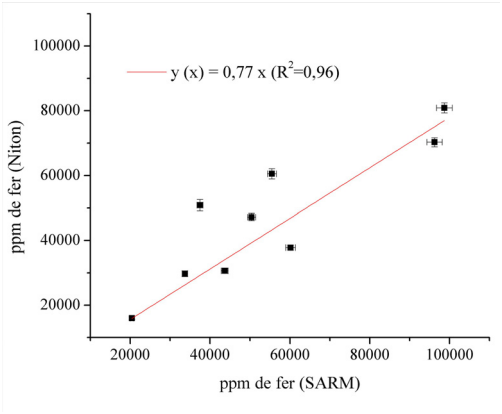


Figure 48 - Courbes de calibration du fer (SARM-Niton).

Mercure

Le mercure est considéré différemment des autres éléments pour lesquels sont relevées les variations de leurs teneurs. Le cas de ce composé est particulier puisque sa présence est posée dans cette étude comme obligatoirement associée à une activité anthropique. Il est donc possible de le considérer en terme de présence ou d'absence dans un sol prospecté.

Compte tenu du nombre restreint d'échantillons retenus pour la calibration, il était envisageable de vérifier seulement la capacité du Niton à mettre en évidence le métal lourd à partir d'un seul échantillon en présentant une faible concentration.

La teneur de 17 ± 8 ppm (2σ) mesurée par le spectromètre portable apparaît surestimée par rapport aux 6,4 ppm évaluées par analyse chimique au SARM. Cependant, cette différence ne nuit pas à la prospection, elle montre au contraire la très bonne sensibilité du Niton qui estime la présence de ce composé en très faible quantité.

Fer

Même si le fer est parfois associé à des pollutions paléométallurgiques, il faut considérer qu'il représente aussi l'un des composés majoritaires du sol. Ceci explique les concentrations importantes relevées dans les échantillons. Elles interdisent normalement l'application du modèle de quantification choisi pour la prospection. Et bien que les concentrations mesurées avec le Niton soient assez bien corrélées avec les analyses du SARM (R^2=0,96), l'équivalence entre les méthodes n'est pas parfaite (Figure 48). Dans le cadre d'études cherchant particulièrement à mettre en évidence cet élément et dans la mesure où le fond géochimique révèle initialement des teneurs supérieures au pourcent, il faut envisager de choisir pour ce composé, un autre mode de dosage.

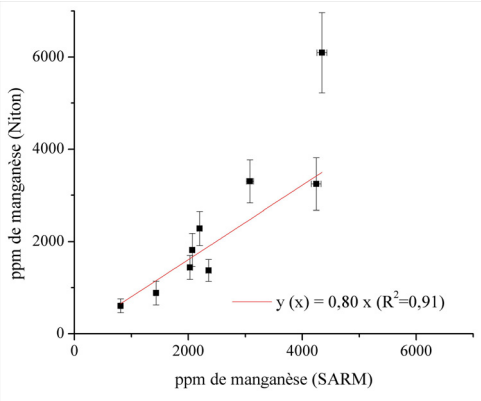


Figure 49 - Courbes de calibration du manganèse (SARM-Niton).

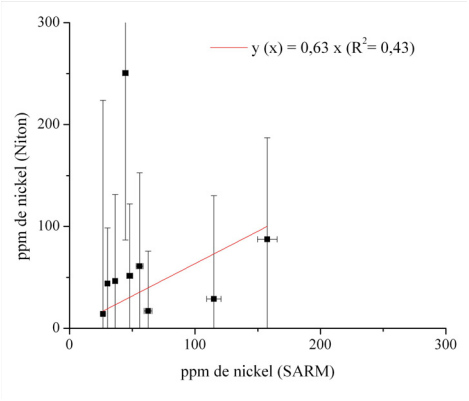


Figure 50 - Courbes de calibration du nickel (SARM-Niton).

Manganèse

Comme le fer, le manganèse est sous-estimé par le spectromètre portable (figure 49) bien que les valeurs mesurées répondent aux contraintes du mode de quantification (< 1%). L'indice de corrélation n'est cependant pas trop éloigné de l'unité (0,91), ce qui peut satisfaire à la caractérisation de cet élément puisqu'il n'intervient pas directement dans une chaîne opératoire paléométallurgique.

Nickel

Les concentrations du nickel très faibles pour la plupart des échantillons, interdisent de juger de la pertinence des quantifications du Niton Xlt 700 (Figure 50). Il faut donc dans le cadre de la prospection considérer cet élément avec précaution. Ce n'est *a priori* pas fortement préjudiciable à l'étude étant donné qu'il n'a pas sa place dans la série des métaux utilisés dans les périodes anciennes.

3.3. Résultats globaux de la calibration

Le nombre total d'échantillons étudiés interdit de certifier les valeurs absolues des différentes calibrations. Dans le cadre du nouveau protocole de recherche géochimique de vestiges paléométallurgiques qui est décrit ici, il faut rappeler les types d'informations recherchées. Plus qu'une grande précision dans les quantifications, c'est d'abord une reproductibilité des mesures qui est indispensable à la prospection, dans la mesure où les résultats obtenus doivent être comparés entre eux afin d'établir des cartographies élémentaires. Or, sur les domaines de concentration propres à chacun des éléments caractérisés, il faut reconnaître les capacités du Niton Xlt 700 à répondre au Cahier des Charges fixé pour cette méthode de prospection inédite.

D'autre part, la mise en évidence des limites du spectromètre portable, participe à l'optimisation de l'interprétation des données collectées pour les différents éléments, notamment en attribuant à chacun un degré de confiance. Les très bons résultats obtenus pour les calibrations du cuivre, du plomb et du zinc, composés justement marqueurs de paléopollutions métallurgiques, permettent de considérer les résultats obtenus pour ces éléments avec plus de poids sur leurs domaines de concentration correspondants.

Cette calibration a aussi rappelé les limites du mode de quantification dont les résultats hors du domaine d'application du modèle, dérivent par rapport aux concentrations réelles. Néanmoins ils sont toujours exploitables d'un point de vue prospectif puisqu'ils présentent une bonne corrélation avec les analyses de référence. Pour le fer seulement, dont les teneurs sont généralement en dehors des critères, il est préférable d'utiliser un autre mode pour les dosages.

Le spectromètre de fluorescence X Niton Xlt 700 apparaît être l'appareil idéal pour le type d'étude envisagée ici. Bien que sa sensibilité soit parfois variable ce n'est pas cette qualité qui est principalement recherchée. Elle est d'ailleurs compensée par la rapidité des mesures, la simplicité du traitement de l'information ainsi que par le fait qu'elle ne demande pas une préparation lourde des échantillons.

4. Discussion de la méthode

Le but de cette étude était de proposer une démarche inédite de recherche de vestiges archéologiques métallurgiques. Après avoir, dans un premier temps, rappelé que les différentes pollutions engendrées par les multiples opérations de production et de traitement du métal représentent un remarquable paramètre de prospection, un protocole a été défini pour caractériser et traiter ce type d'informations. Il est maintenant nécessaire d'avoir un regard critique sur cette méthode afin d'en reconnaître les limites.

L'innovation principale de cette étude réside dans l'utilisation du moyen d'analyse portable qu'est le spectromètre de fluorescence X Niton Xlt 700. L'étude de calibration qui en a été faite a permis de valider la qualité de cet analyseur.

Elle a cependant révélé une meilleure sensibilité pour un nombre restreint d'éléments que sont le cuivre, le plomb et le zinc. Dans un premier temps, il est préférable de limiter l'application de la prospection proposée aux sites métallurgiques où interviennent en majorité ces trois métaux.

Lors des étapes de préparation des échantillons certains traitements ont été imposés afin de s'affranchir de possibles interférences. Il s'agit en particulier des opérations de séchage, broyage, homogénéisation et tamisage, censées participer à la qualité des résultats analytiques.

L'homogénéité des échantillons doit être en particulier discutée. La spectrométrie de fluorescence X est généralement considérée comme une méthode de surface, c'est-à-dire qu'elle permet de caractériser une épaisseur limitée du matériau[436]. Il est donc indispensable que le volume restreint analysé, représente au mieux la composition moyenne de l'échantillon. Aussi, les opérations de broyage et de tamisage lors de la préparation des sédiments doivent favoriser le brassage et le mélange de la matière, participant à son homogénéisation. Les bons résultats obtenus lors de l'étude de calibration témoignent *de facto* de l'efficacité des différentes préparations définies dans le protocole.

A partir des différentes mesures de calibration, il est possible d'attester que le protocole de préparation et d'analyse des échantillons proposé, met en place les capacités nécessaires à la prospection définie. Il permet en effet de révéler, lorsqu'elles existent, les variations de composition dans le sol d'une zone expertisée. Cependant, une part importante de la qualité du diagnostic archéologique, repose sur l'interprétation des résultats analytiques. Il faut alors reconnaître que les plus grandes incertitudes résultent en définitive de l'interprétation des différentes informations obtenues. Et c'est notamment pour ces raisons qu'il est nécessaire de multiplier les différentes méthodes de prospection pour mieux assurer les hypothèses de localisation.

La question des risques de mauvaises interprétations dues à des contaminations plus récentes a été peu évoquée dans cette étude. Si la définition d'une profondeur de prélèvement de trente centimètres doit permettre de s'affranchir de la présence du plomb contemporain, résultant de la combustion des carburants automobiles, d'autres pollutions récentes pourront toutefois être détectées lors des prospections.

A titre d'exemple, plusieurs éléments métalliques ont été utilisés dans l'agriculture contemporaine. Différentes études dont certaines présentent des démarches similaires de celle décrite ici, traitent de la présence d'arsenic, de cuivre, de plomb et de zinc dans des sols cultivés[437]. Le sulfate de cuivre ($CuSO_4$) de la bouillie bordelaise est très couramment employé comme fongicide et bactéricide pour le traitement de la vigne. L'arséniate de plomb ($Pb_3(AsO_4)_2$) a,

[436] cf. Annexe C.

[437] Veneman P. L. M. *et al.*, Spatial distribution of pesticide residues in a former apple orchard, *Journal of Environmental Quality*, vol. 12, n° 1, 1983, p. 101-104.
Francek M. A., Soil lead levels in orchards and roadsides of mission peninsula, Michigan, *Water, Air, & Soil Pollution*, vol. 94, n° 3, 1997, p. 373-384.
Wolz S. *et al.*, Residential arsenic and lead..., *op. cit.*, p. 293-300.
Aten C. F. *et al.*, Arsenic and lead in an orchard environment, *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, vol. 24, n° 1, 1980, p. 108-115.
Jorgensen N. *et al.*, Multi-elemental EDXRF..., *op. cit.*, p. 43-52.

quant à lui, été utilisé comme pesticide. Les emplois agricoles de ces différents éléments induisent donc des variations locales de la composition du sol *a priori* similaires à celles de potentiels vestiges métallurgiques. Elles susciteront de mauvaises interprétations.

Il est difficile de s'affranchir de ce problème en jugeant de l'origine d'une pollution à partir des seules analyses de sol. Cependant, la connaissance de ces possibles interférences permet de chercher à les prévenir. C'est dans ce but qu'interviennent les étapes de réflexion post-analytiques. Les données collectées au cours de la prospection à partir de l'observation et de l'analyse des prélèvements de sol doivent, par leur confrontation avec les informations issues d'études complémentaires, permettre de définir l'intérêt à porter à une anomalie géochimique. Les hypothèses relatives à la présence de potentiels vestiges minéralurgiques ou métallurgiques ne sont en définitive formulées qu'en conclusion de cette compilation des résultats. Ces dernières ne sont par la suite vérifiées que par la prescription d'interventions archéologiques invasives.

B. Monnayage officiel : Montreuil-Bonnin (Vienne)

Jusqu'à présent la présence d'un atelier monétaire médiéval associé au château de Montreuil-Bonnin était attestée par plusieurs sources historiques. Le bilan de trois campagnes de prospections menées récemment aux abords de la forteresse confirme aujourd'hui cette association. Le mobilier mis au jour offre un témoignage supplémentaire de la fabrication monétaire médiévale.

1 - L'atelier monétaire de Montreuil-Bonnin

Située à une vingtaine de kilomètres à l'ouest de Poitiers, la forteresse de Montreuil-Bonnin (Vienne) domine le village situé en contrebas (Figure 51). Au Moyen Age, un atelier monétaire était associé à ce *castrum*. Ce regroupement n'est pas étonnant étant donné le type d'activité dont il est question.

Le château de Montreuil-Bonnin est un ensemble bien conservé encore habité aujourd'hui. Quelques indices témoignent de rénovations et suggèrent plusieurs réaménagements. Situé sur le bord d'un plateau calcaire qui offre sur sa face sud une défense naturelle constituée par un escarpement vertical, la forteresse est bordée par un fossé. La profondeur actuelle du creusement variant de 4 à 9 m pourrait attester de comblements volontaires localisés.

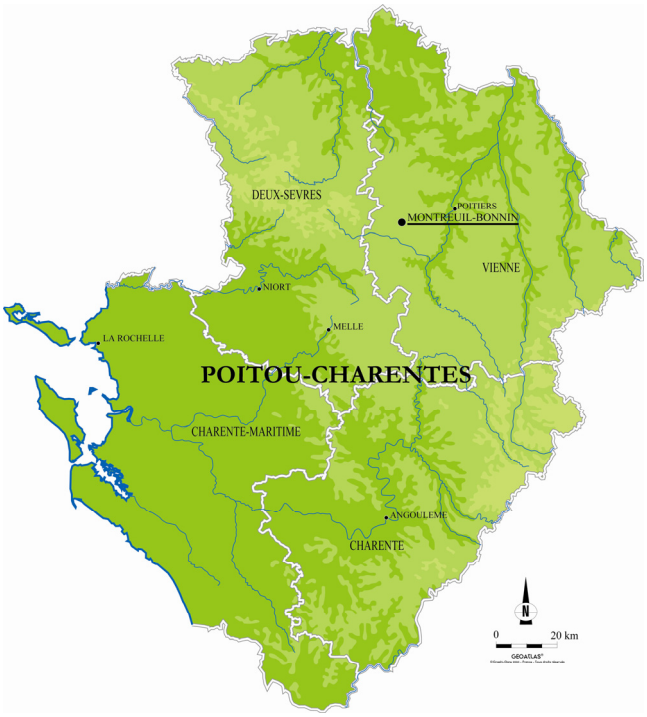


Figure 51 - Montreuil-Bonnin en Poitou-Charentes.

Une étude du bâti du château a fait l'objet d'un mémoire de maîtrise d'Histoire de l'Art soutenue à l'Université de Poitiers[438]. Le rempart qui ceinture la forteresse dessine un quadrilatère rectangulaire avec dans ses coins, quatre tours circulaires et une semi-circulaire flanquant la muraille ouest (Figure 52). Dans la partie ouest de la cour intérieure s'élève un donjon inspiré, sans en être le modèle, des donjons royaux construits sous Philippe Auguste.

L'entrée principale se fait aujourd'hui par un châtelet situé au milieu du rempart nord qui fait face au plateau. Outre cet accès, il en existe deux autres qui ont été pratiqués dans la muraille est. L'un est situé au milieu du rempart et s'ouvre sur une levée de terre muraillée dans le fossé qui mène à une grande étendue nivelée où se retrouvent les indices d'un ancien jardin d'agrément. Ne présentant aucune caractéristique défensive et faite dans ce qui doit être qualifié de mur d'enceinte, et non de muraille, cette percée sur l'ancien parc n'existait pas vraisemblablement à l'origine. La dernière ouverture est une porte percée dans la tour d'angle sud-est. Elle fait face à un pont dont il ne subsiste que deux piles et son accroche au replat de l'autre côté du fossé. Dans l'un des piliers composés d'un appareil irrégulier de pierres et de moellons, se trouve un chapiteau en remploi. L'utilité et l'origine de cette porte sont indéterminées, car elle apparaît

[438] Puaud F., *Le château de Montreuil-Bonnin (Vienne)*, mémoire de maîtrise d'Histoire de l'Art de l'Université de Poitiers, 1992, 133 p.

comme un défaut dans la défense du château, même si avec la destruction du tablier du pont, l'accès à cette ouverture apparaît aujourd'hui difficile.

Bien que la muraille ait été rénovée à plusieurs endroits, en particulier sur sa partie est, il subsiste les restes d'aménagements anciens, notamment une imposante maçonnerie sur la façade extérieure ouest. Cet ensemble parfaitement intégré à la muraille d'origine a pu être assimilé à un renfort de celle-ci[439]. Ses dimensions et le fait qu'il s'agisse du seul exemple observable dans les remparts suscitent l'interrogation. Il est supposé que cette maçonnerie soit en liaison avec le petit replat extérieur qui lui fait face.

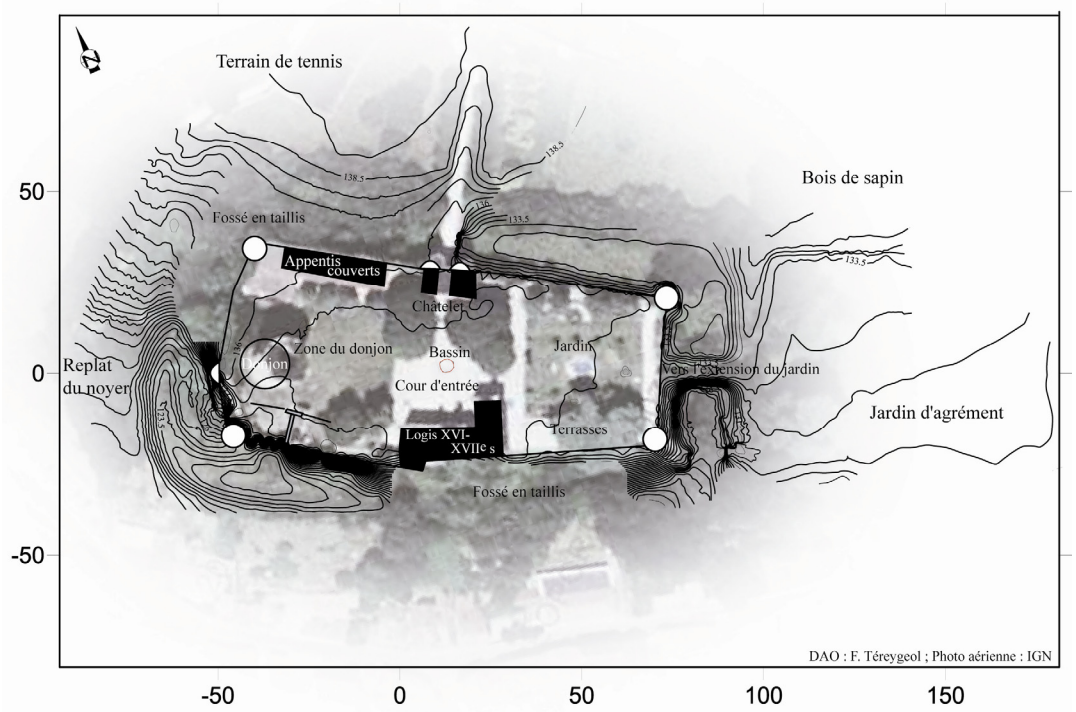


Figure 52 - Plan du château de Montreuil-Bonnin.

Des vestiges de l'atelier monétaire médiéval, il ne reste aujourd'hui rien de visible et le lieu où il s'élevait n'est pas connu précisément. Dans un premier temps, des informations topographiques sur sa situation par rapport au château ont été recherchées dans la littérature. En 2005, la première campagne de prospections a été développée en posant l'hypothèse d'une association en un même lieu de l'atelier et du château, compte tenu des risques et des enjeux, *a priori* liés à la fabrication monétaire. Cependant, deux informations[440] ont remis en cause ce

[439] *Ibidem*, p. 42.
[440] Informations communiquées par M. Bompaire dans le cadre des recherches qu'il mène sur le monnayage de Saint Louis.

postulat initial. En premier lieu, un compte de l'atelier de 1257 mentionne dans les dépenses l'achat de deux cordes *ad pontem levandum*[441]; d'autre part, une enquête de 1259 situe le bâtiment sur une place devant le château[442]. C'est à partir des ces deux sources inédites qu'ont été, par la suite, orientées les prospections. Une attention particulière a, dès lors, été portée sur les indices qui pouvaient trahir la présence *extra muros* de l'atelier.

Dans ses *Annales d'Aquitaine*[443], J. Bouchet situe l'installation de la fabrique en 1181, par Richard Cœur de Lion qui règne sur la région alors sous occupation anglaise. Cette hypothèse de mise en place à la fin du XII^{e} siècle ne peut représenter une certitude, car J. Bouchet ne cite pas ses sources. De plus, à partir de la collection des comptes de Poitou et de Saintonge entre 1241 et 1271 faite par J. Belmon[444], M. Bompaire a pu faire quelques observations, résumées ci-dessous. En 1246, les comptes mentionnent une fabrication monétaire à La Rochelle. En 1250, c'est un certain J. Aubert qui est responsable de la production à Montreuil-Bonnin. Or, les relevés témoignent en 1247 d'une recette de ce même J. Aubert et de ses monnayeurs pour un atelier indéterminé. De plus, ils perçoivent la même année une somme importante, ce qui est souvent le signe d'un démarrage d'atelier ou d'une production[445]. Selon M. Bompaire, l'installation de l'atelier se situerait plutôt en 1247, voire même en 1249, date à laquelle les comptes conservés constituent une série continue faisant suite à une interruption. Envisager une date plus antérieure devient moins probable en considérant que lors de la confiscation du château par Philippe Auguste en 1204, il n'a pas été fait mention de la présence d'un atelier monétaire. De surcroît aucune fabrication de monnaie n'est supposée à cette époque.

Pour l'heure, il n'y a pas de monnaie attribuée avec certitude à cette fabrique. Il y a de fortes présomptions pour certaines monnaies poitevines comme celles

---

Bompaire M., Un siècle de monnayage à Montreuil-Bonnin (1247-1346), dans *Actes du colloque Numismatique et archéologie en Poitou-Charentes*, Niort, 2007, à paraître.

[441] Pour lever un pont.

[442] « *Pro platea que est ante castrum in qua fabricatur moneta*. ».
Fournier P.-F. *et al.*, eds., *Enquêtes administratives d'Alphonse de Poitiers, arrêts de son parlement tenu à Toulouse et textes annexes, 1249-1271*, Paris, Imprimerie nationale, 1959, p. 87.

[443] Bouchet J., *Les annales d'Aquitaine, faicts et gestes en sommaire des roys de France, et d'Angleterre, et Pays de Naples et de Milan jusqu'en 1557*, Poitiers, Inquilbert de Marnef, 1557, p. 207.

[444] Directeur des Etudes de l'Ecole des Chartes.

[445] Exemples dans les comptes du trésor à l'époque de Philippe le Bel : Bompaire M., L'activité monétaire sous le règne de Philippe IV le Bel, dans Mayhew N. J., ed., *The Gros Tournois : proceedings of the Fourteenth Oxford symposium on coinage and monetary history*, Oxford, Angleterre, Ashmolean Museum avec la Royal Numismatic Society et la Société Française de Numismatique, 1997, p. 51-104.

d'Alfonse de Poitiers, comte de Poitou, et notamment le châtel du Poitou[446], mais très peu d'exemples de ce monnayage sont connus[447]. De la même façon, il existe un second type monétaire qui est attribué à l'atelier de Montreuil-Bonnin : il s'agit des *Riccardus Rex*, deniers frappés au nom de Richard Cœur de Lion[448]. C'est la mention *Pictaviensis* à l'avers de ces monnaies, indiquant une frappe poitevine, qui a conduit leur attribution à cette officine. Cette hypothèse repose ici sur la proposition préalablement discutée d'une production anglaise à Montreuil-Bonnin. Bien que plus commun que le châtel du Poitou, puisque la seule collection Rondier en compte déjà 160 exemplaires[449], leur origine demeure incertaine. La fouille de l'atelier monétaire devait vérifier leur fabrication à Montreuil-Bonnin.

Force est de constater le faible nombre de monnaies qu'il est possible d'attribuer à ce jour à la fabrique de Montreuil-Bonnin, malgré l'importance reconnue de cet atelier durant sa période de fonctionnement. En 1306, il est l'un des huit lieux de fabrication français, où étaient frappés des alliages à base d'argent. Le monnayage de l'or y est attesté à partir de 1337[450]. Dans les comptes qui permettent de suivre ses productions, il apparaît souvent juste après Paris pour les quantités émises[451]. Cette fabrique a eu un rôle économique important et ce jusqu'à sa fin tragique décrite dans les chroniques de J. Froissart. Lors du siège du château en 1346[452] par le comte de Derby, sur sa route vers la conquête de Poitiers, la Monnaie de Montreuil est pillée et les 200 monnayeurs exécutés[453]. Elle n'a pas été réhabilitée par la suite.

---

[446] Blanchet J.-A. *et al.*, *Manuel de numismatique française*, 4 tomes, Bologne, Italie, Formi Editore, t. 4, 1969, p. 337.

[447] Une monnaie est disponible dans la collection du musée de Parthenay.

[448] Elias E. R. D., *The Anglo-Gallic coins*, Paris et Londres, Emile Bourgey et Spink & Son Ltd., 1984, p. 36-37.

[449] Collection conservée au musée de Niort.

[450] Barthélémy A. D. *et al.*, *Apurement des comptes de la monnaie d'or fabriquée à Angers, du 25 novembre 1331 au 1er décembre 1333, et à Montreuil-Bonnin du 1er mars 1337 au 22 février 1346*, coll. « Archives historiques du Poitou », t. 4, 1875, p. 235-274.
Clairand A., Aperçu de l'activité des ateliers monétaires en Poitou-Charentes et composition des dépôts monétaires médiévaux et modernes découverts dans les Deux-Sèvres, dans Cavaillès M. *et al.*, eds., *Argent caché..., et retrouvé, les trésors monétaires découverts en Deux-Sèvres,* Parthenay, Musée municipal de Parthenay, 2007, p. 57.

[451] Pour la période 1298-1300, elle est le quatrième atelier français et le deuxième après Paris entre 1308 et 1312 : Queinnec J., Les ressources monétaires du Trésor, 1298-1300, dans Contamine P. *et al.*, eds., *Monnaie, fiscalité et finances au temps de Philippe le Bel* Paris, 2004, p. 269-312.

[452] Froissart J., *Les chroniques de Sire Jean Froissart qui traitent des merveilleuses emprises, nobles aventures et faits d'armes advenus en son temps en France, Angleterre, Bretaigne, Bourgogne, Ecosse, Espaigne, Portingal et les autres parties*, 3 tomes, édité par Buchon J. A. C., Paris, A. Desrez, coll. « Panthéon littéraire », t. 3, 1835, p. 250.

[453] 300 selon une autre copie du manuscrit : Froissart J., *Oeuvres de Froissart : 1346-1356, depuis la bataille de Crécy jusqu'à la bataille de Poitiers*, 26 tomes, édité par Kervyn De Lettenhove J. B. M. C., Osnabrück, Allemagne, Biblio, t. 5, 1967, p. 112.

Si un doute persiste sur la date de création de l'atelier, son fonctionnement s'est déroulé sur une courte période d'activité de 100 à 170 ans, ce qui doit permettre de disposer d'un instantané de la fabrication monétaire à cette période, pour cette région. Quant aux circonstances de l'arrêt de son activité, elles laissent croire en la possibilité de mettre au jour des vestiges bien conservés.

En dehors des différentes sources écrites et numismatiques qui viennent d'être citées, d'autres indices témoignent de la présence de l'atelier à Montreuil-Bonnin. D'un point de vue topographique d'abord, puisqu'il subsiste autour du château une partie du parcellaire qui aurait été attribué aux monnayeurs[454]. Par ailleurs, il existe dans l'église du village trois dalles funéraires qui présentent des gravures d'outils qui se retrouvent dans le monnayage au marteau : entre autres une cisaille (Figure 53), et une enclume.

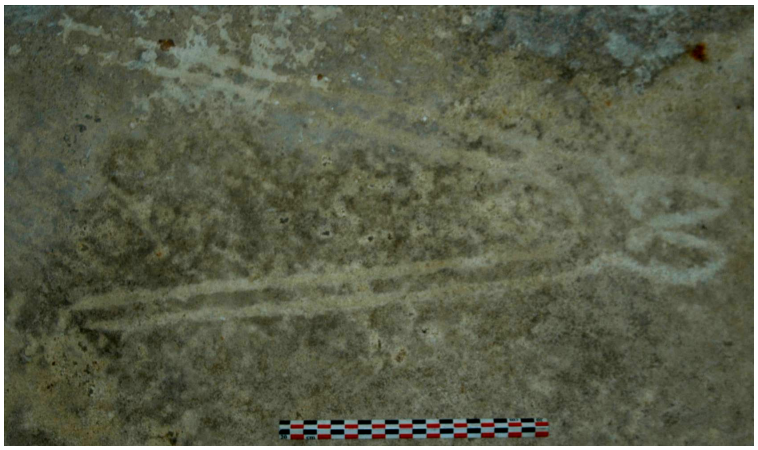


Figure 53 - Représentation potentielle d'une cisaille de monnayeur dans l'église de Montreuil-Bonnin.

Ces tombes seraient, selon M. Meillet[455], celles des chefs fondateurs de la localité. Des représentations de ce type se trouvent également sur certains vitraux d'églises, comme ceux de Strasbourg ou Zurich (Suisse), ainsi que sur l'archivolte du portail de l'église de Saint-Jacques de Carrion-de-los-Condes (Espagne)[456],

[454] Puaud F., *Le château de Montreuil-Bonnin..., op. cit.*, p.16.
[455] Meillet M., Une excursion minéralogique en Limousin, *Rapport de la Société d'Agriculture, Sciences et Arts de la Vienne*, 1858, p. 22.
[456] Vitrail de la ville de Strasbourg, 1582, Collection de la Monnaie de Paris.
Vitrail de Werner Zentgraf, maître de la Monnaie de Schaffouse, 1563, Musée national Suisse, Zurich, LM 40 198.
Bompaire M. *et al.*, *Numismatique médiévale..., op. cit.*, t. 7, p. 481.

mais leur présence sur des monuments funéraires reste inédite. Cependant, là encore, ces gravures ne sont pas reliées avec certitude à l'atelier médiéval ni même à une activité monétaire.

2 - Les investigations archéologiques

Les opérations archéologiques qui devaient mettre au jour les vestiges potentiels de l'atelier monétaire médiéval de Montreuil-Bonnin, ont été mises en œuvre principalement au cours de trois campagnes échelonnées entre 2005 et 2007. Elles ont toutes été dirigées par F. Téreygeol.

Après les premières prospections non invasives, des sondages archéologiques sont venus compléter cette première approche. Ces derniers ont vu la mise au jour de mobilier *a priori* associé à une fabrication monétaire. Ce sont les résultats des différentes expertises archéologiques ainsi que le matériel qu'elles ont permis de dégager, qui vont être maintenant présentés.

Les données exposées ici sont principalement extraites des trois rapports d'interventions rédigés entre 2005 et 2007[457]. Elles ont également fait l'objet de deux publications[458].

a. La topographie du site et les prospections géophysiques

A partir des relevés topographiques effectués à l'intérieur et à l'extérieur du château, on dispose d'une cartographie précise du site sur laquelle sont reportés et croisés les résultats des différentes interventions (Figure 54). Le quart nord-est et le milieu du fossé sud n'ont pas pu être relevés car la végétation de taillis qui s'y est développée a empêché les mesures.

[457] Téreygeol F., *Montreuil-Bonnin, recherches sur l'atelier monétaire médiéval, Document final de synthèse*, SRA poitou-Charentes, 2005, 38 p.
Téreygeol F., *Montreuil-Bonnin 2006..., op. cit.*, 52 p.
Téreygeol F., *Montreuil-Bonnin, recherches sur l'atelier monétaire médiéval, Document final de synthèse*, SRA poitou-Charentes, 2007, 71 p.

[458] Arles A. *et al.*, L'atelier monétaire médiéval de Montreuil-Bonnin : bilan des campagnes de prospection, *Bulletin de liaison année 2007 de l'association des archéologues de Poitou-Charentes*, vol. 36, 2007, p. 87-101.
Arles A. *et al.*, L'atelier monétaire médiéval de Montreuil-Bonnin (Vienne) : Bilan des trois campagnes de prospection, dans *Actes du colloque Numismatique et archéologie en Poitou-Charentes*, Niort, 7-8 décembre 2007, à paraître.

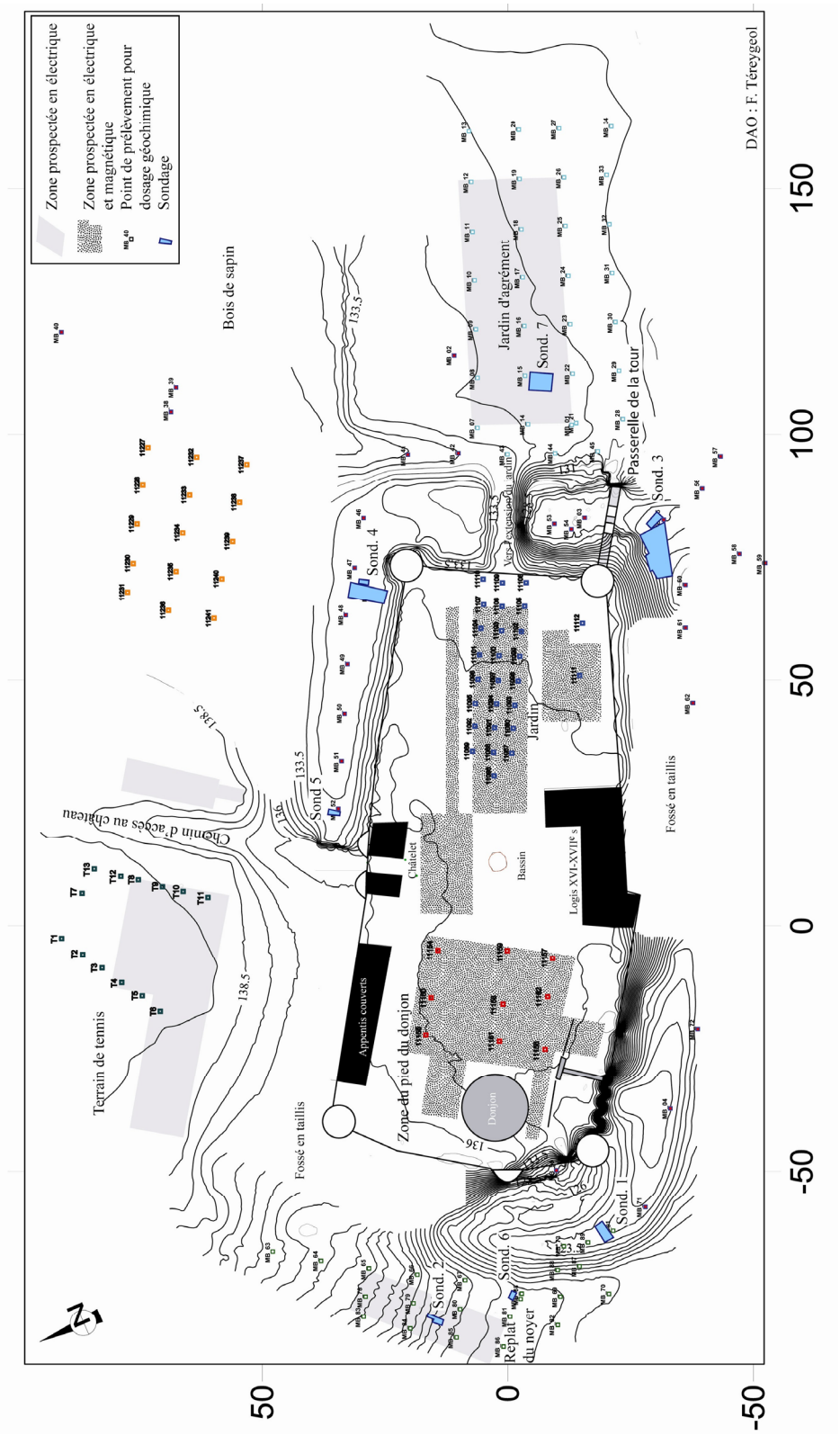


Figure 54 - Carte générale du site et des différentes prospections mises en œuvre.

A partir de la carte générale du site, il était possible de retenir plusieurs zones d'intérêt qui devaient faire l'objet de prospections selon des moyens complémentaires. D'après les sources préalablement présentées, l'atelier monétaire de Montreuil-Bonnin a pu être installé sur une place plate située devant la forteresse. La topographie des abords du château a mis en évidence plusieurs espaces plus ou moins vastes définissant des étendues planes, sans reliefs importants. Au niveau de la tour sud-ouest, de l'autre côté du fossé se situe le plus petit des replats, couvrant une surface d'environ 500 m². Il sera nommé : replat du noyer. Il est par ailleurs en vis-à-vis d'un renfort observable dans le mur d'enceinte[459]. Une seconde étendue plane fait face à l'actuelle entrée nord du *castrum*. Le chemin d'accès qui descend à la forteresse, partage en deux parties, les 6200 m² de cette terrasse. Enfin, à l'est du château, le replat du jardin s'étend sur 4200 m². C'était un jardin d'agrément, comme en témoignent certaines plantations et quelques agencements conservés. L'ouverture à l'est, pratiquée dans la muraille, ainsi que la levée de terre qui vient maintenant barrer le fossé dans son axe, sont *a priori* contemporains de ces aménagements. Bien que le nivellement de l'espace ait pu être mis en place seulement lors de l'organisation du jardin, il était nécessaire de le vérifier par des méthodes prospectives complémentaires.

En contrebas du fossé sud, il est également possible d'observer un espace relativement nivelé qui n'a toutefois pas été topographié. Il correspond à une zone de carrière caractérisée par plusieurs fronts de taille. C'est ce niveau inférieur qui aurait été attribué aux monnayeurs d'après le parcellaire qui perdure encore aujourd'hui[460].

L'intérieur de la forteresse présente évidemment peu de relief. L'altitude moyenne mesurée se situe autour de 135 mètres. C'est pour cette raison que le chemin qui mène à l'entrée nord du château est creusé dans le replat qui lui fait face, lui-même s'élevant à 138 mètres. L'enceinte définit un périmètre de 5800 m² qui a été fractionné en deux principales zones de prospection : celle situé dans la partie ouest, au pied du donjon et celle qui se trouve à l'est, au niveau d'un jardin.

A partir de ces données topographiques, il était possible de proposer une stratégie pour les prospections géophysiques. Elles ont été dans un premier temps limitées à l'intérieur de l'enceinte castrale, avec la caractérisation de la zone du

[459] Puaud F., *Le château de Montreuil-Bonnin..., op. cit.*, p. 42.
[460] *Ibidem*, p. 16.

jardin et du pied du donjon, avant d'être généralisées à la plupart des étendues planes relevées autour de la forteresse (Figure 54).

Dans le jardin, l'emploi des deux méthodes magnétique et électrique n'a fait apparaître aucune structure importante. D'autant que la proximité avec des aménagements récents et notamment la présence d'une canalisation et d'un réseau électrique enfoui, ont induit de nombreuses anomalies susceptibles de masquer les potentielles informations archéologiques.

En revanche, les mesures effectuées dans la zone du donjon n'ont pas été perturbées. Les différentes évaluations de résistivité apparente selon la profondeur ont mis en évidence une succession de trois niveaux d'aménagement (Figure 55).

Le sondage électrique à 2 m de profondeur délimite une structure rectangulaire de 10 par 15 m qui est bordée au nord-ouest par une zone circulaire moins résistante. Au-dessus, à 1 m de profondeur, se dessine une anomalie circulaire de 8 m de diamètre, bordée dans sa partie sud-est par un alignement résistant. Cette succession entre 1 m et 2 m laisse envisager un ensemble cohérent : un bâtiment en élévation, type « tour », assis sur une cave ou une citerne. En corrélant ces informations avec la topographie, cette construction doit être reliée aux contextes médiévaux. Le niveau de sol médiéval est effectivement perceptible dans la zone du logis ruiné et doit être mis en relation avec les données électriques acquises à 1 m et 50 cm de profondeur. En outre, l'étude des relevés magnétiques de cette zone, met en évidence une anomalie parfaitement corrélée à la structure circulaire caractérisée en électrique.

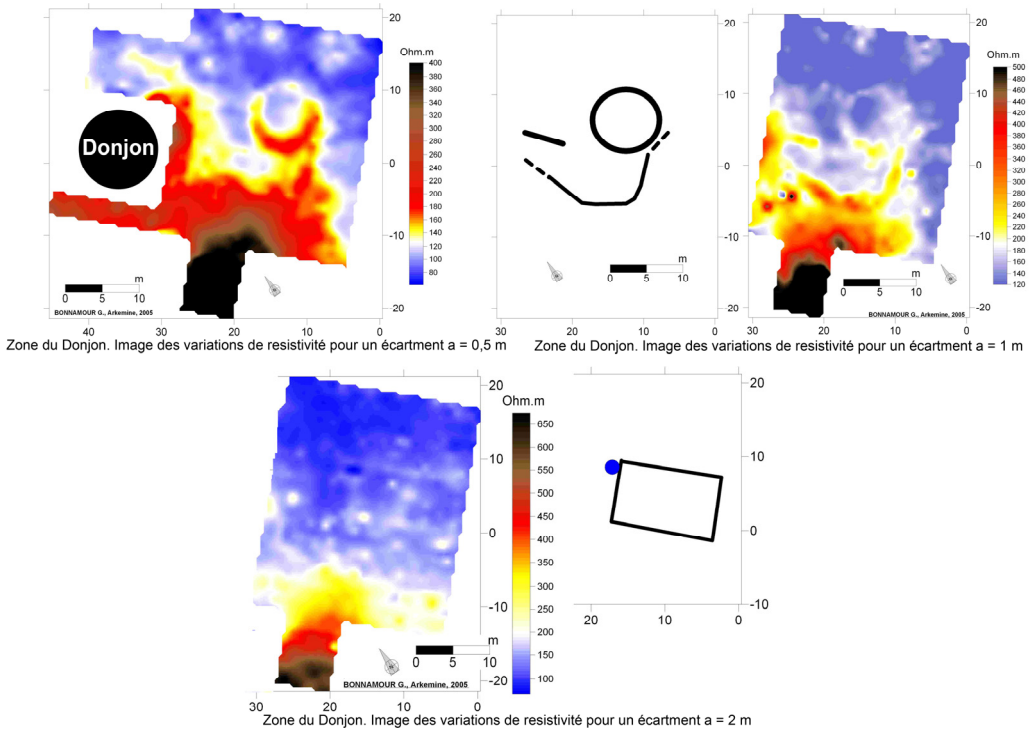


Figure 55 - Prospection géophysique électrique au pied du donjon dans l'enceinte du château de Montreuil-Bonnin (G. Bonnamour, Arkémine).

Les différentes mesures faites dans l'enceinte du château ont révélé des vestiges enfouis pouvant être en relation avec l'occupation médiévale. Cependant, ils ne semblent pas correspondre à des anomalies, notamment magnétiques, associables à une activité métallurgique. Ces résultats ont incité à chercher également hors des murs du château l'emplacement de l'atelier monétaire.

Sur les trois replats qui bordent la forteresse de Montreuil-Bonnin, des cartographies de résistivité apparente du sol ont été réalisées (Figure 56). Comme dans l'enceinte du château, elles ont été mises en œuvre à des profondeurs variables. Des évaluations à 50 cm et 1 m ont été systématiquement décidées. De plus, en supposant que l'aménagement en jardin situé à l'est du château, aurait pu nécessiter un nivellement avec un apport important de terre, une série de mesures à 2 m de profondeur a été collectée dans cette zone. Les résultats de ces prospections électriques ne révèlent pas de structures bâties clairement identifiables. Les mesures relevées sur le replat du noyer sont les seules qui témoignent d'une potentielle structure trahie par une anomalie localisée présentant une forte résistivité.

Les relevés n'ont toutefois pas été inutiles étant donné qu'ils renseignent sur la structure géologique du sous-sol. Elle permet de comprendre la stratégie à partir de laquelle a été construit le château. L'observation des différentes cartographies

réalisées met en évidence le banc calcaire au bord duquel est assise la forteresse et qui se poursuit à l'ouest et à l'est de cette dernière. Il offre un escarpement naturel imposant qui participe à la protection de l'édifice.

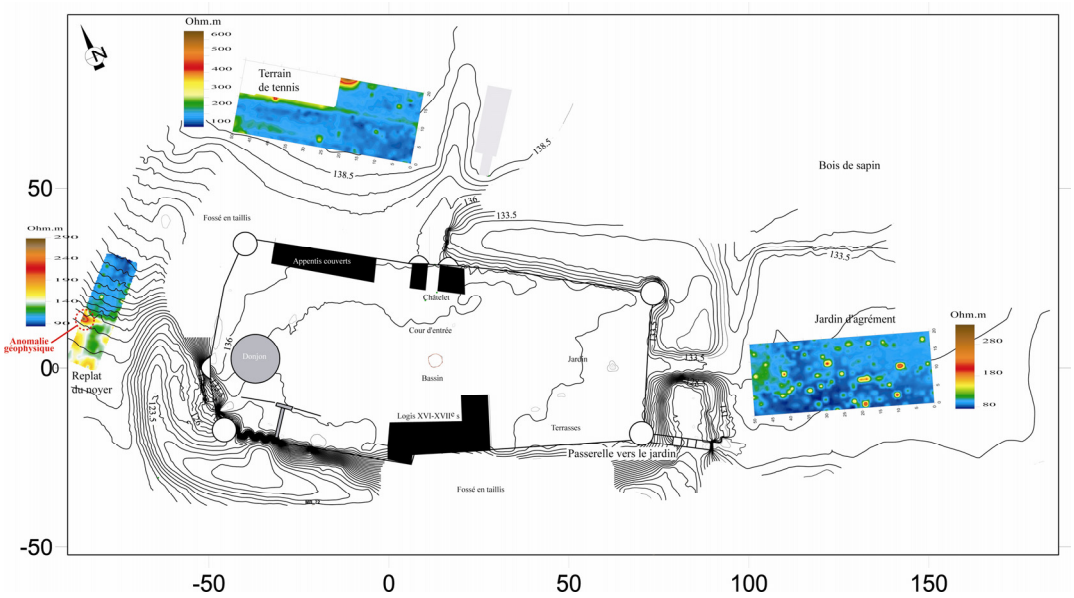


Figure 56 - Sondages électriques à l'extérieur du château pour un écartement a = 1 m.

A partir du bilan de ces prospections géophysiques, il était difficile de proposer une stratégie de possibles sondages archéologiques. C'est pourquoi, en tant qu'industrie métallurgique de métaux non ferreux, l'atelier monétaire représentait un site privilégié pour faire l'objet d'une prospection géochimique.

b. La prospection géochimique

La méthode de prospection géochimique appliquée à l'intérieur ainsi qu'à l'extérieur de l'enceinte fortifiée a suivi le protocole décrit précédemment[461]. Afin de couvrir l'emprise de la prospection, plus de 150 prélèvements de sols ont été préparés et analysés. Ils sont localisés sur la figure 57. Certains ont servi à évaluer le fond géochimique local, d'autres ont compté dans une démarche prospective préliminaire, enfin cinquante-cinq d'entre eux ont permis de réaliser les cartographies élémentaires du replat du noyer et de celui du jardin d'agrément.

[461] cf. Le développement d'une nouvelle méthode : la prospection géochimique de sites de métallurgie des métaux non ferreux, p. 166.

Le fond géochimique

L'évaluation du fond géochimique intervient en préalable de la prospection proprement dite. Il a permis de déterminer les niveaux de concentration, dits non pollué correspondant aux zones où ne se sont pas *a priori* organisées d'activités métallurgiques. Dans le cadre de cette étude, deux séries de trois prélèvements chacune ont été rassemblées. Les zones d'échantillonnage ont été choisies éloignées des espaces où pouvaient se trouver des vestiges monétaires. La première collecte a été faite dans un champ, sur le plateau à deux cents mètres du château, loin de toute route et habitation. La seconde s'est trouvée dans l'enceinte moderne du domaine castral, à proximité d'un bois de sapins. Dans le cadre d'une fabrication monétaire, les composés qui devraient être mis en évidence sont l'or, l'argent et le cuivre qui constituent les seuls métaux monnayés. La technique et le mode d'analyse utilisés ne permettent pas de caractériser les deux plus précieux d'entre eux dans les sédiments. Il est cependant possible d'élargir le champ des métaux considéré au-delà de celui du cuivre : le plomb pour lequel le protocole de dosage utilisé est particulièrement sensible, peut également constituer un marqueur de l'activité monétaire. Bien que ce métal ne se rencontre pas *a priori* dans la fabrication proprement dite, il est tout de même utilisé pour des opérations annexes du monnayage. Il est notamment indispensable aux traitements d'affinage de l'argent[462]. Les autres éléments dosés par le spectromètre de fluorescence X, notamment le zinc, ont également été pris en compte. Ils n'ont cependant pas mis en évidence d'anomalies particulières.

Aux abords de la forteresse de Montreuil-Bonnin, le fond géochimique a été assimilé à la moyenne des dosages des six prélèvements de sols. Il s'élève à 22 ppm pour le cuivre, 75 ppm pour le plomb et à 60 ppm pour le zinc. Les normes actuelles à partir desquelles sont évaluées les pollutions de sol donnent un premier repère de comparaison de ces valeurs. La norme française AFNOR NF U 44-041, limite à 100 ppm la quantité de plomb comme de cuivre qui peut être présente dans des sédiments, sans que ces derniers ne soient considérés comme pollués, le maximum est établi à 300 ppm pour le zinc. Le fond géochimique déterminé au cours du diagnostic, définit effectivement un sol non pollué. Lors de la prospection qui est ensuite mise en place, le dépassement des taux de référence constitue un indice d'une potentielle activité anthropique, d'autant plus probable qu'elle se voit corrélée avec différents éléments marqueurs. Pour simplifier la lecture des cartographies, les zones présentant des concentrations correspondant au niveau

[462] Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 93-96.
Delaguerre, *Rés. ms. 17004 PRI 8°*, *op. cit.*

d’un sol considéré ici comme non pollué, c'est-à-dire inférieures à la moyenne du fond géochimique local, sont laissées en blanc. Les surfaces d’intérêt sont dans ce cas instantanément discriminées.

La prospection

Après avoir évalué le fond géochimique des abords du château de Montreuil-Bonnin, il a été décidé dans une première approche de collecter des échantillons de sédiments autour de la forteresse mais également dans les fossés qui la bordent. Une telle démarche a permis de sélectionner les espaces d’intérêt pour établir une stratégie de prélèvement.

La plupart des prélèvements réalisés dans les fossés n’ont pas révélé de pollution particulière. Seuls les échantillons collectés à proximité du sondage 3 (Figure 54) où ont été par ailleurs trouvés des indices métallurgiques, témoignent d’une augmentation des taux de plomb, cuivre ou de zinc à des niveaux au-dessus des valeurs du fond géochimique.

Une telle configuration pouvait indiquer la présence de déchets provenant des parties supérieures de cette zone du fossé. Dans ce cas, seul le replat à l’est de la forteresse ainsi que le jardin à l’intérieur de l’enceinte présentaient un intérêt d’un point de vue géochimique.

Les campagnes de prospections ayant pu être échelonnées sur deux années, il a été décidé de sonder systématiquement les replats qui bordent le château, parallèlement à l’intérieur de ce dernier.

Dans l’enceinte castrale, ce sont les espaces du pied du donjon et du jardin qui ont été caractérisés, soit les mêmes périmètres pris en compte lors des prospections géophysiques (Figure 54). Disposant de peu d’informations sur la zone du jardin, les mesures électriques et magnétiques ayant été trop perturbées par les aménagements récents, il a été décidé de compenser cette insuffisance par un maillage de prélèvement plus resserré que celui du donjon.

Les différentes cartographies obtenues à partir des 36 dosages réalisés ne définissent pas d’anomalie particulière quelle que soit la zone considérée. Les sédiments analysés ont par ailleurs des compositions voisines de celles du fond géochimique. Toutefois, l’un des échantillons collectés a révélé des taux anormalement élevés en plomb (1387 ppm) et en cuivre (1787 ppm). Le protocole de prospection initialement proposé a permis de rapidement réviser cette observation. Les analyses de cinq prélèvements supplémentaires à une profondeur

de 50 cm dans la zone suspecte, s'étant toutes révélées négatives, il a fallu conclure que la singularité mesurée était due à un effet de pépite et ne justifiait donc pas d'être davantage considérée.

Sur les étendues planes situées au nord de la forteresse (Figure 57), les différentes mesures apparaissent également négatives d'un point de vue métallurgique. Les niveaux évalués pour le plomb sont tout de même situés à des concentrations légèrement supérieures à celle du fond géochimique. Une telle augmentation générale serait justifiée par une plus grande proximité de ces terrains avec les anciennes installations métallurgiques représentant dans ce cas un foyer d'émission d'effluents polluants. De plus, les prélèvements de sols les plus proches du chemin d'accès au château marquent une pollution au plomb. Celle-ci résulte certainement du passage des véhicules qui ont circulé à l'essence au plomb jusqu'à la fin des années 90. En croisant ces résultats aux données obtenues lors des prospections géophysiques préliminaires négatives, il n'était pas nécessaire de proposer de futurs sondages archéologiques de ces espaces.

L'ancien jardin d'agrément situé à l'est de la forteresse a également fait l'objet de prélèvements de sédiments selon un maillage régulier espacé de 10 m, couvrant toute la surface à partir de 31 échantillonnages (Figure 57). Outre le fait qu'il s'agisse d'une étendue plane qui aurait pu accueillir l'atelier monétaire comme le suggèrent les sources évoquées plus haut, il faut rappeler que les dosages réalisés dans le fossé en contrebas de cet espace ont révélé des taux élevés de plomb et de cuivre par rapport au fond géochimique local.

A partir des différentes analyses, il a été possible d'établir les cartographies élémentaires du sous-sol de la zone selon le modèle de krigeage précédemment exposé[463]. La carte de répartition du plomb, présentée sur la figure 57, est particulièrement intéressante d'un point de vue prospectif étant donné qu'elle met en évidence une anomalie localisée.

[463] cf. *supra*, p. 195.

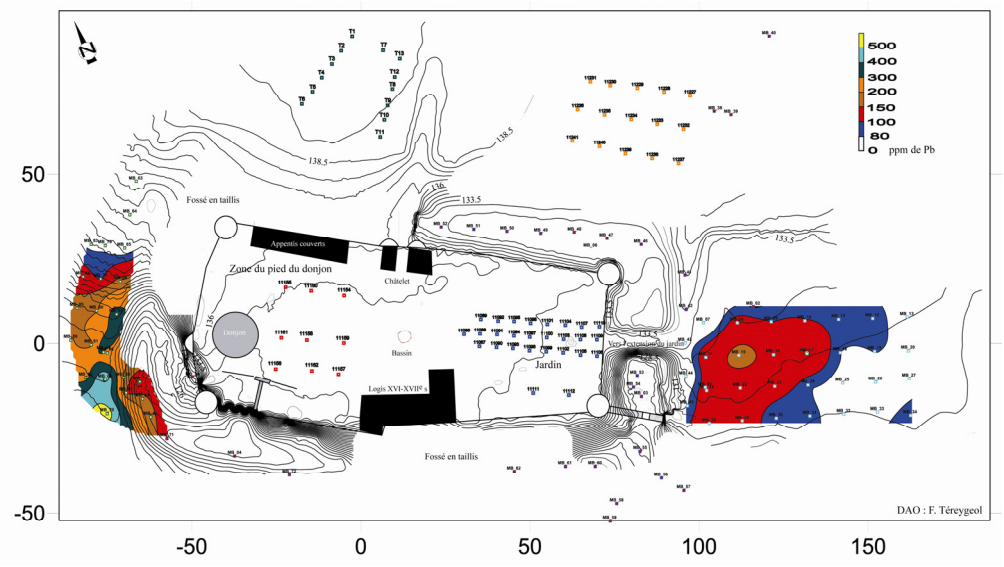


Figure 57 - Carte géochimique du plomb et localisation des différents prélèvements.

La représentation délimite un périmètre globalement pollué qui s'organise autour d'un épicentre situé dans l'axe de l'ouverture dans la muraille est du château (Figure 57). L'anomalie vient par ailleurs border le fossé du pied de la tour sud-est. Tenant compte d'un apport possible de sédiments lors de l'aménagement de cet espace en jardin, certains prélèvements ont été également recueillis jusqu'à une profondeur de 50 cm, la tarière utilisée n'ayant pas permis de sonder des niveaux inférieurs. Les résultats de ces dosages complémentaires définissent une anomalie en plomb similaire, marquant toutefois un niveau de pollution moins élevé.

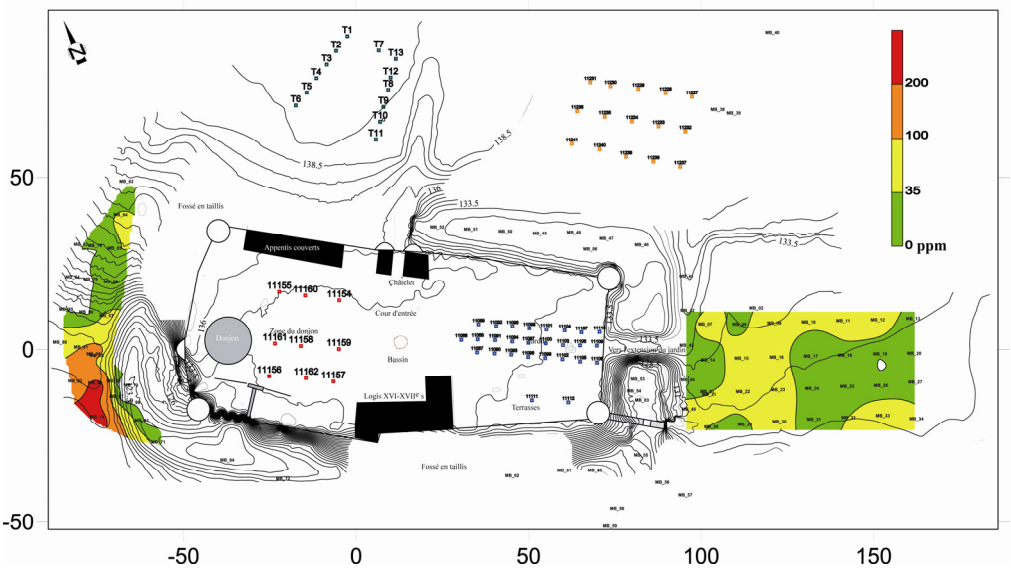


Figure 58 - Carte géochimique du cuivre.

Les teneurs du cuivre dans ce contexte de jardin peuvent être, dans un premier temps, faussées par l'emploi récent de ce métal sous forme de sulfate à des fins phytosanitaires. Cependant, l'anomalie mise en évidence sur la cartographie du cuivre étant corrélée ici avec celle du plomb permet d'exclure pour l'instant cette hypothèse (Figure 58).

Au terme de cette prospection, il était nécessaire de mettre en place un sondage archéologique afin de vérifier l'origine potentiellement métallurgique des pollutions constatées.

Enfin, le replat du noyer, bien que délimitant un espace beaucoup plus restreint, a également fait l'objet d'un échantillonnage exhaustif de sédiments après qu'un prélèvement de contrôle effectué sur cette terrasse ait montré des taux en métaux lourds très au-dessus des limites du fond géochimique. La zone caractérisée comprend en plus de la plateforme, le terrain en pente qui la surplombe, ainsi que le fossé en contrebas (Figure 57 et Figure 58). Les résultats de ce diagnostic sont très significatifs étant donné qu'ils mettent en évidence une pollution en plomb, par ailleurs corrélée avec une anomalie en cuivre. Les niveaux mesurés sont en outre beaucoup plus importants que ceux évalués dans les autres prélèvements collectés autour du château, notamment dans l'ancien jardin d'agrément. Le périmètre est d'autre part relativement bien circonscrit à la zone nivelée. Les concentrations en métaux lourds diminuent progressivement dans la pente qui converge sur l'étendue plane. De même, les taux mesurés dans le fossé sont moins élevés que ceux évalués sur le nivellement supérieur.

La corrélation des données géochimiques avec les mesures géophysiques ayant permis de supposer la présence d'une structure enfouie qui présentait une forte résistivité, il était finalement nécessaire de contrôler la présence de potentiels vestiges métallurgiques, par la définition de sondages archéologiques.

c. Les sondages archéologiques

Dès les premiers résultats des différentes approches prospectives, il a été envisagé de mettre en place plusieurs sondages archéologiques afin de vérifier les hypothèses de localisation des installations monétaires. Cependant, il n'était pas possible de proposer d'intervention invasive dans l'enceinte du château encore habité aujourd'hui. C'est pourquoi, il a également été décidé d'organiser une série de sondages dans les fossés de la forteresse de manière à cerner au mieux la construction. Une telle stratégie devait participer à la localisation d'éventuels vestiges. S'il était admis que l'atelier monétaire n'ait pas pu être installé dans les fossés qui bordent les murs d'enceinte, il était d'un autre côté probable que ces

derniers aient recueilli les déchets des opérations organisées sur les niveaux supérieurs. Par ailleurs, situés à l'interface entre l'intérieur et l'extérieur du château, les indices mis au jour participent à la discussion prospective.

Finalement, au cours des deux campagnes de recherche de 2006 et 2007, il a été décidé de mettre en œuvre sept sondages archéologiques. Deux des ouvertures effectuées en 2006 ont par la suite été élargies en 2007 pour satisfaire aux conditions de sécurité pour caractériser l'ensemble de la stratigraphie jusqu'au substrat naturel.

Bien que définissant un périmètre relativement restreint, le replat du noyer rendait compte d'une anomalie géochimique qui traduisait des taux importants de plomb et de cuivre dans le sol. Un premier sondage (Figure 54 : Sondage 2) a été mis en place pour vérifier cette hypothèse. Les couches rencontrées s'apparentent à des horizons pédologiques naturels et faiblement anthropisés. Il s'est avéré que la forte résistivité qui avait été associée à une construction correspondait à la rupture du banc calcaire situé sous la couche de colluvions de pente. Les valeurs importantes mesurées s'expliquent par la présence de vides karstiques dans ce substrat minéral. Ce sondage n'a pas révélé de matériel archéologique. Pour confirmer ce premier résultat négatif, un second sondage (Figure 54 : Sondage 6) a été fait au milieu du replat. Il n'a révélé qu'une couche de terre naturelle, homogène sur une profondeur d'un mètre et dans laquelle aucun artefact archéologique n'a pu être trouvé. Enfin, un profil stratigraphique établi à proximité de la plus forte anomalie de plomb et de cuivre n'a pas non plus rendu compte d'une origine liée à la fabrication monétaire médiévale. La présence de ces métaux à de telles concentrations reste encore difficile à justifier. La zone marquant les taux les plus élevés à l'extrémité inférieure d'une forte pente suggère la conséquence de phénomènes de lessivage qui auraient pu concentrer les éléments polluants. Cependant, cette hypothèse doit être abandonnée après la mise en évidence de teneurs moins élevées en éléments métalliques, dans le fossé pourtant situé en contrebas de la plateforme. La pollution détectée est superficielle et certainement due à des travaux agricoles plus récents, et de courte durée.

Le replat du jardin situé à l'est de la forteresse a également été sondé. Les mesures géophysiques qui ont caractérisé le sous-sol de cet espace n'ayant pas défini de zone d'intérêt malgré une profondeur d'investigation de deux mètres, c'est à partir des dosages géochimiques que le sondage a été délimité au centre de l'anomalie en plomb (Figure 54 : Sondage 7). L'hypothèse d'un aménagement

récent de l'espace en jardin d'agrément se voit confirmée par la stratigraphie mise en évidence. Les premiers niveaux rencontrés témoignent d'un apport important et homogène de terre horticole. Les couches inférieures sont des remblais plus hétérogènes. Aucune structure n'a pu être mise au jour dans l'emprise du sondage. Le matériel céramique retrouvé n'apparaît pas lié à une fabrication monétaire et couvre un spectre chronologique plus centré sur la fin du Moyen Age. Quant à la source de l'anomalie géochimique sur laquelle s'est organisée l'intervention archéologique, elle a pu être localisée par l'analyse complémentaire[464] de sédiments prélevés dans une unité stratigraphique, témoignant d'une concentration importante de charbons et de scories. Il s'agit cependant d'une couche de remblais qui ne localise pas l'activité associée.

Parallèlement à la caractérisation des replats bordant la forteresse de Montreuil-Bonnin, quatre sondages ont été réalisés dans les fossés. Le premier se situe au niveau du pied de la tour sud-ouest (Figure 54 : Sondage 1), en contrebas du replat du noyer. Il s'agissait d'éclairer également l'arrachement présent dans la muraille, en regard de l'anomalie topographique qui lui fait face. Seuls les niveaux les plus récents ont pu être sondés. Ils correspondent d'une manière générale à des phases de remblaiements progressifs du fossé. La fouille a du être suspendue sans être arrivée sur le substrat naturel après avoir rencontré une couche composée de très gros blocs semblables à ceux observés dans la muraille du château. Considérant qu'il était impossible et dangereux de les déplacer sans moyen mécanique, le sondage n'a pu mettre au jour des niveaux remontant au-delà du XV^{e} siècle. Aucun mobilier associable à l'activité monétaire n'a par ailleurs été découvert.

Le sondage 5 (Figure 54 : Sondage 5) a quant à lui, été positionné en contrebas de l'entrée actuelle du château. Il a également du être interrompu sur des niveaux récents correspondants à la réfection extérieure de la muraille sans révéler de matériel monétaire.

Les deux autres fouilles qui ont été organisées dans les fossés de la forteresse ont finalement aussi été limitées par la présence de gros blocs ainsi que par l'épaisseur importante des remblaiements. Il était nécessaire pour des raisons de sécurité, d'élargir les sondages. Or, les deux espaces considérés situés chacun au pied des tours nord-est et sud-est ont présenté du mobilier métallurgique. Après avoir été suspendus lors de la campagne de 2006, ils ont été repris et élargis au moyen d'une pelle mécanique.

[464] Selon le même protocole que celui mis en œuvre dans le cadre des prospections géochimiques.

La fouille du pied de la tour nord-est (Figure 54 : Sondage 4) a caractérisé une simple mais importante séquence stratigraphique remontant jusqu'au XIV^{e} siècle. Elle n'a cependant révélé que très peu de matériel archéologique lié à une activité métallurgique. La découverte de 6 fragments de creusets ne doit pas égarer la réflexion. Ce matériel reste commun aux alentours de l'atelier. Il faut cependant noter la mise au jour de la pièce d'un moule à méreau poly-valve (Figure 59).

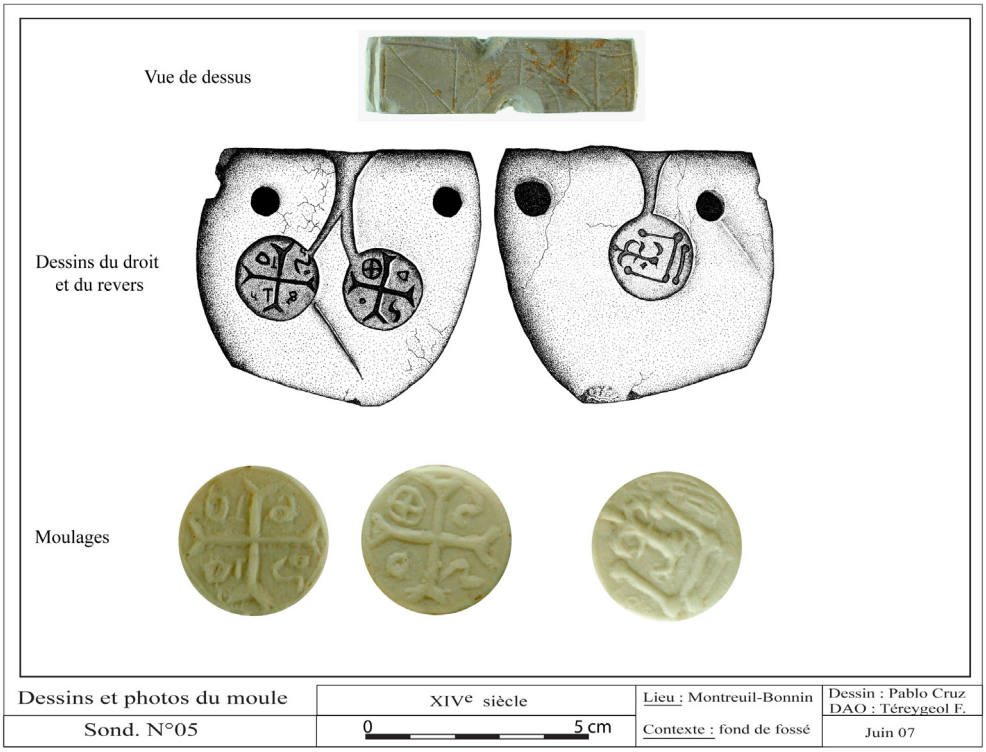


Figure 59 - Pièce d'un moule à méreau.

Il s'agit d'un fragment de calcaire gréseux, fin, gris clair qui a été surfacé afin de graver sur une face les deux droits de jetons alors que ne s'observe qu'un seul revers sur l'autre face. L'objet est traversé par deux trous utilisés pour maintenir les différentes parties du moule ensemble lors de l'utilisation. Enfin, des lignes formant des dessins géométriques ont été gravées sur la face supérieure de la pièce, où débouchent les canaux de coulée. Elles ont pu être utilisés comme repères pour empiler chaque élément dans le bon ordre, et ainsi présenter face à face les bons droits et revers. L'observation des motifs permet d'apparenter le jeton à un tournois dégénéré au château, sans légende. Ce type est à rapprocher de celui du denier tournois certainement frappé à Montreuil-Bonnin. Il s'agit du Châtel Tournois, créé en 1206 sous le règne de Philippe II et monnayé jusque sous

Charles V[465]. Il est cependant impossible de proposer une datation plus fine de son utilisation, notamment à cause de l'absence sur l'exemplaire mis au jour, de légende qui aurait pu restreindre l'incertitude en associant le jeton à un règne. De plus, le moule a été trouvé directement sur le fond du fossé incrusté dans l'argile. Une telle localisation ne fournit pas d'information stratigraphique sinon que le fossé était en fonction lorsque l'objet s'est retrouvé dans cette position. Dans les cantonnements des croix des droits, plusieurs motifs « serpentiformes » ont été gravés, alors qu'une seule des deux faces présente un disque avec une croix en son centre.

Figure 60 - Illustration de la frappe monétaire[466].

Or, cette dernière représentation symbolise souvent la monnaie, qui se retrouve dans plusieurs scènes de fabrication monétaire en lieu et place des espèces frappées (Figure 60). Ces dernières informations permettraient peut-être de relier ce moule au fonctionnement de l'atelier. Sans datation précise, il est cependant encore impossible de l'assurer. Par ailleurs, l'utilité de ce type de méreau au sein de la fabrique est pour l'instant inconnue[467].

Si les précédents sondages réalisés n'ont pas permis de localiser les vestiges de l'atelier monétaire, la fouille du pied de la tour sud-est (Figure 54 : Sondage 3), reprenant un précédent sondage positif du point de vue de la présence de déchets métallurgiques, a révélé de nombreux et nouveaux indices. Avec 79 fragments de

[465] Duplessy J., *Les monnaies françaises royales de Hugues Capet à Louis XVI (Hugues Capet - Louis XII)*, 2 tomes, Paris, Maastricht, Platt A.G. Van der Dussen, t. 1, 1988, p. 69, 73-74.
[466] Magnus O., *Historia de gentibus septentrionalibus*, Rome, 1555, chapitre 12.
[467] Je remercie M. Labrot, Président du Centre de Recherche sur les Jetons et les Méreaux du Moyen Age, pour les informations qu'il m'a communiquées.

creusets de fonte mis au jour en 2006, l'intervention de 2007 a étoffé ce *corpus*, le périmètre caractérisé révélant un grand nombre de tessons du même type, soit 333 individus répartis dans plusieurs niveaux stratigraphiques. Cette collection de céramiques est aussi complétée par une petite quantité de scories et quelques parois de fours. L'importance des déchets liés au travail des métaux ainsi que leur masse par rapport aux céramiques communes attestent de la concentration des indices métallurgiques dans cet espace situé au sud-est du château (Figure 62). Cependant, la fouille ayant été menée jusqu'aux niveaux géologiques, l'observation de la stratigraphie permet d'affirmer que l'ensemble des témoins métallurgiques se trouvaient en position secondaire dans des strates de sédiments provenant d'une aire de dépotoir. Ils ont été rapportés pour niveler la zone du fossé au pied de la tour, certainement lors de phases de réfection de celle-ci. D'après le mobilier céramique plus récent parallèlement découvert, celle-ci a été mise en œuvre dans le courant du XVII^{e} siècle.

D'un point de vue de la localisation de l'atelier monétaire de Montreuil-Bonnin, les différentes prospections réalisées entre 2005 et 2007 n'ont pas mis au jour les vestiges de structures appartenant à la fabrique. L'ensemble des méthodes mises en œuvre aux abords du château s'étant toutes révélées négatives, l'intérieur de l'enceinte apparaît finalement comme étant le lieu le plus probable pour accueillir les installations monétaires. Cependant, les importantes réorganisations dont cet espace a fait l'objet, laissent peu de chance de retrouver des vestiges clairement identifiables. D'autre part, le château est actuellement habité ce qui empêche toutes possibilités de fouille.

Bien qu'il ait été possible de mettre en évidence des anomalies géochimiques, les importants réaménagements qui ont affecté les abords du château constituent une limite de la méthode de prospection proposée. Compte tenu de la profondeur accessible aux prélèvements, il est dans ce cas difficile de caractériser les niveaux les plus anciens. Toutefois, la mise en place du protocole d'analyse durant la fouille a tout de même localisé l'anomalie dans l'une des unités stratigraphiques du sondage 5. En définitive, dans le cas de Montreuil-Bonnin qui est un site ayant fait l'objet de réaménagements importants, c'est la stratégie d'échantillonnage qui devra être reconsidérée.

3 - Le matériel métallurgique archéologique

Bien que les vestiges de l'atelier de Montreuil-Bonnin n'aient pu être mis au jour, la présence dans un voisinage direct, d'une industrie métallurgique, est attestée par la découverte de mobilier très caractéristique de cette activité.

Dans la mesure où il sera démontré qu'ils sont associés à la fabrication monétaire, ces objets constitueront de nouveaux éléments précieux sur le monnayage médiéval de cette région.

a. Les scories et parois de four métallurgiques

En faisant abstraction des éléments associés à la métallurgie du fer, le *corpus* des parois et scories vitreuses mis au jour à Montreuil-Bonnin, constitue un ensemble relativement restreint. Ces mobiliers proviennent exclusivement du seul sondage situé au pied de la tour sud-est (Figure 54 : Sondage 3).

La totalité des fragments considérés compte seulement vingt-neuf échantillons pour une masse totale de 1577 grammes. Dans l'ensemble, les modules sont relativement limités. Ils mettent en évidence deux typologies principales.

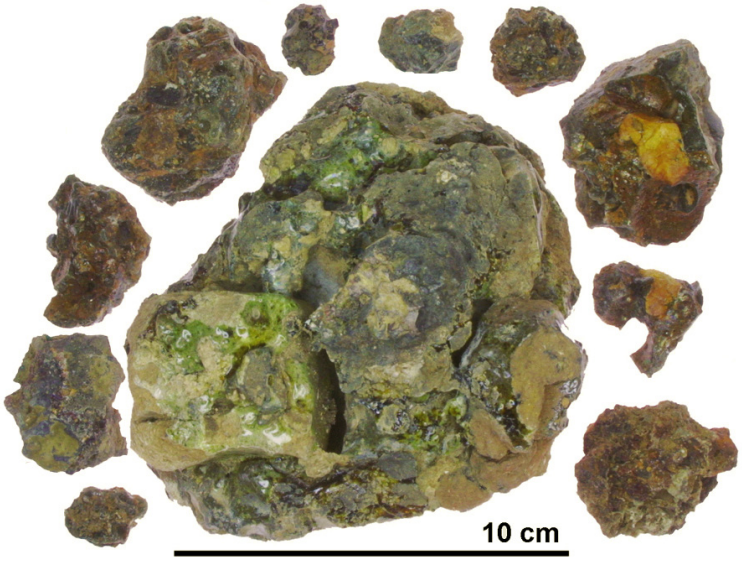


Figure 61 - Parois de four et scories du sondage 3.

Un fragment de four particulièrement important est associé à une collection de petites scories (Figure 61). Les premières observations de cette paroi, montrent que la structure à laquelle elle appartenait, avait été bâtie à partir de briques d'argile rouge. Le liant utilisé a les mêmes caractéristiques. La définition de la position de l'échantillon dans la structure est rendue difficile à cause des vitrifications importantes qui se sont infiltrées. Il semble cependant qu'il s'agisse d'un des angles internes de la chambre de chauffe. Les scories associées sont vitreuses, de couleurs verte et noire. Elles ont emprisonné des charbons ainsi que des bulles de diamètres sub-millimétriques à centimétriques. Un des fragments, associé à de l'argile cuite et des oxydations cuivreuses, a révélé une coulure de plomb.

Plusieurs autres fragments de céramique indéterminés ont des vitrifications noires et bulleuses, indiquant qu'ils ont subi des températures de chauffe élevées. Ils présentent une pâte d'argile blanche très fortement dégraissée avec des grains de quartz millimétriques blancs, rosés.

b. Les céramiques métallurgiques

Les céramiques métallurgiques découvertes à Montreuil-Bonnin et potentiellement utilisées dans la fonte d'alliages monétaires, se présentent dans deux ensembles initialement disjoints car d'origines différentes. Le premier *corpus* est constitué des nombreux fragments mis au jour lors des deux campagnes de sondages de 2006 et 2007. Le second regroupe, quant à lui, un tesson ainsi que deux creusets entiers dont les circonstances de découverte sont moins connues étant donné que cette dernière a eu lieu au XIX^{e} siècle. L'étude de ces deux collections doit vérifier leur relation et apporter des informations complémentaires sur les techniques de fontes monétaires.

1. Les fragments de creusets mis au jour lors des fouilles de 2006 et 2007

Au cours des deux campagnes de fouilles qui se sont déroulées en 2006 et 2007, le sondage 3 des fossés du château (Figure 54 : Sondage 3) a révélé un très grand nombre de fragments de céramiques qui, dès leur découverte, ont été assimilés à des tessons de creusets monétaires. La collection de 79 échantillons mis au jour en 2006, a été complétée en 2007 par 333 individus présentant les mêmes caractéristiques générales et retrouvés dans des contextes identiques. Les deux fouilles ont par ailleurs montré que les fragments se trouvaient en position secondaire après que les remblais dans lesquels ils se trouvaient initialement, aient été répandus dans les fossés du château à des fins de nivellement. C'est lors de cet épandage datant du courant du XVII^{e} siècle, qu'ils se sont trouvés mélangés à du matériel céramique non métallurgique plus récent.

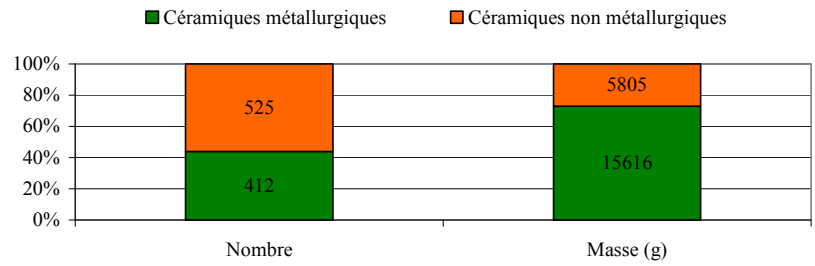


Figure 62 - Répartition entre céramiques communes et métallurgiques du sondage 3.

La figure 62 rend compte des différentes proportions du mobilier céramique métallurgique par rapport au reste du matériel. Si le nombre de tessons de terre cuite non métallurgique est plus important que celui des fragments de creusets, le rapport s'inverse en considérant les masses totales de ces deux *corpus*. Cette observation se justifie par l'épaisseur de pâte plus importante des céramiques métallurgiques qui présentent par ailleurs des dimensions plus conséquentes.

Le sondage 3 n'est cependant pas le seul à avoir livré ce mobilier caractéristique. La fouille mise en place au pied de la tour nord-est a également vu la découverte de quelques échantillons. Au nombre de six seulement, ils se trouvaient dans des proportions beaucoup plus restreintes. Comme ce qui vient d'être affirmé précédemment, leur localisation dans cette partie du fossé est due à une remobilisation de remblais. Une telle configuration ainsi que la ressemblance de ces échantillons avec ceux mis au jour dans le sondage voisin a conduit à les intégrer au *corpus* global des céramiques métallurgiques.

Figure 63 - 414 fragments de creusets trouvés en position secondaire lors des fouilles de 2006 et 2007.

Finalement, les différents sondages réalisés aux abords de la forteresse de Montreuil-Bonnin, ont permis de constituer une collection de 414 fragments de creusets (Figure 63). Sur la totalité des individus et bien que certains aient des dimensions relativement importantes, aucun n'est entier. Ils n'offrent pas un aperçu global de leurs formes originelles. Cependant cet inconvénient peut être contourné grâce au nombre d'échantillons retrouvés qui permet d'envisager une

étude statistique. Les différentes caractéristiques morphologiques observables sur les nombreux tessons, comme les bords, les becs de coulée ou les fonds révèlent le type des creusets considérés. Il est déjà possible d'affirmer que ces céramiques métallurgiques étaient des poches de coulées à fond hémisphérique, aux bords épais qui présentent un bec de versement (Figure 64).

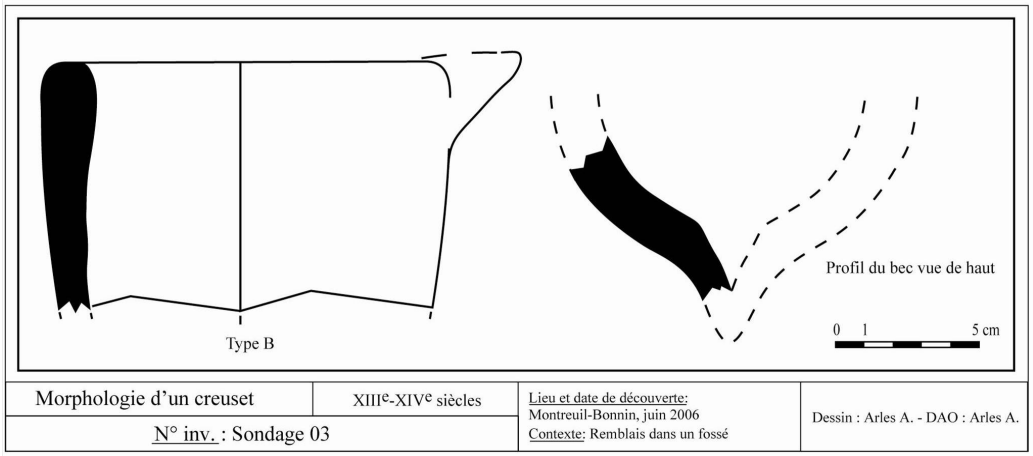


Figure 64 - Morphologie observable à partir de fragments de creusets de Montreuil-Bonnin.

Enfin, si certains des fragments ont leurs surfaces exemptes de traces qui pourraient trahir leur utilisation métallurgique[468], la majorité des échantillons présente au contraire de telles marques. L'analyse des différents dépôts relevés permettra d'ailleurs de connaître les métaux qui étaient fondus dans ces creusets. Les compositions mises en évidence seront des arguments de poids pour déterminer si ces céramiques ont effectivement été utilisées dans une fabrication monétaire.

2. Les creusets du musée Sainte-Croix de Poitiers

Les fragments de creusets mis au jour lors des dernières fouilles menées aux abords de la forteresse de Montreuil-Bonnin ne constituent pas les seuls indices métallurgiques anciens retrouvés dans ce village. Un second ensemble aujourd'hui conservé au musée Sainte-Croix de Poitiers, rassemble deux creusets entiers[469] ainsi que trois fragments présentant des restes de métal[470]. Ce mobilier a été mis au jour au XIXe siècle « à Montreuil-Bonnin »[471] par le père de-la-Croix qui les a qualifiés de creusets monétaires. L'existence au XVIIe siècle d'une autre fabrique

[468] Vitrifications, oxydes, métal, marques de feu.
[469] Numéros d'inventaire : A. 897.16.7 et A. 897.16.8.
[470] Numéro d'inventaire : B.3465.
[471] Je remercie le personnel du musée de Poitiers et particulièrement M. Gendron et Mme Hiernard qui m'ont donné accès à leur collection.

de monnaies sur la commune, près de l'actuel lieu-dit *Moulin Royal*, et le peu de précisions sur le lieu de la découverte ne permettent pas encore d'affirmer que ces creusets soient reliés à l'atelier médiéval. Les différences chronologique et qualitative des deux activités laissent penser que le classement ferme et définitif du mobilier conservé au musée Sainte-Croix sera possible après comparaison avec le mobilier issu des fouilles de la fabrique monétaire du château.

C. Faux monnayage : la grotte de La Catette (Aude)

Dans les années quatre-vingt-dix, à la suite d'une « découverte fortuite », un prospecteur amateur a mis au jour une grande quantité de matériels métalliques au sein de la grotte de La Catette. Située au sud de la commune de Rivel (Figure 65), il s'agit d'une petite cavité, relativement difficile d'accès, à environ 907 mètres d'altitude, une cinquantaine de mètres en contrebas d'une crête. Elle est à l'écart des villages et actuellement dissimulée dans une forêt de buis. Les objets collectés sont caractéristiques d'une production de fausses monnaies et doivent permettre de discuter de leur chaîne opératoire de fabrication. C'est pourquoi, ils présentent un premier intérêt d'un point de vue d'une réflexion technique sur un exemple de contrefaçon monétaire. Par ailleurs, dans une démarche de confrontation de différentes chaînes opératoires, la proximité de cette grotte avec celle ayant également abrité un faux-monnayeur à Auriac est à mentionner[472]. Les deux cavités ne sont qu'à une quarantaine de kilomètres l'une de l'autre, dans la même zone géographique au sud de l'actuel département de l'Aude, sur les premiers contreforts des Pyrénées (Figure 65).

Conservé jusqu'en 2006 par son inventeur, l'ensemble du matériel archéologique collecté a ensuite été confié à G. Rancoule, responsable du dépôt archéologique de Limoux, qui me l'a remis afin d'en proposer une étude[473].

[472] cf. Faux monnayage : la grotte de Lauradieu (Aude), p. 153.

[473] Celle-ci a notamment été commencée par M.-C. Vivier au cours d'un stage de master 2-Pro que j'ai co-encadré avec F. Téreygeol.
Vivier M.-C., *Etude du faux-monnayage de la grotte de La Catette (Aude)*, Mémoire de Master 2-Pro « Méthodes physiques appliquées au Patrimoine culturel », sous la direction de F. Téreygeol et A. Arles, Bordeaux, 2007, 91 p.

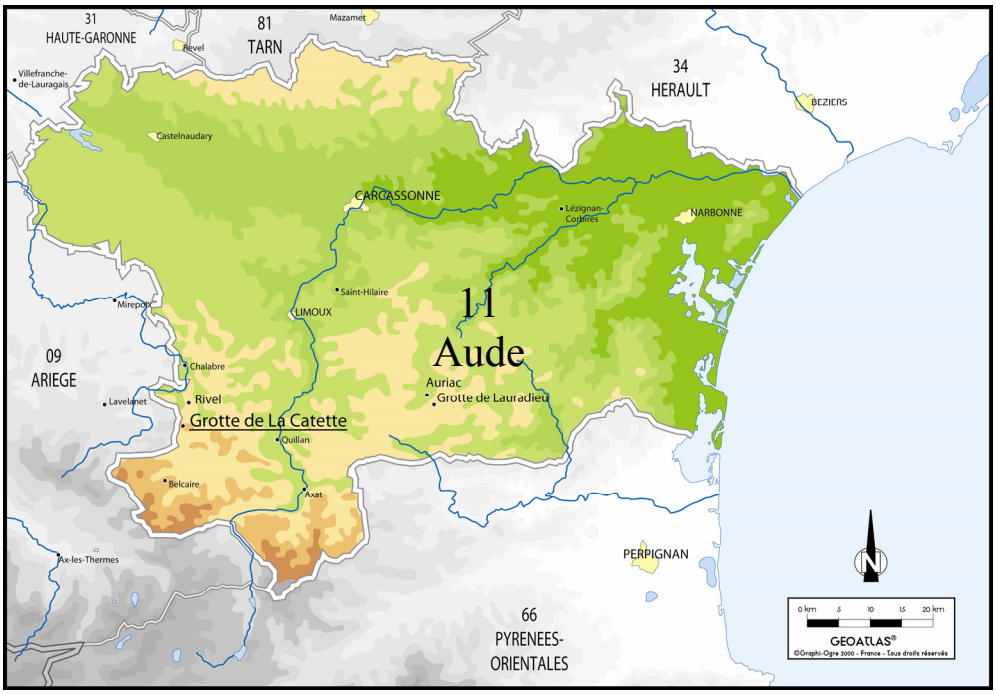


Figure 65 - Grotte de La Catette sur la commune de Rivel dans le département de l'Aude.

Compte tenu des conditions particulières de la découverte du mobilier[474], il est apparu nécessaire de réaliser une fouille au sein de la cavité. Au cours des premiers prélèvements de F. Matta, aucune information portant sur la répartition spatiale ou stratigraphique des vestiges n'a été relevée. Or, ces données sont essentielles pour la compréhension de l'organisation de la production mise en œuvre dans cette grotte. D'autre part, il est indispensable d'être prudent quant à la réalité ou la représentativité du premier *corpus*. Compte tenu des conditions de la découverte, son inventeur n'a pas nécessairement considéré avec le même intérêt, les échantillons assimilés à des déchets de production par rapport aux ébauches dont les morphologies sont plus proches de celles de monnaies. Cette hypothèse a été d'ailleurs suggérée par le faible nombre des individus les plus frustes au sein du *corpus* initial. De même, il est possible que la taille des objets ait constitué un paramètre discriminant, les plus petits gabarits n'étant pas repérés. Enfin, la fouille a montré que lors de son intervention initiale, l'espace ayant été occupé par l'activité de faux-monnayage n'a été que partiellement caractérisé, diminuant d'autant la représentativité des vestiges découverts.

Dans une réflexion technique, il est hasardeux de raisonner à partir d'un *corpus* artificiellement tronqué. L'absence d'indices associés à une opération de mise en forme peut par exemple conduire à supposer à tort l'inexistence de cette dernière.

[474] Elle est le fait de F. Matta, prospecteur amateur, dont les méthodes de collecte, avec l'utilisation potentielle d'un détecteur de métaux, se révèlent peu en rapport avec une démarche archéologique.

La fouille a permis de vérifier la représentativité du matériel préalablement découvert. Parallèlement à cela, elle s'est voulue très précise afin de discuter d'une potentielle organisation de l'activité clandestine au sein de la grotte, les informations spatiale et stratigraphique associées aux vestiges dégagés ont été systématiquement relevées. L'intervention archéologique s'est voulue être la plus exhaustive possible dans la caractérisation de l'espace, comme en témoigne l'élargissement de l'emprise des travaux au cours de l'expertise. La mise en place d'une prospection géochimique préliminaire ayant par ailleurs localisé l'occupation frauduleuse dans cette zone limitée de la cavité.

1 - Situation et topographie de la grotte de La Catette

D'après la datation relativement précise qui pourra être proposée notamment grâce à l'étude du mobilier céramique, mais en particulier à partir de considérations numismatiques, cette production de contrefaçon monétaire prend place au XVI^{e} siècle. Quelle était la situation géographique de cet abri naturel lorsqu'il a accueilli l'activité clandestine discutée ici ? Au début de la période moderne, le Languedoc était organisé en trois sénéchaussées : celles de Toulouse, de Carcassonne, et de Beaucaire. La grotte de La Catette se situe sur un territoire qui appartenait à la viguerie de Mirepoix, dans la sénéchaussée de Carcassonne. La région se trouvant plus au sud, qui correspond à peu près au département actuel des Pyrénées-Orientales, appartenait depuis 1172 aux « comtes de Barcelone ou d'Espagne » qui dirigeaient également le royaume d'Aragon, le comté de Roussillon ainsi que tous les territoires de la Catalogne. La cavité qui abrita un faussaire au XVI^{e} siècle se situait donc à une quarantaine de kilomètres de l'Espagne[475]. Par ailleurs, un ancien chemin, dit d'*Espagne*, descend vers le sud, à seulement deux kilomètres à l'est de la grotte[476]. On rappellera ici que les espaces frontaliers sont opportuns pour la mise en place d'activités de faux-monnayage[477].

La grotte de La Catette est une cavité qui ne comprend qu'une seule salle de taille moyenne, d'environ 200 mètres carrés. Dans un premier temps, une topographie fine de l'espace a été réalisée à l'aide d'un tachéomètre. Elle permet de rendre compte de l'organisation dans ce lieu clos. C'est ainsi qu'ont été définis

[475] De Vic C. *et al.*, *Histoire générale de Languedoc* 16 tomes, Toulouse, Privat, t. 4, 1876, pl. 1.
[476] Lagarde A., *Rivel (Aude) et ses environs : les noms de lieux, la géographie, la tradition et l'histoire*, Carbonne, A. Lagarde, 2000, p. 38.
[477] Rancoule G. *et al.*, La grotte nord de Lauradieu..., *op. cit.*, p. 171-176.
Bompaire M. *et al.*, La grotte du Crés..., *op. cit.*, p. 71-76.
Trojanowska Z., Les faux monnayeurs..., *op. cit.*, p. 213.
L'atelier de la fortification de Plein-Mont est également situé à proximité de la Belgique.

les périmètres présentant un potentiel archéologique. Dans cette démarche, les surfaces particulièrement planes sont à considérer systématiquement dans la mesure où la production de fausse monnaie peut y avoir été organisée.

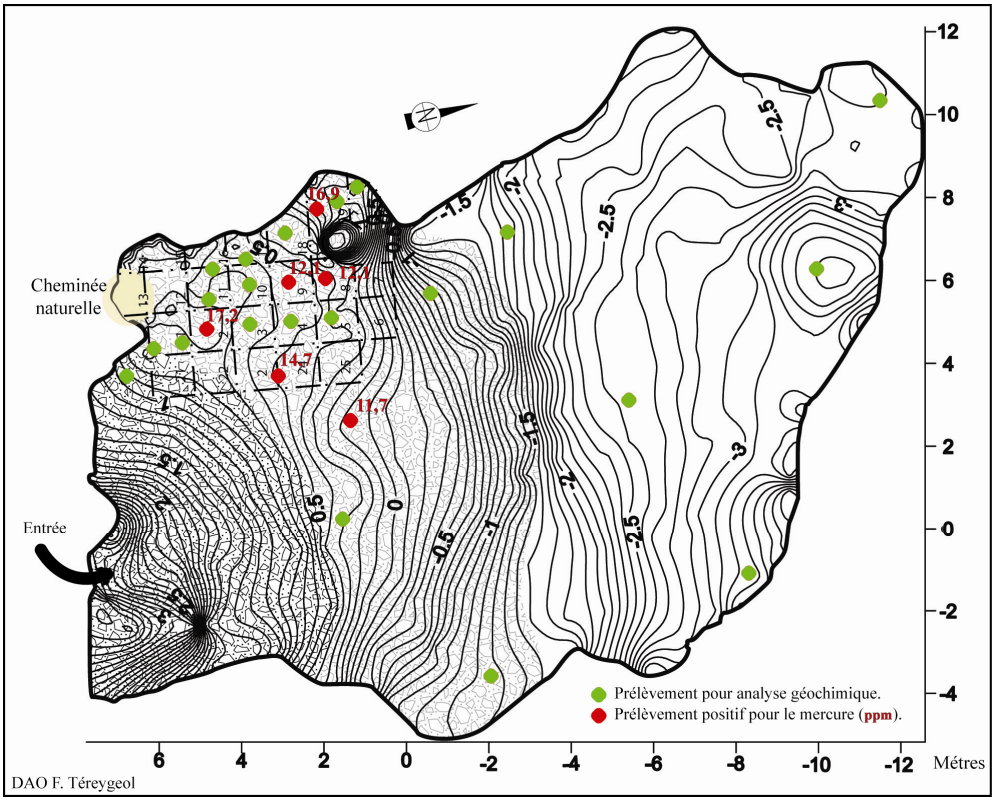


Figure 66 - Topographie de la grotte de La Catette et localisation de la fouille archéologique.

La topographie générale de la grotte révèle une variation de l'altitude interne de près de six mètres (Figure 66). Elle met en évidence trois espaces distincts. Le premier se rencontre à l'entrée et correspond à une accumulation en pente déjà forte de débris récents provenant de l'extérieur (débris végétaux, terre de ruissellement) mêlés à des débris propres à la grotte (altération du calcaire). Ce cône de déblais aboutit à une surface nivelée d'une trentaine de mètres carrés, par la suite appelée replat de l'entrée. Il s'agit du sommet d'un second cône d'accumulation. Celui-ci est plus ancien que le précédent et se compose en grande majorité de débris du toit de la grotte. Il présente une pente stabilisée de forte déclivité et marque un effondrement important, mais ancien, du porche de la grotte. Enfin, le fond de la grotte définit une surface subhorizontale où le sol ne laisse pas voir le rocher. Dans cette dernière partie, la cartographie dessine une dépression assez marquée. Il s'agit en fait d'un creusement caractéristique d'une fouille clandestine.

La voûte de la grotte est dans l'ensemble très élevée. Elle atteint près de sept mètres au niveau de la faille autour de laquelle s'organise la cavité. Au niveau du replat de l'entrée, les effondrements ont été moins importants ne laissant qu'entre 1 et 1,8 mètre sous le plafond. C'est également à ce niveau qu'il est possible d'observer une cheminée naturelle aujourd'hui pratiquement comblée par des sédiments qui s'y sont accumulés de l'extérieur. Elle pourrait être débouchée sans grandes difficultés et il est fort probable qu'elle ait été utilisée au XVI^{e} siècle durant l'activité du faussaire.

A partir des premiers relevés topographiques, il est possible de délimiter plusieurs surfaces horizontales où l'activité de faux-monnayage a potentiellement pu s'organiser. Elles ont ensuite fait l'objet d'une prospection géochimique afin de localiser l'espace où devait être mise en place la fouille archéologique.

2 - La prospection géochimique

Le protocole suivi dans cette prospection est globalement celui décrit précédemment[478]. Cependant, la vitesse de sédimentation au sein de la grotte est naturellement beaucoup moins importante que celle qui existe sur un site extérieur. De plus, elle correspond à un ensemble clos qui est par définition moins soumis aux pollutions extérieures. Compte tenu de cette configuration particulière, les prélèvements de sédiments ont été réalisés en surface et non à trente centimètres de profondeur comme cela est fixé dans le protocole initial. La préparation des échantillons en vue de leur analyse n'a, quant à elle, pas été modifiée. Toutefois, étant donné les faibles concentrations en métaux lourds globalement constatés lors de dosages préliminaires de trente secondes, le temps d'analyse a finalement été doublé afin d'avoir une meilleure précision des mesures, ces dernières approchant les limites de détection du spectromètre de fluorescence X utilisé. Afin de pouvoir comparer les différents résultats, il a été seulement nécessaire de garder la même durée de mesure pour l'ensemble des caractérisations.

A l'échelle de la cavité, plusieurs espaces différents sont mis en évidence par les relevés topographiques, chacun d'eux a été échantillonné. Toutefois ces derniers étant sans relation d'équivalence spatiale[479], il n'est pas pertinent de présenter les résultats obtenus sur des cartographies géochimiques globales. En outre, un simple raisonnement point par point à partir de dix premiers prélèvements répartis sur l'ensemble de la grotte (Figure 66) est suffisant pour

[478] cf. La prospection géochimique, p. 246.
[479] Ils représentent plusieurs espaces de travail possibles séparés les uns des autres par d'important dénivelés.

discuter de l'organisation des travaux archéologiques. Il est en revanche trop restreint pour permettre des représentations spatiales significatives. Finalement, la série préliminaire a été complétée par dix-sept autres prélèvements au niveau du replat de l'entrée, ce dernier révélant des taux supérieurs en métaux lourds.

Le fond géochimique

Le fond géochimique local a préalablement été déterminé à partir de trois prélèvements de sédiments réalisés à une centaine de mètres autour de la grotte de La Catette. Les taux moyens constatés se situent notamment autour de 30 ppm pour le plomb, 90 pour le zinc. Pour le cuivre et le mercure qui se révèleront particulièrement discriminants dans cette prospection, le fond géochimique est en deçà des limites de détection de l'analyseur utilisé. En considérant la norme française AFNOR NF U 44-041 qui définit les différentes concentrations en métaux lourds à partir desquelles un sol est considéré comme pollué[480], le fond géochimique évalué ne trahit pas de contamination particulière.

Les dosages réalisés sur les échantillons extérieurs démontrent finalement que la grotte de La Catette représente un ensemble clos. Le taux de plomb est particulièrement significatif dans la démonstration de cette proposition. En dehors de la cavité, il s'élève à une trentaine de parties par million alors que dans la grotte, il diminue rapidement de l'entrée vers le fond de celle-ci. Ce métal doit être assimilé ici comme résultant des pollutions modernes dues aux rejets de combustion de l'essence au plomb, utilisée en France jusqu'en 2000. Son absence dans l'espace souterrain atteste de l'isolement de ce dernier. Il n'est pas du reste un marqueur de l'activité clandestine qui a trouvé refuge ici.

La prospection

L'étude du matériel associé à la production de cet atelier clandestin révèlera l'importance du cuivre dans cette fabrication. Il n'est pas surprenant que ce métal soit un marqueur pertinent pour proposer une localisation des vestiges. C'est au niveau du replat de l'entrée que les analyses montrent la présence de cet élément dans les sédiments collectés. Il ne s'agit cependant pas des taux les plus importants qui se retrouvent dans la pente située en contrebas de cet espace. Toutefois, une

[480] La norme AFNOR NF U 44-041 limite à 100 ppm la quantité de plomb comme de cuivre présent dans le sol, 300 pour le zinc et 2 ppm pour le mercure.

telle topographie n'est pas cohérente avec l'organisation de la contrefaçon de fausses monnaies. Les taux plus importants de cuivre dans cette zone s'expliquent par des rejets, dans la pente de sols pollués, à la suite des fouilles clandestines mises en évidences par nos travaux archéologiques…

En parallèle d'une pollution au cuivre, cette même zone de replat révèle des teneurs mesurables de mercure, de l'ordre de 12 à 17 ppm (Figure 66). Bien que ces dernières soient relativement faibles et proches des limites de détection du spectromètre de fluorescence X utilisé, elles doivent être considérées comme positives d'un point de vue prospectif. Car si ce métal peut être présent naturellement dans les sols, les niveaux détectés ici traduisent des concentrations anormales, en particulier compte tenu de la limite de 2 ppm fixée par la norme AFNOR. Par ailleurs, comme ce qui a été signalé pour le cuivre, le mercure constitue également l'une des matières premières utilisées par le faussaire de La Catette.

Ces premiers dosages témoignant de pollutions de cuivre et de mercure corrélées au niveau du replat de l'entrée, constituent des indices probants de l'intérêt de considérer cette partie de la grotte. Ils ont par ailleurs été confirmés par de nouveaux prélèvements localisés à cet endroit. C'est finalement dans cet espace nivelé, se limitant à une trentaine de mètres carrés, qu'a été délimité le périmètre de fouille.

Les dosages post-fouilles

Après que les travaux archéologiques entrepris au sein de la grotte de La Catette aient permis de définir le périmètre ayant été occupé par l'activité de contrefaçon monétaire, il a été décidé de réaliser plusieurs dosages géochimiques *in situ*, notamment directement sur les sols d'occupation mis au jour ainsi que sur les parois de la cavité. Cette démarche s'inscrit dans le développement de la méthode de prospection préalablement proposée. Une telle approche de terrain a pu être envisagée grâce à l'utilisation du spectromètre d'analyse portable retenu pour les dosages. Le site dont il est ici question se trouve à une quarantaine de minutes de marche de la route d'accès.

Ces analyses supplémentaires ont évalué la possibilité de révéler une organisation spatiale du travail dans l'espace souterrain à partir de pollutions résultant de différentes opérations de mise en forme. Cette démarche a été envisagée après que les fouilles aient finalement montré que le site n'avait subi

que des perturbations relativement limitées après l'abandon de l'activité du faussaire. Cette configuration est assez rare. Elle se justifie principalement ici par l'isolement de cette officine clandestine qui a été préservée jusqu'à sa récente découverte.

Les résultats de ces essais sont positifs puisqu'ils ont délimité différents espaces pollués dans l'emprise de la fouille. Afin de vérifier la qualité des analyses *in situ*, ces dernières ont également été comparées par une série de prélèvements préparés et dosés selon le protocole précédemment décrit[481]. La confrontation des données atteste de leur analogie. Cette dernière est justifiée par les caractéristiques de la surface analysée. Il s'agit du sol découvert lors des travaux archéologiques. Il présente une granulométrie globalement homogène.

En outre, cette démarche d'analyse directement sur le terrain favorise la multiplication des dosages grâce à l'économie du temps normalement nécessaire à la préparation des échantillons. Les données collectées sont dans ce cas d'autant plus précises.

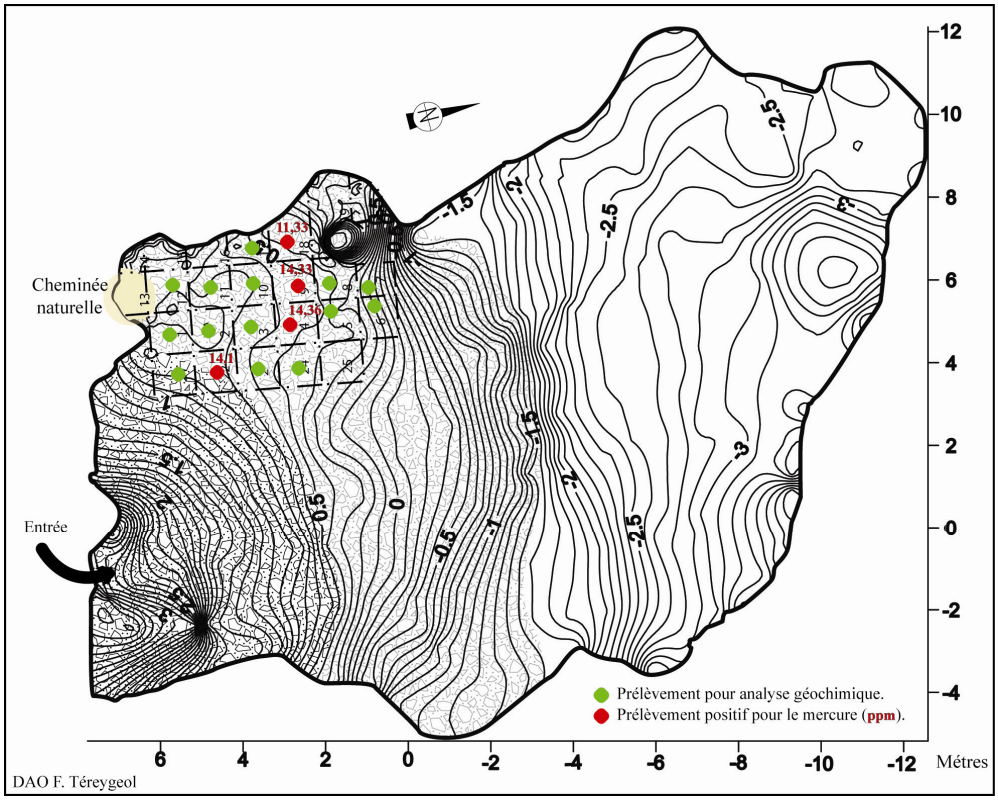


Figure 67 - Répartition du mercure sur l'espace de travail dégagé par la fouille.

[481] cf. Préparation des échantillons au laboratoire de campagne, p. 186.

L'image obtenue à la suite de ces essais, localisant la présence de mercure dans la partie nord de la fouille, est en définitive relativement similaire à celle établie à partir de dosages qui ont précédé les travaux archéologiques (Figure 66 et Figure 67). Une telle constatation se justifie par la sédimentation relativement faible qui a suivi l'occupation du faussaire.

Fort des premiers résultats positifs de ces dosages de terrain et sachant au terme de la fouille que le procédé d'argenture à l'amalgame a été mis en œuvre dans certains espaces de la cavité[482], il a été décidé de faire des mesures directement sur les parois de la grotte. Cependant, les dosages opérés à proximité des espaces d'intérêt révélés par la fouille, se sont tous révélés négatifs d'un point de vue d'une quelconque pollution métallurgique. Aucune trace de mercure résultant de la déposition d'effluents produits lors des dernières étapes de préparation des flans n'a été constatée.

La démarche de prospection géochimique proposée a montré finalement son efficacité en ayant permis de restreindre l'espace de la fouille. Sur les deux cents mètres carrés de la grotte de La Catette, seul un dixième de cette surface présentait un réel intérêt pour des travaux archéologiques. Sans le recours à une telle méthode de prospection, il aurait été nécessaire de mettre en place une série de sondages afin de caractériser l'ensemble des espaces distincts de la cavité, préalablement circonscrits par les relevés topographiques.

Par ailleurs, l'espace dégagé lors des travaux, a pu être caractérisé *in situ* mettant en évidence une répartition spatiale différente des pollutions métallurgiques (Figure 67). Ces données sont particulièrement intéressantes d'un point de vue de la compréhension de l'organisation de la production de fausses monnaies au sein de la cavité. Elles peuvent être discutées en les corrélant aux informations dont la fouille rend compte.

3 - La fouille

Compte tenu des résultats de la prospection géochimique préliminaire, l'emprise des travaux a été délimitée au niveau du replat de l'entrée (Figure 66). Les méthodes de collecte des informations retenues lors de ce chantier archéologique ont été choisies de manière à répondre au mieux aux différentes questions suscitées par ce site. Afin de discuter de la spatialisation potentielle de la chaîne opératoire de contrefaçon monétaire dans l'espace souterrain, un carroyage selon un maillage d'un mètre de côté, a été préalablement organisé dans le périmètre de l'intervention. Chaque vestige se voit positionné dans la stratigraphie

[482] Vivier M.-C., *Etude du faux-monnayage..., op. cit.*, p. 53-56.

ainsi que spatialement dans ce maillage relativement précis. La première division comprenant vingt secteurs a ensuite été élargie de cinq unités supplémentaires afin de caractériser la totalité de la surface potentiellement occupée par l'activité clandestine (Figure 66).

L'éloignement du site des voies de communication ainsi que les difficultés d'accès à ce dernier, ont interdit le recours à un groupe électrogène pour mettre en place un éclairage global au sein de la cavité. La fouille a été réalisée sous une faible luminosité fournie par des équipements individuels. De telles conditions ont imposé un tamisage systématique de tous les déblais[483]. Toutefois, ce dernier a été réalisé en respectant le carroyage afin de toujours disposer des informations spatiales. Le maillage du tamis le plus pertinent s'est avéré être de deux millimètres[484]. En définitive, quatre-vingt-dix pourcents du *corpus* collecté lors de ces travaux, provient des refus de tamis. De plus, la taille des échantillons rassemblés témoignent de la précision de cette méthode, certains déchets de coupe inventoriés pesant seulement 0,01 à 0,04 gramme. A titre d'exemple, parmi ceux découverts par l'inventeur de la collection initiale aucun fragment métallique n'est aussi léger, 0,12 gramme constituant la limite la plus basse.

La découverte lors de la fouille de matériel métallique très caractéristique réparti au niveau du replat désigné par la prospection géochimique, permet de confirmer la localisation de la production de fausses monnaies dans cet espace limité de la cavité. L'ensemble de la stratigraphie a pu être investiguée jusqu'à la roche ou jusqu'aux couches d'altération naturelle de cette dernière. Il est apparu lors de ces fouilles que les niveaux les plus anciens ont souffert de l'installation de l'activité de contrefaçon monétaire dans cet espace. C'est pourquoi la majorité des contextes rencontrés sont associés à cette occupation. Les travaux archéologiques trahissent également les traces de pillages récemment subis par ce site.

En ce qui concerne les vestiges découverts, excepté deux foyers, aucun aménagement particulier en rapport avec l'activité de faux-monnayage, n'a pu être dégagé, suggérant dans ce cas une occupation relativement limitée dans le temps. Cette proposition se voit par ailleurs corroborée par la faiblesse du nombre de tessons de céramiques attribuables à la période d'activité de l'atelier.

[483] Cette opération a été réalisée à sec dans la mesure où le site ne se situe pas à proximité d'une source.

[484] Un essai de tamisage à l'eau avec un maillage plus petit d'un millimètre à partir de plusieurs prélèvements n'a pas montré de différence d'un point de vue du matériel archéologique mis en évidence.

Au terme des travaux, le mobilier rassemblé par l'inventeur du site voit finalement sa population doublée, avec la découverte de nouveaux flans, carreaux et déchets de coupe, ainsi que sept fausses monnaies supplémentaires. En outre, la confrontation des données géochimiques, avec les répartitions spatiales et stratigraphiques associées à ces différents objets, révèle trois espaces où ont été réalisées certaines opérations distinctes du faux-monnayage. Les représentations des répartitions de chacune des classes d'objets mis au jour, notamment les monnaies, flans, carreaux et chutes métalliques, rendent compte de certaines organisations. Ces dernières peuvent être abordées à partir de la figure 68 sur laquelle l'ensemble du matériel métallique dégagé a été localisé.

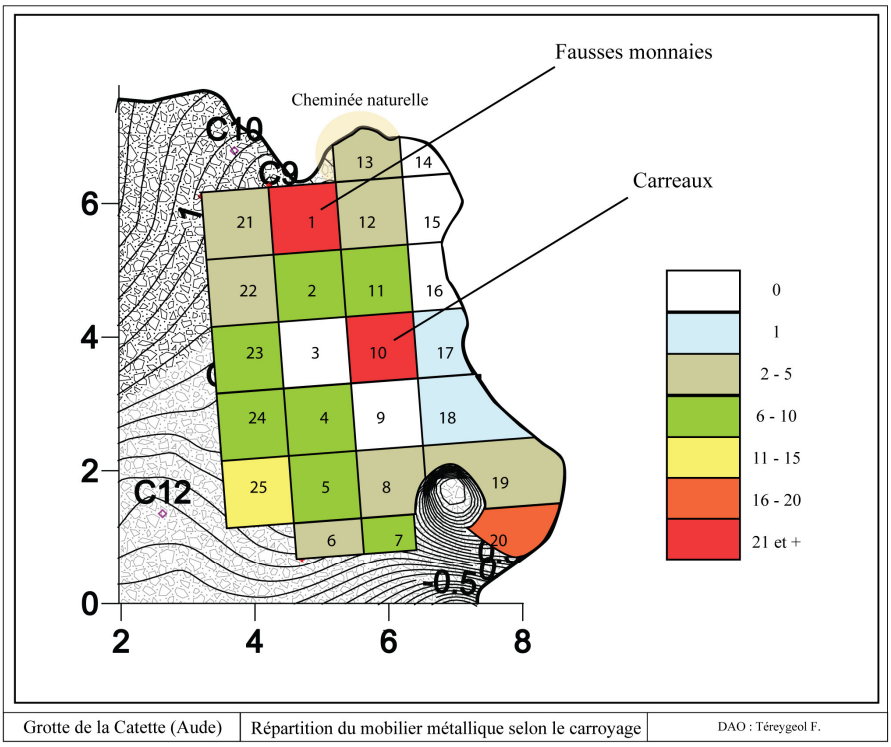


Figure 68 - Répartition spatiale du *corpus* métallique.

C'est dans l'emprise du carré 10 que la totalité des carreaux découverts lors de la fouille ont été mis au jour (Figure 68). Ils ne constituent toutefois pas un dépôt volontaire et sont distribués globalement sur l'ensemble de ce seul mètre carré. Une telle répartition trahit la conséquence d'une étape de fabrication. En outre, en mettant de côté dans un premier temps le carré 1, il apparaît que les unités spatiales 2 et 11 rendent compte de quantités légèrement plus importantes de flans. Une telle observation pourrait localiser leur préparation dans cette zone. Toutefois, la fouille a révélé la présence de flans dans près de la totalité des carrés qui

définissent son emprise. L'écart des différentes populations est peu marqué et demande de considérer avec précaution la localisation potentielle de la préparation de ces ébauches dans cette seule zone. Enfin, le pillage dont certaines traces ont été remarquées dans le carré 2, ajoute une incertitude à cette répartition. En définitive, si la mise en forme des carreaux est attestée dans l'espace central de l'atelier clandestin, celle des flans n'y est que supposée.

Une seconde aire de travail se définit à partir des données géochimiques rassemblées notamment après la fouille. En effet, le carré 1 a vu la découverte d'un lot de fausses monnaies et de flans argentés. Bien que ce mobilier ait été traité par une technique d'argenture à l'amalgame qui sera décrite plus loin, les sédiments dans lesquels ces objets ont été enfouis ne montrent pas de pollution particulière au mercure. *A contrario*, les carrés 4, 9, 18, 19 et 20 qui n'ont pourtant pas révélé de matériel traité à l'amalgame, ont en revanche présenté des taux non négligeables de ce métal lourd. Ce dernier se retrouve à la fois dans les sols des carrés 4, 9 et 18, mais également au niveau d'une surface de roche dégagée dans l'emprise des carrés 19 et 20. Le mercure dosé dans le sol de cette cavité résulte donc effectivement d'une contamination directe liée à la fabrication et non d'une diffusion suivant l'enfouissement d'artefacts argentés à l'amalgame. La pollution mesurée délimite ici l'espace qui a accueilli les opérations liées à l'argenture des fausses monnaies.

Une dernière zone qui s'étend sur les carrés 1 et 2, témoigne de phases avancées de la production de fausses monnaies. C'est en effet dans le premier de ces deux carrés que la quasi-totalité des fausses monnaies et près de 80 % des flans argentés prêts à être frappés, ont été découverts dans un dépôt volontaire. L'espace voisin a, quant à lui, révélé deux poinçons d'alliage ferreux qui doivent être associés à la gravure des coins par le faussaire. C'est dans cet espace restreint qu'ont été mises en œuvre les opérations les plus symboliques de cette contrefaçon monétaire, que sont la frappe des fausses monnaies ainsi que la gravure des coins nécessaires à cette dernière.

En définitive, la fouille mise en place au sein de La Catette révèle que l'activité de contrefaçon monétaire n'a occupé qu'un espace limité de la cavité. Il n'est pas surprenant que les différentes opérations qui définissent cette production, n'aient pas toutes été cantonnées à certaines aires exclusives. Bien que la seule considération du *corpus* de carreaux découverts suggère une telle organisation, l'ensemble des flans et en particulier celui des déchets de coupe demandent à être moins catégorique.

De plus, seuls les dosages géochimiques ont permis de localiser certaines opérations liées à l'argenture de flans à l'intérieur de la cavité. En effet, aucun vestige, ni structure associés à la mise en œuvre de ce procédé, n'ont été découverts dans la grotte. Les deux zones foyères dont rend compte la fouille (carré 2 et carrés 13 et 14), ne montrent en l'occurrence pas de pollution particulière en mercure. Elles ne peuvent être associées au procédé d'argenture des flans. Le foyer nécessaire à cette technique, a donc été mis en œuvre dans un secteur n'appartenant pas à l'emprise des travaux archéologiques. L'hypothèse la plus probable serait une localisation à l'extérieur de la cavité, compte tenu des résultats géochimiques négatifs d'un point de vue du mercure pour les autres secteurs de la grotte.

4 - Le matériel archéologique

Le matériel archéologique mis au jour se rattache principalement à l'activité de faux-monnayage. Ce dernier se compose par ailleurs majoritairement d'objets métalliques résultant de cette fabrication. Le matériel céramique se présente comme limité. Il compte presqu'exclusivement du matériel à vocation domestique. Seuls quelques tessons très fragmentés d'une pâte grossière et mal cuite se détachent de cet ensemble. Ils ont révélé après analyses, des traces de cuivre sur leurs surfaces internes alors que ce métal ne se retrouve pas sur leurs faces externes. Une telle observation suggère une utilisation métallurgique. Il pourrait s'agir de fragments de creuset. Toutefois, ils constituent les seuls indices, au sein de la grotte, d'opérations assimilées à des fontes de cuivre. Les deux foyers mis en évidence lors des fouilles, sont en outre trop sommaires, pour avoir été employés à cette fin. Ces observations seront discutées plus loin dans la définition de la chaîne opératoire qui a pris place dans cette activité, à partir de l'étude du matériel métallique.

a. Le matériel monétaire

Au terme des fouilles entreprises dans la grotte de La Catette, le mobilier associé à la fabrication de fausses monnaies, se présente selon deux ensembles. Le premier correspond à celui découvert fortuitement par F. Matta, le second, à celui mis au jour lors des travaux archéologiques. Dans le cadre de la réflexion technique de ce monnayage, il est nécessaire de rassembler ces deux *corpus* en un seul puisqu'ils témoignent de l'activité d'un même site. Cependant, cette réunion doit être faite en prenant quelques précautions, notamment compte tenu de l'origine de la première collection. Il est nécessaire de discuter de la représentativité de cet isolat. La possibilité d'un mélange avec le mobilier

provenant d'un autre site doit être évoquée. Ce sont notamment ces incertitudes qui ont justifié en partie la mise en place de la fouille de la cavité.

Selon son inventeur, F. Matta, la découverte du matériel au sein de la grotte prend place dans les années quatre-vingt-dix. Une dizaine d'années plus tard, un archéologue, M. Comelongue, fait l'inventaire de ce mobilier et compte alors 108 objets. Il s'agit essentiellement de carreaux et de flans, 103 d'entre eux sont répertoriés comme tels, selon trois groupes morphologiques. Certains flans exposent encore une surface argentée. Seuls deux déchets de coupe sont relevés ainsi que deux fausses monnaies : un faux douzain aux croissants ainsi qu'un faux double tournois à la croisette. En 2006, ce matériel m'est transmis dans le cadre de cette étude. Il compte à cette date 172 objets, soit 64 artefacts supplémentaires par rapport à l'inventaire précédent... Des variations affectent le groupe des flans présentant de plus grands diamètres. La population de ceux ayant été argentés augmente particulièrement. Les déchets de coupe voient également leur nombre passer de 2 à 34 échantillons. Les monnaies sont toujours au nombre de deux avec cependant un remplacement du double tournois à la croisette par un réal fragmenté. Cette dernière est une monnaie espagnole. Enfin, la collection a été enrichie de 5 gouttes et coulures d'alliage blanc.

Les différences entre les deux inventaires de ce *corpus* sont interprétées comme résultant principalement d'un retour de l'inventeur sur le site de sa découverte pour enrichir sa première collection. En effet, les principaux rajouts sont répartis pour la plupart au sein de chacun des groupes morphologiques initialement proposés. Ceci indique qu'il ne s'agit globalement pas d'ajouts hétérogènes provenant d'autres sites. D'autant que la fouille qui a suivi, a complété cet ensemble selon une statistique similaire. Il suffit pour cela de considérer les masses moyennes des individus qui appartiennent aux différentes classes morphologiques (Tableau 4).

	Carreaux	Flans	Monnaies	Déchets
Masse moyenne des individus découverts fortuitement	0,71 g	1,59 g	2,05 g	0,46 g
Masse moyenne des individus découverts lors de la fouille	0,73 g	1,54 g	1,96 g	0,18 g

Tableau 4 - Masse moyenne des individus des différents *corpus*.

Les deux *corpus* considérés individuellement présentent globalement les mêmes statistiques. La seule différence significative concerne les déchets. Elle est justifiée par les techniques retenues lors de l'intervention archéologique. Cet écart est le résultat du tamisage des déblais durant la fouille. La méthode de fouille mise

en œuvre, a permis de mettre au jour des résidus de coupe plus petits que ceux découverts par F. Matta, augmentant d'autant la représentativité de ces objets dans le *corpus* global.

Enfin, les 5 échantillons d'alliage blanc révélés en 2006, lors du second inventaire, apparaissent en revanche, détachés du *corpus* global. Aucun autre échantillon de ce type n'a été découvert lors des travaux archéologiques au sein de la grotte. Les premières analyses de ces coulures révéleront qu'elles ne se rattachent à aucune étape du faux-monnayage considéré. Compte tenu de ces observations, la possibilité d'un mélange de ces dernières au sein du *corpus* de F. Matta alors qu'elles proviennent d'un autre site, ne doit pas être écartée.

En définitive, le mobilier métallique du faux-monnayage de La Catette qui a, à ce jour, pu faire l'objet d'une étude, compte 172 objets mis au jour par F. Matta complétés de 191 autres rassemblés lors de l'intervention archéologique, soit un total de 363 objets à divers stades de mise en forme. Ces derniers représentent une masse totale d'environ 350 grammes. Les conditions d'humidité au sein de la cavité ainsi que le milieu d'enfouissement, n'ont pas induit de phénomènes importants de corrosion. De nombreux flans découverts présentent toujours un aspect argenté. En vue de leur étude, les échantillons ne nécessitent pas de restauration. Dans le cadre de l'étude morphologique et analytique, ils ont été simplement nettoyés dans un bain à ultrasons d'eau distillée jusqu'à ce que la solution de rinçage, régulièrement changée, ne soit plus troublée.

Parmi l'ensemble du mobilier mis au jour, neuf échantillons ont pu être identifiés comme des fausses monnaies. La plupart d'entre elles ont été découvertes lors de la fouille associée, formant un dépôt volontaire.

La particularité de ce *corpus* est la diversité des monnaies qu'il met en évidence. Il rassemble en effet trois types monétaires français : le douzain aux croissants, le douzain à la croisette ainsi que le double tournois à la croisette (Figure 69). Deux autres pièces sont des faux réaux correspondant à une espèce espagnole (Figure 69). Une telle variété sera discutée plus loin mais témoigne déjà de l'utilisation d'un nombre important de coins dans ce monnayage.

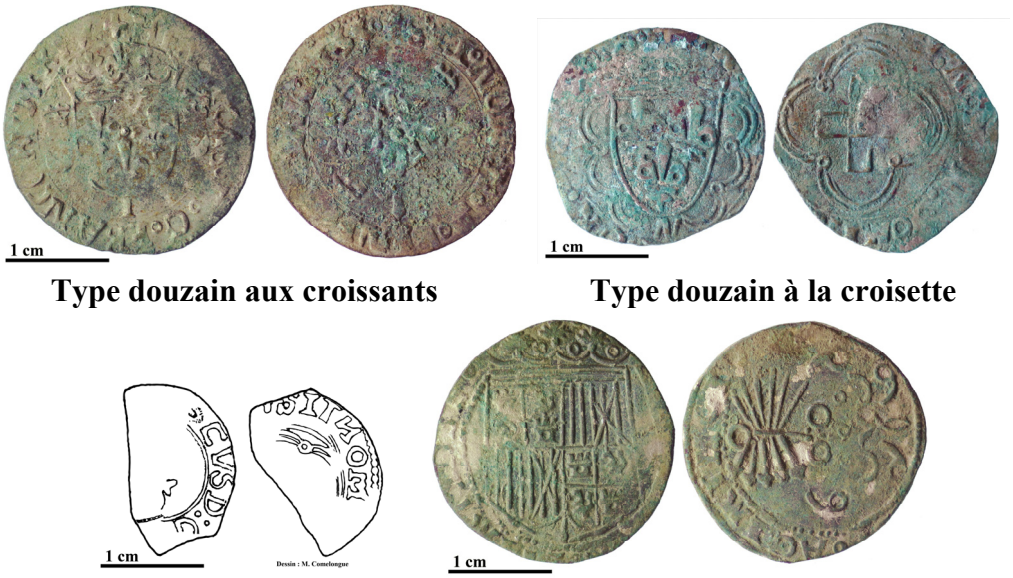


Figure 69 - Les quatre types monétaires contrefaits dans la grotte de La Catette[485].

L'ensemble des monnaies, excepté l'un des deux réaux, ont une couche d'argenture. Mis à part le douzain à la croisette frappé sur un flan de 2,1 cm de diamètre et dont la forme est peu régulière (Figure 69), la morphologie des faux est relativement ronde selon des diamètres d'environ 2,5 cm. Deux d'entre elles ont été frappées comme le faux douzain à la croisette, sur des flans trop petits pour que tous les motifs monétaires aient pu être marqués. Il s'agit d'un des douzains aux croissants ainsi que l'un des deux réaux. Ces caractéristiques étaient-elles les raisons pour lesquelles ces faux n'ont pas été mis en circulation ? Si c'est le cas, quels sont les défauts des autres monnaies découvertes ? L'étude de ce *corpus* confrontée au reste du matériel éclairera ces questions.

A défaut de renseigner uniquement sur le type de production du faux-monnayeur de La Catette, ces contrefaçons permettront en outre de discuter de l'ampleur de cette activité. Elles constitueront par ailleurs de nombreux jalons pour affiner la datation de cette activité.

Avant de considérer le *corpus* des flans monétaires, il est nécessaire de commenter trois échantillons qui présentent certaines caractéristiques de monnaies sans réellement pouvoir être définies comme telles. Le premier est en définitive celui qui se rapproche le plus d'une espèce monétaire car il est argentée et met en

[485] Double tournois à la croisette dessiné par M. Comelongue.

évidence des figures à sa surface. Cependant, il n'est frappé que sur une seule face du droit observé sur l'un des faux douzains aux croissants. En outre, les motifs sont ici marqués en négatif et en creux dans le métal.

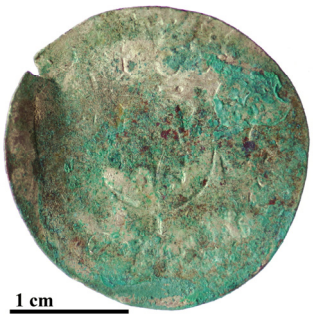


Figure 70 - Faux douzain présentant un droit négatif.

Figure 71 - Moulage d'un flan du *corpus* présentant des fragments de légende monétaire[486].

Les deux autres flans ne sont pas argentés et sont plus difficiles à lire. Des inscriptions sont observables sur leurs surfaces. Elles ne sont déchiffrables que sur l'un d'eux. Il a nettement été frappé sur ses deux faces à l'aide d'un même coin de revers de douzain aux croissants (Figure 71).

Ces trois échantillons très particuliers doivent être assimilés à des essais de frappe. Il s'agit de témoignages exceptionnels des étapes préparatoires mises en œuvre dans ce faux-monnayage.

Parmi les 363 objets rassemblés, 126 ont une morphologie caractéristique de flans. Un premier classement visuel tend à mettre en évidence trois gabarits principaux, illustrés par la figure 97. Ceux correspondant aux plus grands modules, situés autour de 2,4 cm, sont comparables aux différentes fausses monnaies retrouvées. Dans ce cas, il n'est pas surprenant que 43 de ces flans aient une couche d'argenture. En revanche, il est pour l'instant difficile de caractériser le type monétaire qui devait être produit à partir des plus petits, dont les diamètres sont d'environ 1,3 cm. Seules deux de ces ébauches sont recouvertes d'une couche argentée. Aucune des espèces frappées mises au jour ne peut être assimilée à ces petits flans.

[486] Le moulage met en évidence les reliefs à la surface des monnaies permettant de faire abstraction des couleurs de leurs surfaces. Les motifs monétaires sont plus faciles à déchiffrer.

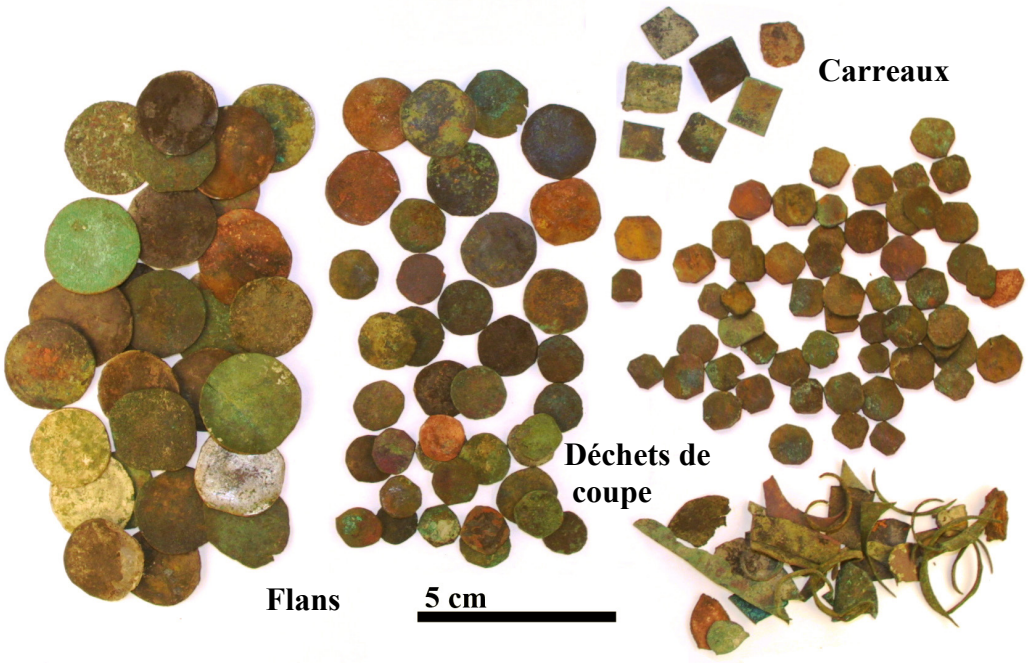


Figure 72 - Echantillons extraits du corpus global présentant les principales morphologies.

En parallèle à cet ensemble déjà très conséquent, le *corpus* global rassemble également des objets moins aboutis qui doivent être qualifiés de carreaux (Figure 72). Ils sont au nombre de 108 individus. Peu d'entre eux présentent leurs formes initiales carrées. Ils ont déjà pour la plupart commencé à être transformés. Les profils octogonaux témoignent, par exemple, du résultat d'une première phase de découpe.

Les dimensions de ces ébauches sont globalement beaucoup plus uniformes que celles observées pour les flans. Ici, les variations de dimensions apparaissent uniquement liées aux différentes étapes de préparation. Leur étude métrologique permettra d'en rendre compte.

Enfin, 112 fragments métalliques sont définis comme les déchets résultant de ce faux-monnayage. Plusieurs morphologies sont relevées. L'une d'entre elles correspond au bord d'une lame. Toutefois la grande majorité des formes résulte d'un rognage pour rectifier une forme circulaire (Figure 72). Certains de ces résidus ont un aspect argenté, et l'un d'eux présente des fragments de légende. Dans ce contexte de contrefaçon monétaire, une telle observation suggère que ces résidus correspondent à des matières premières. Il peut en effet s'agir de rognures de monnaies d'argent par la suite utilisées dans le procédé d'argenture des faux monétaires. Les analyses devront vérifier cette hypothèse.

Compte tenu de la morphologie globale des carreaux découverts parallèlement, il est attesté que leurs coins ont été découpés. Rapportés à la taille des ébauches considérées, ces derniers présentent *a priori* des dimensions inférieures au millimètre. En définitive, aucun déchet de ce type n'a pu être retrouvé durant les travaux archéologiques. Toutefois, les conditions normales de la fouille et les techniques qui ont été mises en œuvre, étaient peu compatibles avec la découverte de fragments métalliques de taille trop limitée. C'est pourquoi, il a été décidé de vérifier l'absence effective de tels vestiges en réalisant le tamisage fin et à l'eau de différents sédiments prélevés sur le site. Ces essais n'ont finalement pas révélé plus de matériel que celui rassemblé sur le chantier.

A contrario, les fragments résultant de la préparation des flans de grande dimension auraient été *a priori* assez massifs pour pouvoir être retrouvés. Certains ont d'ailleurs été collectés, toutefois avec seulement sept individus cette population apparaît très restreinte.

Au terme de la fouille de la cavité, il apparaît que certains types de déchets n'ont été que peu, voire pas mis en évidence, d'autant que différents essais ont été mis en œuvre pour vérifier si les techniques de fouille n'étaient pas la cause d'un tel manque dans le *corpus*. De plus, l'ensemble de la surface occupée par le faussaire a pu être dégagée. Ces observations attestent de la récupération relativement systématique des ses déchets par le faussaire.

La considération des répartitions en nombre et en masse de chacune des classes qui viennent d'être présentées (Figure 73 et Figure 74) rend compte de plusieurs informations. Rapporté à la quantité de déchets rassemblés dans le *corpus* du faux-monnayage de La Catette, le nombre d'échantillons en cours de fabrication apparaît très important. Il équivaut à près de deux tiers de la population totale d'objets découverts. Une telle configuration − notamment de par l'homogénéité générale dont témoigne l'ensemble de ces vestiges − suggère un arrêt de la production avant sa finalisation. Cette hypothèse devra être vérifiée lors de l'étude métrologique du *corpus*.

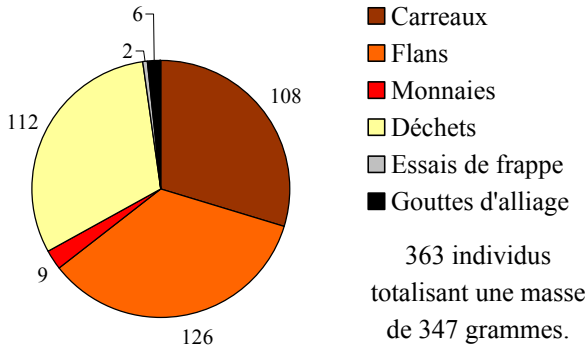


Figure 73 - Répartition en nombre du *corpus* métallique[487].

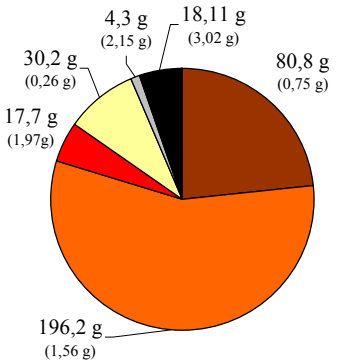


Figure 74 - Répartition en masse du *corpus* métallique[488].

D'un autre côté, si le nombre de flans découverts est à peu près équivalent à celui des carreaux, ce rapport n'est pas conservé pour les masses respectives de ces échantillons. La représentativité des premiers augmente pour rassembler près de deux tiers de la masse totale des flans et des carreaux réunis. Les différents modules mesurés dans le *corpus* des flans suggèrent l'existence de plusieurs productions parallèles, celle des grands et celle des petits diamètres. Dans ce cadre, si la fabrication des espèces les plus larges était au même stade d'avancement que celle des plus petites, la bonne représentativité statistique des sous-ensembles de flans et de carreaux[489] devrait mettre en évidence des masses moyennes voisines. Or, ce n'est pas le cas, avec 1,6 gramme, les artefacts les plus aboutis sont en moyenne plus lourds que les carreaux qui se situent à 0,72 gramme. La différence de représentativité entre chacune des classes (Figure 74) résulte, comme il sera vu plus loin, de l'existence de deux principales productions dont l'une est plus avancée.

b. Les outils

Parmi les vestiges associés à l'activité de faux-monnayage de la grotte de La Catette mis au jour lors de la fouille, deux objets n'appartiennent pas au *corpus* résultant de la production. Ils témoignent tout de même des techniques retenues par le faussaire dans sa fabrication. Il s'agit de deux poinçons en alliages ferreux (Figure 75). Ils attestent de la fabrication in situ des coins nécessaires pour battre ses monnaies. Si une telle hypothèse pouvait être envisagée à partir de l'observation des essais de frappe précédemment évoqués, elle se voit ici renforcée par ce matériel particulier qui n'a pas d'autre finalité dans ce faux-monnayage.

[487] Mise en évidence des populations par catégorie.
[488] Mise en évidence des masses moyennes par catégorie.
[489] Chacun rassemble une centaine d'individus.

Ces outils n'ayant pas encore été restaurés, il est difficile de rendre compte de leur utilisation spécifique. On peut supposer ici que celui présentant une pointe devait être utilisé dans la gravure de *grènetis* alors que le second, dont la pointe de frappe est plus large, a certainement été utilisé pour imprimer des jambages de lettre.

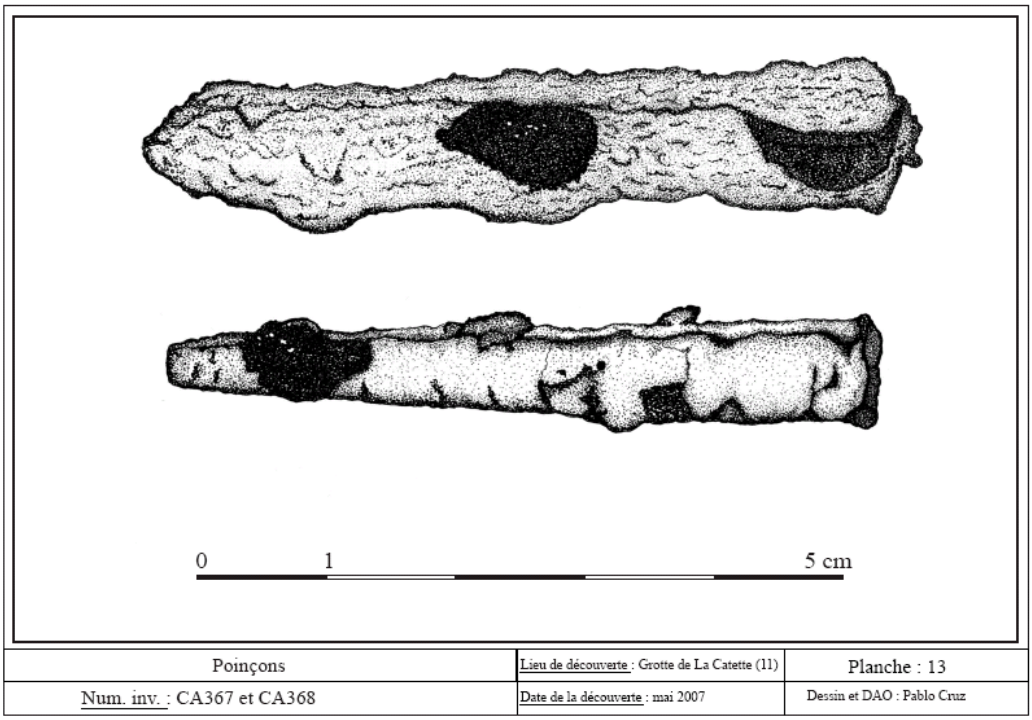


Figure 75 - Poinçons en alliage ferreux de la grotte de La Catette.

En définitive, le *corpus* découvert au sein de la grotte de La Catette est un témoignage riche d'une fabrication de contrefaçons monétaires, organisée au début de la période moderne. La fouille qui a été mise en œuvre à la suite de la première découverte fortuite d'une partie du matériel, a par ailleurs démontré son intérêt : elle a permis de compléter la première collection. L'étude de cet ensemble plus exhaustif, rendra compte d'autant mieux de cette production clandestine. Les travaux archéologiques ont, en outre, révélé des données, trahissant l'organisation du travail dans la cavité, dont seule une approche de terrain pouvait rendre compte. L'intérêt des informations géochimiques a par ailleurs pu être démontré, et ce, à la fois d'un point de vue prospectif, lors de la définition de l'emprise de la recherche archéologique, et après la fouille dans une réflexion sur la spatialisation de l'activité.

Enfin, dans une démarche comparative, ce site apparaît très différent de celui de la grotte de Lauradieu. La simple confrontation des proportions de déchets

découverts dans chacune de ces cavités (Figure 36 et Figure 73), rend compte de la singularité de ces activités. L'étude de leurs mobiliers respectifs mettra en évidence leurs particularismes.

III. Critique du corpus

Après avoir présenté les différents *corpus* archéologiques rassemblés pour mettre en place une réflexion sur les techniques de monnayage médiéval, il est nécessaire de rappeler les limites qui leur sont propres. En effet, les futures discussions seront construites notamment en référence à des données archéologiques, métrologiques, analytiques mais également à partir d'observations de stigmates de mise en forme. Or, l'ensemble de ces informations peuvent être influencées entre autres par les circonstances d'abandon des échantillons, par leur milieu d'enfouissement, les conditions de leur découverte ainsi que par les procédés de restauration et de conservation dont ils doivent parfois faire l'objet. Ce n'est qu'en étant conscient de ces paramètres associés à chacun des *corpus* archéologiques que les erreurs d'interprétations peuvent être minimisées.

En considérant dans un premier temps la représentativité des différents *corpus*, il est intéressant, dans une réflexion technique, de rassembler des échantillons qui permettent de décrire l'ensemble de la chaîne opératoire discutée. Dans une telle configuration, l'absence de résidus caractéristiques d'une étape de mise en forme incite à supposer qu'elle n'existe pas. Or, il est en définitive relativement rare de disposer d'un échantillonnage totalement exhaustif. La qualité de la représentativité résulte de différents processus qui se succèdent chronologiquement.

Ce sont dans un premier temps les conditions d'abandon d'un mobilier archéologique qui vont définir le premier niveau associé à la qualité d'un *corpus* archéologique d'un point de vue d'une réflexion technique. En effet, l'abandon d'un objet peut avoir une origine involontaire, suite à une perte ou un oubli par exemple, comme il peut être intentionnel, lorsqu'un déchet est jeté dans un dépotoir. Dans le cadre de la découverte d'un *corpus*, il s'agit ici d'un paramètre subi. Ces conditions doivent être prises en compte dans la mesure où un artefact perdu ne fournit pas les mêmes informations que celui qui aura été volontairement mis de côté.

Lors des fouilles de l'atelier monétaire de La Rochelle, par exemple, il est remarquable que plusieurs flans tout à fait semblables aient pu être découverts par lot. L'étude de tels ensembles est intéressante dans une réflexion globale car ils

donnent un plus grand poids statistique aux informations qui en sont extraites. Toutefois, dans le contexte très contrôlé de la production monétaire, ces collections sont surprenantes. Ainsi, il faudra discuter parallèlement des conditions d'abandon. Ces différents *corpus* résultent-ils par exemple d'une étape de mise en forme ou ont-ils été seulement écartés parce qu'ils présentaient des défauts de fabrication ?

Ce questionnement sur le mobilier considéré est également valable pour les autres *corpus* de cette étude. Il faudra par exemple également discuter de la grande quantité d'objets en cours de transformation retrouvés dans la grotte de La Catette. Résulte-t-elle de pertes ou de l'arrêt d'une production non menée à terme ? La réponse à cette interrogation a des conséquences sur la définition de la chaîne opératoire associée à ces vestiges archéologiques.

Le cas du *corpus* de Montreuil-Bonnin est particulier et nécessite un rappel. En effet, l'ensemble des céramiques métallurgiques à partir desquelles seront abordées, plus loin, les questions de fonderie monétaire, a été découvert en position secondaire. Les échantillons se trouvaient *a priori* initialement dans une zone de dépotoir, d'où ils ont été prélevés à des fins de nivellement des fossés du château pour être ensuite mis au jour par nos soins. Un tel déplacement qui peut avoir des conséquences sur la représentativité de ce *corpus*, doit être pris en compte dans les futures discussions.

La représentativité d'un *corpus* tient également des méthodes et des contraintes propres à l'archéologie. Le but d'un chantier de fouilles est de rendre compte de la manière la plus exhaustive possible de vestiges enfouis. Cependant, la précision d'une expertise peut être influencée par différents paramètres qui dépendent des conditions de certaines interventions archéologiques. Celles-ci doivent parfois accepter des compromis dans la collecte des informations. Lors des travaux de La Rochelle par exemple, les délais accordés pour les fouilles n'ont pas permis d'envisager un tamisage des déblais. Cette démarche aurait pu permettre de révéler des fragments métalliques de plus petite dimension que ceux qui ont été découverts. Dans ce cas, le *corpus* des déchets de coupe est le premier à se voir amputé d'une partie de ses échantillons, comme en témoignent les dimensions relativement importantes des plus petits individus de cet ensemble mis au jour.

A titre de comparaison, les tamisages réalisés lors des fouilles des deux grottes de faux-monnayeurs de Lauradieu et de La Catette ont permis de révéler des résidus de taille très restreinte. Le second de ces sites illustre particulièrement bien ce problème car le criblage des déblais lors des travaux archéologiques qui ont suivi la première découverte fortuite, a augmenté la représentativité des plus petits

déchets. Ces derniers n'avaient pas été relevés par l'inventeur du site. De plus, les responsables de la fouille de cette cavité étant particulièrement sensibilisés aux problématiques associées à l'activité de contrefaçon monétaire qu'elle a abritée, ont remarqué que leurs méthodes ne mettaient pas en évidence un certain type de résidus. C'est pourquoi, des essais de tamisage à l'eau avec un maillage plus fin ont été mis en place à partir de prélèvements afin de confirmer la réalité de cette absence. Compte tenu de la situation de la grotte, il n'était pas envisageable de généraliser cette démarche à l'ensemble des déblais. Finalement, ces contrôles supplémentaires n'ont pas permis de déceler de vestiges supplémentaires par rapport à ceux préalablement dégagés. Sans complètement écarter l'hypothèse d'absence de déchets de très petite dimension au sein de la cavité, une telle approche lui donne plus de poids.

Enfin, ces deux *corpus* de faux-monnayeurs sont d'autant plus représentatifs des activités associées, dès lors que les deux opérations archéologiques qui les ont caractérisés ont pu élargir les emprises initialement définies pour l'organisation des travaux. Une telle démarche n'a en revanche pas pu être mise en œuvre lors des fouilles de l'atelier monétaire rochelais. Les archéologues étaient conscients qu'ils ne pouvaient caractériser l'ensemble des vestiges de la fabrique dont une partie se trouvait dans un périmètre urbain, hors de l'emprise des travaux. C'est du reste ce qui explique que le *corpus* présente une certaine hétérogénéité. Bien qu'il mette globalement en évidence l'ensemble de la chaîne opératoire de fabrication monétaire, les principales étapes que sont la fonte des alliages, la mise en forme des flans et la frappe des monnaies sont datées d'époques différentes.

En définitive, l'ensemble des céramiques métallurgiques découvertes à La Rochelle apparaît particulièrement marqué par cette limitation spatiale. En effet, les opérations de fonderie ont été relevées dans les niveaux les plus anciens de l'emprise archéologique. Par ailleurs, le *corpus* des fragments de creusets monétaires se divise en deux sous-ensembles. Le plus hétérogène du point de vue des types de pâtes et des vitrifications superficielles provient des niveaux les plus récents qui n'ont pas révélé de structures de fonderie. Dans la mesure où il était difficile de formuler des hypothèses générales à partir de l'étude de ce dernier groupe, il a été décidé de le considérer seulement d'un point de vue comparatif global. Ce n'est en revanche pas le cas du second ensemble, plus homogène et en relation avec les contextes de fonte des alliages de la fabrique. Il doit permettre de proposer une étude comparative avec les fragments du *corpus* de Montreuil-Bonnin.

Il apparaît alors que la représentativité d'un *corpus* résulte à la fois des conditions d'abandon de ce dernier mais également des conditions de sa

découverte par les archéologues. Tous ces paramètres doivent être ensuite considérés lors des études ultérieures car ils peuvent influencer la qualité des hypothèses proposées.

Après avoir été prise en compte d'un point de vue global, la représentativité d'un ensemble d'échantillons archéologiques doit être évoquée à l'échelle de chaque individu qui le compose. En effet, au cours de leur enfouissement, ces derniers peuvent subir individuellement des phénomènes de corrosion qui modifient leur composition. Après leur mise au jour, il est parfois nécessaire de les restaurer en vue de leur conservation. Or, ces opérations de restauration peuvent avoir des conséquences sur la composition voire la morphologie des objets traités.

Cette question doit être abordée à partir du *corpus* métallique de l'atelier monétaire de La Rochelle. Lors de son enfouissement, celui-ci a subi des phénomènes de corrosion. Les produits de ces réactions ont par ailleurs aggloméré des sédiments à la surface des échantillons. C'est pourquoi, les responsables de la conservation de cet ensemble d'objets monétaires ont décidé de le restaurer en éliminant la couche superficielle transformée pour révéler de nouveau leur cœur métallique. Cependant, les méthodes retenues pour cette opération, présentent des conséquences interférant avec l'étude technique et archéométrique du *corpus*. En effet, le décapage mécanique des fragments métalliques a laissé des traces caractéristiques qu'il ne faut en aucun cas associer à une mise en forme initiale de l'échantillon. D'un autre côté, l'abrasion de la surface visant à éliminer les produits de corrosion peut avoir effacé de nombreux stigmates résultant au contraire d'un procédé de fabrication. Enfin, un tel traitement de décapage a également pour conséquence une perte de matière parfois non négligeable. Les échantillons ne présentent finalement plus strictement leur masse initiale. Ce dernier point est cependant le moins pénalisant, car il s'agit d'un compromis plutôt avantageux. En effet, la perte de matière est en général relativement limitée comparée à l'augmentation de la masse due aux sédiments agglomérés par les produits de corrosion à la surface de certains des échantillons non restaurés.

En outre, dans une volonté d'éviter les reprises de corrosion, après avoir été décapé, l'ensemble du matériel métallique de l'atelier de La Rochelle a été recouvert d'un vernis transparent. Cette démarche est peu commune puisque l'atmosphère et les conditions de température et d'humidité des lieux de conservation doivent justement garantir la stabilité des mobiliers archéologiques. A l'inverse, l'application d'un vernis confinant les échantillons, favorise les phénomènes de reprise de corrosion. Ils sont dans ce cas difficiles à éliminer car ils sont protégés par la pellicule externe. D'autre part, dans le cadre d'analyses de

surface, la présence d'une couche superficielle supplémentaire diminue la sensibilité de l'analyse en absorbant une partie du signal d'analyse auquel viennent s'ajouter les émissions parasites des composés du vernis constituant un bruit de fond pénalisant. Dans le cadre de La Rochelle, la pellicule superficielle s'est avérée présenter des traces de chrome, mises en évidence lors d'analyses de spectrométrie de fluorescence X de la surface des échantillons. Sans avoir été informé de la présence de cet élément peu commun, ce n'est que sa mise en évidence sur l'ensemble des objets analysés et la réalisation de dosages complémentaires qui a permis de relier ce composé au vernis de restauration…

C'est notamment pour ces raisons que dans le cadre d'étude de matériel archéologique ayant été restauré, il est nécessaire de disposer d'une description précise des différentes opérations de restauration mises en œuvre. En outre, quand cela est envisageable, il est préférable de réaliser les analyses, les relevés métrologiques ainsi que les observations de surface d'un *corpus* archéologique avant que celui-ci ne soit restauré de façon irréversible. C'est notamment pour ces raisons et dans la mesure où ils n'ont pas été corrodés durant leur enfouissement, que les mobiliers mis au jour lors des fouilles des grottes de Lauradieu et La Catette, n'ont subi comme seul traitement qu'un lavage dans un bain à ultrasons d'eau distillée. Ils présentaient finalement avant leur étude des caractéristiques très proches de celles qu'ils avaient avant leur abandon. Les échantillons qui proviennent de la découverte fortuite et plus particulièrement les individus argentés, demandent plus de prudence. Il est en effet envisageable que son inventeur ait traité son *corpus* pour révéler l'aspect brillant de sa trouvaille.

En définitive, les différentes collections d'objets archéologiques rassemblées pour répondre aux problématiques de la fabrication monétaire médiévale mettent en évidence plusieurs limites qui peuvent influencer la réflexion technique. C'est pourquoi, les futures hypothèses devront être confrontées à cette discussion critique.

Chapitre III. La fabrication de la monnaie au Moyen Age

A partir de l'étude archéométrique et expérimentale des différents *corpus* archéologiques rassemblés ainsi qu'à la lumière des sources bibliographiques monétaires qui ont permis de proposer une chaîne opératoire réglementaire de fabrication, il est maintenant possible de discuter des techniques associées au monnayage au marteau. Ce chapitre s'organise selon plusieurs parties avec, dans un premier temps, le développement des problématiques liées aux étapes de fonderie, suivi dans un second temps par la présentation des procédés de mise en forme par martelage. Avant la frappe qui vient terminer le processus de fabrication des monnaies, le traitement chimique du blanchiment sera également considéré.

Partie 1. Réalisation des alliages

Dans la chaîne de fabrication monétaire médiévale, ce sont les opérations de fonderie qui exigent les technologies les plus performantes, dans la mesure où elles impliquent la mise en œuvre de hautes températures. Il faut par exemple dépasser 1080 °C pour commencer à fondre le cuivre qui est, parmi les trois métaux monnayés, celui qui a le plus haut point de fusion[490]. Il est donc nécessaire de maîtriser la technologie des fours devant atteindre et maintenir la chaleur indispensable à la fonte des métaux. Les contenants dans lesquels sont fondus les alliages monétaires doivent également être capables de résister aux très hautes températures entretenues dans les fourneaux.

La fabrication de monnaies demande aussi une plus grande dans les qualités requises pour les structures et le matériel utilisés. Le travail des métaux précieux dans le monnayage doit minimiser les pertes accidentelles entraînées par l'utilisation de matériaux inadaptés. Ces pertes ont en effet des conséquences économiques autrement plus importantes dans le cadre monétaire que dans une métallurgie d'alliages non précieux. C'est notamment la même logique qui, selon les sources monétaires, impose que les volumes d'alliages fondus soient volontairement plus restreints[491].

[490] Gale W. F. *et al.*, eds., *Smithells metals reference book*, *op. cit.*, p. **14**-10.
[491] cf. *supra*, p. 80.

L'étude du matériel archéologique rassemblé permet de considérer plusieurs aspects de la fonderie monétaire. Dans une première partie, la question de la fonte des métaux sera abordée à partir de la reconstitution d'un four mis au jour lors de fouilles de l'atelier monétaire de La Rochelle. Dans une seconde, les caractéristiques de céramiques monétaires seront proposées grâce à l'étude du *corpus* découvert à Montreuil-Bonnin. L'homogénéité globale de cet ensemble de fragments de creusets ainsi que le très grand nombre d'échantillons qui le composent favorise la proposition d'une description très précise de creusets monétaires, à partir d'une approche statistique. Enfin, la question des matières premières utilisées pour le monnayage royal sera discutée à partir de l'analyse du *corpus* métallique de La Rochelle.

I. Le four en trou de serrure de l'atelier monétaire de La Rochelle

Lors des fouilles de l'atelier monétaire royal de La Rochelle, plusieurs structures métallurgiques ont été mises en évidence[492]. Elles appartiennent toutes aux niveaux les plus anciens. Ces dernières définissent d'après les archéologues, la fonderie de la fabrique de monnaies en activité de la fin du XIV^e^ à la fin du XV^e^ siècle. Au terme de cette période, l'espace de travail est réorganisé et les fours déplacés dans une zone se situant en dehors du périmètre d'intervention des travaux archéologiques.

L'une des structures métallurgiques est particulièrement intéressante pour notre propos. Il s'agit du four en trou de serrure. En effet, il recèle de nombreuses informations dans la mesure où c'est l'un des fourneaux les mieux conservés. De plus, il est tout à fait comparable aux descriptions des fourneaux monétaires que donne J. Boizard dans son traité. Enfin, la découverte dans son cendrier de monnaies partiellement refondues, a permis de dater précisément son fonctionnement de la fin du XIV^e^ au premier quart du XV^e^ siècle[493].

La principale question que suggère la découverte d'un tel four, est évidemment son fonctionnement, cette structure présentant les caractéristiques d'un fourneau en ventilation naturelle. D'autre part, quelles sont ses capacités de fonte ? Quelle est par exemple la quantité de métal qui peut être fondue en une journée de travail ? Et quel est finalement le volume de charbon consommé ? C'est

[492] cf. Monnayage royal : La Rochelle (Charente-Maritime) : Les fouilles, p. 131.
[493] Bocquet A. *et al.*, Les fouilles du second..., *op. cit.*, p. 237-240.
Bocquet A. *et al.*, L'hôtel de la Monnaie..., *op. cit.*, p. 39-42.

notamment par une approche expérimentale qu'il est possible de répondre à de telles problématiques. C'est d'ailleurs cette démarche appliquée qui a été retenue pour appréhender le four en trou de serrure de la fonderie du second atelier monétaire de La Rochelle.

La reconstitution a été mise en œuvre en 2007 sur la plate-forme paléométallurgique des Mines des Rois Francs à Melle (79). Elle entre dans le cadre d'un Programme Collectif de Recherche sur les expérimentations métallurgiques, dirigé par F. Téreygeol[494].

La démarche proposée s'est appuyée sur une reconstruction du fourneau à partir des différentes données collectées lors des fouilles de la place de Verdun. La structure a ensuite été utilisée pour réaliser un grand nombre de fontes de métal afin de relever les différents paramètres de son fonctionnement qui seront développés et discutés plus loin.

Cette expérimentation a été couplée avec celle proposée par le numismate T. Faucher[495]. Dans une réflexion sur les techniques de monnayage antique, ce chercheur avait besoin de produire par une technique de moulage, un très grand nombre de flans d'argent pur. Compte tenu du coût de ce métal, sa démarche n'a pu être envisagée que par la refonte systématique de l'argent ayant été utilisé dans son expérimentation. Cette configuration a justifié le fonctionnement de la reconstitution du four en trou de serrure sur une période d'un mois, presque quotidiennement et de façon continue. Toutefois, cette organisation a également eu des conséquences sur le déroulement des fontes. Notamment sur la disponibilité du métal à fondre qui ne pouvait être refondu qu'après avoir été préalablement traité dans l'expérimentation numismatique associée. Ces manques de matière à fondre devront être pris en compte dans les futures discussions car ils impliquent une diminution globale de l'efficacité du four qui ne doit pas être imputée à ce dernier.

Dans un premier temps, il n'a pas été envisagé de reconstituer ce four à l'identique. Les dimensions du fourneau de La Rochelle se rapportant à une production de masse, le fonctionnement d'une telle structure sur une longue période était difficilement envisageable. C'est pourquoi, les problématiques liées à son fonctionnement ont été appréhendées à partir d'une structure de plus petite

[494] Faucher T. *et al.*, *Recréation d'un atelier monétaire antique : frappe monétaire et usure des coins*, PCR Paléométallurgies et expérimentations : Recherches sur les chaines de production des métaux aux périodes anciennes, sous la direction de F. Téreygeol, 2007, p. 94-72.

[495] Faucher T., *L'atelier monétaire d'Alexandrie sous les Lagides : problèmes techniques et stylistiques*, Thèse de doctorat d'Histoire de l'Université Paris-Sorbonne, Paris IV, Paris, 2006, 551 p.

dimension. Alors que le diamètre interne du cendrier du four de La Rochelle mesure près de 1,3 m, celui du fourneau expérimental a été fixé à seulement 50 cm. C'est à partir de cette dimension qu'ont ensuite été définies les autres dimensions de la structure en maintenant les rapports des proportions du modèle archéologique. Enfin, bien que la fouille de l'atelier rende compte de données sur l'emprise au sol du four, il n'en va pas de même pour l'élévation totale et notamment celle du foyer. Celle-ci a du être supposée pour la reconstitution expérimentale. Toutefois, ce paramètre n'est pas difficile à proposer car il dépend de la taille des creusets utilisés. La hauteur du foyer doit seulement garantir que ces derniers puissent y être complètement recouverts de charbon.

En ce qui concerne les capacités mises en évidence à partir de la reconstitution, il faut en revanche reconnaître qu'elles ne peuvent pas être facilement extrapolées à la structure originale. Le changement d'échelle implique la modification de nombreux paramètres dont les variations ne sont pas obligatoirement proportionnelles ce qui complique les estimations. D'un autre côté, les informations extraites du fonctionnement de la petite structure constituent tout de même des données basses utilisables dans une estimation *a minima* des volumes que peut fondre le fourneau de La Rochelle.

A. Construction du four

La reconstitution du four en trou de serrure a été mise en œuvre dans un espace extérieur. Une telle situation est normalement peu favorable pour les pertes thermiques globales de la structure ainsi que lors des coulées. En effet, celles-ci ne pouvant se faire à l'abri des courants d'air, le métal refroidit plus rapidement durant l'opération[496]. Dans le cadre de la fonte d'alliage, il sera vu qu'un refroidissement accéléré au cours d'une coulée peut être la cause d'une modification de la composition du métal fondu. Toutefois, un tel phénomène n'intervient pas dans une seule réflexion sur le fonctionnement du four. D'autant qu'il s'agit ici de fontes d'argent pur dont le refroidissement lors d'une coulée n'a évidemment pas d'incidence sur la composition du métal et n'entraînera qu'une solidification prématurée de ce dernier.

En revanche, bien que la structure ait pu être protégée par une bâche en cas de pluie, certaines expérimentations ont tout de même dû être interrompues lorsque les conditions devenaient trop mauvaises. La raison est, en premier lieu, le risque

[496] « de bien fermer toutes les portes et fenestres de la fonderie dans le tems que l'on coule, pour que l'air [...] ne donne pas sur la matière, ce qui pouroit la congeler, et la rendre pour lors difficile à fondre..., ».
Anonyme, *Mémoire sur la fabrication..., op. cit.*, chapitre 3.

possible de projections de métal liquide lors des coulées, celles-ci résultant d'un contact du bain en fusion avec de l'eau.

La construction s'est organisée sur un jour avec 3 personnes. Une fosse ayant la forme générale d'un trou de serrure a été creusée (Figure 76). Les dimensions de 1,90 m pour la longueur, de 0,8 m pour la largeur ainsi que la profondeur de 0,45 m fixent le volume final du four.

Figure 76 - Fosse initiale du four.

Figure 77 - Le four en trou de serrure.

Du sable a été disposé à des fins de fondation dans la partie circulaire correspondant au cendrier. Dans la mesure où le pavement dans le four de La Rochelle avait a priori pour finalité principale de faciliter le décendrage du cendrier ainsi que la récupération des métaux perdus dans le foyer, celui-ci n'a pas été reproduit. Dans la fosse, les parois du cendrier, de même que celles du couloir de décendrage ont ensuite été bâties en briques (Figure 78). La structure a finalement été scellée avec de l'argile.

Figure 78 - Le cendrier.

Figure 79 - Pose de la sole sur le cendrier.

La découverte, dans le cendrier du four de La Rochelle, de monnaies dispersées dans le foyer à la suite d'une perte lors d'une refonte atteste que la sole du four était percée. Il s'agit toutefois de l'hypothèse la plus probable car aucun vestige d'une telle structure n'a été découvert.

Lors de la reconstitution, il a été décidé, pour des raisons notamment économiques, d'utiliser une sole de céramique (Figure 79). Pour prévenir l'affaissement de cette dernière suite à sa fissuration, une colonne de soutènement en brique a tout de même été élevée au milieu du cendrier (Figure 78). Aucun indice d'une telle précaution n'est observable dans la structure archéologique. Or, avec un foyer d'1,3 m de diamètre, l'utilisation d'une si grande sole de céramique sans disposition particulière apparaît être une entreprise trop risquée par rapport aux précautions normalement prises lors du travail des métaux précieux dans les ateliers monétaires[497]. Il faut voir dans cette constatation, la démonstration que la sole du four monétaire était une grille de fer comme celle décrite par J. Boizard dans son traité[498]. Ce matériau a des caractéristiques mécaniques suffisantes pour qu'un soubassement se révèle inutile, même à titre préventif.

Une fois la colonne centrale de soutien érigée, la sole vient reposer au niveau du sol sur les murs de briques du cendrier (Figure 79). Cette seule pièce de céramique soumise à des températures élevées doit conserver des caractéristiques mécaniques suffisantes pour soutenir le foyer et les creusets remplis de métal. Il s'agit d'un organe critique du four qu'il est indispensable de préparer avec soin. Dans le cadre de cette reconstitution, la sole a été élaborée par le céramiste F. Peyrat dans une argile particulièrement réfractaire. Cette pièce céramique préalablement cuite, de 60 cm de diamètre pour 5 cm d'épaisseur, est percée de trente orifices de 5 cm de diamètre répartis selon trois cercles concentriques. Cette répartition a du être supposée puisqu'aucun vestige d'une telle structure n'a pu être découvert lors des fouilles de La Rochelle. L'organisation, le nombre et le diamètre des ouvertures doivent garantir différents paramètres. Dans un premier temps, les percements ne peuvent être trop nombreux dans la mesure où ils fragilisent la sole. Par ailleurs, ils doivent d'un côté garantir l'évacuation des cendres et des petites braises du foyer vers le cendrier, et d'un autre, la circulation des flux d'air et d'autre part il est indispensable qu'ils ne soient pas trop restreints afin qu'ils ne se bouchent pas durant les chauffes. Compte tenu des résultats expérimentaux présentés plus loin, le compromis retenu ici a satisfait aux différents critères.

[497] Il suffit de rappeler que les creusets monétaires sont, par précaution, moins remplis que leur capacité maximale, les moindres projections métalliques sont normalement récupérées, et les déchets retraités pour en extraire leurs métaux.
[498] Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 69.

Figure 80 - Détail de la construction du foyer.

Figure 81 - Chappe d'argile.

C'est autour de la sole qu'ont ensuite été élevées les parois en brique du foyer (Figure 80). La taille des creusets utilisés lors des expérimentations étant comprise entre 13 et 20 cm, la hauteur du foyer a été fixée à 25 cm afin que les formes les plus grandes soient suffisamment recouvertes de charbon durant le fonctionnement du four. Les briques ont été disposées en quinconce (Figure 80) et les vides bouchés par un revêtement d'argile (Figure 81). Le toit du couloir de décendrage est fait de brique et d'une plaque de fer. La structure est ensuite scellée par une couverte de terre (Figure 77).

Finalement, le diamètre du foyer a été diminué par un ajout d'une rangée supplémentaire de briques dans le foyer. Le volume occupé par les deux creusets nécessaires aux expérimentations n'occupait pas tout l'espace initialement défini. Le plan de la structure définitive est présenté ci-dessous (Figure 82).

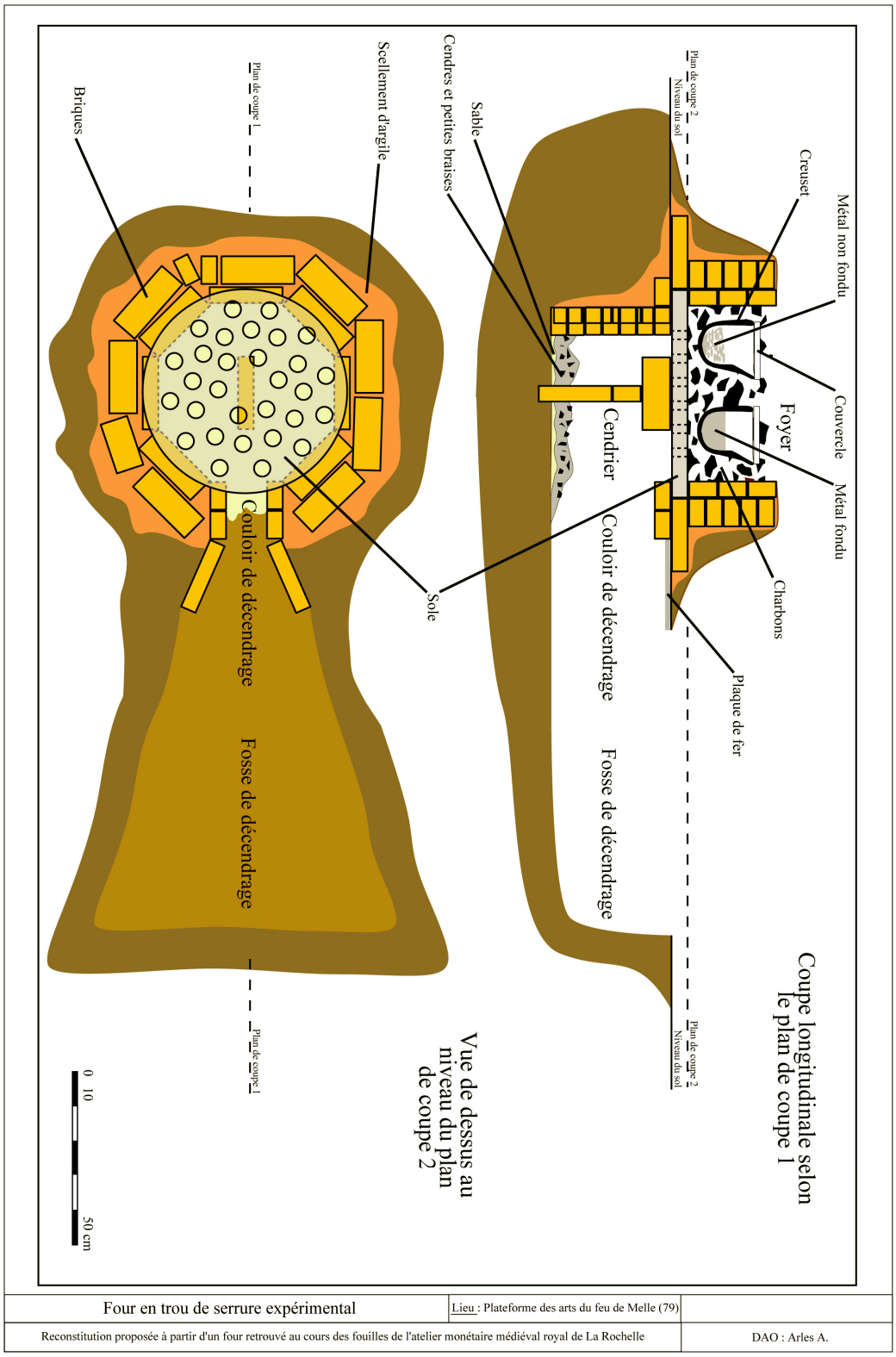


Figure 82 - Reconstitution expérimentale.

B. Mise en chauffe et conduite du four

Avant décrire la conduite expérimentale du four, il est important de décrire les précautions qui doivent être respectées lors de son préchauffage. Ces opérations ont pour but de prévenir les chocs thermiques dans le fourneau car ils le fragilisent et détériorent la sole qui en est l'organe principal. Le chauffage préliminaire est en outre précédé d'une phase de séchage suivant l'état initial du four. Avant son premier fonctionnement mais en particulier après un arrêt prolongé, il est nécessaire d'éliminer l'humidité dans la structure parce qu'elle entraînerait des dégradations en cas de chauffage trop rapide.

1 - Le séchage du four

Dans la mesure où le four a été construit dans une fosse creusée dans le sol et qu'une partie de sa structure a été consolidée avec de l'argile humide, il était indispensable de le sécher avant toute utilisation. Cette opération s'effectue selon un protocole particulier qui est également mis en œuvre en cas d'arrêt prolongé du chauffage du four et en particulier dans le cadre des expérimentations suite à des intempéries[499].

Le principe de cette phase de séchage est de ne jamais chauffer trop rapidement la structure. La démarche consiste à introduire progressivement un feu jusque dans le cendrier. Un feu est dans un premier temps allumé à l'entrée du couloir de décendrage. Le tirage du four aspire ensuite les gaz chauds vers le foyer. La température de celui-ci augmentant lentement, le feu est progressivement introduit dans le cendrier. C'est seulement à cet instant qu'une combustion utile est volontairement mise en œuvre dans le cendrier. En marche normale, elle est située dans la partie supérieure, le cendrier ne collecte que les braises passant à travers la sole.

2 - Le préchauffage du four

Même lorsque le four est déjà sec après une utilisation récente[500], il doit avant toute utilisation être réchauffé progressivement jusqu'à sa température de travail. Un tel protocole garantit notamment que la sole passe lentement le palier de

[499] Il faut rappeler que le four a été construit dans un espace extérieur.

[500] Compte tenu de sa structure et des températures en jeu, le four peut rester chaud d'un jour sur l'autre, d'autant plus qu'étant situé à l'extérieur, il a été décidé d'obturer le foyer avec une couverte de laine minérale lors des périodes de non utilisation. Dans la mesure où la structure de l'atelier de La Rochelle est plus massive et qu'elle se situe dans la pièce d'une fonderie, elle peut rester chaude entre les utilisations quotidiennes.

573 °C. En effet, à cette température, les grains de quartz qu'elle contient changent de forme cristalline, de la structure α vers la structure β, avec une augmentation de volume[501]. La variation de la taille des cristaux est à l'origine de contraintes internes dans la sole. Si la transition est trop rapide, elle peut entraîner une rupture de la céramique. Ce palier à franchir est connu des céramistes sous le nom de *point quartz*.

Une première opération consiste à nettoyer le four (Figure 83). Une partie des braises et des cendres qui se trouvent dans le cendrier doivent être retirées par le couloir de décendrage. Toutes les braises ne sont cependant pas éliminées, il faut veiller à en laisser une couche afin de maintenir le four chaud et de préchauffer l'air qui arrive du couloir de décendrage vers le foyer.

La fouille des différents résidus de combustion collectés, est l'occasion de récupérer les métaux qui ont été perdus dans le foyer et tombés dans le cendrier.

Figure 83 - Sole après nettoyage.

Figure 84 - Chauffage de la sole.

Figure 85 - Disposition des creusets.

Afin de chauffer lentement la sole, toujours pour limiter les contraintes internes, des gros charbons sont placés sur ses orifices. En les recouvrant de braise, ils vont progressivement permettre à la sole de passer le point quartz (Figure 84). Une fois celui-ci atteint, le four est chargé en recevant les creusets parallèlement à un ajout de charbon supplémentaire.

Les creusets contenant le métal à fondre, sont placés sur le lit de charbon chaud (Figure 85). Il faut veiller à ne pas trop les rapprocher entre eux et à les éloigner des parois du foyer. Pour éviter qu'ils ne basculent, ils sont calés avec des gros charbons. Si les creusets utilisés pour les fontes sont en céramique[502], il est en outre nécessaire de leur faire passer le point quartz sans rupture et donc de les chauffer progressivement.

[501] Sorrell C. A. *et al.*, Thermal expansion and the high-low transformation in quartz, *Journal of Applied Crystallography*, vol. 7, n° 5, 1974, p. 568-573.

[502] Lors des expérimentations, il a été décidé de travailler avec des creusets modernes en plombagine. Ils ont permis de réaliser un grand nombre de fontes sans trop se détériorer.

Quand les creusets sont chauds, ils sont fermés par des couvercles[503] qui facilitent la montée en température (Figure 86). Ils empêchent l'accumulation de charbon dans les céramiques car, par la suite, ils peuvent gêner les coulées en tombant sur les moules. Lorsque les couvercles sont posés, le four est rempli de charbon jusqu'à complètement recouvrir les creusets (Figure 87).

Figure 86 - Couvercle sur les creusets.

Figure 87 - Four en chauffe.

Durant la période de préchauffage, il faut régulièrement ajouter du charbon afin de toujours maintenir les creusets entourés de combustible. La structure du four étant initialement plus froide que lors de son fonctionnement normal, il y a une période préliminaire durant laquelle la fonte d'une certaine quantité de métal sera plus longue, car une partie de l'énergie de combustion du charbon sera utilisée à chauffer le four.

3 - La conduite du four

Après la période de préchauffage, la conduite du four est relativement simple. Il faut rappeler ici qu'il s'agit d'un fourneau en ventilation naturelle. Bien qu'il soit possible de contrôler l'arrivée d'air dans le foyer, il n'y a en revanche aucun besoin d'une intervention humaine pour imposer sa circulation qui entretient la combustion du charbon. Celle-ci est garantie par le tirage du four, engendré grâce à l'architecture de ce type de structure. Les courants d'air s'organisent naturellement à partir des différences de températures entre chacune des zones du four. L'air « froid[504] » pénètre par le couloir de décendrage, arrive dans le cendrier où il commence à se réchauffer avec les braises qui sont tombées du foyer à travers la sole. Il passe ensuite par les trous de cette dernière vers le foyer pour participer à la réaction exothermique de combustion du charbon. En définitive, plus il y a d'air qui circule dans la zone de combustion, plus la température de chauffe est importante.

[503] Lors des expérimentations, il s'agissait de couvercles constitués de plombagine.
[504] A température ambiante, il peut être considéré comme froid par rapport à la température qu'il prend à l'intérieur du four.

Les principales interventions dans la conduite du four se résument donc à un entretien régulier du foyer afin de maintenir et favoriser les flux d'air. Le combustible ne doit pas être trop compact. Une démarche relativement simple consiste à ajouter régulièrement du charbon de plus gros calibre dans la zone de combustion[505].

D'un autre côté, il peut être intéressant de limiter la circulation d'air dans le foyer, celle-ci étant corrélée à la consommation de charbon. Or, les températures de fontes varient en fonction des types d'alliages travaillés. Une partie des réglages du four consiste dans ce cas à trouver un équilibre entre le volume de charbon utilisé, le temps et la température nécessaires à la fonte. A cette fin, il faut faire varier l'arrivée d'air dans le foyer en obturant plus ou moins le couloir de décendrage[506].

Les creusets employés dans ce type de four doivent présenter des morphologies facilitant leur réintroduction dans le foyer rempli de charbon, à la suite d'une coulée. Par conséquent, les poches de fonte avec des fonds globulaires sont particulièrement indiquées dans ce type de structure. En revanche, elles sont notablement moins stables et peuvent plus facilement se renverser. Suivant la combustion du charbon, il se crée parfois des vides importants dans la zone de combustion favorisant ensuite le basculement des creusets. C'est pourquoi, il est important pour les fondeurs de toujours surveiller le foyer du four au cours des fontes. C'est également pour des raisons de stabilité qu'il est indispensable de ne pas trop remplir les creusets car il est difficile de les maintenir parfaitement droits durant les chauffes.

Enfin, il faut aussi régulièrement surveiller le cendrier afin qu'il ne se forme pas de bouchons sous la sole par accumulation de braises et de cendres. La conséquence de l'interruption locale des flux d'air, est la formation d'un point froid dans le foyer, entraînant un refroidissement. Or si un bain de métal fondu voit sa température trop diminuer, celui-ci prend en masse. La refonte est par la suite plus difficile compte tenu de la nouvelle géométrie du matériau.

[505] A cette fin, un tri du combustible en début d'expérimentation a été mis en œuvre afin de sélectionner des tailles de charbon importantes qui ont été ajoutés ponctuellement au cours des chauffes. Cette sélection a également permis d'éliminer le *poussier* qui nuit à l'aération du foyer.
[506] Lors des expérimentations celui-ci a été obturé avec des briques.

C. Résultats expérimentaux

Les principales données collectées au cours des nombreuses fontes réalisées dans la reconstitution du four en trou de serrure, sont les quantités de métal fondu ainsi que le temps nécessaire à ces fontes. Elles permettent de discuter du rendement du fourneau. Quant aux quantités de charbon consommées, elles sont difficiles à relever. Leur évaluation pouvant perturber l'expérimentation, elles n'ont pas été systématiquement documentées.

Enfin, les paramètres annexes tels que le manque de matière à fondre et les intempéries ont été enregistrés afin d'en tenir compte dans l'évaluation de l'efficacité du fourneau.

Durant toute l'expérimentation, le four a fonctionné avec deux creusets dans le foyer. Ils contenaient en moyenne un kilogramme d'argent pur à fondre.

Réglages du four

Afin de présenter les paramètres qui peuvent être ajustés lors du fonctionnement du fourneau, il est particulièrement intéressant de s'appuyer sur les deux premières journées de fonctionnement (Figure 88 et Figure 89). Elles ont été l'occasion de définir les configurations optimales de conduite du four.

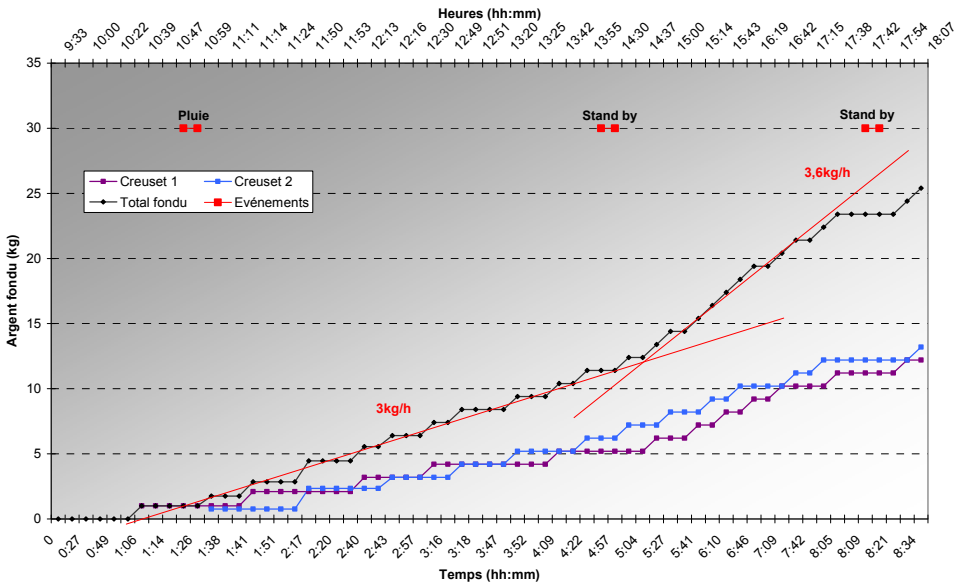


Figure 88 - Relevés de la première journée de fonte (20-07-07).

En marche normale, les relevés rendent compte de l'inertie du fourneau. Il en résulte une très grande régularité dans la fonte du métal. Il est possible de mettre en évidence des courbes de tendances globales très proches des relevés

instantanés. Les paliers observables sur les différentes courbes pourraient être interprétés comme une diminution de l'efficacité du four. Mais ils correspondent en définitive à des événements indépendants de son fonctionnement.

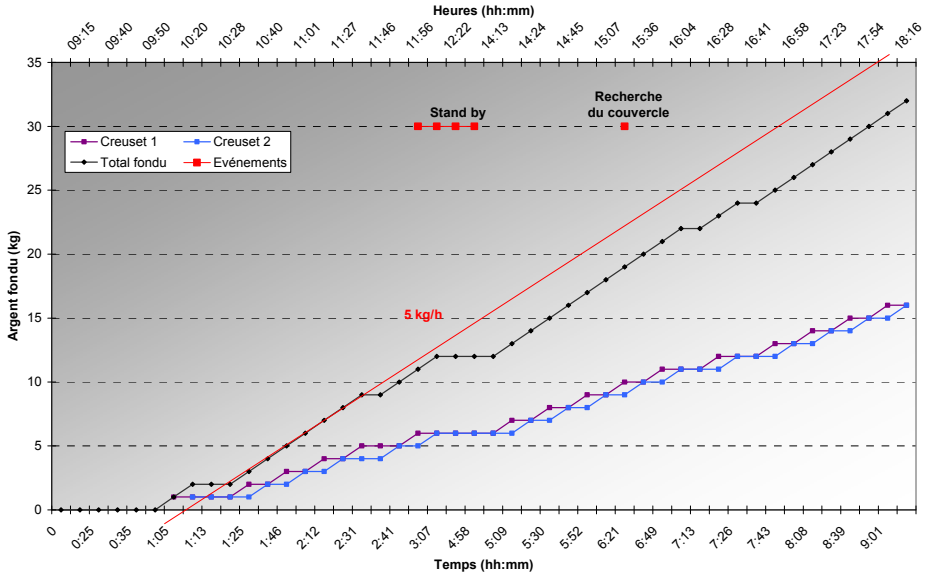


Figure 89 - Relevés de la seconde journée de fonte (21-07-07).

Lors des premières phases de fonctionnement, l'évaluation de l'instant optimum de réalisation des coulées s'est appuyée sur l'observation du métal fondu dans le creuset. Or, pour vérifier ainsi l'état du métal lors de sa fonte, il est indispensable pour pouvoir regarder dans la poche de fonte, de retirer le charbon et le couvercle qui la recouvrent. Une telle opération entraîne un refroidissement global qui retarde d'autant l'instant de la coulée. Elle n'est donc pas compatible avec la détermination de la durée minimale qui doit garantir la fonte d'une certaine masse de métal. C'est pourquoi, l'observation directe du bain de métal fondu a rapidement été remplacée par celle de la couleur du creuset dans le foyer. Celle-ci indique indirectement l'état du métal, tout en maintenant la poche de fonte dans le charbon. Il n'y a plus de risque de refroidissement de l'ensemble.

Finalement, avec un peu de pratique, il est simple de faire correspondre la couleur de creuset au cours d'une fonte avec l'état du métal qu'il contient. Il a été ensuite envisageable de déterminer la durée optimale nécessaire aux fontes.

La figure 88 qui rend compte du fonctionnement du four le premier jour, traduit l'augmentation de la vitesse de chauffe de 3 à 3,6 kg d'argent fondus en une heure. L'accélération a ensuite été poursuivie le second jour (Figure 89), pour atteindre 5 kg fondus par heure. Cette vitesse représente finalement une limite

haute. En effet, l'augmentation au cours de la cinquième journée jusqu'à 6 kg de métal fondu par heure a eu pour résultat la réalisation de mauvaises coulées.

La température de coulée ne correspond pas exactement à celle de la fusion du métal ou de l'alliage fondu. Lorsque la matière est fondue, il faut continuer de la chauffer jusqu'à la température optimale de coulée. Celle-ci doit garantir que tout le métal reste liquide durant son versement dans les moules. Dans le cadre de la fonte d'alliages, cela favorise l'homogénéité de la composition de la coulée. Prenons l'exemple monétaire de la coulée d'un alliage argent-cuivre : l'observation du diagramme de phase de cet alliage[507] met en évidence des domaines de température et de composition où une phase liquide est en équilibre avec une phase solidifiée de composition différente. Lors d'une coulée, si la température du bain de métal diminue jusqu'à ce que le mélange toujours liquide se trouve dans l'un de ces intervalles, il en résulte une ségrégation au sein du bain. Celle-ci modifie progressivement la composition de la coulée. Sans que les causes en soient connues, ce phénomène se trouve déjà décrit dans le *Mémoire sur la fabrication des sols de billon...*, dans une description des opérations de fonderie. D'ailleurs, les fondeurs monétaires l'ont certainement constaté rapidement dans la mesure où les contrôles du titre en métal précieux des alliages monnayés sont nombreux.

Finalement, la température de coulée n'est pas une constante. Elle dépend de nombreux paramètres dont les principaux sont le lieu où sont réalisées les coulées[508], le volume de métal fondu ainsi que le type de creuset utilisé. Lors de la cinquième journée de fonte, la vitesse de 6 kg d'argent fondus par heure était suffisante pour fondre le métal mais pas assez pour couler la totalité du volume travaillé sans le chauffer de nouveau.

Sachant, que le four peut fondre au maximum autour de 5 kg d'argent par heure, en travaillant avec deux creusets simultanément dans le foyer, il faut environ 24 minutes pour fondre un kilogramme de métal. Il a finalement été décidé d'organiser la coulée de chaque creuset toutes les vingt minutes. En décalant chacune des fontes dans le temps, il était possible d'obtenir une coulée toutes les dix minutes. Un rythme si important laisse peu de temps pour les opérations annexes telles que l'entretien du foyer et la préparation des fontes qui comprend notamment celle des moules. Il apparaît ici que la capacité de fonte du four est finalement supérieure à celle des expérimentateurs qui le font fonctionner. Ces

[507] cf. Annexe G.
[508] Suivant l'aération de ce dernier, le refroidissement du métal peut être plus rapide. Cela justifie que des précautions soient prises pour minimiser les courants d'air lors des coulées.

derniers doivent parfois décider de limiter sa vitesse de fonte, en diminuant l'arrivée d'air pour espacer les coulées.

La consommation de charbon

Dans le cadre du fonctionnement du four en trou de serrure, la gestion du charbon est le paramètre principal. Il a en effet été vu que la taille du combustible intervenait dans l'efficacité de la structure métallurgique. Par ailleurs, cet élément intervient dans le coût de fonctionnement du fourneau. Il constitue une des dépenses du maître de l'atelier[509]. C'est pourquoi, il est intéressant de connaître la consommation de combustible nécessaire à la fonte d'une certaine masse de métal.

La figure 90 présente le volume de charbon utilisé lors des deux premiers jours de fonctionnement. En effet, une quantification massique, bien que plus précise, demandant une gestion préjudiciable au déroulement de l'expérimentation, il a été décidé de recourir à une estimation volumique à partir du nombre de sacs de charbon consommés. Ces derniers équivalents à un volume de 60 litres de combustible justifient que les relevés ne soient pas continus. En définitive, chaque palier correspond à la combustion d'un sac de charbon[510]. D'un autre côté, une incertitude est introduite par le tri du charbon, préalablement évoqué, qui intervient en amont de chaque chauffe. C'est pourquoi, l'évaluation de la consommation des plus gros fragments mis de côté et utilisés ponctuellement au cours du fonctionnement est difficile. Elle n'est considérée qu'*a posteriori*, par une correction finale du volume effectivement utilisé.

A partir de ces deux courbes, il apparaît, d'un point de vue général, qu'avec des paramètres d'aération similaires, définis par le degré d'ouverture du couloir de décendrage, la consommation en charbon est constante au cours des chauffes[511]. Les deux jours révèlent des consommations presque identiques pour des durées de fonctionnement voisines, soit 540 litres de charbon pour 510 à 555 minutes de chauffe. Compte tenu de ces constatations de régularité, il est envisageable

[509] Dans un ouvrage F. Dumas et M. Bompaire, il est présenté différentes dépenses liées à une émission monétaire à partir de l'étude d'un compte d'atelier. L'achat du charbon constitue 9,6 % des frais de fabrication. Il s'agit ici du combustible utilisé pour toutes les opérations du monnayage, toutefois les opérations de fonderie sont *a priori* les étapes du monnayage les plus consommatrices de combustible.
Bompaire M. *et al.*, *Numismatique médiévale..., op. cit.*, t. 7, p. 484.

[510] Le décalage entre les deux courbes est introduit par le relevé de la durée de combustion de 15 litres de charbon au début du premier jour de fonctionnement.

[511] Les paliers les plus importants correspondent à des périodes de veille du four. Elles sont indiquées par les événements reportés sur le graphique. Il s'agit, par exemple, des arrêts pendant le repas de midi ou par manque de métal à fondre.

d'estimer la consommation horaire de combustible pour ce four à partir de la durée totale d'activité et du volume globalement utilisé. Pour les deux journées, les fontes ont nécessité en moyenne la combustion d'environ 60 litres de charbon par heure. Il faut noter ici qu'avec des paramètres d'aération identiques entraînant une consommation de combustible constante, la vitesse de fonte varie tout de même selon la gestion des coulées.

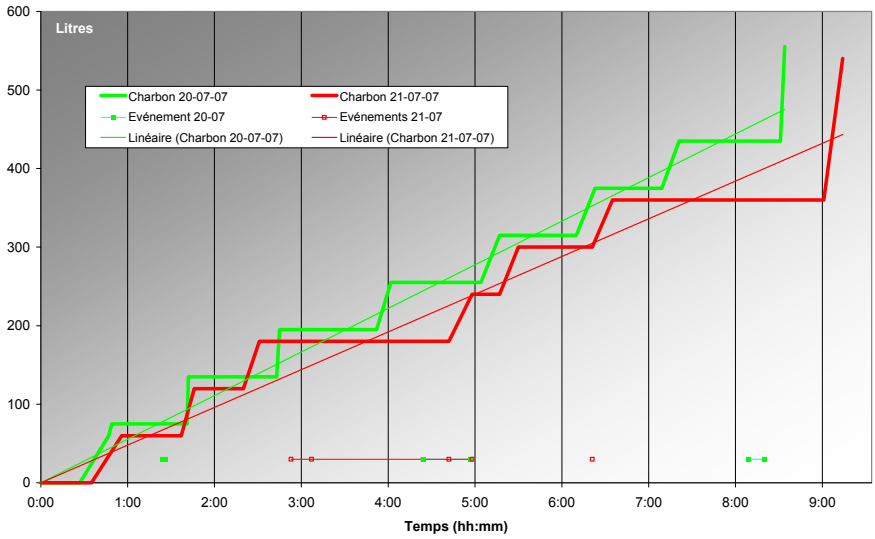


Figure 90 - Consommation de charbon lors des deux premières journées.

Finalement, à partir de l'estimation de la quantité de charbon consommée instantanément dans le foyer, il est possible de supposer le volume de combustible indispensable à la fonte d'une certaine masse d'argent. En effet, dans les conditions optimales de fonctionnement du four qui ont été précédemment définies comme permettant la fonte de 5 kg de métal précieux par heure, il faut 12 litres de charbon pour fondre 1 kg d'argent.

Paramètres généraux

Inscrit dans le cadre de cette expérimentation de longue durée, le four devait fonctionner pendant quatre semaines sans interruption, environ huit heures par jour. En pratique, suivant les intempéries et la quantité disponible de métal, le fourneau a pu être réellement en chauffe pendant 21 jours, entre le 20 juillet et le 9 août 2007, avec 18 jours de chauffes effectives. Finalement sur cette période, la structure totalise 81 heures 22 minutes de fonctionnement, soit l'équivalent de 3 jours 9 heures et 22 minutes de chauffe continue ou d'une dizaine de jours de travail avec 8 heures de chauffe quotidiennes. Suivant la disponibilité du métal à

fondre qui dépendait des opérations de la suite de la chaîne opératoire de l'expérimentation de frappe monétaire, la durée des chauffes journalières n'a pu être constante[512]. Au cours du fonctionnement le plus long, 30 kg d'argent ont été fondus en 7 heures 35 minutes, soit une moyenne de fonte de 4 kg/h.

Sur la durée de la reconstitution, 303 coulées ont été réalisées, équivalentes à une masse de 303 kg d'argent fondu. La figure 91 met en évidence l'efficacité du four, avec notamment la quantité maximum d'argent qu'il a été possible de fondre en une seule journée. Le deuxième jour d'essai a vu la fonte la plus importante avec 32 kg d'argent fondus. A partir de ces masses de métal quotidiennement traitées, il est finalement envisageable de calculer la vitesse moyenne de fonctionnement du four pour chacune des journées de travail (Figure 92). Il faut toutefois noter que ces estimations sont présentées après une correction du temps réellement effectif des chauffes. Les périodes de veilles du foyer[513] ne doivent pas être comptées ici dans les durées de travail.

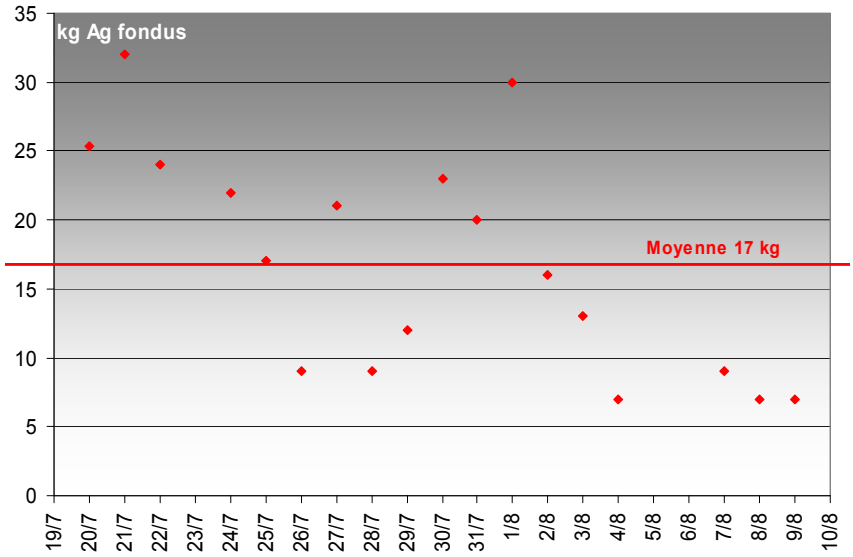


Figure 91 - Masse d'argent fondue quotidiennement.

Ces figures (Figure 91 et Figure 92) sont également le reflet de la chaîne opératoire globale de fabrication dans laquelle les fontes ne représentent qu'une partie. En effet, la chaîne opératoire globale propre à l'expérimentation proposée, a rendu compte que la masse de métal fondu quotidiennement dépend en grande partie des opérations de mise en forme qui suivent les coulées mais aussi de celles qui les précédent.

[512] Faucher T. *et al.*, *Recréation d'un atelier monétaire..., op. cit.*, p. 64-72.
[513] Elles correspondent notamment aux arrêts pendant les repas, par manque d'argent à fondre ou durant les intempéries…

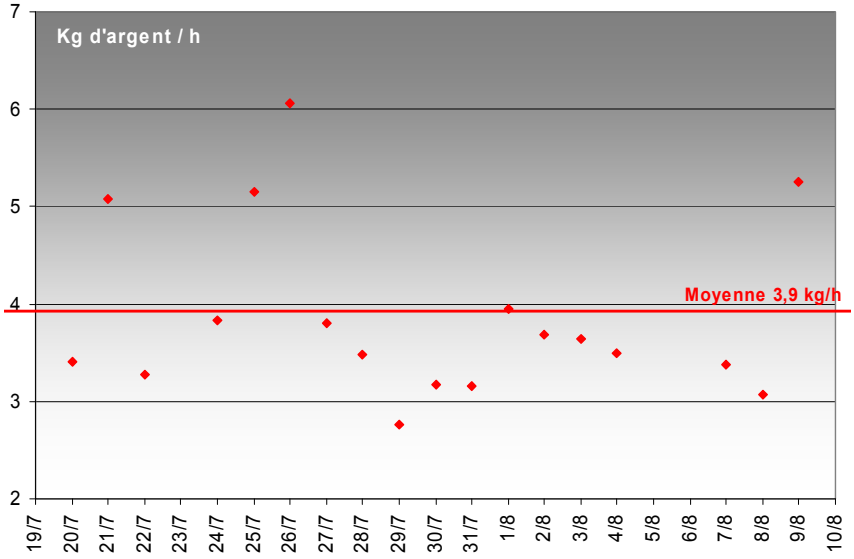


Figure 92 - Vitesse quotidienne moyenne de fonte.

D'un point de vue de la fabrication monétaire médiévale, les contraintes ne sont pas toutes identiques. En effet, le paramètre quasi instantané de disponibilité du métal à fondre constitue ici une variable propre à l'expérimentation puisque les refontes n'étaient possibles qu'après l'utilisation du métal pour les essais de frappe. Dans le cadre du monnayage, la gestion du métal pouvait *a priori* être évaluée à moins court terme, au moins à l'échelle d'une journée de travail. En revanche, la durée nécessaire à la fabrication des moules est une donnée à laquelle les ouvriers monétaires médiévaux se sont trouvés également confrontés dans la mesure où les lames étaient coulées dans des moules de sable qui demandent une préparation relativement longue avant chaque utilisation[514].

Ces expérimentations rappellent finalement l'influence des opérations annexes sur les opérations de fonderie. La quantité de métal qui peut être fondue dans un four ne doit pas représenter le seul étalon temporel dans une estimation des durées de travail au sein d'une fabrique monétaire. La comparaison entre les deux figures est finalement assez explicite car si la quantité de métal fondu quotidiennement diminue à partir du 1er août, la moyenne horaire reste en revanche dans la tendance des jours précédents. Or, c'est à partir du début du mois d'août, compte tenu de la diminution du personnel travaillant sur les expérimentations du four et de la fabrication monétaire, qu'il a été décidé de mettre en place une organisation différente des opérations. Initialement, le fonctionnement a pu être en continu avec la réalisation simultanée de toutes les étapes telles que la fabrication des moules, la

[514] « Pendant que les matières fondent dans les creusets, on prépare des moules pour les jeter en lames. ».
Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 70.

fonte et les différentes mises en forme. Celui-ci a dû être ensuite séquencé pour bénéficier d'une main d'œuvre suffisante, monopolisant à chaque fois toute l'équipe participant aux expérimentations.

Il apparaît que sur une journée de travail de 8 heures, il est possible de fondre dans la structure reconstituée un maximum d'une trentaine de kilogrammes d'argent en fonctionnant avec deux creusets accueillant chacun 1 kg de métal. Cependant, le fonctionnement moyen se situe plutôt entre 20 et 25 kilogrammes[515].

Sur la figure 93 sont exposés les suivis des 18 jours de chauffe du four. Ils définissent la gamme de conduite du four et la régularité de son fonctionnement. Si la figure 92 résume les vitesses quotidiennes de fonte, l'observation du comportement instantané du four montre que ces moyennes correspondent réellement à l'efficacité du four. En effet, les performances globales de cette structure de fonte sont finalement tout à fait comparables à son comportement instantané.

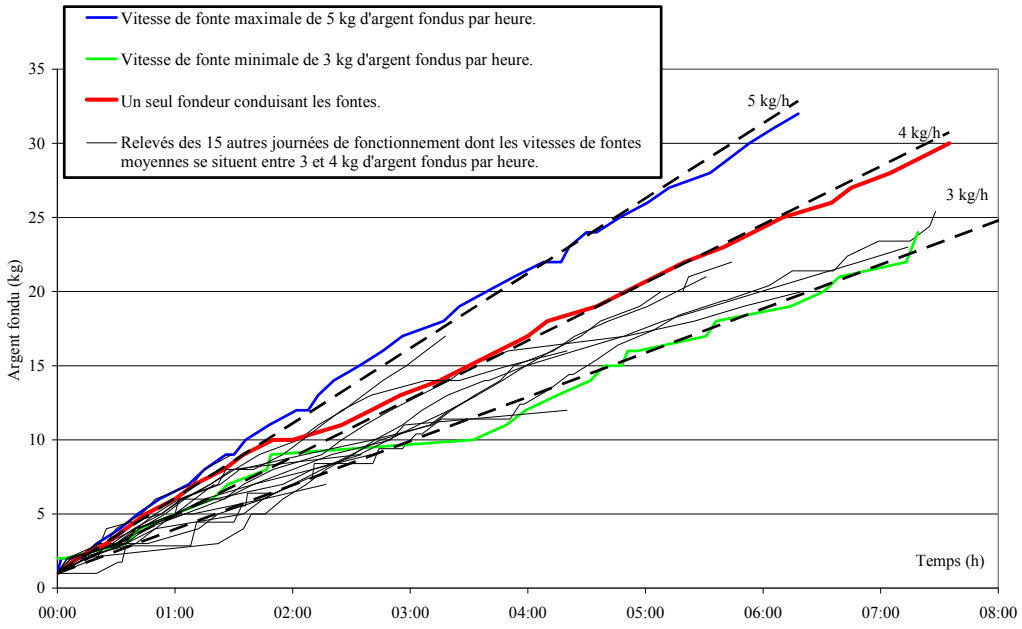


Figure 93 - Détail des 18 journées de fonctionnement du four.

Cette représentation rend aussi compte du travail des fondeurs. En effet, bien que les premiers essais aient montré qu'il est possible de conduire les fontes dans ce four à un rythme maximum de 5 kg d'argent fondus par heure, les tendances majoritaires sont plus proches de 4 kg, même si ponctuellement des accélérations sont observables. Ce rythme idéal plus lent n'est plus dicté par le four, mais

[515] Cette moyenne ne tient pas compte des journées où la diminution des expérimentateurs n'a pas permis un fonctionnement continu du four.

principalement par l'entretien du foyer qui consiste à maintenir son aération ainsi qu'à surveiller les creusets, notamment pour qu'ils ne basculent pas et qu'ils soient toujours entourés de charbon.

La journée du 1er août (Figure 93 : courbe verte) apparaît comme un bon exemple de ce rythme idéal. En effet, en raison de la diminution du nombre d'expérimentateurs, la conduite du four qui employait précédemment deux personnes, a, ce jour-là, occupé un seul fondeur. Si la cadence importante du début de journée s'est voulue calquée sur celle des journées précédentes, elle a rapidement été diminuée. L'alternance des coulées a été finalement stabilisée délibérément par l'opérateur autour de 3 kg d'argent fondus par heure toujours avec une très grande régularité.

D. Les apports de l'expérimentation

Cette expérimentation à grande échelle a en définitive mis en évidence le fonctionnement d'un four en trou de serrure en ventilation naturelle. De plus, les relevés des volumes fondus permettront d'aborder les problématiques liées à l'influence des opérations de fonderie en terme de productivité monétaire. Il faut cependant rappeler que le changement d'échelle par rapport à la structure découverte à La Rochelle requiert la prudence du point de vue des extrapolations.

Au-delà, de données concernant l'efficacité d'un tel four, cette reconstitution donne également des informations résultant de son fonctionnement.

Evolution de la structure

S'il est difficile de proposer des informations sur le comportement à très long terme de ce type de four puisqu'il n'a fonctionné que 18 jours lors des expérimentations, il est cependant possible de faire le bilan d'une utilisation conséquente. La sole du four est l'organe qui doit faire l'objet de la plus grande attention. Cette structure de céramique sur laquelle reposent les creusets, est soumise à des contraintes importantes à la fois mécaniques et thermiques. Or, même si celle utilisée lors de la reconstitution a été préparée en conséquence, il a été tout de même nécessaire de respecter une procédure lors de la mise en chauffe du fourneau[516] afin de minimiser les risques de rupture lors de cette étape critique.

A la fin des trois semaines de fonctionnement, le bilan de la résistance de la sole est tout à fait positif puisque malgré l'apparition de quelques fissures entre différents trous de chauffe (Figure 83), elle dispose encore d'une très bonne tenue

[516] cf. Le préchauffage du four, p. 277.

mécanique. Preuve en est, le pilier de soutènement placé en complément sous la pièce afin de la retenir en cas de rupture (Figure 82), n'est pas encore en charge.

Il a été vu que l'utilisation d'une sole de céramique n'est pas certaine dans le fourneau découvert à La Rochelle. La très grande dimension du foyer favorise plutôt l'hypothèse d'une structure équivalente en fer, comme celle décrite par J. Boizard dans son traité[517]. Ce matériau, dans la mesure où il est moins fragile que la terre cuite, est plus indiqué pour soutenir la masse du foyer et des creusets remplis de métal. Si le fer présente des propriétés mécaniques intéressantes pour être utilisé comme sole dans un four de fonte, qu'en est-il de son évolution à long terme dans les conditions difficiles maintenues dans ce type de fourneau ? En effet, compte tenu de l'organisation de flux d'air qui pénètrent par le couloir de décendrage et qui passent par le cendrier avant d'arriver dans le foyer en traversant la sole (Figure 82), celle-ci, par ailleurs portée à haute température, se trouve dans une zone très oxydante. C'est pourquoi, une structure de fer disposée dans un tel espace vieillit *a priori* prématurément au fur et à mesure des réactions de corrosion qu'elle subit[518]. En définitive, si le recours à une sole métallique n'oblige pas à prendre de précautions quant aux montées en température, il est quand même indispensable de surveiller régulièrement cet organe afin d'éviter les ruptures accidentelles en cours de chauffe.

Concernant la structure générale, l'évolution principale concerne la chape extérieure d'argile. Au cours des nombreuses manipulations, cette dernière se voit progressivement détériorée. Cependant, dans la mesure où elle intervient essentiellement d'un point de vue thermique et non structural, un simple rechapage régulier permet de réparer les dommages.

Globalement, le four n'a pas présenté d'avarie majeure au cours de son fonctionnement.

La conduite du four

Le fonctionnement de la reconstitution du four en trou de serrure fournit également des données sur l'organisation du travail au sein d'un atelier monétaire.

---

[517] « une grille de fer plat, en manière de croix..., ».
Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 68.

[518] L'utilisation lors des expérimentations d'un couvercle de fer lors de certaines fontes a permis d'observer un vieillissement accéléré de ce dernier qui s'est progressivement désagrégé avec la formation d'écailles d'oxydes de fer.
Une solution au probléme d'oxydation d'une sole de fer consiterait à la recouvrir d'une couche céramique. Cette sole de fer luttée serait alors protégée. Cependant, on ne trouve pas de descritpion d'un telle précaution dans les sources monétaires.

La réalisation d'essais sur de longues périodes est une démarche difficile mais très pertinente pour évaluer le besoin en personnel pour cette opération dans la chaîne opératoire de fabrication.

Dans un premier temps, compte tenu de la consommation de charbon et du temps que représente sa mise en chauffe[519], il faut admettre qu'il n'est pas rentable d'utiliser un four d'une si grande dimension pour fondre de petites quantités de métal. Ceci implique une certaine organisation au sein de l'atelier. Le fonctionnement est de deux types suivant la disponibilité en personnel et le rythme de production. Avec un nombre suffisant d'ouvriers, pour développer parallèlement les différentes étapes, la chaîne opératoire peut être organisée en continu. D'un autre côté, il est aussi envisageable qu'elle soit séquencée, une opération n'étant commencée que lorsque la précédente a produit une quantité suffisante de demi-produits. Dans ce cas, seule une partie du temps de mise en forme est dédié à la fonte, ce qui permet d'avoir un personnel moins important mais qui suppose néanmoins de disposer d'un certain stock de métal à fondre pour que les périodes de fonctionnement du four ne consomment pas du charbon inutilement.

Dans le cadre de la fabrication monétaire, les volumes de production ne constituent pas une constante, ils dépendent principalement des quantités de métal apportées aux hôtels de la monnaie pour être monnayées ainsi que des quotas imposés aux maîtres d'ateliers lors de la signature de leurs baux. Finalement seul un rythme de fabrication élevé impose un fonctionnement continu. Une telle affirmation n'est pas exceptionnelle puisqu'il est attesté que les ateliers monétaires pouvaient subir des périodes de chômage plus ou moins longues selon notamment la disponibilité des matières premières ainsi que du combustible[520].

Quel est le besoin en personnel nécessaire au fonctionnement du four ? Il a été vu précédemment qu'en suivant quelques règles, la conduite des chauffes n'est pas difficile. Elle demande néanmoins un contrôle constant pour éviter la mise en place de mauvaises circulations d'air, préjudiciables aux montées en température. De même, les creusets reposant sur le lit de charbon en combustion, il est

[519] Elle demande près d'une heure de chauffage. Pour le four découvert à La Rochelle, cette période devait être plus longue dans la mesure où il est deux fois plus grand.

[520] Spooner F. C., *L'économie mondiale et les frappes monétaires en France : 1493-1680*, Paris, Librairie Armand Colin, coll. « Monnaie - Prix - Conjecture », 1956, p. 102-107.
Bompaire M., Les cadences de production..., *op. cit.*, p. 579.
Bompaire M. *et al.*, *Numismatique médiévale..., op. cit.*, t. 7, p. 490.

indispensable de veiller constamment à ce qu'ils ne soient pas déséquilibrés par une combustion locale plus rapide créant des vides dans le foyer. D'autant que les fonds hémisphériques qui doivent faciliter le placement de ces derniers dans le charbon, diminuent d'un autre côté leur stabilité générale.

Lors des expérimentations, le paramètre de contrôle en continu du four a suggéré qu'il est intéressant d'employer deux opérateurs aux opérations de fonte. Cependant, la structure a tout de même pu être conduite par un seul fondeur en diminuant seulement les rythmes des coulées (Figure 93). En revanche, compte tenu de l'encombrement autour de la structure, il était inutile qu'elle fût entretenue par plus de deux fondeurs.

Dans le cadre de la conduite d'un four plus grand, comparable à celui mis au jour à La Rochelle, la question du nombre de fondeurs doit être discutée car le changement d'échelle n'implique pas obligatoirement une augmentation du personnel. Le principal paramètre à considérer est la taille des creusets. En effet, c'est en définitive le nombre de poches de fonte présentes dans le foyer qui modifie particulièrement la quantité de travail des fondeurs. Pour un même volume de métal fondu, les opérations de fonderie augmentent avec le nombre total des creusets utilisés, en multipliant les coulées. Finalement, à nombre de céramiques métallurgiques égal, la gestion des grosses structures est à peu près semblable à celle d'un fourneau plus petit.

Observations générales

Outre la collecte de données concernant le mode de fonctionnement ou le rendement d'un four en ventilation naturelle comparable à celui découvert dans l'atelier monétaire de La Rochelle, les expérimentations sont également l'occasion de rendre compte d'observations pratiques propres aux opérations de fonderie. Si leur caractère, d'un certain point de vue anecdotique, explique qu'elles ne soient peu, voire même pas du tout décrites dans les textes monétaires, elles sont cependant importantes dans notre discussion technique et archéologique.

Un premier point qu'il faut aborder, concerne la découverte de métal dans le cendrier du four lors de certaines des opérations quotidiennes de décendrage. Quelques-uns des résidus résultent de projections de métal dans le foyer, d'autres en revanche sont la conséquence de pertes accidentelles (Figure 94). Comme les florettes découvertes presque intactes dans le four fouillé à La Rochelle, ces échantillons ont globalement leur forme originelle. Ils constituent finalement une masse beaucoup plus importante que celle des projections.

Figure 94 - Argent destiné à la fonte retrouvé dans le cendrier lors des expérimentations.

Si la présence des florettes dans le cendrier du fourneau rochelais a été associée à une rupture de creuset ou à une perte lors d'un chargement, durant les expérimentations il n'y a pas eu de problème de fragmentation des creusets. Les résidus retrouvés lors de certains nettoyages du four reconstitué doivent principalement être rapprochés de la technique choisie pour l'introduction du métal à fondre dans le creuset.

Cette opération est particulièrement critique puisque le fonctionnement en continu du four implique que le remplissage des poches de fonte soit fait après les coulées, alors que les céramiques présentent encore des températures très élevées. De plus, le métal devant être fondu n'est pas nécessairement sous forme de lingots, les refontes de florettes de La Rochelle en sont la preuve. Il est d'ailleurs préférable, d'un point de vue des fontes, que le métal ne soit pas sous forme massive. Lorsqu'il est divisé, la fusion plus rapide des petits fragments favorise l'obtention d'un premier bain de métal augmentant les contacts et donc les échanges thermiques avec les morceaux encore solides qui fondent dans ce cas plus rapidement.

A priori, l'introduction de monnaies et de chutes métalliques dans un creuset chaud n'est pas simple. Durant l'expérimentation, les opérateurs ont été confrontés à ce problème puisqu'il s'agissait également de refontes de fragments métalliques. La technique de chargement qui est apparue être la plus simple, est décrite dans le

Traité des monoyes... de M. de Bettange, pour les essais de l'or et de l'argent[521]. Il y est recommandé de placer les métaux à analyser dans les creusets après les avoir enveloppés dans un paquet de plomb ou de papier. Ce dernier doit être cependant utilisé avec précaution car il peut, en brûlant prématurément, entraîner la perte des échantillons. Bien qu'il s'agisse ici d'une opération qui traite de petites quantités d'alliage, il a été envisagé de la transposer lors des expérimentations. C'est notamment ce choix qui explique les pertes dans le cendrier, justifiant ainsi la remarque de M. de Bettange sur les risques entraînés par une combustion prématurée du papier.

Si le recours à une bourse de papier est aujourd'hui assez simple, il ne représente pas une alternative systématiquement envisageable pour les époques plus anciennes. Dans le cadre de l'atelier monétaire de La Rochelle, les fouilles n'ont révélé aucun indice indiquant la méthode retenue pour introduire le métal à fondre dans les creusets. Finalement, il faut ici raisonner par analogie. Puisqu'il existe des descriptions de l'utilisation de grandes cuillères pour prélever dans les creusets les alliages fondus, pourquoi n'auraient-elles pas été également utilisées pour y placer les métaux avant leur fonte[522] ? S'il est impossible d'attester cette hypothèse, elle constitue l'alternative la plus simple à mettre en œuvre.

[521] « on y met avec une pincette pointue le petit paquet ou eft enveloppé la matière à essayer. » et « il met toutes les parties d'argent dans un morceau de feuille de plomb ou de papier..., »
De Bettange M., *Traité des monoyes..., op. cit.*, t. 1, p. 151 et 158.

[522] « on prend une cuillière dont le manche de six pieds de long est de bois par le bout et dont le cuilleron est de fer..., ».
Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 71.
« Les fondeurs [...] se servent de cuillières dont le manche est plus long que celuy des cuillières ordinaires ».
Anonyme, *Mémoire sur la fabrication..., op. cit.*, chapitre 4.

Figure 95 - Coulée à la pince avec un masque pour le visage, des gants et un tablier de cuir.

Enfin, la réalisation d'une expérimentation à grande échelle a aussi été l'occasion d'appréhender les conditions de travail associées au fonctionnement d'un four métallurgique d'une taille en rapport avec une production de masse.

C'est dans le *Mémoire sur la fabrication des sols de billon...*, que l'on trouve les principales descriptions de précautions mises en œuvre par les monétaires lors des fontes. Il est décrit que « *les fondeurs* […] *ont de grands chapeaux qui leur couvrent une partie du visage* » et qu'ils se servent d'outils présentant de longs manches. Ce compte rendu assez sommaire résume finalement bien les moyens de se prémunir des brûlures qui peuvent résulter du travail à proximité directe des zones de hautes températures associées au fonctionnement des fours de fonderie. Il est *a priori* évident d'utiliser des ustensiles tels que des pinces ou des ringards, pour éviter les contacts directs avec les sources chaudes. En revanche, les expérimentations permettent de comprendre l'importance de la prise en compte du rayonnement thermique produit par ces grandes structures. Or, le moyen de se protéger de ce dernier est dans un premier temps de s'éloigner du foyer en travaillant justement avec des ustensiles présentant de plus longs manches. Toutefois, dans la mesure où le recours à de tels outils diminue la précision du geste, il est parfois indispensable de se rapprocher du four pour intervenir dans la zone de chauffe. C'est pourquoi, il est dans ce cas nécessaire de couvrir les principales surfaces du corps exposées que sont les bras et le visage.

Lors des expérimentations, les fondeurs disposaient de gants de cuirs, de pinces et de ringards, mais également d'une visière protégeant leur visage des

rayonnements. De plus, en cas de projection de métal en fusion, ils étaient vêtus d'un tablier de cuir (Figure 95).

En conclusion, les apports de cette étude expérimentale à la discussion portant sur les techniques de monnayage médiévale se définissent sur plusieurs plans. Dans un premier temps, la démarche retenue a permis de mettre en évidence le fonctionnement d'un four en ventilation naturelle d'une structure identique à celui découvert lors des fouilles du second atelier monétaire de La Rochelle. De même qu'un fourneau de ce type permet de fondre les alliages utilisés dans la fabrication des monnaies. De plus, les nombreuses fontes réalisées définissent les capacités associées à un four des dimensions de celui reconstitué. Il est possible, lors d'un fonctionnement normal, de fondre entre cinq et six kilogrammes d'argent toutes les heures. Toutefois, il est également apparu que le rendement du fourneau n'est pas le seul paramètre à prendre en compte dans l'évaluation des quantités de métal qui peuvent être traitées sur une journée de travail. Dans une telle discussion, il est important de considérer les opérations annexes liées à la fonte des alliages. Ne serait-ce que la gestion du foyer qui doit être régulièrement organisée pour garantir son bon fonctionnement en ventilation naturelle, mais également la fabrication des moules qui sera développée plus loin. C'est pourquoi, le rythme des fontes doit parfois être artificiellement diminué par les fondeurs.

Enfin, la réalisation de ces expérimentations a également permis de rendre compte d'observations très pragmatiques associées au fonctionnement du four de grande dimension, mettant en œuvre des températures très élevées. C'est notamment ainsi qu'a été appréhendée la question des protections indispensables pour travailler avec de telles structures.

II. Les creusets de l'atelier monétaire de Montreuil-Bonnin

Les fouilles menées aux abords de la forteresse de Montreuil-Bonnin, ont mis au jour 414 fragments de céramiques caractéristiques d'une utilisation métallurgique[523]. Elles sont à rapprocher de deux creusets entiers et de trois tessons présentant des dépôts métalliques retrouvés au XIX^{e} siècle également à Montreuil-Bonnin. Le propos de cette étude est de révéler le lien potentiel entre ces deux *corpus* et de vérifier leurs possibles relations avec la fabrication monétaire qu'a connue Montreuil-Bonnin au Moyen Age. Si ces premières hypothèses peuvent être attestées, les informations collectées à la suite de cette étude, constitueront des données inédites sur les caractéristiques des creusets utilisés dans un monnayage médiéval.

Les fragments de creusets métallurgiques

En préalable à l'étude, le *corpus* a été classé selon des observations macroscopiques. Compte tenu du nombre important de fragments collectés, une telle démarche devait dans un premier temps rapprocher les individus les plus semblables et ainsi faciliter les remontages potentiels. D'autre part la mise en évidence de groupes typologiques participe également de la réflexion technique dans la mesure où les points communs relevés peuvent résulter de traitements particuliers. Les paramètres retenus dans ce classement sont principalement basés sur les types de pâte et les dégraissants utilisés dans la mise en forme des céramiques, ainsi que les couleurs des nombreuses vitrifications résultant de l'utilisation des creusets.

Les familles proposées sont au nombre de neuf auxquelles s'ajoute un groupe très restreint de céramiques inclassables :

- 01 : surface interne gris foncé.
- 02 : surface interne bordeaux.
- 03 : surface interne marron.
- 04 : surface blanche sans carbonisation ni vitrification.
- 05 : surface blanche et gros dégraissant.
- 06 : pâte bleue.

[523] cf. Monnayage officiel : Montreuil-Bonnin (Vienne) : Les fragments de creusets mis au jour lors des fouilles de 2006 et 2007, p. 239.

- 07 : pâte rose orangée.
- 08 : vitrification interne noire.
- 09 : surface blanche avec carbonisation ou vitrification.
- 10 : individu inclassable

Les quatre premiers groupes sont particulièrement significatifs, à la fois quant au nombre d'échantillons rassemblés mais aussi quant aux masses correspondantes (Figure 96 et Figure 97). Le paramètre de population seul décrit des groupes assez semblables pour chacun de ces quatre ensembles, avec cependant moins d'individus dans le troisième isolat (Fragments marron interne). Néanmoins, la répartition en masses des familles fait apparaître une différence. Les trois premières classes conservent les mêmes proportions les unes par rapport aux autres, alors que la quatrième (Fragments blancs), qui correspond aux fragments à surface blanche sans carbonisation, représente une masse plus importante. Cette variation s'explique par une taille moyenne plus importante des échantillons qui appartiennent à cette famille.

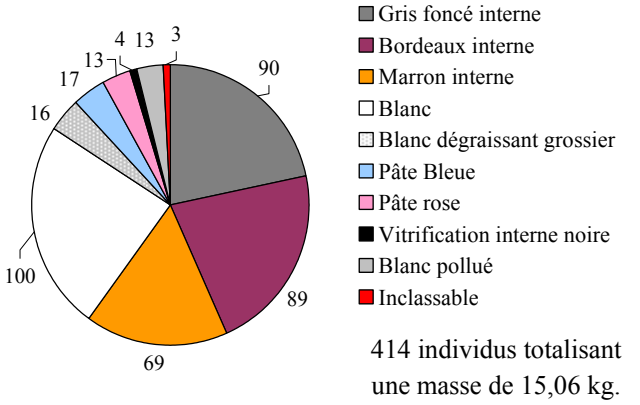


Figure 96 - Répartition en nombre du *corpus*.

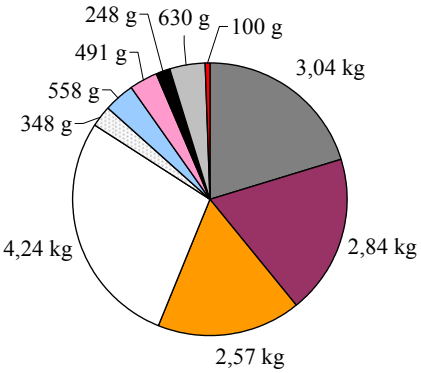


Figure 97 - Répartition en masse du *corpus*.

Le *corpus* étudié est assez homogène car statistiquement bien représenté par quatre grands groupes. Cette cohérence se voit renforcée par l'observation des pâtes céramiques utilisées. En effet, la très grande majorité des individus (83 % en nombre) présente une couleur de pâte blanche à gris clair et, pour la quasi-totalité des échantillons, le dégraissant employé se présente sous forme de grains de quartz de dimension pouvant atteindre les 2 mm. Cet ajout vise à améliorer les propriétés mécaniques[524] et thermiques de l'ensemble tout comme souvent l'addition de

[524] La dispersion de dégraissant dans une pâte céramique augmente la resistance mécanique de cette dernière. Les particules consituent des obstacles à la propagation des fissurations internes.

chamotte[525] à l'argile, même si cette dernière n'est jamais observable dans les fragments de Montreuil-Bonnin. De même, aucun des tessons ne montre l'utilisation de matière végétale mélangée à l'argile.

Au terme du classement, sept recollements ont été mis en évidence à partir des 414 fragments que compte le *corpus*. Ce nombre est moins important que ce que ne le laissait espérer le nombre élevé de tessons retrouvés, ainsi que l'homogénéité des groupes typologiques définis.

Tout en reconnaissant qu'il est envisageable que certaines recombinaisons aient été omises, cette possibilité ne justifie pas à elle seule un taux de remontage si faible. La découverte des échantillons dans des couches de sédiments remobilisés, explique également une certaine dispersion et un mélange des tessons au cours des opérations de nivellement. Toutefois, il ne faut pas négliger un second postulat lié aux opérations métallurgiques traitant de métaux précieux, visant notamment à la récupération de ces derniers et qui entraîne la destruction volontaire d'une partie des creusets. Cette hypothèse sera discutée par la suite à partir de données complémentaires.

Après la définition d'un premier classement du *corpus* à partir d'observations de surface, le relevé de la morphologie de chaque fragment permet de proposer une seconde typologie. Dans la collection des 414 fragments retrouvés, 97 présentent un bord, soit 23 % de la population totale. En préalable à la proposition d'une typologie, une caractérisation plus fine des profils révèle qu'ils appartiennent tous, exceptés deux individus, à des creusets différents. Chacun des profils individualisés correspond dans ce cas à une céramique entière. En tenant compte des trois fragments inclassables, la collection originelle représente un minimum de 99 creusets.

Une telle estimation aurait pu être comparée à la quantité de monnaies produites au sein de l'atelier. Toutefois, cette discussion ne peut être envisagée sans disposer d'un meilleur calage chronologique que les opérations de terrain n'ont pu fournir. Il est en effet impossible de préjuger de la période de fonctionnement de l'atelier métallurgique au cours de laquelle ont été utilisés les creusets à l'origine de ces fragments. De même, la durée de vie de ces céramiques et le nombre de fontes qu'elles ont pu accueillir, est un paramètre qu'il est encore difficile d'appréhender.

[525] Céramiques cuites broyées.

Parmi l'ensemble des 97 bords, treize présentent des ébauches de bec. Un unique exemplaire est entier. Il n'apparaît cependant pas comparable aux morphologies qui se retrouvent sur les ébauches. Moins bien marqué et n'offrant pas une symétrique axiale selon le canal de coulée, il aura tendance à guider le métal fondu préférentiellement sur le côté gauche lors du versement. De plus, l'intérieur n'est pas bien lissé et la présence d'un bourrelet de terre représente une gêne pour l'écoulement du liquide. Cet organe aurait rendu les coulées difficiles et, compte tenu de la propreté de sa surface, il a pu être mis au rebut sans même servir. Il ne sera pas pris en compte pour une description globale des creusets.

D'une façon générale, les morphologies des ébauches de bec indiquent une mise en œuvre sans ajout de matière, par une simple déformation des bords des céramiques.

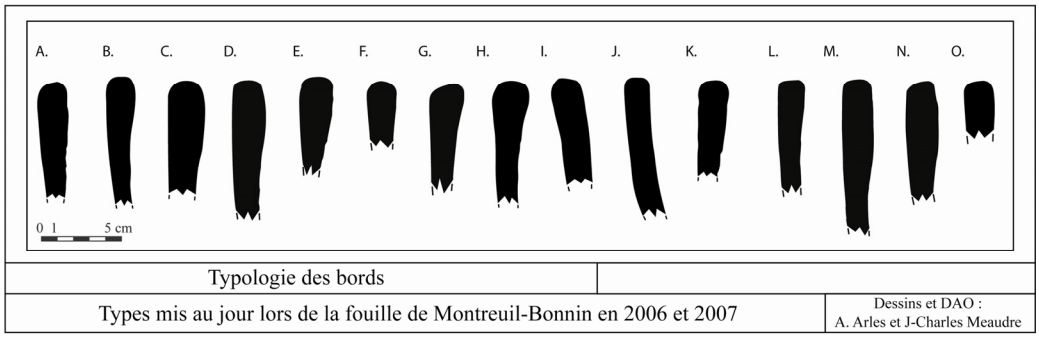


Figure 98 - 15 profils types de bords observés.

A partir de la centaine d'échantillons de bords mis au jour, plusieurs types de morphologies différentes se dégagent selon l'épaisseur des pâtes, les courbures générales et la nature des arêtes, ces dernières étant plus ou moins arrondies ou orthogonales. (Figure 98). La grande majorité des profils observés se traduit par une épaisseur de pâte plus importante au niveau des bords. La répartition des échantillons du corpus selon cette typologie (Figure 99) montre que certaines morphologies, notamment les groupes A, B, C, D, F, N et O, se retrouvent plus souvent.

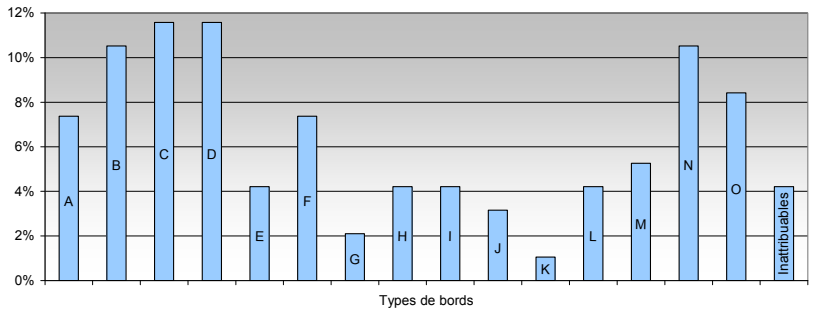


Figure 99 - Répartition des bords selon la typologie établie.

Ces profils majoritaires présentent des bords relativement massifs qui s'affinent au niveau de la panse des creusets. La mesure de l'épaisseur des tessons doit permettre de vérifier cette observation. Pour chaque fragment considéré, l'épaisseur ne peut être assimilée à une seule valeur car elle varie de près d'un centimètre chez certains individus. Dans ce cas, il était nécessaire de relever deux valeurs d'épaisseur de pâte, une maximale et une minimale pour chacun des échantillons. Toutefois, les données collectées ne peuvent pas non plus être directement reliées à la morphologie des creusets. Sur un tesson, il est souvent impossible d'affirmer que la mensuration relevée correspond à un maximum ou un minimum sur la pièce d'origine. Les seules formes correspondant réellement à un souhait de mise en forme sont celles évaluées à partir des bords, voire des fonds quand ces derniers peuvent être mis en évidence. Cependant, l'importance du *corpus* permet ici de s'affranchir dans une certaine mesure, de ce problème. En effet, si à partir d'un seul fragment, il n'est pas possible de juger de l'observation d'une épaisseur réellement voulue, la constatation de cette même longueur sur un grand nombre d'individus lui donne un autre poids. Les répartitions des épaisseurs maximales et minimales (Figure 100) renseignent ici sur les profils moyens des creusets.

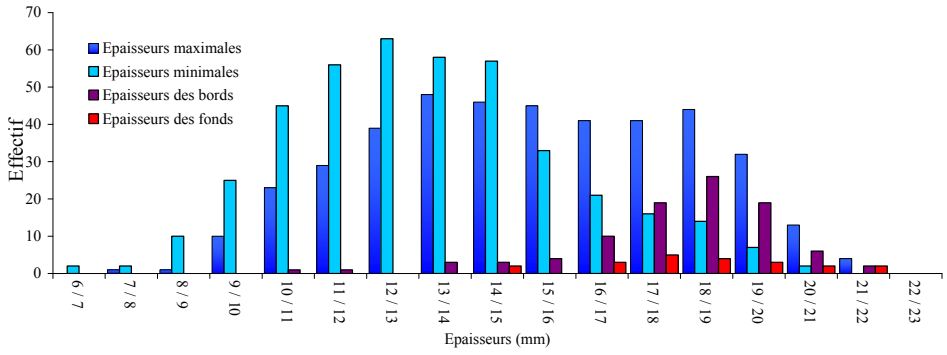


Figure 100 - Répartition des épaisseurs.

C’est au niveau des bords que s’observent les valeurs les plus importantes, celles-ci étant centrées autour de 18 mm. Le pic visible à la fois pour les relevés des maxima et des minima, montre que la pâte s’amincit des bords vers la panse, jusqu’à une épaisseur moyenne de 12 mm. Quant aux fonds qui ont pu être mis en évidence sur vingt-et-un individus, ils révèlent des épaisseurs qui redeviennent plus importantes, autour de 17 à 18 mm.

Il faut aussi remarquer quelques creusets avec des bords moins épais qui correspondent aux types J ou L (Figure 98), avec des épaisseurs vers 10 mm et 13 mm. Ils ne représentent cependant qu’une population très limitée.

Parallèlement aux épaisseurs de pâte, les diamètres internes originaux ont été également estimés à partir des fragments retrouvés. Dans la mesure où les individus présentaient un rayon de courbure suffisant, il a été possible de déterminer ce paramètre à partir d’une comparaison avec des gabarits de dimensions connues.

L’intervalle de variation des modules relevés est assez large puisqu’il s’étend entre 9 cm et 23 cm. Toutefois, la figure 101 met en évidence une grande majorité des individus appartenant à un domaine plus réduit centré sur 15 cm, entre 13 et 17 cm.

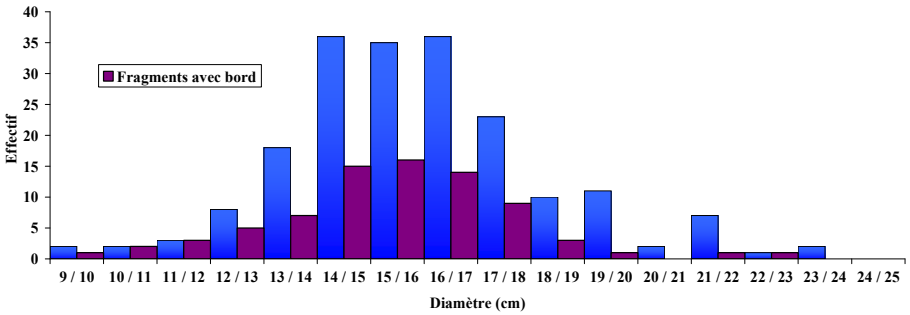


Figure 101 - Répartition des diamètres internes.

Compte tenu de cette amplitude de 4 cm sur le diamètre, il est difficile d’estimer s’il existe plusieurs classes de grosseurs de creusets. On propose l’hypothèse d’un diamètre moyen de 15 cm dont le rayon peut varier de plus ou moins 1 cm.

En outre, le sous-ensemble des fragments présentant un bord définit un histogramme similaire à celui de la totalité du *corpus*. Une telle répartition atteste de la forme cylindrique des creusets puisque leurs fragments ont globalement les mêmes diamètres au niveau des bords et des panses.

Les données collectées pour chacun des tessons de céramiques métallurgiques concernant leurs épaisseurs de pâte ainsi que leurs modules originaux, révèlent-elles une quelconque corrélation ? Dans ce cas, la prise en compte d'une épaisseur moyenne[526] doit suffire pour rendre compte d'une relation fut-elle avérée.

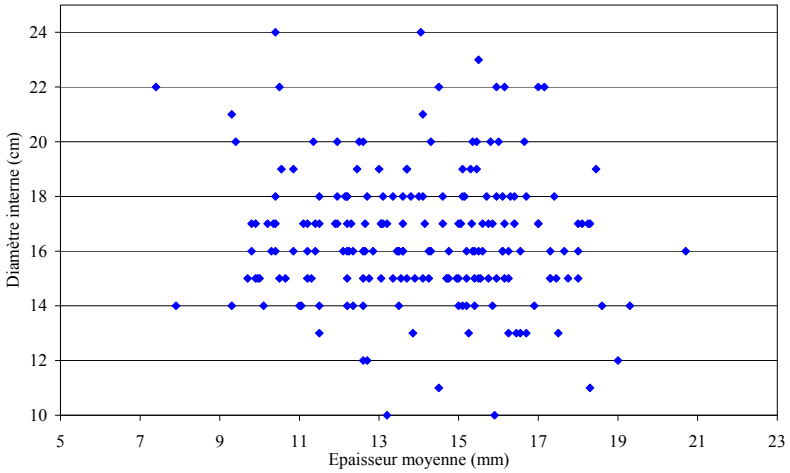


Figure 102 - Diamètres mesurés en fonction des épaisseurs moyennes de pâte pour chacun des fragments de creuset étudiés.

Sur la figure ci-dessus est représenté le couple d'informations propre à chaque fragment. Les points s'organisent globalement sans définir de groupe de morphologies voisines. En outre, il n'y a pas de corrélation entre les deux paramètres. Il n'est par exemple, pas possible d'affirmer que les épaisseurs les plus importantes sont nécessaires aux plus gros modules.

La dimension restreinte de l'ensemble des échantillons mis au jour, de même que les quelques remontages effectués, ne permettent pas d'estimer les hauteurs moyennes des creusets originaux. Cette donnée manquante, pourtant à opposer aux nombreuses informations parallèlement relevées à partir de chacun des fragments de céramiques métallurgiques mis au jour, interdit de supposer pour l'instant des volumes de métal qui pouvaient être fondus dans ces contenants.

Du point de vue de la technique de fabrication, le relevé des multiples traces de façonnage sur les surfaces internes et externes trahit la chaîne opératoire de mise en forme. Les marques de tournage, parfois très prononcées, sont les indices les plus courants. Ils témoignent de l'utilisation d'un tour dans cette fabrication. Même si, dès leur apparition, les ouvrages de fonderie comme celui du moine Théophile ou plus tardivement de L. Ercker, recommandent l'utilisation de

[526] Moyenne entre les valeurs minimales et maximales de chaque échantillon.

creusets moulés, les profils de tournage sont ici très nombreux[527]. Ils excluent le recours au moulage pour la mise en forme des creusets de Montreuil-Bonnin. Ces traces sont observables sur près de 47 % des surfaces internes des échantillons alors qu'elles ne sont présentes que sur 4 % des surfaces externes. Ces proportions s'inversent pour les marques de lissages observables sur 25 % des surfaces externes et seulement 9 % des internes. Ces différences de répartitions se justifient par la technique employée. Enfin, les fragments ne présentent pas de glaçures volontaires, les vitrifications observables résultent *a priori* uniquement de l'utilisation des creusets.

L'obtention d'un fond hémisphérique et le façonnage du bec à partir du bord sans ajout de matière obligent à séquencer la fabrication en trois grandes étapes (Figure 103) :

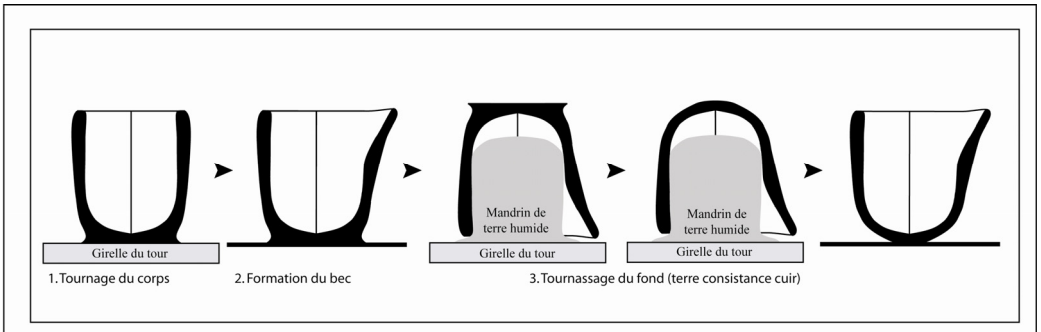


Figure 103 - Chaîne opératoire de mise en forme des creusets.

- Le tournage : un cylindre est monté sur le tour. La mise en forme se fait à la main ce qui peut induire des ondulations de la surface de la pièce. Ce sont ces traces qui caractérisent cette technique.

- Avant de mettre en forme le fond, le bec de coulée est modelé par déformation, sans ajout d'argile. Le bord du creuset est pincé entre le pouce, le majeur et l'index, qui vient tirer la pâte vers l'extérieur. Ce geste allant dans le sens d'écoulement du métal fondu veille à ce qu'aucune aspérité ne gêne par la suite les coulées. Cette opération intervient avant celle du tournassage car elle doit être faite quand la terre est encore assez facilement déformable. Il est possible d'observer sur plusieurs des fragments mis au jour l'empreinte des doigts qui trahissent le geste de cette opération.

[527] Théophile *et al.*, *Essais sur divers arts..., op. cit.*, p. 142 et 222.
Ercker L., *Treatise on ores..., op. cit.*, p. 180-182.

- Le tournassage : c'est l'étape qui permet de façonner le fond du creuset en hémisphère. Après avoir laissé sécher la forme tournée initiale jusqu'à la consistance cuir de la pâte[528], afin que la pièce ait une plus grande tenue, cette ébauche est retournée sur un mandrin de terre humide placé sur le tour. Compte tenu de la fermeté de la terre, l'emploi d'outils coupants est nécessaire pour travailler le fond de la céramique. Ce façonnage demande un certain savoir-faire pour ne pas trop enlever de matière et ne pas percer le fond. L'estimation du volume à enlever se fait au toucher, à l'œil et au poids avant que la pièce ne soit replacée sur le tour. Cette technique de mise en forme permet peut-être d'expliquer la plus forte épaisseur des fonds par rapport aux panses. Le travail de la surface extérieure va éliminer en partie les traces externes du tournage. En fin d'opération, la pièce est lissée, notamment avec un linge humide.

- Après un séchage final, la céramique est cuite avant d'être utilisée.

Cette technique de mise en forme explicite les différentes traces observées sur les faces internes et externes des fragments de creusets. Le séquençage des opérations élimine certaines empreintes alors qu'en parallèle d'autres sont laissées.

Cette chaîne opératoire prouve également que le fond hémisphérique de ces céramiques est recherché dès leur fabrication. Il n'est pas une conséquence de cette dernière. L'obtention de cette morphologie demande une opération supplémentaire de mise en forme à laquelle s'ajoute un temps de séchage avant que la pièce ne soit rectifiée une dernière fois.

La présence de fonds hémisphériques sur les creusets apparaît dans un premier temps moins pratique qu'un fond plat. Elle peut au contraire être très intéressante suivant le type de four dans lesquels ils sont utilisés. Les structures de fonte décrites dans la littérature monétaire disposent d'un foyer où les céramiques métallurgiques sont placées au milieu de charbon en combustion[529]. C'est notamment un fourneau de ce type retrouvé lors des fouilles de l'atelier de La Rochelle dont le fonctionnement a été présenté plus haut[530]. Le fond convexe des poches de coulées facilite fortement leur introduction et leur calage au sein de la masse de combustible fragmenté qui remplit la chambre de chauffe.

Les bords épais des creusets de Montreuil-Bonnin, globalement observés lors de l'étude morphologique, ne sont pas une conséquence indirecte de la fabrication. Ils sont volontairement recherchés. Les profils massifs sont tout aussi recherchés.

[528] A ce degré de séchage, la pâte est encore humide, donc souple, mais elle peut être manipulée sans risque de déformation.
[529] cf. *supra*, p. 76.
[530] cf. Le four en trou de serrure de l'atelier monétaire de La Rochelle, p. 270.

Ils doivent *a priori* participer à la tenue mécanique des céramiques, dans un premier temps durant leur chauffe aux hautes températures nécessaires aux fusions des alliages et dans un second temps lors des coulées. Au cours de ces opérations, les bords constituent des zones soumises à des contraintes importantes. C'est à cet endroit que sont manipulés les creusets avec des tenailles lorsqu'ils sont retirés du foyer. Les pinces vont par ailleurs exercer de fortes pressions durant les coulées, le point de pivot se localisant au niveau des bords (Figure 104).

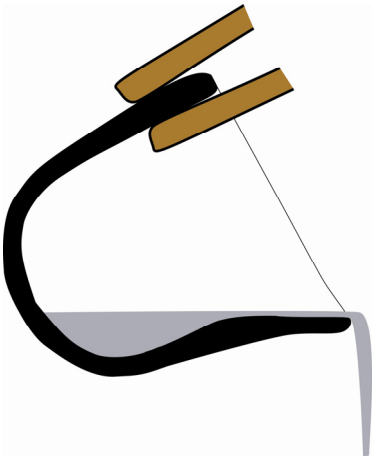


Figure 104 - Coulée avec une pince.

Les forces impliquées sont d'autant plus grandes que les métaux monnayés ont par définition des masses volumiques élevées, les volumes fondus représentant dans ce cas des masses généralement importantes. La mise en évidence, par la suite, des volumes de métal liquide que peuvent contenir ces céramiques, rendra compte de ce paramètre.

La description de la chaîne opératoire de mise en forme des poches de fonte utilisées à Montreuil-Bonnin permet d'aborder la question du lieu de leur fabrication. La mention dans un compte de l'atelier monétaire de l'achat de six creusets indique qu'ils n'étaient pas produits au sein de la fabrique. En outre, aucune donnée archéologique recueillie ne vient pour l'instant contredire ce témoignage. Sans données supplémentaires, il faut pour le moment admettre que les poches de fusion étudiées ici ont certainement été confectionnées par un artisan n'appartenant pas à la fabrique. L'homogénéité constatée dans l'ensemble du *corpus*, tant du point de vue morphologique que du type de pâte utilisé, sous-entend par ailleurs qu'il s'agit d'une source unique de production.

Les céramiques étudiées ici présentent les caractéristiques morphologiques indispensables à un emploi métallurgique : bec de coulée, fond globulaire, épaisseur de pâte. Une telle utilisation se voit par ailleurs attestée par les vitrifications présentes à la surface des tessons dont certaines sont associées à des dépôts métalliques. Leurs analyses permettent d'attester leur utilisation monétaire mais en particulier de discuter des types d'alliage monnayés qu'elles ont servis à fondre. La composition de ces derniers trahit en outre différents procédés mis en œuvre au sein de la fabrique.

Dans un premier temps, les échantillons présentant des indices métallurgiques ont été analysés qualitativement[531] par spectrométrie de fluorescence X[532]. Les mesures ont porté de préférence sur les dépôts métalliques internes et externes dont la composition se rapproche certainement le plus des alliages ayant été travaillés.

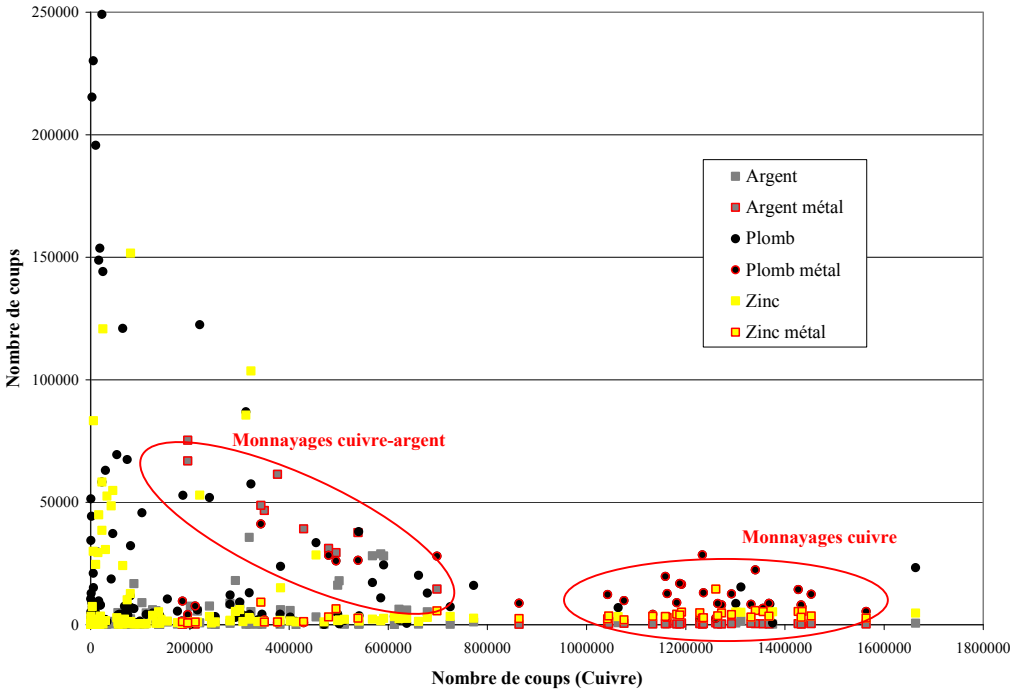


Figure 105 - Analyses par fluorescence X de la surface des fragments de creusets de Montreuil-Bonnin avec mise en évidence des dosages de dépôts métalliques.

[531] Compte tenu de la similitude des échantillons et des conditions expérimentales constantes, il est possible, sans proposer de résultats quantitatifs, de définir des tendances à partir de l'importance du signal. Un élément mesuré avec un nombre de coups très important sera *a priori* en quantité plus élevée dans le volume analysé.
[532] cf. Annexe C.

De plus, les vitrifications et les surfaces présentant des colorations d'origine *a priori* métallurgique ont aussi été analysées, pour disposer d'informations plus étendues que celles provenant des quelques dépôts métalliques relevés. Ces mesures doivent être pondérées car elles caractérisent des dépôts intervenus à la suite de réactions entre le contenu et le contenant. Ils ne représentent pas une image exacte des métaux travaillés. Ces résultats qualitatifs doivent être confrontés à ceux portant sur les résidus de métaux (Figure 105).

Le plomb et le zinc se retrouvent en plus forte proportion dans les vitrifications de surface, plutôt que dans les alliages alors que les métaux travaillés sont pour une grande part le cuivre et l'argent, dans lesquels sont détectés de faibles signaux de plomb. La majorité des dépôts métalliques caractérisés révèlent des compositions majoritaires de cuivre et seuls quatre échantillons font état d'un alliage à base d'argent. Toutefois, certains résidus définissent également un mélange de cuivre et de plomb seulement.

La présence de plomb n'est pas surprenante, car cet élément a tendance à se lier très facilement avec la silice contenue dans la pâte des creusets et se voit rapidement accumulé à la surface des céramiques. De plus, si ce métal n'est pas directement lié à la fabrication monétaire puisqu'il n'est pas monnayé, il faut rappeler qu'il représente une impureté connue de l'argent. Les dosages présentés plus bas, de l'un des dépôts métalliques par une méthode quantitative, font d'ailleurs état de cette possibilité avec une concentration de plomb approchant le quart de pourcent massique (Tableau 5). Enfin, des composés contenant du plomb sont parfois utilisés comme fondant, notamment dans des opérations de retraitement de déchets métallurgiques[533]. Cet élément volontairement introduit dans ce procédé constitue également une des sources possibles des contaminations mises en évidence sur les tessons.

Afin de disposer d'une estimation plus précise de la qualité des alliages qui ont été travaillés dans les céramiques dont les fragments sont ici étudiés, trois dépôts métalliques ont été analysés par spectrométrie de masse couplée à un plasma inductif avec ablation laser (LA-ICP-MS). Elles ont été réalisées par G. Sarah selon le protocole qu'il a défini au cours de sa thèse de Chimie présentée à l'Université d'Orléans[534]. La méthode est notamment présentée dans un article du *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*[535]. De mise en œuvre relativement plus

[533] cf. *supra*, p. 108.

[534] Sarah G., *Caractérisation de la composition et de la structure des alliages argent-cuivre par ICP-MS avec prélèvement par ablation laser. Application au monnayage carolingien*, Thèse de doctorat de Chimie de l'Université d'Orléans, Orléans, 2008, 516 et 226 p.

[535] Son principe consiste à prélever à partir d'une ablation laser, une petite quantité de matière qui est ensuite analysée par spectrométrie de masse après avoir été préalablement ionisée dans un

contraignante que la spectrométrie de fluorescence X, il n'a pas été possible de caractériser toutes les traces d'alliages relevées dans le *corpus*.

Dans un premier temps, trois échantillons ont été choisis pour leurs compositions différentes à partir des estimations faites par spectrométrie de fluorescence X. Afin de vérifier la reproductibilité des dosages par LA-ICP-MS, étant donnée l'hétérogénéité présumée des résidus de fonte, une composition ne devait être proposée qu'à partir de trois analyses reproductibles pour chacun des échantillons.

Les résultats de cette étude confirment globalement le travail de l'argent associé aux céramiques étudiées. Dans le *corpus* choisi, deux des dépôts correspondent à une fabrication monétaire puisqu'il s'agit d'alliages binaires cuivre-argent. Cependant un seul des ces échantillons est apparu assez homogène[536] pour pouvoir définir une composition précise (Tableau 5). Il s'agit en définitive d'un billon, avec une teneur moyenne de 65 % en masse de cuivre pour 35 % d'argent. Le plomb est présent en très petite quantité.

	Cu	Ag	Pb	Au	Zn	Sn
Analyse 1	66,52 %	32,92 %	0,26 %	0,08 %	0,18 %	0,01 %
Analyse 2	64,37 %	35,01 %	0,32 %	0,07 %	0,18 %	0,01 %
Analyse 3	62,08 %	37,35 %	0,21 %	0,06 %	0,23 %	0,02 %
Moyenne	**64,32 %**	**35,09 %**	**0,27 %**	**0,07%**	**0,20%**	**0,01%**

Tableau 5 - Analyse par LA-ICP-MS d'un dépôt métallique à la surface d'un fragment de creuset.

Il faut rester prudent quant à la possibilité de faire correspondre la composition de ce dépôt résiduel à celle d'un alliage ayant été effectivement fondu dans le creuset considéré. Le volume de métal observé ici est minime par rapport à celui que pouvaient contenir les céramiques. Toutefois, la composition mise en évidence

---

plasma d'argon. Après un étalonnage approprié cette méthode rend compte de résultats quantitatifs. En outre, le protocole de prélèvement permet de s'affranchir des enrichissements de surface qui résultent des phénomènes de corrosions que peuvent avoir subi les échantillons métalliques au cours de leur enfouissement. Les résultats proposés témoignent de la composition réelle de l'échantillon, c'est-à-dire ici, celle des alliages lors de leur fusion.
Sarah G. *et al.*, Application of laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS) for the investigation of ancient silver coins, *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, vol. 22, n° 9, 2007, p. 1163-1167.

[536] Sur les trois analyses réalisées.

est comparable à celle des deniers d'Alphonse de Poitiers qui ont pu être frappés à Montreuil-Bonnin[537].

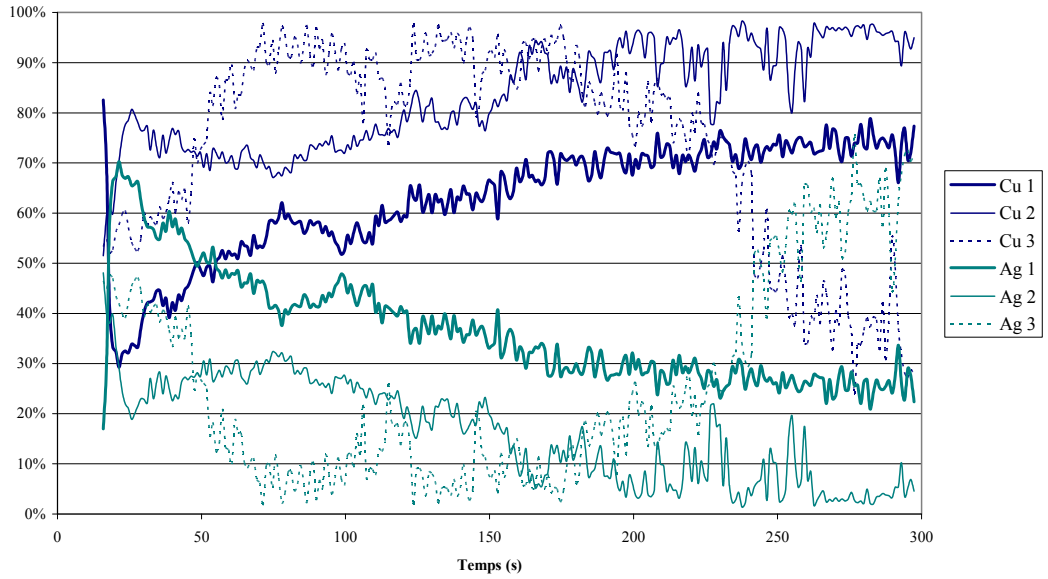


Figure 106 - Trois profils réalisés sur un dépôt métallique par LA-ICP-MS, montrant une répartition très hétérogène du cuivre et de l'argent.

Le second alliage analysé présente des concentrations non négligeables d'argent mais apparaît beaucoup plus hétérogène. Les trois dosages successifs ne concordent pas (Figure 106). Il est impossible d'en proposer une composition représentative. Cette hétérogénéité atteste qu'il est difficile de considérer de tels dépôts dans le but de mettre en évidence les alliages travaillés dans une céramique métallurgique. Ceci n'est pas surprenant car c'est dans les creusets que sont effectivement mélangés les métaux. Un échantillon analysé peut dans ce cas révéler des compositions intermédiaires, non homogénéisées. Par ailleurs, un creuset n'a pas obligatoirement vocation à fondre des alliages de même composition. Ainsi, un dépôt métallique peut finalement correspondre à un mélange inégal de plusieurs fontes.

Le troisième dépôt diffère des deux précédents par les métaux majoritaires qui le composent. C'est un alliage à base de cuivre et de plomb. Cependant, ces deux métaux sont très peu miscibles et forment un mélange biphasé, hétérogène à l'échelle de l'analyse (Figure 107)[538]. Il est là aussi impossible de proposer une

[537] Teboulbi A. *et al.*, Etude du monnayage de Toulouse et d'Alphonse de Poitiers par analyses élémentaires, *Revue Numismatique*, vol. 164, à paraître.
[538] La dimension du prélèvement se situe autour de 80 µm de diamètre.

quantification globale. Il faut cependant rappeler que cet alliage ne correspond pas à un mélange monétaire. La part du plomb, même si elle ne peut être évaluée précisément, représente une fraction trop importante de l'alliage. Le taux élevé de plomb n'étant pas corrélé à une présence d'argent associé au cuivre, exclut *de facto* les procédés d'affinage. Ce résidu particulier trahit en revanche une autre opération annexe du monnayage. Sa composition sera discutée plus loin dans une réflexion de techniques de retraitement de déchets métallurgiques au sein de la fabrique monétaire.

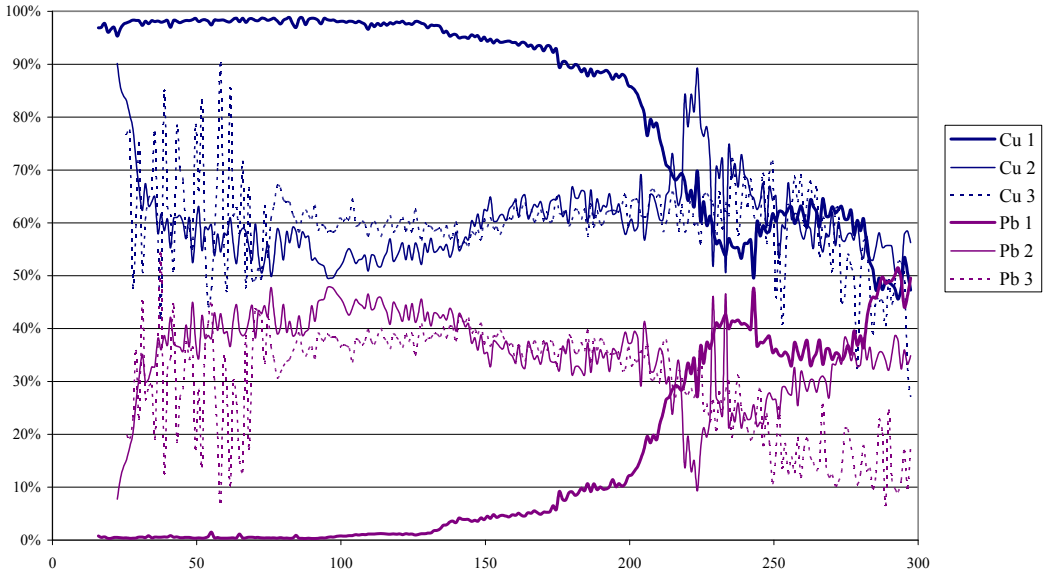


Figure 107 - Trois profils réalisés sur un dépôt métallique par LA-ICP-MS, montrant une répartition très hétérogène du cuivre et du plomb.

D'après les analyses réalisées sur les fragments de creusets de Montreuil-Bonnin et compte tenu du contexte de leur découverte, il est maintenant possible d'affirmer qu'il s'agit de déchets de la fabrication monétaire. Ils complètent ainsi le *corpus* restreint lié au monnayage médiéval, jusqu'ici mis au jour. Quant aux informations qui viennent d'être présentées, elles peuvent être dès à présent versées à la présente étude technique.

Parmi la quantité importante d'échantillons de céramiques monétaires mis au jour, le nombre d'individus présentant finalement des restes métalliques apparaît surprenant. Si les surfaces internes font état d'une utilisation métallurgique, elles présentent une propreté générale surprenante pour des objets usagés et brisés.

Seuls 25 des fragments sur les 414 que compte le *corpus* révèlent des dépôts d'alliages superficiels. En outre, seulement quatre d'entre eux contiennent des quantités non négligeables d'argent. Les autres correspondent à du cuivre pur ou allié de plomb. Durant la période de fonctionnement de cette fabrique, le monnayage de cuivre pur n'ayant pas encore été rétabli, il faut voir dans les dépôts mettant en évidence ce seul métal, les résidus d'alliages non encore homogénéisés[539]. Quant à la présence de plomb, elle sera discutée plus loin.

Il a aussi été vu que les fragments appartenant au groupe à surface blanche sans vitrification qui, par définition, sont exempts de traces métallurgiques, sont également ceux qui correspondent aux plus gros gabarits du *corpus*.

L'attention particulière nécessaire à la manipulation des métaux précieux apporte des éléments qui permettent de discuter des observations précédentes. Notamment parce que cette dernière implique la mise en place de stratégies de retraitement des parois et soles de fours, ainsi que des creusets et sols d'ateliers[540]. L'ensemble de ces matériaux peut représenter rapidement un volume important, alors que les résidus qui présentent un intérêt à être récupérés ne constituent en définitive qu'un pourcentage très restreint de cette masse globale. Ils forment généralement des dépôts ponctuels et localisés à la surface des parois de four ou sur les creusets. Bien que les rares données bibliographiques monétaires ne rendent pas compte d'une telle démarche, ne faut-il pas envisager que le retraitement des déchets métallurgiques ait pu être limité par une sélection des échantillons présentant le plus grand intérêt à subir ces opérations ? Une telle démarche justifierait la faible représentativité métallique observée au sein du *corpus*. Les creusets ayant servi à fondre des alliages de métaux précieux auront été sélectionnés systématiquement. Dans ce cas, il ne subsiste que les fragments les plus « propres » ou ayant été utilisés dans la fonte de bas billons et ne méritant pas d'être retraités faute d'un gain potentiel sensible. Quant aux quelques exemples mettant en évidence la présence non négligeable d'argent, ils peuvent résulter d'une mauvaise sélection ou garantissant finalement un gain trop limité pour justifier leur retraitement. Les différentes caractéristiques mises en évidence dans le *corpus* mis au jour à Montreuil-Bonnin, montrent qu'il s'intègre pleinement dans la démarche décrite précédemment. Il faut y voir le témoignage du tri au sein de l'atelier monétaire, des déchets produits dans cette activité de métallurgie de métaux précieux. D'autant qu'un tel protocole explique également en partie, le

[539] Le monnayage de cuivre a été interrompu au VI^e^ siècle pour ne reprendre qu'à partir de 1575 dans les ateliers royaux en France. L'atelier de Montreuil-Bonnin ayant été en activité antre le milieu du XIII^e^ et le milieu du XIV^e^ siècle, les dépôts de cuivre observés ne peuvent correpondre à un résidu d'alliage monnayé tel quel.

[540] cf. Le retraitement des déchets, p. 105.

faible taux des remontages qui ont pu être proposés, sans toutefois négliger l'influence du mélange dû à l'épandage des déblais dans lesquels se trouvaient initialement les fragments de creusets. Enfin, il est par ailleurs remarquable que dans l'ensemble de la collection de céramiques mises au jour, aucune d'elles ne puisse être assimilée à un couvercle. Or, cet ustensile doit notamment limiter les projections de métal dans le foyer et évite que des charbons ne recouvrent le bain de métal liquide gênant ensuite les coulées[541]. Particulièrement recouvert de projections métalliques, cet accessoire aura été systématiquement retraité interdisant sa découverte lors des fouilles.

Dans une discussion parallèle, si les alliages d'argent obligent à mettre en place un tri sélectif des déchets, il en est nécessairement de même pour ceux à base d'or. L'absence totale de ce métal dans le *corpus* des fragments de creusets pourrait être interprétée comme le résultat de cette sélection. Toutefois, plusieurs circonstances obligent à revoir cette hypothèse. D'abord parce que les rapports de monnayage d'or et d'argent produits à Montreuil-Bonnin, sont très fortement déséquilibrés en faveur du métal blanc. La fabrication de monnaies d'or n'est certaine à Montreuil-Bonnin qu'à partir de 1337, soit durant une dizaine d'années seulement avant la destruction de l'atelier[542]. Par ailleurs, il faut rappeler la séparation du travail de l'or et de l'argent au sein des ateliers monétaires. Celle-ci se retrouvant jusque dans le traitement des déchets pourrait également être la cause de l'absence d'or sur les échantillons mis au jour à Montreuil-Bonnin. Sans de nouvelles données archéologiques, permettant notamment un calage chronologique précis du *corpus*, il est pour l'instant difficile de conclure sur les questions liées au travail de l'or dans cet atelier.

A propos du développement des étapes qui se succédaient après la présélection des déchets de l'atelier monétaire, les analyses menées sur certains des résidus métalliques relevés sur les fragments de creusets rendent compte d'une grande représentativité du plomb. Or, si ce métal avait été également associé à de l'argent, une telle configuration aurait pu être associée à des opérations d'affinage. C'est finalement avec un procédé de retraitement des déchets métallurgiques que les alliages cuivre-plomb relevés doivent être rapprochés. Selon l'affineur strasbourgeois Delaguerre[543], après avoir broyé l'ensemble des terres de lavure

[541] cf. Les opérations de fonderie, p. 75.
[542] Barthélémy A. D. *et al.*, *Apurement des comptes..., op. cit.*, t. 4, p. 235-274.
[543] Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 108.
De Bettange M., *Traité des monoyes..., op. cit.*, t. 1, p. 117-120.
Delaguerre, *Rés. ms. 17004 PRI 8°*, *op. cit.*

contenant des résidus métalliques à récupérer, ces derniers peuvent être séparés des composés céramiques auxquels ils sont mélangés grâce à une fusion de l'ensemble. Il est dans ce cas avantageux d'utiliser un fondant, en l'occurrence de la litharge[544], pour réaliser une telle extraction. Celle-ci favorise la formation d'une scorie vitreuse surnageant à la surface du métal liquide. Ce dernier est ensuite facilement séparé de la phase minérale fondue. La présence de plomb allié à du cuivre à la surface de certains fragments de creusets découverts atteste de la mise en place à Montreuil-Bonnin, d'opérations de retraitement des déchets, similaires à celles décrites par l'affineur strasbourgeois. D'autant que les résidus en question, dans la mesure où ils ne contiennent pas d'argent en quantité détectable, ne peuvent être associés à aucun autre procédé du monnayage médiéval.

A l'occasion d'expérimentations associées au fonctionnement d'un four de fonderie[545], il a été possible de faire différentes observations quant au comportement des céramiques métallurgiques utilisées pour fondre de l'argent pur. Une attention particulière a été portée à la quantité de métal restant à la surface de ces dernières à la suite de nombreuses chauffes, notamment afin de vérifier que la relative absence de métal constatée au sein du *corpus* archéologique pouvait effectivement être supposée comme le résultat d'opérations annexes des fontes.

Durant les expérimentations, ce sont des creusets de plombagine, identiques à ceux utilisés actuellement dans les ateliers métallurgiques, qui ont été employés. Un tel choix est essentiellement pratique. La finalité première des expériences étant la réalisation d'un grand nombre de fontes, les céramiques métallurgiques choisies devaient avoir une durée de vie relativement importante. L'observation de leur comportement durant les chauffes est intervenue en complément. Toutefois, bien qu'il soit interdit de considérer que ces poches de plombagine illustrent de façon certaine les conséquences des multiples fontes qu'ont pu subir les échantillons de Montreuil-Bonnin, il faut admettre qu'elles permettent de proposer quelques analogies, notamment parce qu'elles ont été utilisés pour fondre de l'argent qui est un des trois métaux monnayés. D'autre part, le type de four expérimenté est *a priori* identique à ceux utilisés à Montreuil-Bonnin, comme en témoignent les fonds hémisphériques des creusets découverts.

Lors des premiers essais de fontes, les creusets ont rapidement été marqués par leur usage. Après de multiples fontes, les poches de fonte utilisées lors des expérimentations, ont vu la formation de résidus vitreux surnageant sur le bain de métal en fusion. Il s'agit de composés formés à partir des impuretés présentes à la

[544] Oxyde de plomb.
[545] cf. Le four en trou de serrure de l'atelier monétaire de La Rochelle, p. 270.

fois à la surface et dans les métaux fondus. Au fur et à mesure des fontes, ces petites quantités de scories se sont accumulées progressivement et ont constitué un volume non négligeable. La vitrification du creuset participe en outre également au phénomène. Bien que lors des expérimentations, cette dernière ait résulté de la transformation de la plombagine, des réactions similaires ont lieu pour les terres cuites. Le contact avec les composés résultant de la combustion du charbon dans le foyer favorise les vitrifications superficielles. Les cendres contiennent en particulier des éléments alcalins connus pour constituer de bons fondants des matériaux siliceux dont sont composés les creusets. En définitive, suivant la viscosité des néoformations vitreuses, ces dernières sont difficiles à extraire et peuvent piéger du métal (Figure 108).

Figure 108 - Scories accumulées dans le creuset et métal à la base interne du bec de coulée (exp.).

Figure 109 - Projections d'argent sur la surface interne des creusets (exp.).

Le bec de coulée et sa base interne sont d'autre part des endroits où se localisent préférentiellement les dépôts métalliques et vitreux (Figure 108). Au cours d'une coulée, le métal liquide se refroidit progressivement dans le creuset. En fin d'opération, l'alliage commence à se solidifier de nouveau. Les derniers endroits en contact avec la matière fondue, comme le fond de la céramique mais en particulier son bec de versement, sont plus susceptibles de recueillir des résidus figés. L'absence de bec de coulée entier dans le *corpus* de Montreuil-Bonnin est-il à mettre en relation avec cette dernière constatation ?

Par ailleurs, à la suite de nombreuses fontes d'argent pur, les surfaces internes mais aussi externes des creusets expérimentaux, ont assez rapidement été en partie couvertes par des projections métalliques (Figure 109). Celles-ci interviennent lors du refroidissement du métal liquide, notamment au cours d'une coulée. Avec la diminution de la température, l'oxygène absorbé par l'argent fondu est libéré rapidement entraînant avec lui de petites quantités de métal. Cependant, ce phénomène est propre au travail de l'argent pur qui est reconnu pour sa capacité à

absorber de grandes quantités d'oxygène lorsqu'il est fondu ; mélangé à d'autres métaux, cette capacité est fortement diminuée[546]. Dans le monnayage, de telles fontes sont en définitive relativement rares car ce métal précieux est rapidement allié à du cuivre.

Ces observations, dont il faut toutefois rappeler qu'elles résultent de fontes dans des creusets actuels, témoignent tout de même de phénomènes qui ont également existé dans les creusets de Montreuil-Bonnin. Ils ont entraîné les mêmes conséquences que celles qui viennent d'être décrites. Or, dans la mesure où ces dernières ne sont globalement pas constatées au sein du *corpus* de fragments étudiés, l'hypothèse préliminaire d'un traitement sélectif des déchets au sein de l'atelier, se voit confortée.

L'étude morphologique et analytique qui vient d'être présentée, a proposé un modèle assez précis des céramiques monétaires de Montreuil-Bonnin, il est maintenant envisageable de le confronter aux creusets entiers retrouvés au XIX^{e} siècle par le père de-la-Croix, aujourd'hui conservées au musée Sainte-Croix de Poitiers. Elle doit permettre de vérifier leur lien supposé avec le monnayage médiéval.

Les creusets du musée Sainte-Croix de Poitiers

Les deux céramiques conservées au musée Sainte-Croix de Poitiers sont des poches de fonte[547] retrouvées entières à Montreuil-Bonnin. Elles pèsent respectivement 1,9 et 2,4 kg (Figure 110). Elles montrent, ainsi que les fragments[548] qui les accompagnent, des épaisseurs de pâte importantes, comprises entre un centimètre au fond des creusets, jusqu'à deux au niveau des bords. Sur chacun des exemplaires complets, des traces de mise en forme au tour sont visibles, à la fois sur les faces internes et sur les faces externes. Des marques de lissage peuvent être également relevées.

[546] Assal J. *et al.*, Thermodynamic assessment of the silver-oxygen system, *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 80, n° 12, 1997, p. 3054-3060.
Parlee N. A. D. *et al.*, The solubility of oxygen in liquid silver, *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*, vol. 233, 1965, p. 1918-1919.
[547] Numéros d'inventaire dans la collection du musée Sainte-Croix de Poitiers : A. 897.16.7 et A. 897.16.8.
[548] Numéro d'inventaire dans la collection du musée Sainte-Croix de Poitiers : B.3465.

Les profils des bords sont arrondis. Ces derniers ont été déformés pour créer un bec de versement, il n'y a pas d'ajout de matière. D'un point de vue morphologique, ces individus apparaissent très semblables au profil global extrait de l'étude du *corpus* archéologique. L'observation des pâtes employées fait, quant à elle, apparaître des différences relatives. Le plus grand des creusets (Figure 110 : B) a été tourné à partir d'une argile rose d'un type assez peu représenté dans la collection de tessons précédemment décrite, alors que le second (Figure 110 : A), ainsi que les trois fragments, ont été modelés avec une argile blanche, *a contrario* plus souvent observée. Les dégraissants employés sont des grains de quartz comme pour les fragments retrouvés lors des fouilles.

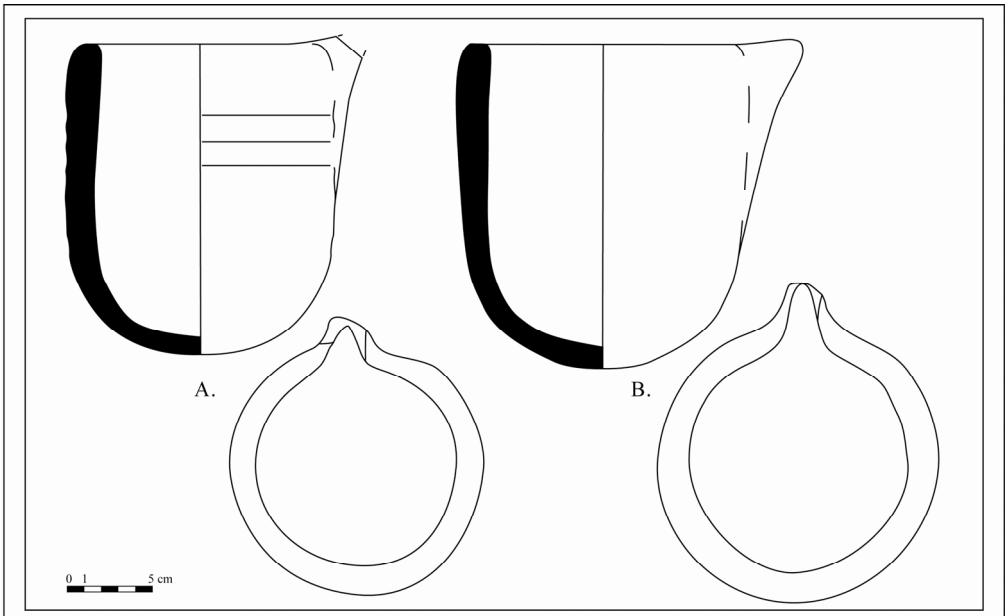


Figure 110 - Creusets de Montreuil-Bonnin conservés au musée Sainte-Croix de Poitiers.

En remplissant les deux poches de coulée avec un corps étalon leurs volumes ont pu être estimés[549]. Ils sont respectivement de 1,8 et 2,1 litres, pour des hauteurs de 18 et 19 cm et des diamètres internes de 15,5 et 17 cm.

[549] La méthode utilise des billes micrométriques de verre. Elle a été mise en place par A. Doridot à l'occasion de son étude des creusets de Melle (79). Il était envisageable d'utiliser de l'eau ou du sable. Toutefois, les billes de verre ont l'avantage d'être neutres vis-à-vis de l'objet archéologique et de s'évacuer totalement après l'estimation.
Doridot A. *et al.*, *Les creusets trouvés en contexte funéraire à Melle, Niort et Souché (79)*, Rapport d'étude archéométrique, 2006, p. 12.

L'aspect extérieur des différents individus révèle très peu de traces résultantes de leur utilisation. Seule la céramique la plus massive présente à sa surface interne des marques plus foncées qui pourraient être le niveau maximum atteint par le métal en fusion. Celle-ci aurait été remplie aux deux tiers de son volume.

Les deux céramiques ainsi que les trois fragments associés étant conservés au musée Sainte-Croix, il n'a pas été possible de réaliser une étude analytique en laboratoire, ni d'en prélever des échantillons. Une analyse qualitative de l'alliage qui recouvre la surface interne de l'un des tessons a toutefois pu être effectuée *in situ* grâce à un appareil d'analyse par spectrométrie de fluorescence X portable[550]. Le dosage montre qu'il s'agit d'un alliage cuivre-plomb, avec des quantités non négligeables d'argent, d'étain, de zinc, ainsi que des traces d'antimoine. Sans être directement associé à une composition monétaire, celle-ci est cependant à rapprocher de celle observée sur l'un des précédents échantillons analysé par LA-ICP-MS. Ce mélange pourrait également correspondre à un résidu d'un traitement d'affinage d'un billon.

A la vue des nombreux points communs mis en évidence sur ces deux ensembles d'origines différentes, il faut maintenant assimiler les céramiques et tessons retrouvés au XIX^{e} siècle à Montreuil-Bonnin aux fragments de creusets mis au jour lors des fouilles récentes des fossés du château. Ces derniers ayant été par ailleurs associés à l'atelier monétaire médiéval, ce rapprochement complète la description globale qui a pu être proposée des céramiques monétaires avec des données concernant leurs volumes et hauteurs. Il est maintenant envisageable d'estimer la masse de métal qui pouvait être travaillée au cours d'une fonte.

D'après la technique de remplissage des creusets telle qu'elle a été décrite dans la présentation bibliographique[551], il est ici nécessaire de raisonner avec un volume de métal en phase liquide. L'ajout de matière lors des fontes est fait au fur et à mesure de la fusion. Une fois fondu, le métal occupe un volume plus condensé. D'un autre côté, la masse volumique des métaux varie en fonction de leur température ainsi que de leur état. En prenant l'exemple du cuivre, celui-ci

[550] L'appareil utilisé est identique à celui qui a été employé au cours des prospections géochimiques présentées précédemment. C'est toutefois le mode de caractérisation des alliages métalliques qui a du être utilisé ici avec une durée d'analyse d'une minute.
En tant que méthode d'analyse de surface, la spectrométrie de fluorescence X ne permettait pas ici de s'affranchir de la couche de corrosion que présentait l'échantillon. Ce dernier appartenant à la collection d'un musée, il n'était par ailleurs pas envisageable de réaliser une abrasion superficielle pour atteindre le métal sain. C'est pour ces raisons que les résultats sont considérés ici d'un point de vue seulement qualitatif.
[551] cf. *supra*, p. 80.

présente une masse volumique égale à 8,96 g.cm^{-3} à température ambiante[552]. Lors d'une élévation de température, cette valeur va diminuer suivant la dilatation du métal. Une fois fondu, un centimètre cube de cuivre ne pèse plus que 8 grammes[553]. La masse correspondant à ce même volume de matière va également diminuer si la température continue d'augmenter[554].

La masse volumique d'un alliage est également fonction de sa composition. Elle peut être plus ou moins élevée que la moyenne pondérée de celles des différents métaux alliés. Pour un billon composé d'argent et de cuivre, elle est notamment moins grande[555]. Bien que moins importante que celle résultant des changements de température, cette diminution n'est en revanche pas linéaire et doit être déterminée pour chacun des couples de concentration de ce binaire argent-cuivre.

Dans la présente discussion, il a été choisi de raisonner à partir d'une composition binaire assimilée à celle qui a pu être dosée par LA-ICP-MS sur l'un des fragments dans la mesure où elle pouvait effectivement correspondre à un alliage monétaire[556]. Il s'agit d'un mélange de 65 % massique de cuivre pour 35 % d'argent. Le volume effectif estimé à partir de creusets retrouvés à Montreuil-Bonnin est de 1,2 à 1,4 litre[557]. Sur la figure 111, sont représentées les variations en fonction de la température des masses d'argent, de cuivre, ainsi que d'une estimation haute de la masse de l'alliage retenu[558], pour un creuset contenant 1,3 litre de métal fondu. La variation de la masse volumique de l'alliage est considérée ici comme suivant la loi de Vegard[559], à partir des variations de celles du cuivre et de l'argent.

---

[552] Lide D. R., ed., *CRC handbook of chemistry and physics*, 72ème ed., Boston, USA, CRC Press, 1991, p. **12**-119.
La température de référence est ici de 25 °C.

[553] Densité du cuivre à sa température de fusion, Tf = 1084,9 °C.
Gale W. F. *et al.*, eds., *Smithells metals reference book*, *op. cit.*, p. **14**-10.

[554] La masse volumique d'un métal en fusion suit la relation :
$\rho_{Métal}(T) = \rho_{Métal\,f} + \frac{\partial \rho_{Métal}}{\partial T}(T - Tf)$, avec ρ_f, la masse volumique du métal à sa température de fusion, $\frac{\partial \rho}{\partial T}$ son coefficient d'expansion thermique et T_f sa température de fusion.

[555] Brillo J. *et al.*, Density and Thermal Expansion of Liquid Ag–Cu and Ag–Au Alloys, *International Journal of Thermophysics*, vol. 27, n° 2, 2006, p. 494-506.

[556] Teboulbi A. *et al.*, Etude du monnayage de Toulouse..., *op. cit.*

[557] L'observation des traces dans l'un des creusets permet d'estimer le volume efficace aux deux tiers du volume total.

[558] Brillo J. *et al.*, Density and Thermal.., *op. cit.*

[559] $\rho_{Alliage} = 0{,}65 \times \rho_{Cu} + 0{,}35 \times \rho_{Ag}$

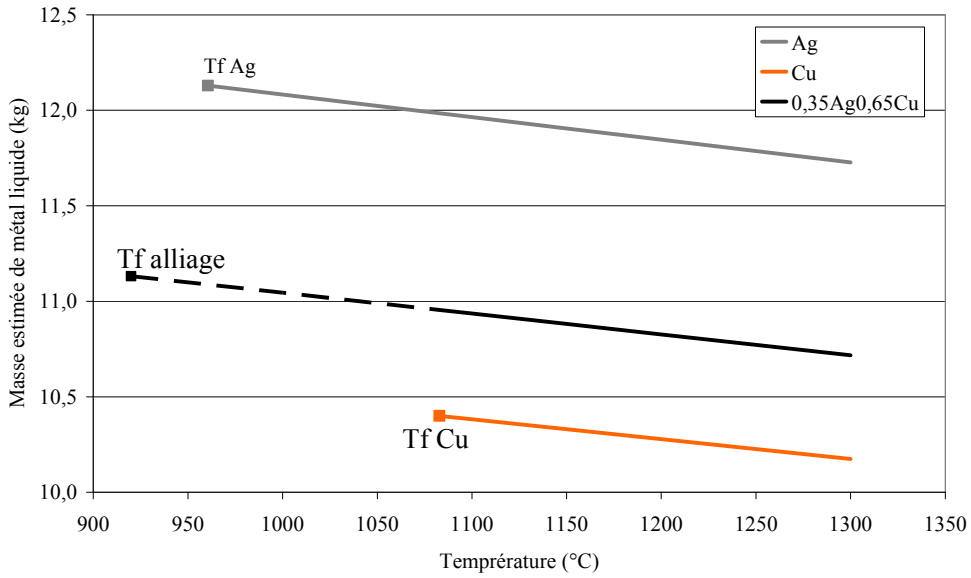


Figure 111 - Estimation des variations de masse de métal contenues dans un creuset de Montreuil-Bonnin pour 1,3 litre de métal.

Au voisinage de la température de travail qui est supposée se situer vers 1000 °C, soit une centaine de degrés au-dessus de celle de la fusion de l'alliage[560], il est possible de supposer que la masse d'alliage liquide qui peut être contenue dans les creusets se situe entre 10,5 et 11 kilogrammes[561]. Une telle masse de métal fondu rend compte des contraintes auxquelles sont soumises ces céramiques. Elle justifie d'autant plus les morphologies particulières observées qui doivent garantir leur tenue mécanique.

En définitive, bien qu'ils aient été découverts en position secondaire, les fragments de creusets de Montreuil-Bonnin représentent un témoignage nouveau d'une fabrication monétaire médiévale.

L'étude analytique des tessons mis au jour et en particulier celle des dépôts métalliques et vitreux observables à leurs surfaces a mis en évidence différents alliages à base de cuivre et d'argent. La présence de ces deux métaux conjuguée au

[560] La température de fusion est ici estimée à 920 °C à partir du diagramme de phase du binaire argent-cuivre.
cf. Annexe G.

[561] Ce raisonnement n'a volontairement pas tenu compte de la dilatation du creuset soumis à de hautes températures. Il faut admettre que ce paramètre ne peut être modélisé à partir des échantillons archéologiques. En définitive, l'augmentation du volume du creuset avec la température permet *a priori* de fondre plus d'alliage dans un rapport qu'il n'est pas possible d'estimer ici.

contexte de découverte des fragments constitue un faisceau de preuves sérieuses pour attester de leur lien avec la fabrication monétaire.

D'autre part, le très grand nombre de fragments étudiés a favorisé une réflexion statistique. L'homogénéité globale du *corpus*, a permis de reconstituer une morphologie moyenne des céramiques employées. Quant aux paramètres correspondant au volume ainsi qu'à la hauteur de ces poches de fonte, ils ne pouvaient être évalués à partir des seuls fragments dont les remontages partiels ne définissaient du reste pas de formes archéologiquement complètes. C'est le rapprochement démontré de la collection de tessons avec deux creusets retrouvés entiers au XIX^{e} siècle qui a complété l'inventaire des mensurations.

Les creusets utilisés dans la fabrication monétaire médiévale de Montreuil-Bonnin, correspondent finalement à des poches de fonte au fond hémisphérique, possédant un bec de coulée. Les diamètres estimés, centrés autour de 15 cm, rendent compte de pièces de tailles assez importantes, voire très conséquentes pour certaines dont les modules atteignent 23 cm. Ils ont pu être associés à des volumes utiles situés autour de deux litres. Ces céramiques métallurgiques ne présentent pas de glaçure. Les vitrifications finalement observables sur les fragments résultent *a priori* uniquement de leur usage métallurgique.

Du point de vue de leur fabrication, les creusets ont été mis en forme à partir d'une pâte blanche à laquelle a été ajouté un dégraissant très grossier. Il s'agit de grains de quartz blancs/gris voire blancs/roses, dont la granulométrie atteint jusqu'à 2 mm. Ce type de dégraissant est supposé ici, améliorer la tenue mécanique et thermique des céramiques aux hautes températures nécessaires à la fusion des métaux. C'est notamment pour cette même raison que les creusets présentent des épaisseurs de pâte importantes, avec près de 12 mm au niveau des panses et jusqu'à 18 mm pour les bords et les fonds.

Les observations générales du *corpus* ainsi que les analyses pratiquées sur ce dernier mettent en évidence une certaine « propreté métallique » générale. Bien qu'il s'agisse ici de tessons de céramiques métallurgiques, la présence de dépôts résiduels de métal à leurs surfaces apparaît comme restreint. Un tel contraste révèle un retraitement des déchets métallurgiques produits au sein de l'atelier. Il devait permettre de récupérer les métaux précieux qu'ils peuvent contenir. Une telle démarche est du reste décrite dans les traités monétaires[562]. L'ensemble de fragments mis au jour à Montreuil-Bonnin traduit cependant une certaine singularité, dans la mesure où ils sont peut-être le reliquat d'un tri préliminaire de l'ensemble des déchets résultant de la fonderie monétaire. Cette opération se justifie par une nécessité de limiter le traitement de récupération, aux seuls

[562] cf. Le retraitement des déchets, p. 105.

échantillons présentant un intérêt économique. Une telle démarche, par ailleurs soutenue par d'autres observations au sein du *corpus* ainsi que par des reconstitutions expérimentales, est inédite dans un contexte monétaire. En effet, bien qu'il se comprenne d'un point de vue d'une économie de main d'œuvre, un tel tri n'est cependant jamais évoqué dans les quelques textes monétaires qui décrivent les procédés de traitements des résidus métallurgiques.

III. La composition des alliages du monnayage du second atelier de La Rochelle

Parmi l'ensemble du matériel archéologique mis au jour lors des fouilles de l'atelier monétaire, le matériel métallique n'est pas seulement intéressant pour les marques de mises en forme dont il rend compte. L'analyse de la composition des différents alliages utilisés apporte plusieurs éclairages sur la production monétaire associée. C'est notamment à partir de telles informations qu'il est envisageable de débattre de la gestion des matières premières au sein de la fabrique, mais également des contrôles auxquels sont normalement soumis les ouvriers. Enfin, la connaissance du titre en métal précieux des nombreux carreaux et flans qui ont été collectés constitue un élément supplémentaire dans la réflexion sur les types monétaires auxquels ils étaient finalement destinés.

Le *corpus* initialement rassemblé pour faire l'objet de l'étude analytique compte 303 objets métalliques relativement différents. Les hétérogénéités à la fois morphologiques et de composition observées ont du être considérées dans la définition du protocole de caractérisation.

A. Définition du protocole d'analyse

Dans le cadre d'une convention avec le CEMHTI (Conditions Extrêmes et Matériaux : Haute Température et Irradiation), le Centre Ernest-Babelon dispose d'un accès privilégié à un cyclotron. C'est pourquoi, ce laboratoire a, depuis de nombreuses années, développé des protocoles d'analyses par irradiation des alliages monétaires[563]. Ces derniers sont aujourd'hui utilisés en routine par les chercheurs du Centre. Dans la mesure où le *corpus* métallique de La Rochelle est composé uniquement d'alliages à base de cuivre et d'argent, c'est l'analyse par activation aux neutrons rapides de cyclotron (ANRC) qui présente le plus d'intérêt[564]. Cependant, il était indispensable de recourir à une méthode d'analyse préliminaire complémentaire pour déterminer les conditions d'activation qui

[563] Beauchesne F., *Analyse non destructive..., op. cit.*, 282 p.
Gratuze B., *Analyse non destructive..., op. cit.*, 198 p.
Basutçu M., *Contribution à l'analyse par réaction nucléaire à l'aide de particules alpha de basse énergie (< 3,5 MeV). Etude comparative du dosage de l'argent par des réactions nucléaires non destructives en numismatique*, Thèse de doctorat de Sciences Physiques de l'Université Pierre et Marie Curie, Paris 6, 1980, 166 p.

[564] Beauchesne F. *et al.*, Ion beam analysis of copper and copper alloy coins, *Archaeometry*, vol. 30, n° 2, 1988, p. 187-197.
cf. Annexe B.

dépendent de la quantité d'argent que contiennent les échantillons[565]. Si une partie du mobilier présente après restauration un aspect argenté trahissant un fort taux de métal précieux, qui facilite le choix du protocole d'activation adapté sans risque d'erreur, pour une autre en revanche, la discrimination devient plus difficile. Avec la diminution de la quantité d'argent dans l'alliage celui-ci perd sa couleur caractéristique, et même restaurés, il est difficile de supposer la composition de certains échantillons. C'est pourquoi une analyse par spectrométrie de fluorescence X[566] a été mise en œuvre pour proposer un premier classement du *corpus*. Après étalonnage, cette technique d'analyse permet de réaliser les analyses quantitatives nécessaires à la définition du protocole d'activation des échantillons. Cependant, cette technique ne pouvait être la seule méthode pour obtenir un dosage quantitatif précis des échantillons de La Rochelle, notamment à cause de sa sensibilité aux enrichissements de surface.

Analyses par spectrométrie de fluorescence X

La totalité des analyses a été réalisée au laboratoire Pierre Süe (LPS) du CEA de Saclay (91), selon un même protocole. La source de rayons X utilisée est un générateur à anode tournante[567]. Cette technologie produit un faisceau d'excitation dix fois plus puissant que ceux fournis par les sources usuelles de rayonnement X. Ce flux plus important de photons excitateurs diminue la limite de détection de la méthode ainsi que le temps d'analyse tout en travaillant avec une taille de faisceau importante[568]. L'anode en molybdène utilisée pour les analyses[569] induit l'émission d'un faisceau de rayon X de 17,5 keV. Une telle énergie permet de doser l'ensemble des éléments majeurs qui se rencontrent dans les alliages du mobilier

[565] cf. Annexe B.
[566] cf. Annexe C.
[567] Générateur de rayons X de marque Rigaku mis à la disposition du LPS par le « Laboratoire Métallurgies et Cultures » (IRAMAT UMR 5060) basé à Sévenans (Territoire de Belfort) dans le cadre de l'accord LRC DSM 01-27.
[568] La distance entre l'échantillon et le détecteur est de 3,7 cm. Ce faible espacement permet de diminuer l'absorption du rayonnement de fluorescence de l'échantillon, notamment aux faibles énergies. En revanche, une telle configuration a également pour conséquence d'augmenter le nombre de photons X arrivant jusqu'au détecteur. C'est pourquoi, il est dans ce cas nécessaire de mettre un collimateur sur le capteur pour pouvoir travailler avec un temps mort inférieur à 15 %.
La durée d'analyse est de 120 s en temps réel (live time). Compte tenu du temps mort, la durée effective (real time) est supérieure. La taille du faisceau au niveau du point d'analyse a été fixée par un collimateur à 2 mm de diamètre. Une dimension aussi importante doit permettre de s'affranchir au mieux des hétérogénéités locales de l'alliage. Le dosage obtenu représente en définitive la composition moyenne du volume soumis au flux de photons X.
[569] La tension d'accélération est de 45 kV et l'intensité de 25 mA.

métallique mis au jour à La Rochelle. De plus, une grande énergie d'excitation affine le spectre d'analyse car elle augmente le nombre de raies de fluorescence X émises pour un même élément. La multiplication du nombre de raies observées pour un élément diminue d'autant le doute quant à la présence de ce dernier dans un échantillon analysé.

La spectrométrie de fluorescence X est une méthode simple pour réaliser des analyses qualitatives. En revanche, l'obtention de données quantitatives requiert plus de précautions afin de corriger différents phénomènes physiques qui perturbent les résultats[570]. Toutefois, cette technique d'analyse est considérée comme une méthode de surface, c'est-à-dire qu'elle n'analyse qu'une couche de faible épaisseur à la superficie des objets. Le volume caractérisé dépend du matériau étudié[571]. Dans le cadre de l'analyse d'échantillons archéologiques, cette spécificité est particulièrement problématique[572]. Ces derniers, lors de leur enfouissement, subissent des phénomènes de corrosion qui modifient leur composition superficielle[573]. Les réactions impliquées ainsi que leur ampleur sont propres à chaque échantillon. Les conséquences de ces transformations sur les dosages ne peuvent pas être prévues[574]. Il n'est donc pas possible de les corriger[575]. C'est pourquoi, au LPS, l'utilisation du logiciel de quantification Winaxil bien que préalablement étalonné[576], ne devait proposer que des estimations de la

[570] Il s'agit principalement des effets de matrices, des pics d'échappement et d'empilement qui sont présentés en Annexe C.

[571] Un article de J. Tate présente ce problème pour différentes compositions d'alliages analysés par spectrométrie de fluorescence X. En considérant notamment l'exemple d'un alliage monétaire composé de 77 % d'argent, de 20 % de cuivre et de 3 % d'or, il signale que la profondeur de caractérisation pour l'argent est d'environ 130 µm alors qu'elle n'est que de 10 µm pour le cuivre.
Tate J., Some problems in analysing museum material by nondestructive surface sensitive techniques, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, vol. 14, n° 1, 1986, p. 20-23.

[572] Hughes M. J. *et al.*, The production techniques, silver content, and circulation history of the twelfth-century Byzantine Trachy, *Archaeometry*, vol. 12, n° 1, 1970, p. 14.

[573] Hall E. T., Surface-enrichment of buried metals, *Archaeometry*, vol. 4, n° 1, 1961, p. 62-66.

[574] Condamin J. *et al.*, Changes suffered by coins in the course of time and the influence of these on the results of a different methods of analysis, dans Hall E. T. *et al.*, eds., *Methods of Chemical and Metallurgical Investigation of Ancient Coinage*, London, 9 - 11 December 1970, Royal numismatic society, 1972, p. 59-66.

[575] De plus, la présence à la surface des échantillons de La Rochelle d'un vernis de restauration contenant notamment du chrome est une source d'imprécision supplémentaire, parce qu'il va absorber une partie du signal de fluorescence X.

[576] Les étalons nécessaires à ces corrections sont difficiles à synthétiser car ils doivent représenter au mieux les échantillons étudiés : composition, épaisseur, surface, granulométrie, forme. C'est pourquoi, il a été décidé d'utiliser comme étalons des éléments prélevés au sein du *corpus* archéologique. Afin de disposer des individus les plus représentatifs, ils ont été choisis à partir d'un classement réalisé à partir des analyses qualitatives de spectrométrie de fluorescence X. Ils ont ensuite été caractérisés par trois différentes analyses par spectrométrie en dispersion d'énergie

composition des échantillons de La Rochelle analysés par spectrométrie de fluorescence X. Les informations obtenues sont tout de même suffisantes pour définir les protocoles d'analyse par activation mis en œuvre par la suite.

Compte tenu d'observations préliminaires qui ont isolé le *corpus* des alliages d'argent qui ne nécessitaient pas d'être analysés en préalable de leur activation, seuls 211 échantillons sur les 303 rassemblés pour cette étude, ont été analysés par spectrométrie de fluorescence X[577].

Analyses par activation aux neutrons rapides de cyclotron

Pour discuter des problématiques propres à la composition du *corpus* métallique monétaire de La Rochelle, l'analyse par activation aux neutrons rapides de cyclotron est particulièrement indiquée. Contrairement à la spectrométrie de fluorescence X qui ne détermine que la composition superficielle d'un échantillon, l'analyse par ANRC est une méthode globale. En effet, les neutrons auxquels sont soumis les échantillons lors de l'activation ainsi que les rayonnements gamma détectés lors de l'analyse, sont beaucoup moins absorbés par les matériaux étudiés[578].

Cette technique suppose que l'ensemble de l'objet soit caractérisé, la quantification obtenue représente dans ce cas une moyenne sur la totalité de la matière qui le compose. C'est pourquoi, il est admis que ce moyen analytique est généralement moins sensible aux enrichissements de surface. En effet, les volumes de matière correspondant à des modifications locales de la composition d'un échantillon sont dans la plupart des cas, donc négligeables par rapport au volume total de ce dernier. La composition finalement obtenue par analyse par ANRC

---

couplée à un microscope électronique à balayage (MEB : LEO 120 Cambridge Instrument, tension d'accélération 15 kV, 120 s d'analyse sur une surface de 2 x 2 mm). Toutefois, cette méthode est également très sensible aux enrichissements de surface. Les dosages ont été réalisés après que les échantillons aient été abrasés superficiellement afin notamment d'éliminer le vernis déposé lors de leur restauration. Pour parfaire l'étalonnage, des alliages cuivreux commerciaux ont été utilisés en complément. Ils sont très homogènes et préalablement dosés par spectrométrie d'émission optique à source étincelle par le laboratoire Qualité du fournisseur.

En comparant les compositions de référence avec les dosages réalisés par ailleurs par spectrométrie de fluorescence X, le logiciel de quantification calcule les coefficients correctifs qu'il applique ensuite en routine lors des analyses. Finalement, l'étalonnage proposé a été validé en comparant les résultats obtenus à partir de nouveaux échantillons préalablement abrasés et analysés par spectroscopie en dispersion d'énergie selon le même protocole que les échantillons de référence.

[577] cf. Annexe K.

[578] cf. Annexe B.

n'est pas beaucoup influencée par ces hétérogénéités limitées. Les seules configurations où les analyses risquent d'être faussées, sont les caractérisations d'échantillons de petite dimension et en particulier de très faible épaisseur. Dans ces cas particuliers, le volume qui aura pu être modifié par les réactions d'enrichissement peut constituer une part non négligeable du volume total. Sa composition a un poids important sur le résultat final[579]. C'est pourquoi, le laboratoire développe aujourd'hui une méthode complémentaire d'analyse des monnaies d'argent par spectrométrie de masse couplée à un plasma inductif avec prélèvement par ablation laser (LA-ICP-MS). Cette technique visuellement non invasive permet de caractériser la matière sous la couche de corrosion superficielle d'un échantillon[580].

Toutefois, les dimensions des objets du *corpus* de La Rochelle sont globalement assez importantes pour attester que les analyses par ANRC rendent compte de la composition originelle de ces derniers. D'autant que leur restauration a éliminé les produits de corrosion agglomérés à leur surface.

En préalable à la définition du protocole d'analyse, il a été décidé compte tenu des résultats préliminaires de fluorescence X que les analyses par ANRC ne seraient pas mises en œuvre sur la totalité des échantillons du *corpus* initial.

Dans une réflexion sur les questions monétaires, la connaissance du titre en métal précieux des différents objets apparaît indispensable puisqu'il correspond à un paramètre réglementaire imposé par des ordonnances royales. La détermination de cette donnée pour chacun des carreaux et flans mis au jour place de Verdun, permet finalement de traiter des questions des types monétaires rencontrés mais également du respect des règlements officiels. C'est pourquoi les échantillons contenant de l'argent ont été systématiquement analysés.

En revanche, la caractérisation d'une famille très homogène, composée d'objets de cuivre presque pur, n'a été envisagée qu'à partir d'un échantillonnage restreint. Considérant que l'un des isotopes formés lors des analyses par l'irradiation du cuivre, a une période de décroissance radioactive particulièrement longue, une telle démarche minimise la quantité de radioisotopes formés sans limiter les futures discussions. D'autant que les dosages par ANRC ont validé, pour ce groupe, les quantifications préliminaires par fluorescence X.

L'échantillonnage de ce groupe a finalement exclu principalement une grande part des carreaux et flans de l'unité stratigraphique 3009 qui constitue par ailleurs

[579] Condamin J. *et al.*, Changes suffered..., *op. cit.*, p. 52.
[580] Sarah G. *et al.*, Application of laser ablation..., *op. cit.*, p. 1163-1167.
Sarah G., *Caractérisation de la composition..., op. cit.*, 516 et 226 p.

une fraction importante du groupe des cuivreux. L'homogénéité de composition constatée au sein de cet ensemble est d'autant plus certaine que les objets proviennent d'un même contexte. Sur les 99 carreaux et flans de cette famille préalablement analysés par spectrométrie de fluorescence X, seuls six d'entre eux ont été analysés par ANRC.

Un troisième groupe a révélé des objets trahissant des quantités non négligeables de zinc. Son étude met *a priori* en évidence l'utilisation de laiton dans la fabrication monétaire alors qu'il ne s'agit pas d'un alliage monnayable, seul le cuivre pur ou allié d'or ou d'argent étant réglementaire. Son analyse permettra notamment de discuter des questions des matières premières du monnayage en référence aux ordonnances royales.

Enfin, parmi les échantillons qui ont été retenus pour être dosés par ANRC, il est apparu que certains d'entre eux n'étaient pas morphologiquement compatibles avec cette technique. Ils n'étaient pas assez plats ou de dimension trop importante. C'est notamment le cas de plusieurs déchets de coupe ainsi que des lames, ces dernières étant trop longues pour être placées dans la cellule d'analyse de 5 cm de diamètre.

Finalement, parmi les 211 objets préalablement analysés par spectrométrie de fluorescence X, 94 ont été caractérisés plus précisément par analyse par ANRC. A ce chiffre s'ajoute celui des échantillons préalablement isolés grâce à leur aspect argenté. Au total, 180 analyses par activation ont été effectuées. Les durées d'irradiation ont pu être calculées à partir des estimations des teneurs déterminées par les dosages de fluorescence X. En définitive, 126 objets ont été irradiés selon le programme d'analyse des alliages cuivreux et 54 selon celui des alliages d'argent[581].

Les objets analysés à la fois pas fluorescence X et par ANRC, offrent l'opportunité de vérifier les remarques énoncées sur la limitation des analyses de surface dans l'étude d'objets archéologiques métalliques.

Comparaison entre analyses par analyse par activation aux neutrons rapides de cyclotron et par spectrométrie de fluorescence X

Finalement, les analyses par activation ont confirmé les tendances des résultats quantitatifs de spectrométrie de fluorescence X. Les classements préalablement proposés à partir de cette technique n'ont pas été modifiés par les caractérisations

[581] cf. Annexe B.

supplémentaires. Cependant, une comparaison plus fine révèle des différences. Elles sont particulièrement visibles sur les deux graphiques suivants :

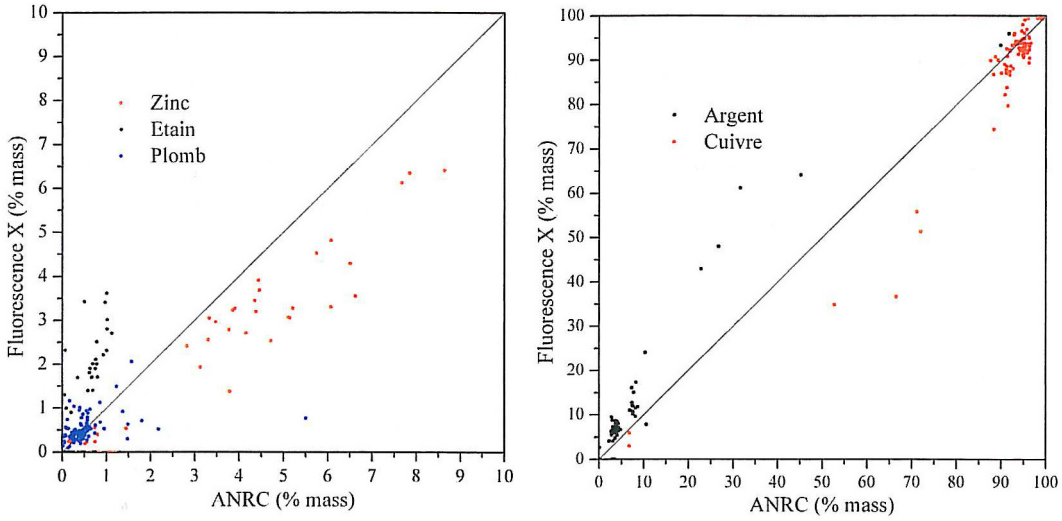


Figure 112 - Comparaisons entre les résultats obtenus par fluorescence X et ANRC.

La méthode de surface surdose systématiquement l'argent et l'étain alors que le zinc est sous-évalué[582]. Quant au plomb, il est en moyenne relativement bien estimé en spectrométrie de fluorescence X. Dans une étude menée sur les phénomènes d'enrichissement de surface et leur influence sur les résultats des méthodes d'analyses de surface, J. Condamin et M. Picon constatent les mêmes tendances que celles qui viennent d'être présentées[583]. Ceci confirme la nécessité d'analyser les échantillons de La Rochelle par une méthode globale. Lors de leur enfouissement, ils ont subi des réactions de corrosion superficielles qui ont modifié localement leur composition. C'est pourquoi, en tant que méthode de surface, les dosages par spectrométrie de fluorescence X sont particulièrement affectés.

La solution proposée par J. Condamin et M. Picon ainsi que par d'autres analystes consiste à abraser systématiquement les échantillons afin d'éliminer les produits transformés[584]. C'est cette démarche qui a été retenue lors de notre

[582] Le cuivre en tant que constituant complémentaire de ces trois éléments met logiquement en évidence des tendances inverses.
[583] Condamin J. *et al.*, Changes suffered..., *op. cit.*, p. 50-66.
[584] Carter G. F., Preparation of ancient coins for accurate X-ray fluorescence analysis, *Archaeometry*, vol. 7, n° 1, 1964, p. 106-113.
Hawkes S. C. *et al.*, X-ray fluorescent analysis of some dark age coins and jewellery, *Archaeometry*, vol. 9, n° 1, 1966, p. 132.
Metcalf D. M. *et al.*, The metal contents of the silver pennies of William II and Henry I, *Archaeometry*, vol. 13, n° 2, 1971, p. 184.

protocole d'étalonnage. Toutefois, elle ne pouvait être mise en œuvre sur la totalité des 303 objets du *corpus*, notamment pour des raisons évidentes de conservation.

Le cas de l'enrichissement superficiel en argent est plus gênant. C'est en effet à partir d'une connaissance précise du titre en métal précieux des alliages de La Rochelle que doivent être abordées les problématiques monétaires qui lui sont associées. Or, il sera vu plus loin que les hétérogénéités de la composition superficielle des échantillons monétaires à base d'argent, ne résultent pas seulement des réactions qui se mettent en place lors des périodes d'enfouissement. Les opérations de mise en forme du monnayage ainsi que celle du blanchiment, sont également à l'origine de phénomènes d'enrichissement similaires[585].

Enfin, il s'avère que les conditions d'analyses retenues pour les analyses par fluorescence X n'ont pas permis d'avoir une limite de détection assez basse pour quantifier des éléments tels que l'antimoine, l'arsenic ou l'or, par la suite dosés par activation[586]. Le recours à un temps d'analyse plus long aurait certainement amélioré ces paramètres. Cependant, d'un point de vue de la durée totale de l'étude, un tel choix n'est pas indispensable puisque la spectrométrie de fluorescence X n'intervient que dans la définition d'un classement préliminaire.

Finalement, le protocole proposé a permis de traiter rationnellement le *corpus* métallique de l'atelier monétaire de La Rochelle. Les analyses préliminaires par spectrométrie de fluorescence X, dans un premier temps indispensables pour calculer les durées d'activation des échantillons analysés par ANRC, ont également permis de restreindre l'utilisation de cette technique de caractérisation relativement lourde. Dans la mesure où il est possible de définir des groupes présentant de fortes homogénéités de composition, il est dans certains cas préférable, suivant les problématiques développées, de ne doser qu'un échantillonnage représentatif d'un *corpus* plutôt que son ensemble. Cette démarche est particulièrement intéressante dans le cadre de la caractérisation de grandes collections. C'est notamment ce même protocole qui a été mis en œuvre pour l'étude des *corpus* des grottes de Lauradieu et La Catette[587].

Carter G. F. *et al.*, Comparison of analyses of eight Roman orichalcum coin fragments by seven methods, *Archaeometry*, vol. 25, n° 2, 1983, p. 203.
Cowell M. R., Coins analysis by Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometry, dans Oddy W. A. *et al.*, eds., *Metallurgy in numismatics,* Londres, Angleterre, Royal numismatic society, 1998, t. 4, p. 452.

[585] cf. Blanchiment des flans, p. 459.

[586] Le manque d'informations sur l'or aurait été d'autant plus gênant puisque ce dernier se révélera être un marqueur particulièrement intéressant dans le *corpus* de La Rochelle.

[587] cf. Les matières premières du faux-monnayage de la grotte de Lauradieu, p. 517.

B. Les résultats analytiques

Au terme du programme d'analyse, 295 des 303 échantillons initialement rassemblés pour cette étude analytique ont finalement été caractérisés[588]. Les résultats de ces caractérisations présentés en Annexe K, témoignent d'une grande diversité de compositions. Cependant, au sein de ce *corpus*, il est également possible d'inventorier des sous-groupes homogènes. Ces derniers avaient déjà été pressentis lors des premières analyses par fluorescence X et avaient aussi pu être évoqués dans le cadre de la présentation des échantillons, à partir d'observations préliminaires et notamment celle de leur morphologie[589]. Or, dans une réflexion monétaire, il n'est pas surprenant de mettre en évidence des corrélations entre la composition d'un alliage, en particulier son titre en métal précieux, et les paramètres métrologiques que sont les dimensions et la masse d'un objet puisqu'ils définissent les différents types de monnaies.

Dans un premier temps, afin d'appréhender la diversité des alliages rencontrés au sein de l'atelier monétaire de La Rochelle, il est possible de recourir à une analyse en composantes principales (Figure 113)[590]. Il s'agit d'une représentation statistique qui permet d'exposer un grand nombre de données sur un graphique réduit ici à seulement deux dimensions. Il est donc possible de mettre en évidence des groupes homogènes, ainsi que des corrélations entre ces derniers et les données prises en compte. Son principe est exposé en Annexe E.

Dans une démarche préliminaire, la seule considération des données analytiques permet de proposer une discrimination satisfaisante sans qu'elles nécessitent d'être complétées par des informations métrologiques. La figure ci-dessous a été calculée à partir des données collectées et réduites[591], pour chacun des échantillons quant à leur composition en antimoine, argent, arsenic, cuivre, étain, nickel, or, plomb et zinc.

S'agissant de considérer le *corpus* d'un point de vue global, il a été décidé de tenir compte à la fois des données obtenues par analyse par ANRC mais également, pour les échantillons n'ayant pas été caractérisés par cette méthode, des quantifications données par les dosages de spectrométrie de fluorescence X.

---

cf. Les matières premières de faux-monnayage de la grotte de La Catette, p. 563.

[588] Les 8 échantillons non pris en compte ici n'étaient finalement pas composés de métaux.

[589] cf. Monnayage royal : La Rochelle (Charente-Maritime) : Le mobilier numismatique métallique, p. 149.

[590] Le calcul des coordonnées de cette représentation ont été réalisés avec le logiciel Excel après un centrage et une normalisation des données.
cf. Annexe E.

[591] cf. Annexe E.

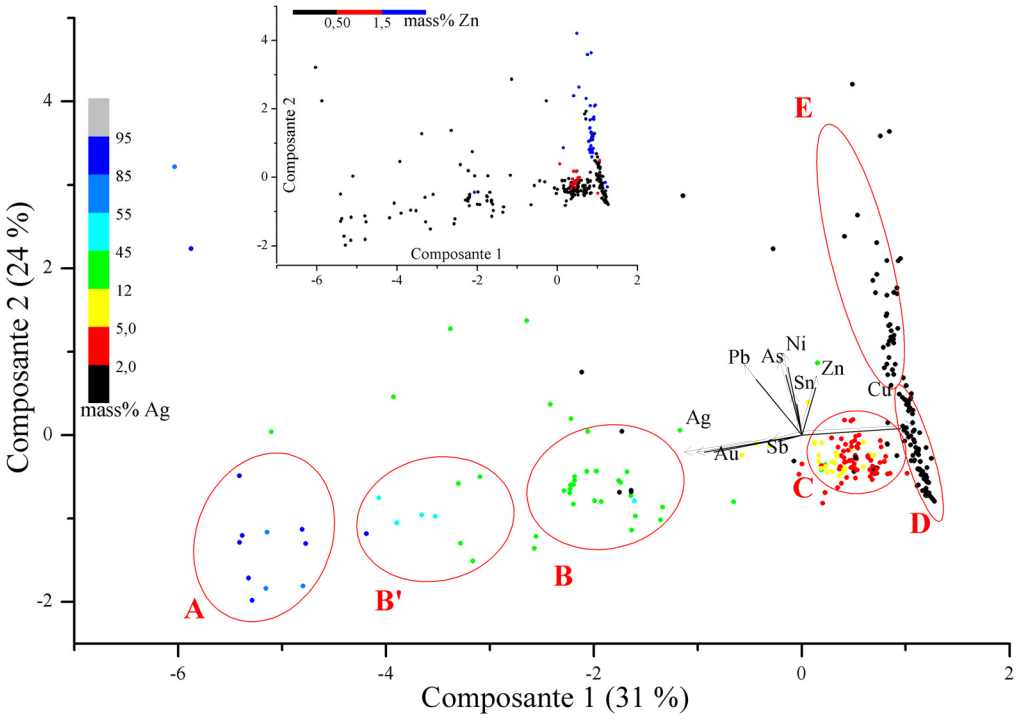


Figure 113 - Analyse en composantes principales des données analytiques du *corpus* métallique de l'atelier monétaire de La Rochelle.

Avec une variance de 31 %, l'axe 1 porte plus d'informations que le second. C'est d'ailleurs selon sa direction, qu'il est possible d'observer cinq groupes de composition : A, B, B', C et (D, E). Quant à la perpendiculaire, avec une variance de 24 %, elle ne permet d'ajouter qu'une seule nouvelle population, le groupe E, à ces premiers ensembles. Avec une variance cumulée de 55 %, une telle répartition est finalement bien caractéristique d'un *corpus* monétaire puisque la discrimination principale de l'étude de la composition des objets mis au jour, s'appuie sur leur titre en métal précieux qui correspond ici à celui de l'argent. Or, l'axe associé à cet élément particulier est globalement orienté selon la direction la plus représentative donnée par la composante 1. La considération des sens de variation est tout aussi caractéristique puisque celle du cuivre est opposée à celle de l'argent dans une direction quasiment parallèle. Elle traduit la complémentarité du cuivre et de l'argent dans les alliages binaires monétaires.

C'est à partir de cette ACP que peut être abordée la description de différentes compositions métalliques qui ont été travaillées dans l'atelier monétaire de

La Rochelle. Il faut souligner que finalement les ensembles mis en évidence correspondent globalement à ceux proposés dans la présentation du *corpus*[592].

Dans un premier temps, la prise en compte des teneurs en argent dégage quatre principales familles qui rappellent la classification monétaire. Le groupe A rassemble les alliages de plus haut titre en métal précieux, c'est-à-dire au-delà de 75 % massique. Il est en référence avec le monnayage d'argent. Viennent ensuite les groupes B et B' dans lesquels l'argent ne représente plus que 20 à 55 % du mélange total. Ces ensembles sont associés à la frappe de monnaies de billon. Enfin, la famille C regroupe les alliages de très bas titres puisqu'ils ne dépassent pas la dizaine de pourcents. Il s'agit ici de preuves de la production dans l'atelier rochelais, d'un monnayage de bas billon correspondant à l'émission des monnaies noires. Au sein de ce dernier groupe, la représentation statistique suggère l'existence de deux sous-ensembles suivant le taux de métal précieux. Les teneurs en zinc (Figure 113 : petit graphique) permettent d'y définir une catégorie supplémentaire. L'étude de ces différents ensembles sera développée plus loin lors de leur prise en compte individuelle.

A partir de 1575, sous le règne d'Henri III, le monnayage de bas billon est remplacé par la frappe de cuivre pour les monnaies de valeurs moins grandes[593]. C'est à ce type de monnayage qu'il faut rapprocher le groupe D qui rassemble les alliages de cuivre à peu près pur principalement révélé lors des analyses de spectrométrie de fluorescence X. Enfin, l'ensemble E qui trahit la présence de zinc dans le monnayage de La Rochelle est particulière (Figure 113 : petit graphique). Dans un cadre monétaire et dans la mesure où les alliages considérés ne contiennent pas de métal précieux, cet ensemble E doit être rapproché du groupe D, donc d'un monnayage de cuivre. La vérification de cette hypothèse devra être envisagée par une approche métrologique. En revanche, ce groupe E doit également être considéré individuellement puisqu'il témoigne de l'utilisation d'alliages *a priori* non réglementaires dans la fabrication monétaire.

Finalement, l'étude de la totalité du *corpus* sur la figure 113, donne un aperçu global de la population de chacun des groupes qui viennent d'être définis. Compte tenu des datations proposées par les archéologues, le mobilier considéré se répartit sur toute la période du XVI^{e} siècle. La quantité du matériel numismatique mis au jour est finalement limitée et en accord avec la rigueur théorique de la fabrication

[592] cf. Monnayage royal : La Rochelle (Charente-Maritime) : Le mobilier numismatique métallique, p. 149.
[593] Hoffmann H., *Les monnaies royales..., op. cit.*, p. 133.
Bompaire M. *et al.*, *Numismatique médiévale..., op. cit.*, t. 7, p. 83.

monétaire. D'un autre côté, la richesse de certains contextes témoigne également de pertes relativement importantes. Toutefois, la composition des alliages associés corrobore la logique qui veut que plus le monnayage est précieux, plus il est contrôlé. En l'occurrence, le nombre d'échantillons retrouvés diminue avec l'augmentation de la quantité d'argent qu'ils contiennent.

Enfin, l'une des caractéristiques intéressante de l'ACP est qu'elle révèle les relations entre les variables introduites dans le calcul[594]. L'une des relations les plus évidentes, qui a notamment été déjà présentée, est celle qui associe l'argent au cuivre puisque les axes de variation de ces deux métaux sont quasiment parallèles et opposés. En revanche, le cas de la relation entre l'or et l'argent (parallèle et de même sens) est beaucoup plus intéressant. Si les analyses ont confirmé l'absence de matériel associé au monnayage de l'or dans le *corpus* mis au jour place de Verdun, cet élément n'est toutefois pas totalement absent dans les alliages caractérisés. Il a été détecté à de faibles teneurs qui ne dépassent jamais 0,2 % massiques, dans une grande partie du mobilier numismatique d'argent, de billons et de bas billons. Or, une quasi-superposition des deux axes de l'or et de l'argent, est observable sur l'ACP (Figure 113). Il apparaît dans ce cas que ces deux éléments sont très fortement corrélés. C'est pourquoi cette question doit être particulièrement développée.

1 - Les métaux du monnayage de l'atelier de La Rochelle

Dans un premier temps, les résultats analytiques sont considérés d'un point de vue global, notamment à partir des principaux métaux en présence. Il est ainsi possible de discuter des matières premières du monnayage associées au mobilier métallique de La Rochelle.

En préliminaire, il faut noter que les teneurs obtenues par les analyses par ANRC et par spectrométrie de fluorescence X ne doivent pas être prises en compte à un même niveau, mais comparées avec beaucoup de précaution. D'abord parce qu'elles n'ont pas les mêmes limites de détection. C'est pourquoi, ce sont les dosages par activations qui sont dans la plupart des cas considérés. Toutefois, les résultats obtenus par fluorescence sont retenus pour discuter du groupe des alliages cuivreux puisqu'il a été principalement analysé par cette méthode. D'autant que la qualité des données obtenues pour ce groupe est attestée par l'échantillonnage étudié par ANRC.

[594] cf. Annexe E.

Les premiers résultats des analyses menées sur le *corpus* métallique de l'atelier rochelais confirment que les fouilles de la place de Verdun n'ont pas mis au jour d'indices associés au travail de l'or. D'un autre côté, de nombreux échantillons à base d'argent, dont certains présentent un titre élevé de métal précieux, ont été découverts. L'hypothèse retenue pour justifier cette différence, est qu'elle résulte de la consigne donnée aux ouvriers monétaires de séparer spatialement les monnayages de ces deux métaux monétaires afin d'éviter qu'ils ne soient accidentellement mélangés. Les métallurgistes de l'époque n'étaient alors pas capables de les séparer. L'emprise des travaux archéologiques n'aurait donc pas concerné les espaces dévolus au travail de l'or.

D'un autre côté en mettant en évidence des alliages à base d'argent dans les mêmes contextes que d'autres qui n'en contiennent pas[595], il faut admettre que le monnayage du cuivre est mis en œuvre dans les mêmes espaces que celui de l'argent. Une telle démarche de séparation des monnayages du cuivre et de l'argent n'a pas en effet lieu d'être. D'abord parce que les mélanges des ces deux métaux constituent les alliages monétaires frappés au sein de cet atelier, mais également parce que la séparation de ces deux éléments est bien maîtrisée, par le procédé de la coupellation. Il n'est donc pas surprenant que les monnayages de ces deux métaux ne soient pas spatialement séparés.

L'argent dans le monnayage de l'atelier de La Rochelle

Parmi les 295 échantillons métalliques analysés, près de la moitié d'entre eux, soit 155 objets présentent une concentration non négligeable d'argent, supérieure à 2 % de leur masse totale. Il s'agit, comme exposé précédemment, pour la plupart d'alliages de bas billon avec cependant quelques échantillons du monnayage d'argent auxquels sont associés des titres très élevés en métal précieux, au-delà de 80 % massiques.

La relation suggérée par l'ACP, entre l'argent utilisé dans les alliages monétaires du *corpus* rochelais avec les traces d'or mesurées, est confirmée par le graphique ne prenant en compte que ces deux seuls éléments (Figure 114)[596]. Il est nécessaire d'en discuter ici puisqu'elle est sensiblement identique pour une très

[595] Il faut citer principalement les unités stratigraphiques 1021 et 3009 qui mettent en parallèle des monnayages de cuivre pur et d'argent.
[596] Il s'agit des résultats obtenus par les analyses par ANRC. Dans les conditions retenues pour les analyses de fluorescence X, la limite de détection de l'or dans les différents alliages est trop élevée. Il est dans la plupart des cas non détecté.

grande majorité des échantillons des monnayages d'argent et de billon de La Rochelle (Figure 114 : Groupe I). Et seuls deux autres ensembles beaucoup plus limités en nombre d'individus s'éloignent de la tendance que définit le premier groupe. L'un met en évidence des rapports Au/Ag plus élevés, dépassant 1 % (Figure 114 : Groupe II). Alors que dans un second (Figure 114 : Groupe III), les rapports sont au contraire plus faibles que la moyenne globale puisqu'ils sont tous inférieurs à 0,1 %. Ce sont par ailleurs ces mêmes échantillons qui sont constitués des alliages de plus haut titre, tous autour de 90 % de métal blanc.

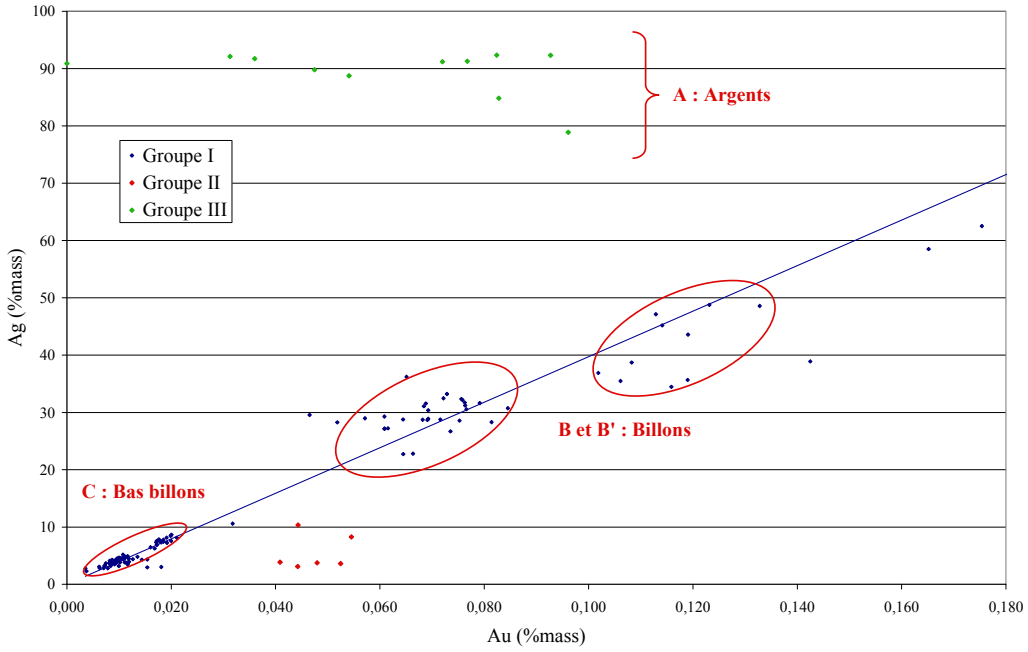


Figure 114 - Quantification des traces d'or dans le monnayage d'argent et de billon.

Dans le traitement de l'argent comme matière première, le lien de ce composé avec l'or n'est pas surprenant, il est d'ailleurs reconnu par différents auteurs[597]. Il est admis, et les expériences de H. Mc Kerrell et R. B. K. Stevenson l'ont montré, que l'or suit l'argent au cours des différentes opérations métallurgiques de

[597] Metcalf D. M. *et al.*, The metal contents..., *op. cit.*, p. 177-187.
Richet D. *et al.*, Le Potosi et la physique nucléaire, *Annales*, vol. 27, n° 7, 1972, p. 1235-1256.
Gale N. H. *et al.*, Ancient Egyptian silver, *The Journal of Egyptian Archaeology*, vol. 67, 1981, p. 103-115.
Collin B. *et al.*, Sur les traces de l'argent du Potosí, *Annales*, vol. 45, n° 2, 1990, p. 483-505.
Collin B., L'argent du Potosi (Pérou) et les émissions monétaires françaises, *Histoire et mesure*, vol. XVII, n° 3/4, Monnaie et espace, 2002, p. 217-225.
Meyers P., Production of silver in Antiquity: ore types identified based upon elemental compositions of ancient silver artifacts, dans Van Zelst L., ed., *Patterns and Process: A Festschrift in Honor of Dr. Edward V. Sayre,* Suitland, Etats Unis, Smithsonian Center for Materials Research and Education, 2003, p. 274.

production ou d'affinage[598]. C'est pourquoi, il a parfois été considéré dans les études précédentes comme un marqueur potentiel du minerai initial. Une telle caractéristique est justifiée par les propriétés chimiques relativement semblables de ces éléments, en particulier du point de vue de leur résistance à l'oxydation par l'oxygène à haute température. Ce sont, tous les deux, des métaux nobles.

La principale opération métallurgique associée au travail de l'argent se résume à la coupellation. Elle est utilisée à la fois dans un cadre de métallurgie extractive où elle doit séparer l'argent contenu dans le plomb produit à partir de la galène argentifère, mais ce même procédé se retrouve dans la fabrication monétaire. Il est dans ce cas nécessaire à l'affinage des matières premières afin de récupérer l'argent contenu dans les alliages refondus.

Le principe de la séparation qui se met en place au cours d'une coupellation s'explique par une oxydation préférentielle des métaux auxquels l'argent est allié alors que ce dernier reste sous forme réduite[599]. C'est pourquoi, cette opération ne modifie pas les rapports entre ce métal et l'or puisque ce dernier n'est pas non plus oxydé.

Dans le cadre de cette étude technique sur le monnayage médiéval, il n'a pas été envisagé de développer de problématiques de provenance des matières premières. Toutefois, la forte corrélation mise en évidence au sein du *corpus* de La Rochelle est tout de même très significative d'un point de vue du stock d'argent utilisé. Globalement, parmi les 141 échantillons pris en compte[600], le groupe I en rassemble 124. Bien qu'ils se répartissent selon plusieurs sous-ensembles, ces derniers correspondent finalement aux différents types d'alliages monétaires travaillés, B, B' et C, marqués par l'ACP. En définitive, il est relativement remarquable que le rapport moyen Au/Ag au sein de cet ensemble, se situe autour de 0,25 % avec un écart-type de seulement 0,06 %. Cette variabilité cependant non négligeable, est *a priori* principalement due aux billons présentant les taux les plus élevés d'argent (Figure 113 : groupes B et B'). L'augmentation de la proportion de cet élément est corrélée avec une dispersion plus importante des échantillons autour de la tendance générale. Dans cette configuration, le groupe des bas billons est en revanche très homogène (Figure 113 : groupe C).

---

[598] Mc Kerrell H. *et al.*, Some analyses of Anglo-Saxon and associated Oriental silver coinage, dans Hall E. T. *et al.*, eds., *Methods of Chemical and Metallurgical Investigation of Ancient Coinage,* London, Royal Numismatic Society, 1972, p. 197-198.

[599] Téreygeol F. *et al.*, La coupellation..., *op. cit.*, p. 171-187.

[600] Seules sont prises en compte ici les analyses par ANRC qui ont permis d'avoir une limite de détection suffisante pour mettre en évidence les traces d'or associées à l'argent. D'autant que les échantillons du *corpus* présentant des taux non négligeables de ce dernier ont été systématiquement caractérisés par ANRC.

L'écart plus important observé pour les échantillons de plus haut titre par rapport à la moyenne, se comprend dans la mesure où la nécessité de disposer de plus grandes quantités de métal précieux dans la préparation de ces alliages, augmente d'autant les probabilités de mélanges d'argents provenant de sources différentes.

Qu'en est-il de l'origine d'une telle homogénéité constatée au sein du groupe I ? Il y a en définitive deux alternatives distinctes qui se comprennent par les propriétés de l'or à suivre l'argent lors des opérations métallurgiques qui lui sont associées.

Dans certains cas favorables, un rapport Au/Ag fixe se voit directement hérité du type de minerai utilisé. Il n'aura pas été modifié par les opérations de métallurgie extractive. Ce paramètre est réellement conservé jusqu'à l'utilisation finale du métal, uniquement si ce dernier ne se trouve pas mélangé à d'autres sources présentant des rapports différents. Dans ce cas, la traçabilité est rompue. D'un autre côté, l'homogénéité d'un rapport or-argent résulte au contraire, dans certains cas d'un mélange. Dans le cadre du monnayage notamment, les refontes de monnaies à la suite de réformes monétaires ont pour conséquence l'uniformisation du stock de métal utilisé dans la fabrication des espèces. Cette homogénéisation est d'autant plus grande que le nombre des refontes est élevé. D'un autre côté, si à une grande échelle l'uniformisation aurait tendance à trahir une circulation rapide des monnaies favorisant les mélanges de nombreuses sources, au niveau d'un atelier cette conclusion est moins évidente. Dans ce cas, l'alignement des compositions peut également avoir pour origine la refonte d'un stock local dont l'inertie de composition est finalement peu perturbée par des apports étrangers.

Finalement, quelle est l'hypothèse applicable au *corpus* de La Rochelle ? La réponse à cette question est difficile, en particulier parce qu'elle ne peut ici s'appuyer sur des données chronologiques fines. Les objets considérés ici ont été globalement datés du XVI^{e} siècle par les archéologues. Par ailleurs, dans une telle réflexion, il est nécessaire de disposer d'une collection de référence à laquelle confronter les données de l'atelier rochelais. Dans ce cadre, deux études numismatiques sont accessibles.

En 1972, D. Richet *et al.* ont proposé de mettre en évidence l'arrivée de l'argent provenant de la mine de Potosi dans les monnayages européens notamment espagnol et français. Ils ont pour cela justement considéré le rapport

Au/Ag mesuré dans un *corpus* de monnaies françaises bien datées[601]. Cependant, cette donnée n'est pas apparue comme suffisamment discriminante pour détecter l'argent de Potosi dans les alliages monétaires. Ce n'est qu'à la reprise de ces travaux en 1990, selon une même démarche par B. Collin *et al.*, que les interrogations initialement définies ont été finalement levées à partir de la considération du rapport indium-argent[602].

En définitive, dans la discussion sur les analyses des échantillons métalliques de La Rochelle, les *corpus* rassemblés pour ces deux précédentes études sont particulièrement intéressants. D'abord parce qu'ils sont constitués d'un grand nombre de monnaies datées couvrant précisément la période qui a vu la préparation des alliages considéré ici : elle s'étend de la fin du XV^{e} jusqu'au milieu du XVII^{e} siècle. De plus, les espèces analysées proviennent d'ateliers de la zone atlantique dont La Rochelle fait justement partie. Enfin, les résultats analytiques sont comparables dans la mesure où ils ont été obtenus par des méthodes de caractérisation similaires, utilisant toutes le principe de l'activation nucléaire.

Sur la figure ci-dessous, les analyses du *corpus* de La Rochelle sont comparées à celles des études précédemment évoquées. Parmi les 130 monnaies considérées, il apparaît que les rapports or-argent mesurés sont globalement plus faibles que celui de la plupart des alliages rochelais. Même si certaines monnaies présentent des rapports tout à fait comparables, ils se situent en moyenne autour de 0,12 %. De plus, le XVI^{e} siècle apparaît comme une période de transition. La quantité d'or associée à l'argent diminue entre le XV^{e} et le XVII^{e} siècle. Il n'est pas question ici de discuter de l'origine de variation, d'autant que l'échantillonnage daté du XV^{e} siècle est relativement limité. En revanche, quelles sont les conclusions de cette confrontation pour nos échantillons ? Mettent-ils en évidence le monnayage d'un stock d'argent homogénéisé à la suite de nombreuses refontes successives ou faut-il y voir une source plus localisée ? Dans la mesure où la moyenne générale du rapport Au/Ag, observé sur l'ensemble des monnaies des deux *corpus* de monnaies, est plus faible que celle qui caractérise les ébauches rochelaises se situant vers 0,25 %, l'hypothèse d'une uniformisation résultant d'une refonte de monnaies est maintenant peu probable. Finalement, c'est le groupe III (Figure 114), bien que moins homogène vis-à-vis des traces d'or, qui se situe dans la moyenne générale.

[601] Richet D. *et al.*, Le Potosi..., *op. cit.*, p. 1235-1256.
[602] Collin B. *et al.*, Sur les traces..., *op. cit.*, p. 483-505.

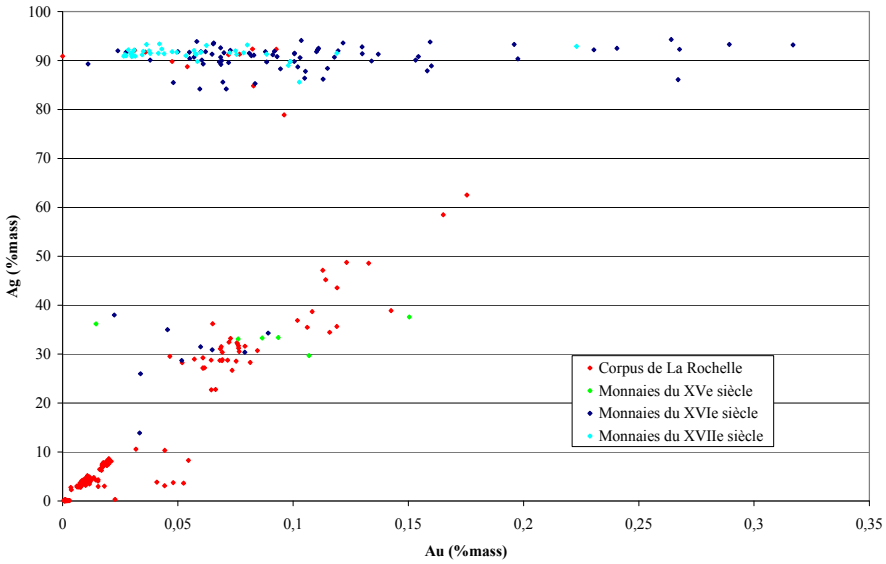


Figure 115 - Comparaison du corpus de La Rochelle avec les analyses de monnaies de D. Richet *et al.* et B. Collin *et al.*[603].

En conclusion, l'argent utilisé dans le monnayage de l'atelier monétaire de La Rochelle, provient principalement d'une même source *a priori* géographique. Il n'est pas possible en revanche d'être plus précis sans avoir une approche géochimique. D'autant que le rapport Au/Ag n'est pas une donnée suffisante pour attester d'une relation entre une mine et un métal. Même si P. Meyer s'y est risqué en proposant des tendances générales suivant différentes classes de minerais, les rapports révèlent difficilement des origines minières, car selon d'autres auteurs, ils peuvent varier suivant les filons au sein d'une même exploitation[604]. En revanche, la prise en compte de ces données parallèlement à une étude des rapports isotopiques du plomb de ce *corpus* homogène serait une démarche potentiellement très efficace dans une telle discussion.

En outre, la spécificité du *corpus* correspondant à un monnayage d'argent de l'atelier de La Rochelle, peut constituer un marqueur temporel d'une période précise de fonctionnement de la fabrique. Celle-ci pourrait finalement être déterminée à partir de l'analyse d'un ensemble de monnaies datées ayant été frappées dans cette seule fabrique. Il s'agirait en définitive de la même démarche que celle retenue en 1972 par D. Richet *et al.* pour déterminer la date d'introduction de l'argent de Potosi dans les monnaies françaises. Bien que leur

[603] Richet D. *et al.*, Le Potosi..., *op. cit.*, p. 1250-1251.
Collin B. *et al.*, Sur les traces..., *op. cit.*, p. 503-505.
[604] Stos-Gale Z. A. *et al.*, The sources of Mycenaean silver and lead, *Journal of Field Archaeology*, vol. 9, n° 4, 1982, p. 467-485.
Meyers P., Production of silver..., *op. cit.*, p. 271-288.

étude n'ait pas été très concluante, la particularité du rapport rochelais comparée à ceux qui caractérisent le monnayage français à la même époque permet d'espérer de meilleurs résultats.

Le zinc et l'étain dans le monnayage de l'atelier de La Rochelle

Dans la discussion sur les matières premières utilisées dans le monnayage du second atelier monétaire de La Rochelle, le cas du zinc et de l'étain est particulier. Ils apparaissent en quantités non négligeables dans plusieurs échantillons, entre 1 et 10 % de leur masse totale, alors qu'il ne s'agit pas de métaux monétaires.

Le zinc ne doit pas ici être considéré sous sa forme métallique simple mais bien sous forme alliée. Au XVI^{e} siècle, période à laquelle est associé le *corpus* de La Rochelle, le zinc métal est peu connu[605]. Les premiers procédés métallurgiques qui ont permis de l'obtenir sous forme métallique pure, n'ont commencé à être maîtrisés qu'à partir du XVIII^{e} siècle en Europe[606]. Cependant, avant cette période, cet élément a tout de même été indirectement utilisé, mélangé au cuivre dans des laitons. Lorsque le zinc ne se trouvait pas allié indirectement lors de la réduction de minerai de cuivre contenant également cet élément, la préparation des laitons était différente de celle d'aujourd'hui puisque les métaux purs ne pouvaient être directement alliés. Il fallait recourir à la technique de la cémentation[607].

La mise en œuvre de ce procédé est décrite dans un article d'A. Doridot *et al.* à partir d'une étude expérimentale des recettes médiévales et modernes[608]. Il se

[605] Ramin J., *La technique minière..., op. cit.*, p. 181-186.
Bompaire M. *et al.*, Analyses de monnaies françaises du XIe siècle, le problème du zinc, dans Kluge B. *et al.*, eds., *XII. Internationaler Numismatischer Kongress Berlin 1997*, Berlin, Allemagne, 2000, p. 876.
Doridot A. *et al.*, Production expérimentale de laiton par cémentation en creuset ouvert, avec du minerai de zinc, selon les recettes médiévales et modernes, *Archéoscience revue d'archéométrie*, vol. 30, 2006, p. 15-24.
[606] *Ibidem*, p. 16
[607] Pline, *Histoire naturelle des métaux et de la sculpture, livre XXXIV*, édité par Le Bonniec H. *et al.*, Paris, Les Belles Lettres, coll. « Collection des universités de France Série latine », t. 141, 1953, p. 142 et 288.
Théophile *et al.*, *Essais sur divers arts..., op. cit.*, p. 224-225.
Caley E. R., *Orichalcum and related ancient alloys: Origin, composition and manufacture with special reference to the coinage of the Roman Empire*, New York, Etats Unis, The American Numismatic Society, 1964, p. 92-103.
Martinón-Torres M. *et al.*, Agricola and Zwickau: theory and practice of Renaissance brass production in SE Germany, *Historical metallurgy*, vol. 36, 2002, p. 95-111.
[608] Doridot A. *et al.*, Production expérimentale de laiton..., *op. cit.*, p. 15-24.

résume à placer dans un même creuset, du cuivre avec de la poudre de charbon de bois et le cément. Ce dernier constitue la source de zinc, il se compose principalement d'oxyde ZnO. Il résulte de la calcination d'un minerai appelé calamine et qui rassemble sous ce terme un mélange en proportions variables de carbonate et de silicate de zinc. Au cours de la cémentation, le creuset est chauffé à haute température dans un four, afin de favoriser la réduction du cément. Aux températures de réduction, le zinc est sous forme gazeuse et diffuse dans le cuivre[609]. Le résultat de cette opération, est l'obtention de laitons dont les titres en zinc varient entre 15 et 30 % massiques. Il s'agit d'alliages de couleur jaune.

Dans le cadre de l'étude des analyses de La Rochelle, le zinc doit donc être considéré par rapport au cuivre. Par ailleurs, compte tenu des différences constatées entre les quantifications par fluorescence X et par ANRC, il a été décidé de considérer seulement ces dernières.

En définitive, l'ACP a mis en évidence deux ensembles présentant des concentrations significatives de zinc (Figure 113). Dans le premier, il forme quasiment un composé binaire avec le cuivre, les autres éléments comme le plomb et l'étain ne dépassant pas le pourcent massique (Figure 116 : groupe E et Figure 117). Cette division du groupe E, s'apparente donc au monnayage de cuivre. Les 27 échantillons qui le constituent[610] ont été retrouvés en grande majorité dans la même unité stratigraphique, correspondant au remplissage d'une canalisation aboutissant dans un vide sanitaire[611]. Ils présentent une relative homogénéité métrologique qui doit être rapprochée du type monétaire fabriqué. Les principaux écarts par rapport à une moyenne générale se justifient par une mise en forme plus ou moins avancée suivant les ébauches. Finalement, du point de vue de leur aspect extérieur, les couleurs jaune à jaune-orangé de la plupart de ces échantillons trahissent en quelque sorte leurs compositions irrégulières.

[609] Ramin J., *La technique minière..., op. cit.*, p. 181-182.
[610] L'un d'entre eux n'a pas été analysé par ANRC dans la mesure où il a été prélevé pour une étude métallographique. Les analyses réalisées par spectroscopie en dispersion d'énergie (tension d'accélération 15 kV, 120 s d'analyse) confirment cependant sont appartenance au groupe E.
[611] 20 échantillons proviennent de la couche 1021.

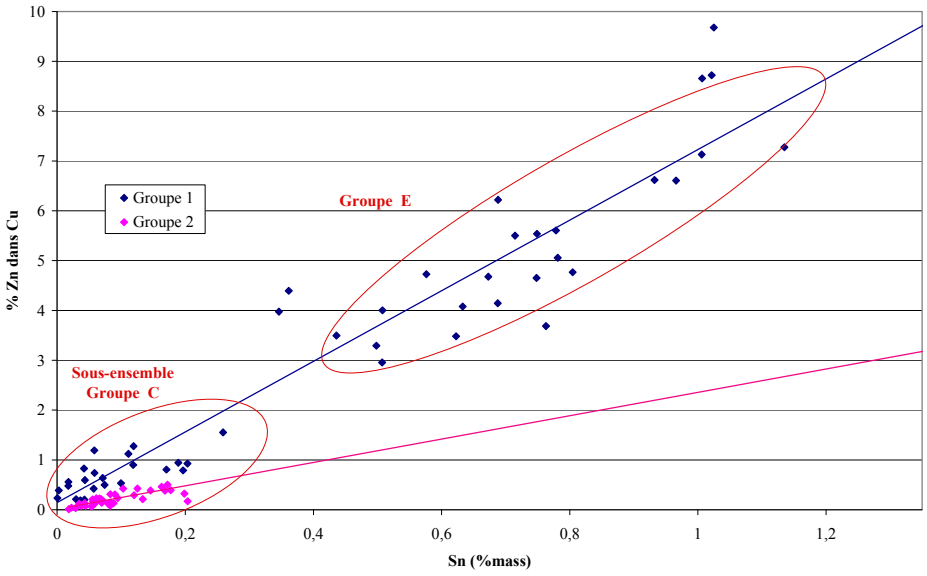


Figure 116 - Le laiton dans le monnayage de La Rochelle.

En revanche, les taux de zinc rapportés au cuivre mesurés au sein de cet ensemble ne traduisent pas d'uniformité puisqu'ils varient entre 2,5 et 9,5 % massiques (Figure 116 : groupe E). Compte tenu des propriétés de cet élément dont la température de vaporisation est relativement basse[612], il est maintenant attesté que l'on observe, lors des refontes de laiton, une diminution de la quantité de zinc dans ces alliages[613]. Toutefois d'après de récentes expérimentations d'A. Gaffiero[614], la perte de 10 % estimée par E. R. Caley au cours de chaque fonte, semble être surévaluée. D'autant qu'elle ne justifie pas les écarts constatés entre les laitons de La Rochelle. Puisque la variation du rapport zinc-cuivre est corrélée à la fois avec l'étain et le plomb également présents dans les alliages du groupe E (Figure 116 et Figure 117). La diminution du zinc résultant d'une vaporisation aurait entraîné mécaniquement l'augmentation des proportions des deux éléments mineurs, or c'est l'inverse qui s'observe. Les figure 116 et

[612] Le zinc fond à 419,58 °C et se vaporise à 907 °C. Par comparaison, le cuivre fond à 1084,87 °C et se vaporise à 2563 °C.
Lide D. R., ed., *CRC handbook..., op. cit.*, p. **12**-119 et **12**-120.
[613] Caley E. R., *Orichalcum and related..., op. cit.*, p. 99.
Etienne R. *et al.*, *Le trésor de Garonne : Essai sur la circulation monétaire en Aquitaine à la fin du règne d'Antonin le Pieux (159-161)*, Bordeaux, Fédération Historique du Sud-Ouest, 1984, p. 386.
Dungworth D., Caley's "zinc decline" reconsidered, *The numismatic chronicle*, vol. 156, 1996, p. 231-232.
[614] Ces expérimentations sont actuellement réalisées dans le cadre de la thèse d'A. Gaffiero qui traite de problématiques de refonte d'orichalques dans l'Empire roamin, sous la direction de B. Gratuze et A. Suspène.

figure 117 montre des tendances qui corrèlent l'augmentation du taux de zinc avec celles des taux d'étain et de plomb. Il faut voir dans une telle configuration principalement le résultat d'un mélange entre stocks de métaux, l'un d'eux étant composé de laiton contenant de l'étain. Les variations témoignent par ailleurs d'une dilution de ce dernier.

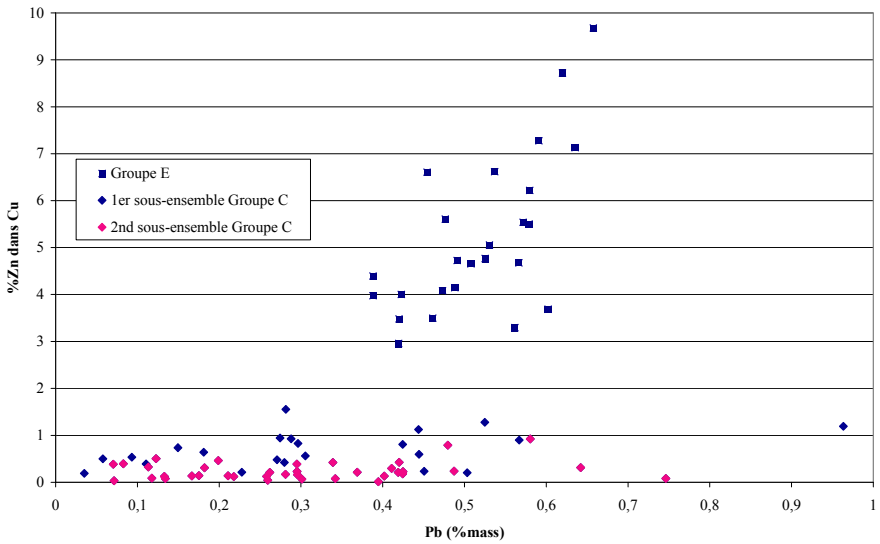


Figure 117 - Le laiton dans le monnayage de La Rochelle.

En outre, les relations de corrélations observées entre le zinc, l'étain et le plomb, incitent à reconnaître l'utilisation de deux stocks de métal homogènes mélangés au sein de la fabrique monétaire. Car l'opération métallurgique qui consiste à mélanger ces deux composés maintient le rapport entre le zinc, l'étain et le plomb de l'alliage initial.

Compte tenu de cette donnée, qu'en est-il du second isolat mettant également en évidence des taux non négligeables de zinc ? Il s'agit d'un sous-ensemble du groupe C constaté sur l'ACP (Figure 113). Le zinc est associé ici à des alliages de bas billon avec des taux d'argent inférieurs à 10 % massique. Cet ensemble est parfaitement inclus au sein du groupe C, il ne s'en démarque que par les faibles taux de zinc mesurés dans les alliages qu'il rassemble. Les autres paramètres tels que le titre en métal précieux ainsi que les données métrologiques des échantillons considérés, ne rendent pas compte de différences entre ce sous-ensemble et le groupe auquel il appartient.

Les rapports zinc-cuivre calculés pour ces échantillons sont finalement beaucoup plus faibles que ceux précédemment évoqués puisqu'ils ne dépassent jamais les deux pourcents. D'un autre côté, la confrontation de ces données avec

les taux d'étain rend compte de deux corrélations, l'une d'elle étant de surcroit identique à celle déjà constatée au sein du groupe E (Figure 116). Est-elle comme dans le groupe précédent renforcée par une considération avec le plomb ? La figure 117 ne soutient pas l'hypothèse d'un lien entre le laiton utilisé dans le groupe E et celui utilisé dans le sous-ensemble du groupe C. Cependant, l'argent de ces alliages constitue une source possible de plomb. En effet, ces deux métaux proviennent généralement du même minerai, la galène argentifère. Dans la métallurgie extractive mais également lors de traitements d'affinages, l'argent est séparé du plomb par coupellation. Or, d'après les expérimentations de H. Mc Kerrell et R. B. K. Stevenson, il peut résulter entre 0,5 et 1 % de ce dernier dans l'argent après cette opération[615]. Il est dans ce cas ajouté involontairement au billon lors de la réalisation de l'alliage, et justifie une modification du rapport zinc-plomb associé au laiton. Finalement, aucune donnée n'incite à réfuter le lien entre le laiton du groupe E et celui du sous-ensemble du groupe C, même si le rapport de dilution est plus grand dans ce dernier.

Faut-il voir dans une telle relation une refonte de monnaies à base de laiton, préalablement produites au sein de l'atelier rochelais au profit d'un nouveau monnayage de bas billon ? Cette hypothèse est très peu probable. L'utilisation d'un stock de monnaies de cuivre devant être refondu n'aurait pas maintenu une corrélation identique entre les deux monnayages. Dans le cadre de telles refontes, les monnaies à base de laiton auraient été mélangées à de nombreuses autres de compositions différentes. L'alliage formé aurait finalement présenté des rapports de corrélation différents de ceux constatés dans le stock initial. Or, ce n'est pas le cas ici étant donné que le lien zinc-étain est conservé dans au moins une partie des échantillons.

En définitive, les monnayages de cuivre et de bas billon qui mettent en évidence l'utilisation d'un même stock de laiton ont certainement été produits dans la même période durant le fonctionnement de l'atelier.

Le laiton ne faisant pas partie des trois métaux monnayés, les monétaires étaient-ils conscients qu'ils utilisaient cet alliage non réglementaire dans leur monnayage ? Dans un premier temps, il faut considérer qu'il n'est pas possible de connaître le pourcentage de zinc contenu dans le laiton initialement utilisé par les monnayeurs. Compte tenu des variations de composition, il a été mélangé à du cuivre. Toutefois, les plus forts taux de zinc mesurés dans les échantillons qui se rapprochent le plus des matières premières utilisées, atteignent jusqu'à 9 %

[615] Mc Kerrell H. *et al.*, Some analyses..., *op. cit.*, p. 198.

massiques[616]. Or, de tels alliages ont encore, les échantillons archéologiques en attestent, une couleur jaune différente de celle du rouge du cuivre pur. Les ouvriers monétaires n'ont donc pas utilisé du laiton à leur insu, leur matière première trahissant sa composition par sa couleur.

D'un autre côté, plusieurs paramètres permettent de discuter de l'importance de l'utilisation du laiton dans le monnayage de cuivre de La Rochelle. D'un point de vue statistique, bien qu'avec 27 échantillons, le groupe E constitue près de 9 % des 303 objets du *corpus* total de La Rochelle considéré ici, ils proviennent pour une grande majorité, soit 20 d'entre eux, d'un même contexte : l'unité stratigraphique 1021, constituée par le sédiment d'une rigole. En mettant en parallèle cette constatation avec l'homogénéité métrologique globale ainsi qu'avec la démonstration précédente qui a conclu à l'utilisation d'un seul stock de laiton pour la totalité des échantillons considérés, ce monnayage à base de laiton correspond en définitive à une période courte du fonctionnement de la fabrique. Le recours à cet alliage non réglementaire ne trahit pas une habitude mais un fait ponctuel.

L'utilisation de zinc où plus précisément de laiton, dans le monnayage médiéval n'est pas un fait nouveau. Il a déjà été constaté par plusieurs auteurs à partir d'analyses de monnaies d'argent[617]. Cependant, la présence de zinc dans ces espèces n'a pas d'incidence sur leur aspect général et ne trahit pas leur composition[618]. En outre, les règlements monétaires définissent les monnaies contenant de l'argent à partir de leur titre en métal précieux. L'utilisation du cuivre comme métal complémentaire dans les alliages n'est qu'implicite. Ce n'est pas le cas pour le monnayage de cuivre. Si certaines ordonnances n'indiquent pas expressément que ce métal doive être utilisé pur, d'autres en revanche témoignent d'une plus grande prudence en précisant explicitement qu'il le soit[619]. A l'époque

---

[616] Le calcul du titre théorique de zinc dans le laiton utilise les données obtenues par ANRC : $\%Zn_{laiton} = 100 \times \frac{\%Zn_{ANRC}}{\%Zn_{ANRC} + \%Cu_{ANRC}}$

[617] Dumas F., *Le trésor de Fécamp et le monnayage en Francie occidentale dans la seconde moitié du X^e siècle*, Paris, Éditions du CTHS, 1971, analyses d'A. A. Gordus, p. 40-45.
Bompaire M. *et al.*, Analyses de monnaies..., *op. cit.*, p. 876-884.

[618] Mc Kerrell H. *et al.*, Some analyses..., *op. cit.*, p. 201.
Metcalf D. M. *et al.*, Interpreting the alloy of the later Anglo-Saxon coinage, *British Numismatic Journal*, 1986, p. 49.
Bompaire M. *et al.*, Analyses de monnaies..., *op. cit.*, p. 880.

[619] *Arrest de la Cour des monoyes 8 février 1593..., op. cit.*, n. p.
Arrest de la Cour des monoyes 8 janvier 1603..., op. cit., n. p.
Arrest du Conseil d'Etat du roy..., op. cit., n. p.

considérée, les procédés d'analyses des alliages que sont la pierre de touche ou la coupellation ne sont utiles que pour déterminer la quantité de précieux qu'ils contiennent. En définitive, les gardes ne disposaient pas de moyen pour contrôler la pureté du cuivre. Toutefois, dans le cas de La Rochelle, la couleur jaune à jaune-orangé des alliages diffère suffisamment de celle du cuivre pour ne laisser que peu de doutes sur leur qualité. C'est d'ailleurs, cette couleur caractéristique, et non les analyses, qui permet à J. Duplessy dans son étude du trésor de Vaucé, composé en très grande majorité de doubles tournois normalement de cuivre pur, de remarquer que certains ateliers utilisent illégalement le laiton dans leur fabrication[620].

Une telle configuration rend compte d'une tolérance de la part des autorités qui encadrent le monnayage qui se comprend à partir de deux paramètres. Dans un premier temps, il faut signaler que le monnayage de cuivre est associé à la production des espèces de moins grande valeur libératoire. Les deniers et les doubles ne valent respectivement qu'un et deux deniers tournois. Ces monnaies utilisées dans les petits échanges ont-elles dans ce cas fait l'objet d'une moins grande attention[621] ? Deux constatations appuient cette hypothèse. Dans son étude des archives monétaires de l'atelier de La Rochelle, A. Clairand observe que les monnaies de cuivre, contrairement aux espèces d'or et d'argent, n'ont jamais été échantillonnées pour être mises en boîte[622]. Or, ces prélèvements en principe effectués à chaque émission monétaire, représentent le principal moyen pour les autorités de vérifier *a posteriori* la qualité de la production d'une fabrique[623]. Il apparaît que les autorités émettrices n'ont pas jugé de telles précautions indispensables pour ce monnayage. D'un autre côté, il faut croire que les gardes responsables des délivrances au sein des ateliers monétaires ne considéraient pas non plus les espèces de cuivre avec la même rigueur que celles de plus grande valeur libératoire. C'est eux, et notamment à La Rochelle, qui ont parfois autorisé la délivrance de doubles tournois de cuivre de mauvaise qualité présentant des formes à peine circulaires, ne permettant pas de marquer l'intégralité des figures monétaires[624]. Le fait que la fabrication des espèces de cuivre ait été moins strictement contrôlée, justifie que du laiton ait pu être utilisé en complément dans les alliages.

Arrest de la Cour des monoyes 6 juillet 1620..., op. cit., n. p.
Lettres patentes qui ordonnent..., op. cit., n. p.

620 Duplessy J., Le trésor de Vaucé (Mayenne), *Revue Numismatique*, vol. 6, n° 4, 1962, p. 283-284.

621 Spooner F. C., *L'économie mondiale..., op. cit.*, p. 30.

622 Je remercie A. Clairand de m'avoir communiqué son étude qui doit être éditée dans la publication des fouilles de l'atelier monétaire de La Rochelle.

623 cf. *supra*, p. 70.

624 cf. *supra*, p. 104.

Dans sa thèse, l'historien économiste F. C. Spooner met en évidence à partir de l'étude des comptes de production des ateliers monétaires, une baisse de la disponibilité du cuivre en France à la fin du XVI[e] siècle[625]. Il corrèle cette crise avec l'épuisement des mines allemandes. Elle ne prendra fin que dans le premier quart du XVII[e] siècle avec l'arrivée sur le marché européen du cuivre suédois[626]

Est-ce à cause d'un manque de métal que la production des doubles et deniers tournois de cuivre n'est pas continue à La Rochelle ? Le compte rendu des comptes de production que présente F. C. Spooner pour cette fabrique, montre que les frappes des monnaies de cuivre qui débutent pour une année en 1579, ne reprennent qu'entre 1586 et 1589, puis 1592 et 1595. Il faut attendre ensuite 1631-1632 et enfin 1643-1644 pour voir de nouveau frapper le métal rouge[627].

Finalement, dans une période de crise métallique, il n'est pas illégitime de penser que les autorités monétaires ont toléré des écarts quant à la qualité des alliages de cuivre utilisés dans la fabrication de petites monnaies. D'autant qu'il a été reconnu précédemment que cette utilisation n'a pas été une pratique systématique.

Enfin, il est intéressant de développer la question de l'origine du laiton utilisé dans la fabrique monétaire ? Dans le contexte précédemment discuté reconnaissant que cet alliage non réglementaire intervient en complément dans un monnayage de cuivre, une source potentielle de métal est la récupération d'objets. Dans un contexte monétaire, une telle démarche n'est pas inédite. Lorsque le métal précieux vient à manquer, l'argenterie constituant une forme usuelle de thésaurisation, a souvent été réquisitionnée pour battre monnaie[628]. Cependant, cette hypothèse interfère ici avec les données analytiques. Il n'est pas possible que l'homogénéité de composition qui a été mise en évidence puisse se retrouver à l'échelle d'un lot d'objets devant être utilisés dans le monnayage. Une telle uniformité ne pourrait finalement être observée qu'après une première refonte de cet ensemble *a priori* hétérogène. Or, dans le cadre de l'atelier monétaire, une telle démarche ne se justifie pas.

Finalement, le laiton utilisé à La Rochelle se présentait certainement déjà sous forme de lingots, leur réalisation par le vendeur ou son fournisseur ayant homogénéisé l'ensemble.

---

[625] Spooner F. C., *L'économie mondiale..., op. cit.*, XXIX pl. et 544 p.
[626] *Ibidem*, p. 40-41.
[627] *Ibid.*, p. 405-425.
[628] Blanchet J.-A. *et al.*, *Manuel de numismatique française*, *op. cit.*, t. 2, p. 32.
Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 45-50.

Après avoir considéré l'apport du zinc dans le monnayage de La Rochelle à partir d'un ajout de laiton, il est en définitive possible de proposer une discussion similaire du point de vue de l'étain. C'est notamment à partir des analyses de résidus métallurgiques discutées plus loin[629] qu'il faut admettre que cet élément n'a pas été incorporé pur dans les alliages monétaires, mais par l'intermédiaire de bronzes dans lesquels il avait été allié préalablement au cuivre. Dans cette partie, les quantités d'étain doivent donc être également rapportées à celles du métal rouge[630].

En considérant l'ensemble des analyses du *corpus* de La Rochelle, l'ajout de bronze apparaît plus limité que pour le laiton. Seuls 8 échantillons sur les 180 analysés par ANRC présentent un taux d'étain dans le cuivre supérieur à 1 %. De plus, alors que l'alliage jaune a seulement été utilisé en quantités non négligeables dans le monnayage de cuivre, les huit carreaux et flans ici considérés sont associés à des alliages de billon. Cinq d'entre eux sont d'ailleurs à relier à un même type monétaire puisque leurs titres en métal précieux se situent entre 27 et 32 % massiques pour une masse comprise entre 2,1 et 2,5 g. Ce *corpus* apparaît finalement relativement homogène pour ce qui est des caractéristiques numismatiques. En revanche, cette uniformité n'est transposable ni d'un point de vue stratigraphique puisque les sept échantillons se répartissent dans cinq contextes différents[631], ni en considérant le taux d'étain puisque celui-ci varie de 1,08 à 11,6 %. De plus, les données analytiques, bien que finalement restreintes par le nombre d'individus considérés, ne mettent pas en évidence de corrélation particulière à partir des éléments mineurs et traces comme celles observées précédemment. Contrairement à ce qui a été constaté à partir du zinc, il n'est pas possible ici de supposer l'utilisation d'un stock uniforme d'alliage.

De telles constatations suggèrent que les refontes de bronze dans le monnayage de La Rochelle, doivent être considérées comme des événements extrêmement rares. Quant au fait que ces ajouts soient exclusivement réservés au monnayage de billon, le nombre d'échantillons donne relativement peu de poids aux différentes hypothèses envisageables qui ne seront donc ici proposées que sous forme d'interrogations. Un bronze allié à de l'argent est-il en définitive plus facilement déformable que lorsqu'il est travaillé seul ? L'arrivée de bronze au sein de l'atelier monétaire a-t-elle eu lieu durant une période où elle ne produisait pas de monnaies de cuivre ? Cette hypothèse est plus probable dans la mesure où la production de

[629] cf. *infra*, p. 353.

[630] $\%Sn_{bronze} = 100 \times \frac{\%Sn_{ANRC}}{\%Sn_{ANRC} + \%Cu_{ANRC}}$

[631] Les contextes concernés sont les unités stratigraphiques 1009, 1021, 1072, 3009 et 3068.

monnaies de cuivre n'a été pas constante à la fin du XVI[e] siècle à La Rochelle et que les refontes de bronze ont été par ailleurs exceptionnelles[632].

Enfin, il faut rappeler que le bronze ne constitue pas, tout comme le laiton, un alliage monétaire. Toutefois, si l'utilisation de ce dernier dans le monnayage de cuivre a pu être justifiée par la tolérance des autorités émettrices vis-à-vis de la frappe de monnaies de faible valeur, une telle hypothèse est moins probable ici. En particulier, parce que les bronzes ont été alliés à de l'argent ce qui sous-entend la fabrication d'espèces relativement fortes. Ici, c'est peut-être seulement l'incapacité des gardes à détecter ou seulement quantifier cet emploi irrégulier qui a autorisé une telle pratique.

La présence dans les alliages du *corpus* de La Rochelle, de zinc par l'intermédiaire du laiton et d'étain suite à l'utilisation de bronze, résulte finalement d'utilisations relativement ponctuelles qui ne traduisent pas une habitude particulière de cet atelier monétaire. Quant aux causes qui justifient que ces deux alliages non réglementaires aient pu être employés, elles traduisent à la fois une tolérance des autorités monétaires vis-à-vis de la qualité des petites monnaies mais également, pour ce qui est des fontes de bronzes, les limites des moyens de contrôles connus, ne permettant pas de connaître précisément la composition des alliages frappés.

Le plomb dans le monnayage de l'atelier de La Rochelle

En considérant l'ensemble des 295 analyses d'échantillons métalliques, le plomb apparaît presque systématiquement. Il ne dépasse que très rarement les deux pourcents massiques : 286 artefacts ont un taux inférieur à cette limite, seulement neuf ont des concentrations supérieures.

Dans la mesure où le plomb est souvent associé à l'argent de par leur origine géologique souvent commune mais compte tenu aussi des procédés métallurgiques associés au métal précieux[633], les taux mesurés ont été représentés sur la figure ci-dessous[634]. Finalement, il apparaît que le plomb présent dans les alliages analysés n'est pas seulement apporté par l'argent. Les alliages cuivreux en contiennent

[632] Spooner F. C., *L'économie mondiale..., op. cit.*, p. 405-425.
[633] cf. L'argent dans le monnayage de l'atelier de La Rochelle, p. 345.
[634] Il s'agit ici uniquement des résultats obtenus pas ANRC. Il a été vu que pour les concentrations en argent, les analyses par spectrométrie de fluorescence X étaient trop dépendantes des enrichissements de surface.
cf. Comparaison entre analyses par spectrométrie de fluorescence X et par ANRC, p. 329.

également des quantités non négligeables. C'est pourquoi, il faut admettre que dans le cadre de la réalisation de mélanges cuivre-argent, la concentration en plomb finale pourra résulter de l'apport des deux métaux. A titre d'exemple, la droite rouge (Figure 118 : %Ag = 50 x %Pb - 50) représente la tendance théorique de l'alliage d'un cuivre contenant 0,5 % de plomb[635] avec un argent en présentant 2,5 % massiques[636].

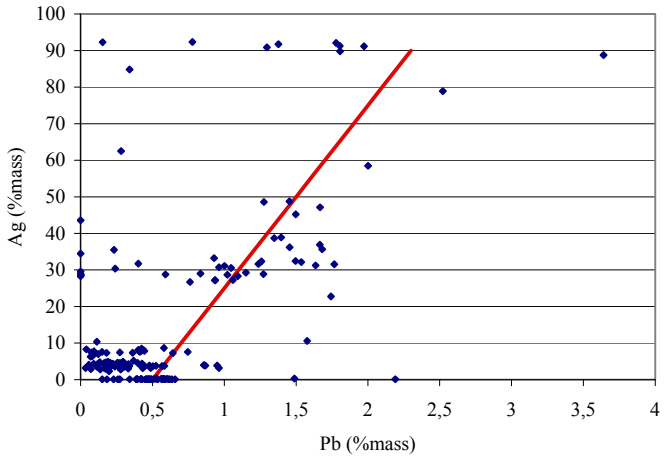


Figure 118 - Le plomb dans le monnayage de La Rochelle.

En définitive, il est difficile de mettre en évidence une tendance générale à l'échelle du *corpus* de La Rochelle. En revanche, à partir des taux relativement faibles mesurés sur l'ensemble des échantillons, il faut admettre qu'il n'y a pas eu d'ajout volontaire de plomb pour faire poids dans les alliages monnayés. Compte tenu des tolérances concernant l'ajout de laiton dans le monnayage de La Rochelle, la forte densité du plomb aurait pu constituer un choix intéressant pour permettre certaines économies en utilisant globalement moins de cuivre. Cependant, une telle alternative est rapidement écartée par la considération de la tenue mécanique d'un alliage de cuivre contenant trop de plomb. Il suffit notamment de prendre en compte le diagramme binaire formé de ces deux métaux, où le second apparaît presque totalement insoluble dans le premier[637]. Il en résulte que le plomb se présente sous forme d'inclusions ou se voit rejeté aux joints des grains qui composent l'alliage. L'observation des coupes métallographiques de deux échantillons du *corpus* rend déjà compte de tels phénomènes, néanmoins en faibles

[635] Valeur moyenne mesurée dans le *corpus* des alliages cuivreux.
[636] Ce taux apparaît plus important que celui mesuré dans les alliages du *corpus* présentant les plus forts taux de métal précieux, toutefois il a été vu que ces argents n'étaient pas comparables à ceux mis en évidence dans les billons et bas billons.
cf. L'argent dans le monnayage de l'atelier de La Rochelle, p. 335
[637] cf. Annexe G.

proportions puisque les impuretés de plomb ne dépassent pas ici 1 % massique (Figure 119 et Figure 120).

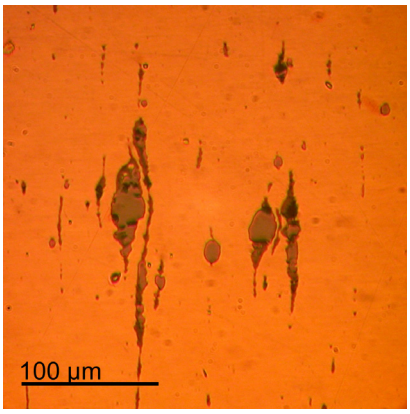


Figure 119 - Inclusions de plomb dans un échantillon du groupe D.

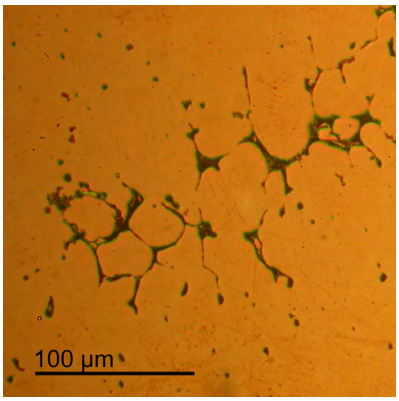


Figure 120 - Rejet du plomb aux joints de grains d'alliage d'un échantillon du groupe E.

Une telle organisation au sein de la matière a pour conséquence la fragilisation de l'alliage qui augmente avec le taux de plomb. Finalement, le métal devient rapidement difficile à déformer et impossible à mettre en forme. Les lames, carreaux ou flans préparés avec un tel mélange se fissurent et se cassent[638]. A titre d'exemple, lors d'une expérimentation de martelage, une lame pourtant recuite, d'un alliage contenant 80 % massiques de cuivre, 5 % de zinc et d'étain et 10 % de plomb, s'est fissurée et rompue dès les premiers coups de marteau (Figure 121).

Figure 121 - Fissures et rupture d'un alliage cuivreux expérimental contenant 10 %mass de plomb.

[638] Dans la fabrication de monnaies de bronze antiques, le plomb a été ajouté dans des proportions élevées puisqu'elles pouvaient dépasser 10 % de la masse totale des alliages et atteindre jusqu'à 35 %. Néanmoins, une telle constatation n'est pas en désaccord avec notre propos puisqu'à cette époque, les flans étaient produits par moulage et non par la mise en forme par martelage de lames et de carreaux.
Deraisme A., *Apport de la physique à l'étude du faux-monnayage du III^e siècle après J.-C.*, Thèse de doctorat de Science des Matériaux de l'Université d'Orléans, Orléans, 2005, p. 13-20, 51-53, 55-57.
Faucher T., *L'atelier monétaire d'Alexandrie..., op. cit.*, p. 46-47, 259-277.
Barrandon J.-N. *et al.*, *Monnaies de bronze de Marseille. Analyse, classement, politique monétaire*, Paris, CNRS Edition, coll. « Cahiers Ernest-Babelon », t. 10, 2007, p. 106-108.

Finalement au sein de l'atelier de La Rochelle, les monnayeurs ont respecté leurs règlements en n'ajoutant pas volontairement de plomb à leurs alliages, toutefois ce choix n'était peut-être pas innocent puisque dans le cas contraire ils n'auraient pas pu mettre en forme leurs flans…

Observation des résidus métallurgiques de l'atelier de La Rochelle

Dans des contextes similaires à ceux qui ont vu la découverte des ébauches en cours de mise en forme, correspondant à des lames, carreaux, flans voire même à des déchets de coupe, les fouilles de cet atelier ont permis de dégager un grand nombre de vestiges dont les formes sont moins explicites. Ils ont été globalement assimilés à des déchets métallurgiques[639]. Afin de comprendre la finalité voire l'origine de ces résidus, un grand nombre d'entre eux ont dans un premier temps été analysés qualitativement par spectrométrie de fluorescence X[640]. Dans la mesure où ces objets n'ont pas été restaurés, la plupart d'entre eux exposent une surface formée d'un agglomérat d'oxydes et de sédiments. C'est pourquoi les caractérisations ont été mises en œuvre après un décapage local de la zone d'analyse. Cette opération a notamment révélé que certains échantillons pourtant très denses n'étaient pas métalliques. Ils devaient donc être rapprochés d'autres fragments assimilés à des scories. Afin de disposer de données quantitatives, un échantillonnage a été proposé à partir des résultats qualitatifs afin de réaliser des analyses par ANRC. Compte tenu des dimensions de ces objets, les dosages ont été mis en œuvre à partir de prélèvements.

Au total, 86 échantillons ont été étudiés par spectrométrie de fluorescence X et 14 d'entre eux ont vu les alliages qui les composent caractérisés par ANRC. Les différents résultats sont présentés en Annexe L.

En considérant dans un premier temps les échantillons métalliques, ils mettent en évidence une grande quantité de métal puisque l'ensemble des alliages observés

[639] cf. Monnayage royal : La Rochelle (Charente-Maritime) : *Le mobilier numismatique métallique*, p. 151.

[640] Analyses de spectrométrie de fluorescence X réalisées au Centre Ernest-Babelon. Le rayonnement incident est ici produit par un tube générateur de rayon X à anode de molybdène. La tension d'excitation est de 45 kV pour une intensité de 500 µA pour maintenir un temps mort inférieur à 5 %. La taille du faisceau incident est définie par un collimateur de 1,5 mm de diamètre et la durée d'analyse est fixée à 60 s.
cf. Annexe L.

totalise une masse de 1776 g[641] pour 71 individus. Ces derniers sont plus ou moins massifs, le plus gros pesant 291 g et le plus petit seulement 0,13 g.

Ces agglomérats métallurgiques sont-ils en définitive comparables aux alliages précédemment discutés à partir du *corpus* numismatique ? D'autant que cette collection représente près de trois fois la masse de l'ensemble des ébauches en cours de mise en forme découvertes. Cependant, la considération des types d'alliages en présence permet d'éclairer la question posée. Les deux figures ci-dessous donnent les répartitions en nombre d'individus et en masse totale des cinq classes de résidus métalliques caractérisés par les analyses de spectrométrie de fluorescence X. Il s'agit ici d'un classement approximatif puisqu'il ne s'appuie que sur des données qualitatives.

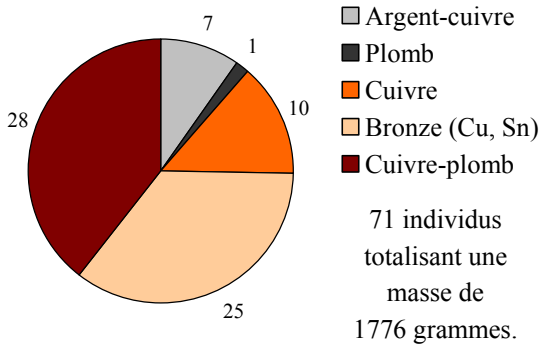


Figure 122 - Répartition en nombre des échantillons métalliques selon les types d'alliages.

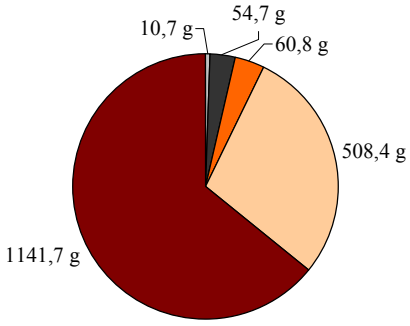


Figure 123 - Répartition en masse des échantillons métalliques selon les types d'alliages.

Finalement, bien que le cuivre, les alliages argent-cuivre et les bronzes se retrouvent dans le monnayage de l'atelier de La Rochelle, les proportions de chacune des classes marquent des différences importantes (Figure 122 et Figure 123). Quant au laiton pourtant mis en évidence dans les alliages monétaires précédemment analysés, il est ici complètement absent. Cette constatation n'est toutefois pas surprenante car il a été également démontré que l'utilisation de cet alliage dans ce monnayage est relativement limitée. En revanche, la forte représentativité des bronzes parmi les résidus métallurgiques est plus surprenante puisque la refonte de tels mélanges dans les carreaux et flans rochelais, a été reconnue comme exceptionnelle.

Une telle surreprésentation de ces alliages a dans un premier temps suggéré qu'il pouvait s'agir de résidus de la fonte de cloche dont les fouilles ont rendu

[641] Cette masse totale est approximative car elle prend également en compte les sédiments agglomérés à la surface des échantillons non restaurés.

compte sur la place de Verdun[642]. Toutefois, les niveaux stratigraphiques ne sont pas en relation. Les fragments métalliques ont bien été découverts au sein de l'atelier monétaire alors que le moule à cloche dégagé lors des travaux, se trouve dans des contextes contemporains du fonctionnement de la fabrique mais situés en dehors de son emprise.

Il apparaît finalement que ces morceaux de bronze doivent être effectivement associés à la production monétaire. Les six prélèvements analysés par ANRC ont permis de calculer que ces alliages étaient équivalents à des bronzes car tenant 17 à 23 % en masse d'étain[643]. Ces taux sont supérieurs à ceux calculés pour les échantillons du *corpus* numismatique qui se situent entre 1,6 et 11,6 % massiques. Ils indiquent que les alliages de bronze non réglementaires ont pu tout de même être dilués avec du cuivre lors de la réalisation des alliages. En effet, ces mélanges devaient obligatoirement être alliés à d'autres contenants moins d'étain pour être déformables. Au dessus de 14 % massique d'étain dans les bronzes, il y a formation d'une phase delta. Les alliages deviennent cassants et ne peuvent être mis en forme à froid.

Il n'a pas encore été fait mention d'un autre type d'alliage qui constitue pourtant la masse majoritaire des résidus métallurgiques considérés (Figure 123). Il s'agit de mélanges formés principalement de cuivre et de plomb. Ce métal gris représente ici une part non négligeable des alliages puisque les analyses par ANRC de six prélèvements montrent que son taux varie de 28 à 90 % massiques. Ces concentrations se démarquent de celles mesurées dans les ébauches de monnaies où le plomb a été assimilé à une impureté[644]. C'est pourquoi, les résidus dont il est question ici ne correspondent pas à des alliages monétaires, d'autant qu'il a été démontré précédemment que de tels mélanges ne pouvaient être mis en forme par martelage.

Dans un contexte monétaire, la rencontre d'une association de forts taux de cuivre et de plomb est potentiellement associée à des opérations d'affinage d'alliages cuivre-argent, ces derniers étant préalablement mélangés à du plomb avant d'être traités par coupellation, voire par liquation[645]. Cependant, en estimant

[642] Nibodeau J.-P., *Rapport de sauvetage..., op. cit.*, p. 71-73

[643] Le calcul du titre théorique d'étain dans le bronze utilise les données obtenues par ANRC : $\%Sn_{bronze} = 100 \times \frac{\%Sn_{ANRC}}{\%Sn_{ANRC} + \%Cu_{ANRC}}$

[644] cf. Le plomb dans le monnayage de l'atelier de La Rochelle, p. 350.

[645] cf. *supra*, p. 74.

les titres en métal précieux des alliages initiaux correspondants[646], un seul d'entre eux présente un taux comparable à celui d'un mélange monétaire. Avec 7,1 % massiques d'argent il pourrait dans ce cas être assimilé à un mélange préalablement réalisé en vue d'un affinage.

Dans les cinq autres échantillons, la part de l'argent est en revanche beaucoup plus faible puisqu'elle ne dépasse pas le pourcent dans le cuivre. De telles concentrations ne sont pas en accord avec l'hypothèse précédente. D'un autre côté, J. Boizard décrit dans son *Traité des monoyes...*, plusieurs opérations qui justifient l'existence de tels alliages dans le contexte de l'atelier monétaire de La Rochelle. Elles correspondent au traitement des déchets résultant d'un affinage par coupellation et ont pour finalité de récupérer les petites quantités d'argent qui peuvent y avoir été piégées.

Le procédé consiste à placer dans un fourneau tous les résidus produits lors d'un affinage tels que les glettes[647] et les casses[648], afin de réduire les oxydes qu'ils contiennent. Le résultat de cette réduction est l'obtention d'une loupe d'un alliage de cuivre et de plomb. C'est dans ce dernier que se concentre l'argent recherché. Il faut ensuite mettre en place une séparation par liquation. Il s'agit d'un chauffage modéré de la loupe, au cours duquel seule la phase plombeuse doit fondre et s'écouler, entraînant avec elle l'argent qu'elle contient. Celui-ci est finalement extrait du plomb séparé du cuivre par une dernière coupellation.

En définitive, il apparaît que les alliages découverts à La Rochelle s'inscrivent dans cette chaîne opératoire de recyclage, ils correspondraient dans ce cas aux alliages produits après la réduction des déchets d'affinage. Toutefois, il ne s'agit que d'une hypothèse qui devrait être confirmée par la recherche dans le *corpus* de La Rochelle d'indices associés à l'ensemble des procédés qui viennent d'être décrits. Dans ce cadre, il sera nécessaire de considérer les résidus métallurgiques non métalliques également mis en évidence lors des caractérisations par spectrométrie de fluorescence X. Il semble notamment que les fragments particulièrement denses contenant du cuivre et du plomb, puissent être assimilés à des casses d'un four de coupellation[649].

---

[646] La part du plomb n'est dans ce cas plus considérée et le titre en métal précieux est estimé par le calcul :

$$\%Ag_{billon} = 100 \times \frac{\%Ag_{ANRC}}{\%Ag_{ANRC} + \%Ag_{ANRC}}$$

[647] Ce sont les oxydes de plomb et de cuivre extraits lors d'une opération d'affinage.

[648] Il s'agit de la coupelle de cendre dans laquelle est réalisé l'affinage par coupellation. Elle absorbe une partie des oxydes de plomb et de cuivre formés durant l'opération.

[649] L'étude de ce mobilier particulier a été entreprise par M.-P. Guirado dans le cadre de sa thèse traitant des problématiques de l'affinage de l'argent au Moyen Age, sous la direction de P. Fluzin et F. Téreygeol.

En conclusion, rapportée au *corpus* numismatique, la masse de métal que représentent les résidus métallurgiques découverts à La Rochelle pouvait paraître importante. Néanmoins, leur étude analytique a révélé que la part la plus importante ne doit pas être considérée comme rassemblant les matières premières principales du monnayage. Les bronzes n'y ont été ajoutés que ponctuellement alors que les mélanges cuivre-plomb résultent d'opérations annexes de la fabrication monétaire.

2 - Les monnayages du XVI^{e} siècle à La Rochelle

Après une discussion portant sur les matières premières du monnayage de La Rochelle, l'analyse du *corpus* mis au jour lors des fouilles de la place de Verdun offre également la possibilité d'étudier les différents types monétaires associés. Il aurait été plus simple d'aborder ces questions à partir de la caractérisation de monnaies ayant été effectivement frappées au sein de la fabrique. Cependant, les fouilles n'ont pas mis au jour de tels artefacts. D'un autre côté, bien que la collection du département des Monnaies, médailles et antiques de la Bibliothèque nationale de France ait certainement permis de rassembler un *corpus* idéal dans le cadre d'une telle recherche, cela n'a pas été envisagé puisqu'elle ne constitue pas la problématique principale de cette étude sur les techniques monétaires.

Néanmoins, les données métrologiques et analytiques recueillies à partir des échantillons archéologiques constituent tout de même une base pour supposer les types de monnaies qui devaient être fabriquées. Une telle approche peut notamment permettre d'affiner la datation du *corpus*.

La démarche retenue pour mettre en évidence les types monétaires associés au matériel archéologique consiste à confronter les données réglementaires que sont la masse et le titre en métal précieux des alliages d'argent et de billon, aux informations relevées dans le *corpus* de La Rochelle. Toutefois, seuls les échantillons correspondant effectivement à des ébauches en cours de mise en forme, c'est-à-dire les carreaux et les flans, ont été considérés. Il est inutile de prendre en compte les déchets de coupe dont les caractéristiques métrologiques ne traduisent pas un paramètre numismatique. De même, les échantillons ayant explicitement perdu trop de matière lors de leur restauration, ne présentent pas d'intérêt dans cette démarche. Enfin, les lames ont été également exclues de cette étude.

Les références retenues pour être comparées à la collection de La Rochelle ont été extraites de la publication de la thèse de F. C. Spooner et complétées à partir

des deux catalogues des monnaies des rois de France de J. Duplessy[650]. Ces ouvrages font parfois correspondre au nom et à la valeur des espèces, les informations concernant leur masse ainsi que leur titre théorique en fonction de données collectées dans les ordonnances monétaires. C'est une compilation de ces caractéristiques légales qui a été comparée au *corpus* de carreaux et de flans. En revanche, il est regrettable qu'aucun renseignement sur les différents remèdes de poids et de lois[651] qui sont quelquefois reportés dans les baux monétaires, ne figurent dans ces ouvrages[652]. Ces limites légales définissent pour chaque référence un domaine d'incertitude auquel l'appartenance des carreaux et des flans étudiés ici est plus probable. A titre de comparaison, les tolérances enregistrées par N. de Wailly seront considérées : il évalue pour le titre d'argent, une variation autorisée de 7 millièmes ; quant à la masse, elle peut varier de 0,01 gramme pour les espèces d'argent jusqu'à 0,1 gramme pour celles de billon[653]. Toutefois, J.-A. Blanchet et A. Dieudonné signalent que ces limites sont beaucoup plus faibles que les variations qu'ils observent à partir de monnaies déjà émises[654].

D'un autre côté, dans la mesure où le *corpus* archéologique considéré correspond à des objets en cours de mise en forme, il faut admettre que leurs caractéristiques métrologiques peuvent être différentes de celles qu'ils auraient présentées une fois terminés. Cette remarque vaut uniquement pour la masse puisque le titre en métal précieux n'est pas modifié par la mise en forme. D'autre part, un contrôle des alliages est normalement effectué après leur coulée et avant qu'ils ne commencent à être travaillés. Une telle démarche évite que les contrôles qu'effectuent les gardes avant la libération des monnaies n'imposent, la refonte d'une production finalisée mais jugée d'un titre non réglementaire. C'est pourquoi, un classement formel à partir d'observations morphologiques est utilisé dans la discussion. Chaque échantillon sera finalement qualifié de carreau et de flan suivant l'arrondi de sa forme. Cependant, si une telle discrimination est pertinente pour les monnaies de grandes valeurs, ce n'est pas forcément le cas pour les monnayages de cuivre ou de bas billon. Des exemples sont connus de pièces

[650] Spooner F. C., *L'économie mondiale..., op. cit.*, p. 335-337.
Duplessy J., *Les monnaies françaises..., op. cit.*, t. 1, 325 p.
Duplessy J., *Les monnaies françaises..., op. cit.*, t. 2, 350 p.
[651] cf. *supra*, p. 70.
[652] Blanchet J.-A. *et al.*, *Manuel de numismatique française*, *op. cit.*, t. 2, p. 38 et 44.
[653] Wailly N. D., *Mémoire sur les variations de la livre tournois depuis le règne de Saint Louis jusqu'à l'établissement de la monnaie décimale*, Paris, Imprimerie Impériale, 1857, p. 7-13.
[654] Blanchet J.-A. *et al.*, *Manuel de numismatique française*, *op. cit.*, t. 2, p. 38 et 44.

libérées alors qu'elles ne présentent pas une forme ronde[655]. Cette question devra donc être abordée lors de l'étude de deux ensembles en particulier, le groupe C et le rassemblement des groupes D et E (Figure 124).

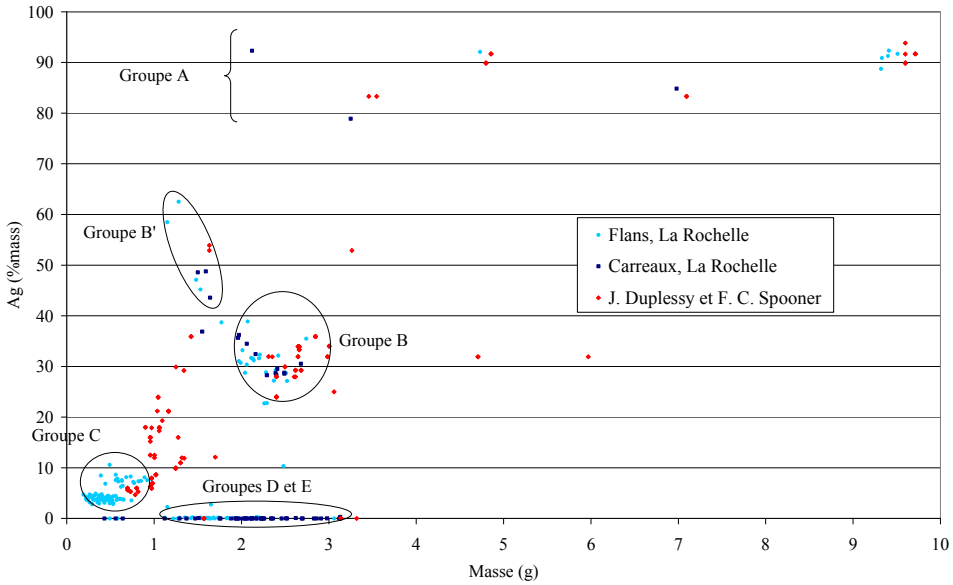


Figure 124 - *Corpus* de flans et de carreaux de La Rochelle confronté aux données collectées par J. Duplessy et F. C. Spooner[656].

Sur la figure ci-dessus, la totalité du *corpus* défini pour cette étude numismatique est confrontée aux données compilées par J. Duplessy et F. C. Spooner[657]. Il apparaît que la démarche retenue pour envisager la problématique de la correspondance des types monétaires est pertinente puisque les groupes préalablement proposés par des considérations uniquement analytiques, sont clairement mis en évidence. D'autre part, ils semblent se rapprocher plus particulièrement de certaines références. Les groupes D et E

[655] La consultation du catalogue de J. Duplessy est d'ailleurs très significative. Dans la mesure où la finalité de cet ouvrage est de permettre aux numismates d'identifier leurs monnaies, il faut admettre que l'auteur aura cherché à ne présenter que des exemplaires sans défaut. Cet inventaire témoigne quand même de nombreux exemples de monnaies imparfaites, principalement cantonnées toutefois dans les parties consacrées aux espèces de bas billon et de cuivre.
Duplessy J., *Les monnaies françaises..., op. cit.*, t. 2, p. 60, 62, 86, 87, 137, 138, 140, 141.
Clairand A., Le trésor de Maisonnais, *op. cit.*, p. 132-134.
cf. Figure 4, p. 104.
[656] Spooner F. C., *L'économie mondiale..., op. cit.*, p. 335-337.
Duplessy J., *Les monnaies françaises..., op. cit.*, t. 1, 325 p.
Duplessy J., *Les monnaies françaises..., op. cit.*, t. 2, 350 p.
[657] Spooner F. C., *L'économie mondiale..., op. cit.*, p. 335-337.
Duplessy J., *Les monnaies françaises..., op. cit.*, t. 1, 325 p.
Duplessy J., *Les monnaies françaises..., op. cit.*, t. 2, 350 p.

constituent finalement ici une seule famille puisqu'ils sont tous les deux associés au monnayage de cuivre.

Groupe A

Cet ensemble est constitué des carreaux et flans qui ont été associés au monnayage d'argent compte tenu des titres très élevés en métal précieux des alliages qui les composent. C'est également cette hypothèse qui a été retenue pour expliquer le faible nombre de ces échantillons dans le *corpus*. De par leur valeur importante, ils ont fait l'objet d'une plus grande attention, diminuant ainsi leur perte au sein de l'atelier.

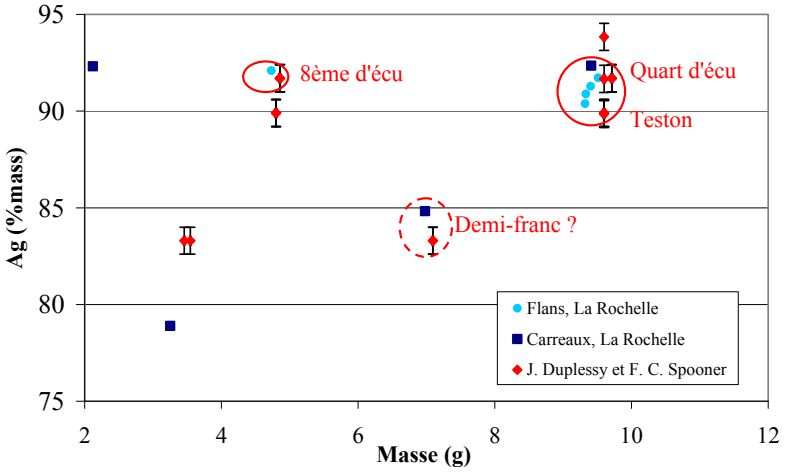


Figure 125 - Monnayage d'argent de La Rochelle[658].

Finalement, ce sont tout de même les individus les plus massifs et dont les taux d'argent sont les plus élevés qui constituent le sous-ensemble le plus homogène dans le groupe A, comptant quatre flans et un carreau (Figure 125). La comparaison de leurs masses et titres d'argent avec les références de J. Duplessy et F. C. Spooner suggère qu'il pourrait s'agir d'ébauches de testons frappés au début du XVI[e] siècle ou de quarts d'écus qui les ont remplacés à partir de 1578, sous le règne d'Henri III[659].

[658] Wailly N. D., *Mémoire sur les variations..., op. cit.*, p. 7-13.
Spooner F. C., *L'économie mondiale..., op. cit.*, p. 335-337.
Duplessy J., *Les monnaies françaises..., op. cit.*, t. 1, 325 p.
Duplessy J., *Les monnaies françaises..., op. cit.*, t. 2, 350 p.
[659] *Ibidem*, p. 120.

Deux des flans considérés sont en liaison stratigraphique[660] avec un troisième qui n'appartient pas au même sous-ensemble. Avec un titre similaire mais une masse deux fois moins importante, ce flan possède les caractéristiques d'un huitième d'écu. De tels liens à la fois archéologiques et typologiques, suggèrent que les monnayages en question doivent être associés à une période de fonctionnement de l'atelier s'étendant sur la fin du XVI^{e} siècle. Cette datation sera confirmée par la suite à partir de l'étude des groupes D et E. Par analogie, il faut admettre alors que le premier ensemble évoqué correspond à un monnayage de quarts d'écus et non de testons.

Enfin, le groupe A rassemble par ailleurs trois carreaux supplémentaires. Toutefois, un seul d'entre eux présente une masse et un titre proches d'un type monétaire de référence. Il pourrait correspondre à un demi-franc. D'autant que cette hypothèse n'est pas en contradiction avec son appartenance à l'unité stratigraphique 3009 qui sera également datée par la suite, de la fin du XVI^{e} siècle. Dans ce cas, avec une masse presque deux fois plus petite et appartenant par ailleurs à la même unité stratigraphique, l'un des carreaux restants devrait être un quart de franc. Cependant, avec seulement 79 % en masse d'argent, le titre en métal précieux de ce dernier est tout de même très inférieur aux 83,3 % réglementaires[661].

Enfin, le carreau qui présente la plus faible masse dans ce groupe, n'en est certainement pas un. De par son titre en argent similaire à celui des huitièmes et quarts d'écus, il s'agit *a priori* d'un déchet de coupe et non d'une ébauche en cours de mise en forme.

Groupes B et B'

Le traitement de ces deux groupes offrant un nombre d'échantillons plus important que précédemment est plus complexe (Figure 126). En particulier, parce que les données métrologiques et analytiques mesurées dans le *corpus* archéologique sont relativement éloignées des références proposées par F. C. Spooner.

[660] Unité stratigraphique 1021.
[661] *Ibid.*, p. 133 et 163.

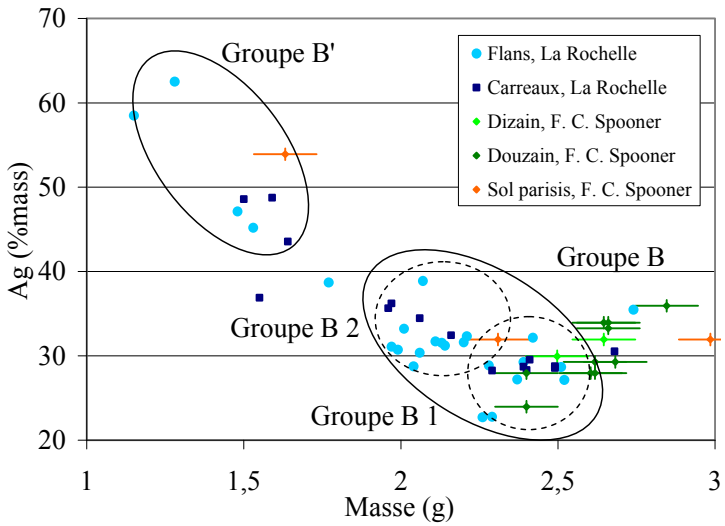


Figure 126 - Monnayage de billon de La Rochelle[662].

Finalement, le groupe B se divise selon deux sous-ensembles B1 et B2. Le premier rassemble *a priori* de futurs douzains ou dizains. Si les premiers ont été frappés pendant tout le XVI^{e} siècle, la fabrication des seconds a rapidement été arrêtée au début de cette période. Le groupe B2 quant à lui ne peut être rapproché que d'un monnayage de sol parisis, en remarquant toutefois une importante dérive des masses vers de faibles valeurs. En admettant cette hypothèse, il est finalement possible de lever l'incertitude concernant le groupe B1. Notamment parce que les deux sous-ensembles du groupe B sont associés par cinq liaisons stratigraphiques[663]. Or, les sols parisis n'ont commencé à être frappés qu'à partir du règne de Charles IX, suite à l'ordonnance du 5 octobre 1564. Dans ce cas, les flans et carreaux du groupe B1 doivent être assimilés à une fabrication de douzains. Il est en outre remarquable que les douzains de références les plus proches des points représentant les échantillons de La Rochelle sont également ceux des émissions les plus tardives : ceux frappés à partir de 1550, pour leur titre, et plus particulièrement ceux fabriqués après 1572 pour leur titre ainsi que leur masse[664].

[662] Wailly N. D., *Mémoire sur les variations..., op. cit.*, p. 7-13.
Spooner F. C., *L'économie mondiale..., op. cit.*, p. 335-337.
[663] Les unités stratigraphiques 1009, 1021, 1067, 1072 et 1084 voient les vestiges qui y sont associés se répartir dans les groupes B1 et B2.
[664] *Ibidem*, p. 336 et 337.

Pour le groupe B', ce n'est cette fois pas la masse des échantillons mais leurs titres qui présentent les différences les plus marquées avec, en outre, l'unique référence envisageable. Ils correspondent *a priori*, du moins pour les plus lourds, à un monnayage de sols parisis (Figure 126). Quant à la question des deux flans présentant des taux d'argent très élevés parallèlement à des masses relativement faibles, elle reste pour l'instant sans réponse car aucune monnaie ne possède de caractéristiques similaires.

Groupe C

L'ensemble C est constitué des alliages de bas billon, présentant des titres en métal précieux inférieurs à 10 % en masse. Une seconde particularité de ce groupe est qu'il compte près de 81 échantillons répartis dans seulement six unités stratigraphiques (Figure 127). En outre, quatre d'entre elles correspondent à trois fosses dont le contenu a incité les archéologues à les définir en tant que fosses de combustion[665].

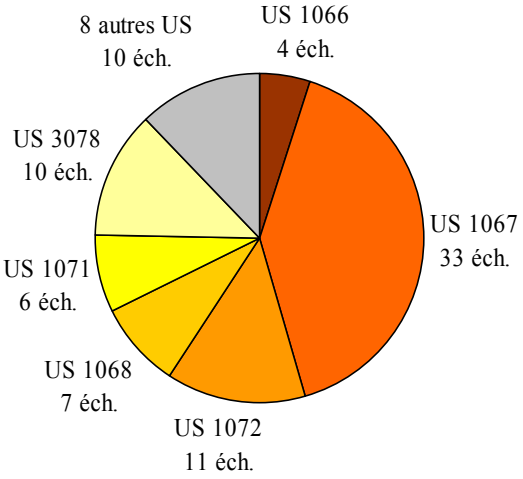


Figure 127 - Répartition stratigraphique des 81 échantillons du groupe C.

Compte tenu des alliages associés à ces échantillons, ils ne peuvent correspondre qu'à trois types monétaires : les liards, les doubles tournois et les deniers tournois[666]. D'un point de vue morphologique et analytique, les ébauches se répartissent selon deux groupes principaux (Figure 128).

---

[665] Les unités stratigraphiques 1067 et 1072 correspondent à une première fosse et les unités 1068 et 1071 à deux autres de plus petits diamètres.
cf. Monnayage royal : La Rochelle (Charente-Maritime) : Les fouilles, p. 139.

[666] Duplessy J., *Les monnaies françaises..., op. cit.*, t. 1, p. 300 et 303.
Duplessy J., *Les monnaies françaises..., op. cit.*, t. 2, p. 40, 43, 60-61, 86-87, 116-117, 138-139 et 182.

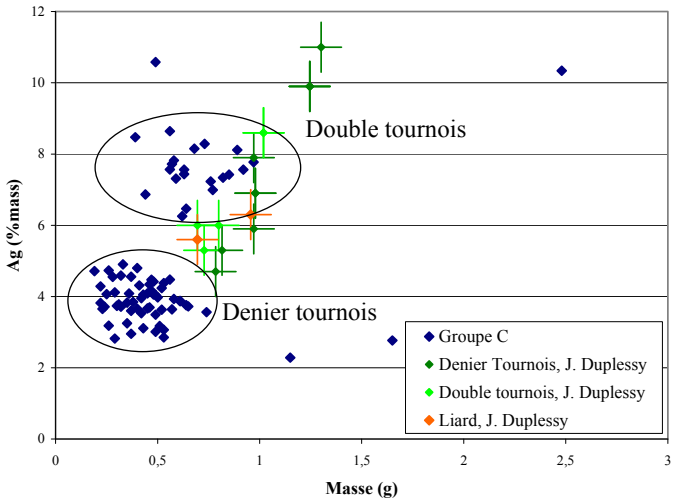


Figure 128 - Monnayage de bas billon de La Rochelle[667].

Dans la mesure où les deux sous-ensembles se répartissent indifféremment entre les six unités stratigraphiques, il apparaît que les deux monnayages correspondants doivent être considérés en parallèle. C'est pourquoi, il est plus probable que la discrimination mise en évidence soit associée au système des deniers et doubles tournois, valant respectivement un et deux deniers.

Cependant, malgré la grande homogénéité des deux familles, les caractéristiques métrologiques et analytiques des ébauches sont très éloignées des limites réglementaires (Figure 128). Est-ce leur masse trop faible qui a décidé que ces lots de flans et de carreaux aient été mis de côté dans les fosses, justifiant ensuite leur découverte lors des fouilles ? Une telle hypothèse est peu probable puisque les alliages utilisés présentent déjà des taux non réglementaires qui auraient imposé leur refonte avant toute mise en forme.

D'un autre côté, il faut tenir compte particulièrement pour ces échantillons de petite taille, des modifications résultant des opérations de restauration qu'ils ont subies. Car la perte de matière entraînée par leur décapage conduit à une variation de masse beaucoup plus significative que pour les ébauches de plus grande taille. De plus, bien que l'on ne dispose pas d'un rapport de restauration qui aurait pu rendre compte du niveau de corrosion de ces objets avant leur traitement, l'aspect final de certains d'entre eux témoigne de réactions corrosives importantes. Quelques carreaux exposent une fois restaurés des morphologies trahissant une perte explicite de matière (Figure 129).

[667] Wailly N. D., *Mémoire sur les variations..., op. cit.*, p. 7-13.
Duplessy J., *Les monnaies françaises..., op. cit.*, t. 1, p. 300 et 303.
Duplessy J., *Les monnaies françaises..., op. cit.*, t. 2, p. 40, 43, 60-61, 86-87, 116-117, 138-139 et 182.

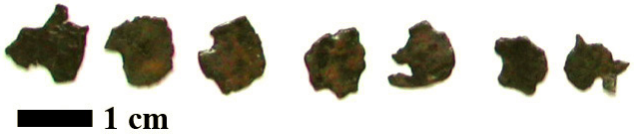


Figure 129 - Carreaux partiellement corrodés (US 1067).

Finalement, il est impossible de définir dans quelle mesure, les ébauches retrouvées présentaient à l'origine des caractéristiques beaucoup plus proches des limites réglementaires qui auraient autorisé leur frappe.

Enfin, bien qu'il subsiste un doute sur la finalité de ces carreaux et flans, ils constituent tout de même un élément de datation très précis des contextes considérés. En effet, les monnaies de bas billons auxquelles ils sont associés, sont remplacées à partir de 1575 par les frappes de cuivre pur évoquées dans la partie suivante[668].

Groupes D et E

Ces deux ensembles initialement séparés par leurs compositions différentes sont ici regroupés car ils ne présentent pas de quantités significatives de métaux précieux et doivent être associés au monnayage de cuivre. Par ailleurs, ils sont composés de vestiges provenant principalement de deux unités stratigraphiques[669]. Or, comme ceux du groupe C, les échantillons dont il est question ici permettent de proposer une datation plus précise pour ces contextes. C'est en 1575, sous le règne d'Henri II que reprend la frappe de monnaies de cuivre pur arrêtée, au VI^{e} siècle[670]. Elle remplace alors la fabrication de doubles et de deniers tournois de bas billon[671]. De plus, la considération des comptes de productions précise cette date puisqu'ils révèlent que les fabrications de monnaies de cuivre n'ont débuté qu'à partir de 1579 dans l'atelier de La Rochelle.

[668] *Ibidem*, p. 120.
[669] Les unités stratigraphiques 1021 et 3009.
[670] Hoffmann H., *Les monnaies royales..., op. cit.*, p. 133.
Duplessy J., *Les monnaies françaises..., op. cit.*, t. 2, p. 120.
Bompaire M. *et al.*, *Numismatique médiévale..., op. cit.*, t. 7, p. 83.
[671] Hoffmann H., *Les monnaies royales..., op. cit.*, p. 133.
Duplessy J., *Les monnaies françaises..., op. cit.*, t. 2, p. 120.
Bompaire M. *et al.*, *Numismatique médiévale..., op. cit.*, t. 7, p. 83.

Dans la considération des données métrologiques, il est apparu pertinent d'observer la répartition de la masse des échantillons selon les deux principales unités stratigraphiques dans lesquelles ils ont été découverts (Figure 130).

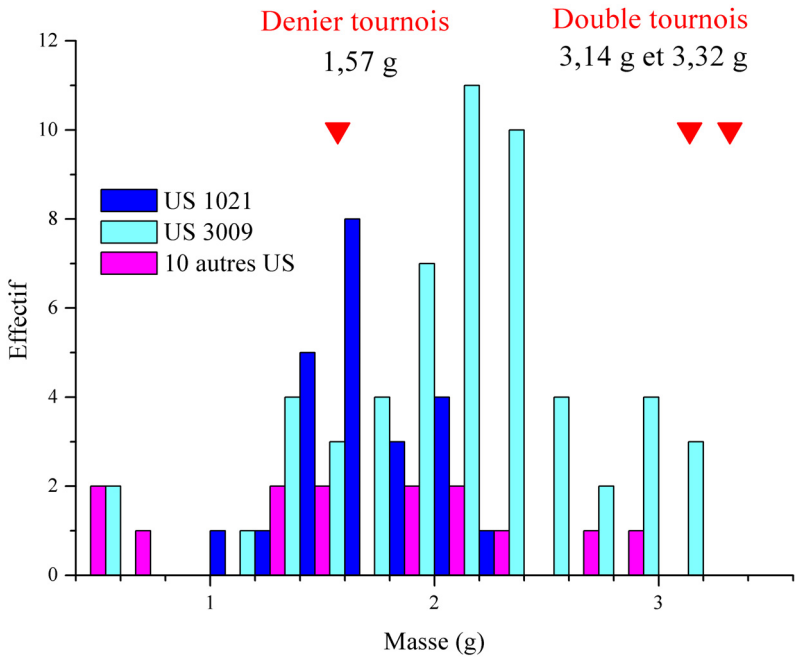


Figure 130 - Le monnayage de cuivre de La Rochelle[672].

L'observation des échantillons provenant de l'US 1021 a conduit à supposer que 21 d'entre eux correspondaient à des flans, pour 3 carreaux seulement. Cette hypothèse est compatible avec la répartition des masses de ces derniers qui s'organisent tous très majoritairement autour de la masse réglementaire de deniers tournois. Il apparaît que la totalité de ces ébauches est associée à ce type monétaire. Pour ce qui est de l'US 3009, la considération des morphologies en présence révèle que le lot en question est uniquement constitué de carreaux. Cependant, cet ensemble apparaît beaucoup moins homogène que le précédent d'un point de vue de la masse. Il se développe selon trois familles (Figure 130). La première doit être assimilée à un monnayage de deniers tournois. Les carreaux qui la composent ont donc déjà été rectifiés pour approcher la masse réglementaire. La seconde famille regroupe un plus grand nombre d'échantillons. Ils pèsent autour de 2,25 g. Ils sont trop légers pour être associés à un monnayage de doubles tournois. C'est pourquoi, ils correspondent certainement à des carreaux n'ayant pas été rectifiés pour ajuster leurs masses. Enfin, le dernier groupe dont les

[672] Duplessy J., *Les monnaies françaises..., op. cit.*, t. 2, p. 139, 153, 183.

ébauches présentent des masses autour de 3 g, doit permettre la frappe de doubles tournois.

Dans la mesure où les échantillons les plus lourds assimilables à des derniers non ajustés peuvent également correspondre à des doubles tournois un peu faibles, il a été décidé de retenir formellement la limite de 2,75 g qui sépare graphiquement les deux ensembles (Figure 130). C'est à partir de ce postulat qu'il sera possible d'estimer la valeur de ce *corpus* s'il avait été finalisé.

En conclusion, il a été possible à partir d'une approche métrologique et analytique de faire correspondre les types monétaires aux carreaux et flans mis au jour lors de fouilles de l'atelier monétaire de La Rochelle. Globalement les valeurs réglementaires sont bien respectées en reconnaissant toutefois de plus grandes réserves pour le groupe B'. En revanche, l'ensemble associé au monnayage d'argent est particulièrement en accord avec les limites légales. Bien que l'origine d'une telle rigueur puisse être rapprochée de la valeur importante de ces alliages, il est aussi envisageable que ces derniers contrairement à leurs homologues de plus bas titre, présentent leurs masses originelles. Compte tenu de leur composition, il est très probable qu'ils aient été moins concernés par des phénomènes de corrosion durant leur enfouissement. Leur perte de masse lors des restaurations aurait finalement été moins importante…

D'un autre côté la mise en évidence des types monétaires a également permis de proposer une datation plus précise de certains contextes. Finalement, les années autour de la période 1575[673] - 1579[674] apparaissent comme une phase de transition importante au sein de l'atelier monétaire de La Rochelle d'ailleurs mis en évidence stratigraphiquement par les archéologues[675].

[673] Les unités stratigraphiques 1066, 1067, 1068, 1071, 1072 et 3078 doivent être associées à une période qui précède cette date.
[674] Les unités stratigraphiques 1021 et 3009 doivent être associées à une période ultérieure.
[675] On peut ici signaler que deux analyses prospectives de flans d'agents réalisées par ICP-MS avec abaltion laser ont mis en évidence des traces d'indium de l'ordre de la ppm pouvant être mises en relation avec une possible provenance sud américaine de l'argent utilisé. De nouvelles analyses pourraient donc constituer un nouvel argument datant dans la mesure où l'argent américain arrive à la fin du XVIe siècle par l'intermédiaire de l'Espagne dans les ateliers monétaires français.
Collin B. *et al.*, Sur les traces..., *op. cit.*, p. 483-505.

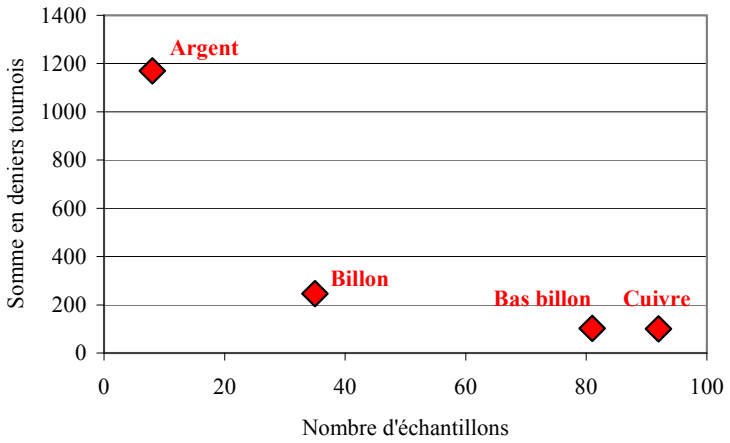


Figure 131 - Valeur des différents monnayages par rapport au nombre d'échantillons rassemblés.

Enfin, à partir de la mise en évidence des types monétaires associés aux flans et carreaux découverts à La Rochelle, il est possible de calculer la somme équivalente à chacune des catégories d'alliages définies. Le groupe A rassemble cinq quarts d'écu de quinze sous, un huitième d'écu qui en vaut la moitié, un demi franc de dix sous ainsi qu'un quart de franc de cinq sous, pour un total de 1170 deniers tournois[676]. En considérant les variations importantes constatées par rapport aux masses ainsi qu'aux titres de certaines ébauches, les groupes B et B' comptent treize douzains et vingt-deux sols parisis. Ce *corpus* est donc équivalent à une somme de 486 deniers tournois[677]. Avec 22 doubles tournois et 59 derniers tournois, le groupe C représente 103 deniers potentiels. Enfin, le monnayage de cuivre regroupe 84 ébauches de deniers et 8 de doubles tournois, pour une valeur de 100 derniers.

En définitive, il ne faut pas considérer la somme estimée dans sa globalité des 7 livres 14 sous et 11 deniers. Il est plus intéressant de conserver le classement en fonction des types d'alliages. Il confirme en quelque sorte l'hypothèse précédemment suggérée qui voyait dans une moins grande représentativité des échantillons d'argent dans le *corpus*, une plus grande attention durant leur mise en forme. Les sommes équivalentes rapportées aux nombres d'échantillons (Figure 131) permettent de constater que la valeur des monnaies augmente de manière exponentielle avec la quantité d'argent qu'elles contiennent.

[676] *Ibidem*, p. 132, 133.
[677] Spooner F. C., *L'économie mondiale..., op. cit.*, p. 336 et 337.

IV. Discussion sur les opérations de fonderie

Les précédentes discussions ont finalement permis de collecter un certain nombre de données à la fois bibliographiques, archéologiques, et, de surcroît, expérimentales qu'il est maintenant possible de comparer. Dans un premier temps, la discussion doit être abordée d'un point de vue comparatif avec la confrontation du *corpus* de fragments de creuset provenant des ateliers de Montreuil-Bonnin et de La Rochelle. Dans un second temps, il est envisageable de proposer une organisation du travail de préparation des alliages au sein de ces fabriques, en considérant notamment les données disponibles dans les comptes de production concernant les rythmes des émissions.

Les creusets monétaires de Montreuil-Bonnin et de La Rochelle

Malgré le taux de fragmentation important des creusets découverts lors des campagnes de fouilles aux abords de la forteresse de Montreuil-Bonnin, il a été possible à partir du très grand nombre de tessons collectés de proposer une approche statistique efficace pour définir le type de pâte utilisée ainsi que la morphologie moyenne des céramiques correspondantes[678]. C'est une démarche similaire qui a permis aux archéologues qui ont étudié le matériel de La Rochelle, de décrire les creusets monétaires rochelais[679]. Toutefois, leur étude mise en parallèle avec les révélés stratigraphiques a également mis en évidence une évolution de leur forme au cours du fonctionnement de la fabrique monétaire. Finalement, seul un premier ensemble qui regroupe les échantillons de la première phase d'activité de l'atelier, est comparable à celui découvert à Montreuil-Bonnin. Le second groupe, constitué des fragments des niveaux du XVI^{e} siècle, ne sera donc pas strictement considéré dans la discussion suivante autrement que d'un point de vue morphologique global trahissant une évolution des structures métallurgiques.

Finalement, les différentes données collectées à partir du matériel céramique de Montreuil-Bonnin ainsi que du mobilier de la première période de fonctionnement du second atelier monétaire de La Rochelle, sont résumées dans la figure ci-dessous pour être comparées.

[678] cf. Les creusets de l'atelier monétaire de Montreuil-Bonnin, p. 297.
[679] cf. Monnayage royal : La Rochelle (Charente-Maritime) : *Les céramiques métallurgiques*, p. 141.

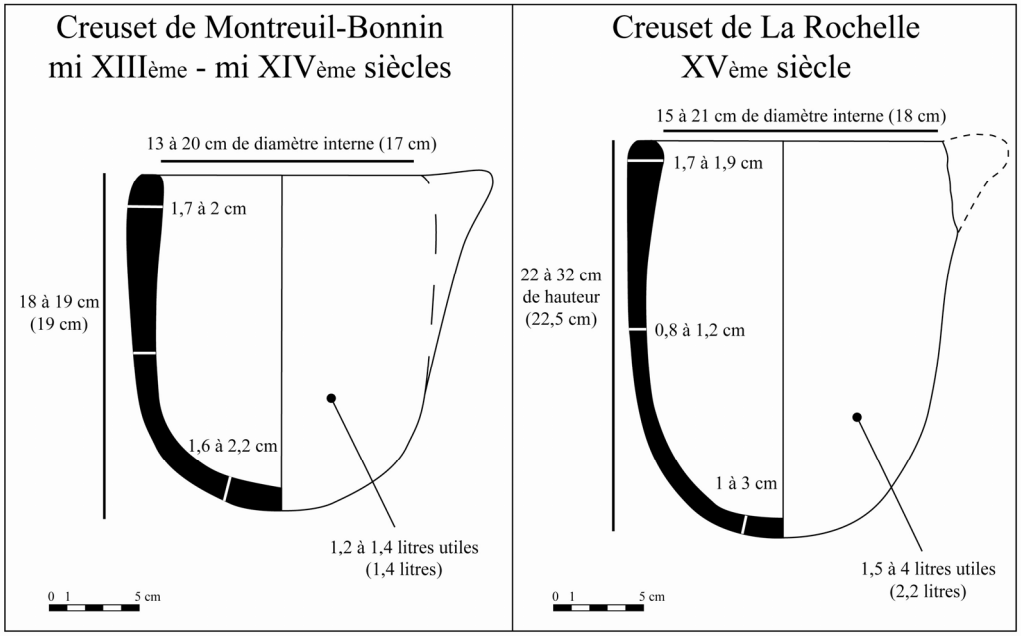


Figure 132 - Comparaison des données collectées sur les creusets monétaires de Montreuil-Bonnin et de La Rochelle[680].

En préalable, il faut rappeler que les deux *corpus* qui viennent d'être évoqués sont datés de périodes qui ne coïncident pas, elles expriment une succession chronologique. Les fragments retrouvés à Montreuil-Bonnin sont les plus anciens. Ils sont datés à partir du fonctionnement de la fabrique monétaire qui est attesté entre la moitié du XIII^{e} et la moitié du XIV^{e} siècle. Ils sont ici confrontés aux échantillons provenant des niveaux de la fonderie du second atelier rochelais en activité au XV^{e} siècle. En définitive, les deux *corpus* considérés ici sont séparés d'une cinquantaine d'années au minimum.

D'un autre côté, l'une des caractéristiques de l'atelier monétaire de Montreuil-Bonnin qui a justifié sa prise en compte dans cette étude, est sa proximité avec La Rochelle. Durant le fonctionnement de la fabrique de Montreuil, des liens sont d'ailleurs attestés entre les deux villes. Certains notables rochelais interviennent dans la gestion de l'atelier poitevin[681].

Dans la mesure où elles appartenaient à une même aire géographique, les céramiques provenant des deux fabriques pouvaient trahir des points communs significatifs de pratiques monétaires locales.

[680] Les données entre parenthèses correspondent aux caractéristiques des creusets représentés.
[681] Bompaire M., Un siècle de monnayage..., *op. cit.*

Dans une confrontation des résultats, la figure 132 est particulièrement significative puisqu'elle révèle que les morphologies globales des creusets sont identiques bien que provenant de deux ateliers monétaires différents. Il s'agit de poches de coulée avec un bec verseur et présentant un fond hémisphérique. Finalement, en considérant les différents relevés et observations collectées sur ces objets, il apparaît que les similitudes entre ces céramiques métallurgiques existent également à des degrés plus fins. Bien que certains creusets rochelais aient des dimensions plus importantes que ceux de Montreuil-Bonnin, il existe tout de même un domaine moyen où les mensurations relevées dans chacun des ensembles concordent. La donnée la plus représentative de cette observation est le volume utile correspondant à la quantité de liquide que pouvaient accueillir ces creusets lors des fontes. Pour Montreuil-Bonnin, il est évalué entre 1,2 et 1,4 litre à partir des deux céramiques retrouvées entières. Alors que les fragments découverts à La Rochelle ont permis aux archéologues de supposer que les volumes associés définissent un intervalle de 1,5 à 4 litres de matière fondue. Il a été par ailleurs mesuré à 2,2 litres dans un individu archéologiquement complet. Toutefois, ces différences de contenance peuvent-elles constituer un paramètre discriminant ?

A titre de comparaison, si la masse de métal qui pouvait être fondue à Montreuil-Bonnin est à peu près constante puisqu'elle a été estimée à environ 10,5 kg[682], un calcul proportionnel donne des fontes équivalentes à 11 à 34 kg de billon à La Rochelle pour des volumes de 1,5 à 4 litres d'alliage. La masse fondue varie ici du simple au triple. Une telle variation peut dans un premier temps se justifier par des niveaux de production différents au sein des deux fabriques. Cependant, les données disponibles concernant les rythmes de fabrication de l'atelier rochelais à la période considérée ne sont pas assez précises pour permettre une comparaison. D'autant que les rares traces de métal et de vitrifications qui ont permis de connaître les types d'alliages qui ont été travaillés à Montreuil-Bonnin, sont en revanche inexistantes sur l'ensemble des vestiges de La Rochelle dont il est ici question. Il est dans ce cas impossible de supposer quels sont les métaux qui ont été fondus dans ces récipients. Cette méconnaissance des types d'alliages travaillés dans les creusets retrouvés dans cette officine conjuguée à leur datation relativement large, n'auraient finalement pas permis de les relier à des productions précises, si elles avaient été connues.

D'un autre côté, une mention du traité monétaire de J. Boizard permet de proposer une autre hypothèse pour justifier la variation du volume des céramiques. La taille des creusets ne doit-elle pas être rapprochée des types d'alliages travaillés ? Selon le conseiller à la Cour des monnaies de Paris, il est nécessaire de

[682] cf. *supra*, p. 318.

préparer les alliages à base d'or en quantités plus restreintes que ceux à base d'argent. Les premiers représentant à volume égal une somme beaucoup plus importante, devaient être fondus dans des creusets plus petits « afin que, si le creuset se casse, il y ait moins de perte »[683]. Dans la mesure où un rapport de coût homologue existe entre les alliages à forte proportion de cuivre et ceux contenant beaucoup d'argent, il est envisageable qu'un modèle identique soit transposé dans l'organisation des fontes de l'atelier rochelais. Dans ce cas, les plus petits creusets auraient été employés pour la fonte d'argent ou de billon. Les plus gros en revanche, auraient été réservés à la préparation des bas billons dont les titres en métal précieux sont très faibles et peuvent parfois ne pas dépasser cinq pourcent de la masse totale. Toutefois, cette hypothèse ne peut être vérifiée puisqu'aucun tesson n'a révélé de résidus métalliques qui auraient permis de relier les calibres des céramiques à des types d'alliages monétaires.

Les ressemblances sont également marquées par le type de pâte qui a été utilisée pour la fabrication de ces poches de coulée. Il s'agit en général d'une argile blanche dégraissée avec des grains de quartz d'une taille moyenne plus importante dans les échantillons de Montreuil-Bonnin. En revanche, alors que cette pratique est décrite dans les sources monétaires, aucun fragment ne rend compte d'ajout d'un autre matériau tel que de la chamotte ou un composé organique dans un but d'améliorer les propriétés mécaniques de l'argile utilisée. Quant aux très rares glaçures observées à la surface des tessons rassemblés, elles résultent certainement de leur utilisation et non d'une préparation initiale.

Finalement, c'est également sur le plan de leurs structures et de leur technique de mise en forme que les creusets des deux ateliers exposent leurs points communs. Bien que les céramiques rochelaises soient légèrement plus massives, elles définissent en revanche des rapports d'épaisseur de pâte équivalents à ceux déterminés à partir de celles de Montreuil-Bonnin. Leurs panses sont en effet systématiquement plus fines que les bords et les fonds. Une telle configuration justifiée à la fois par des considérations mécaniques et de mise en forme, s'applique finalement aussi aux vestiges de La Rochelle. Dans un premier temps, ils ont la même finalité de fondre des alliages métalliques denses, dont résultent des contraintes importantes durant leur manipulation. Ils ont en outre été fabriqués selon la même chaîne opératoire que celle proposée pour les creusets de

[683] Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 68.

Montreuil-Bonnin[684], comme en témoignent les différentes traces de tournage et de lissage caractéristiques.

Entre les creusets utilisés à Montreuil-Bonnin jusqu'à la moitié du XIV^e^ siècle et ceux employés au XV^e^ siècle dans la fonderie du second atelier monétaire de La Rochelle, les relations d'analogie sont nombreuses et effectives sur différents plans. Elles s'expriment à la fois au niveau des types de pâtes, des morphologies et des méthodes de fabrication. Or, s'il a été vu que certaines caractéristiques communes se comprennent par la finalité identique de ces récipients, d'autres en revanche trouvent peut-être leur justification en considérant l'hypothèse d'une origine locale.

Bien que les deux ateliers ne présentent pas des périodes de fonctionnement communes, leurs activités ne sont en définitive séparées que par une cinquantaine d'années. D'autre part, les données archéologiques recueillies sur les deux sites ne permettent pas d'évaluer à quelles durées de fonctionnement des fabriques correspondent ces *corpus*. Les homogénéités des deux ensembles pourraient être mises en relation avec de courtes périodes d'activité. Toutefois, celles-ci définissent également des unicités puisqu'aucun autre type n'apparaît parallèlement[685]. Il est donc envisageable que les caractères relevés aient été maintenus durant une plus grande période que celle initialement supposée. Dans ce cas, rapportée aux centaines d'années qu'elles représentent, les cinquante ans qui séparent leurs activités permettent de considérer qu'il ait pu y avoir une persistance du modèle de creuset métallurgique. Pour la période de fonctionnement de la fabrique rochelaise, deux autres ateliers monétaires en activité à la même époque, ont été fouillés. Ils offrent des *corpus* de comparaison particulièrement intéressants. Il s'agit des officines de Trondheim en Norvège et de Porto au Portugal[686]. Les formes mises en évidence sur ces sites sont très différentes de celles qui viennent d'être évoquées puisqu'il s'agit de creusets triangulaires à fonds plats. Ce sont ces formes de creusets que l'on peut observer sur une représentation d'un atelier monétaire du XVI^e^ siècle présentée dans le traité de numismatique de J.-A. Blanchet (Figure 133)[687].

---

[684] cf. Mise en forme des creusets de Montreuil-Bonnin, p. 304.

[685] Le changement typologique constaté au sein de l'atelier de La Rochelle prend place dans une autre période de fonctionnement de la fabrique. De plus, il sera vu qu'il est associé à un changement de procédé métallurgique. Il n'a donc pas lieu d'être évoqué ici.

[686] McLees C., Itinerant craftsmen, permanent smithies..., *op. cit.*, p. 121-135.
Lopes I. A. *et al.*, Excavaciones arqueológicas..., *op. cit.*, p. 57-72.
Kearns T. *et al.*, Fire assay..., *op. cit.*

[687] Blanchet J.-A. *et al.*, *Manuel de numismatique française*, *op. cit.*, t. 2, p. 23.

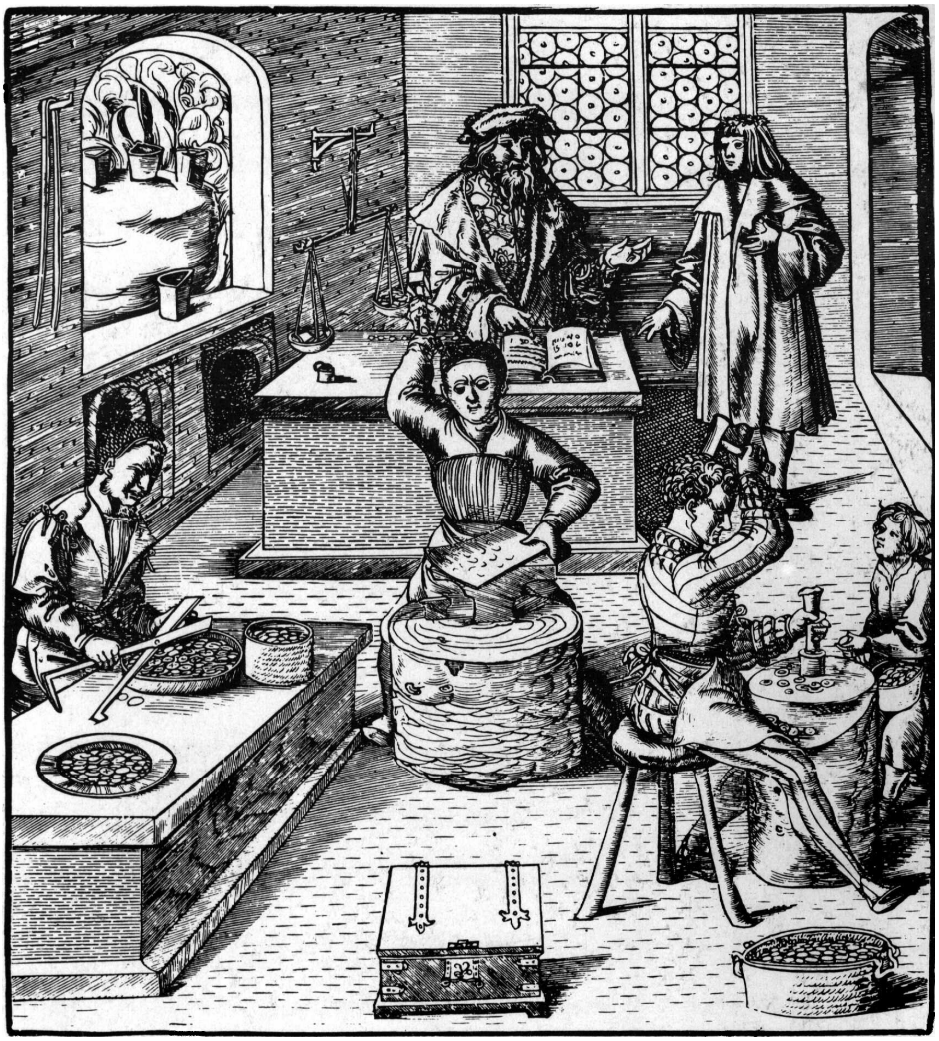


Figure 133 - Creusets triangulaire dans le four d'un atelier monétaire du XVI^e^ siècle.

Leur étude proposée pas M. Martinón-Torres *et al.*, a révélé qu'ils ont été importés de la région de la Hesse en Allemagne[688]. Ce sont d'ailleurs des céramiques d'un même type que décrit J. Boizard quand il évoque des formes pyramidales[689]. Cette zone de production paraît avoir fourni des ateliers monétaires et métallurgiques répartis dans toute l'Europe[690]. Toutefois, la fabrique de La Rochelle n'a pas semble-t-il employé des céramiques de cette provenance.

Sans décrire une gamme aussi étendue que celle mise en évidence lors des fouilles de l'atelier d'alchimiste du XVI^e^ siècle à Oberstockstall avec des tailles de

[688] Martinón-Torres M. *et al.*, Post-medieval crucible..., *op. cit.*
[689] « vaisseau en manière de pyramide..., ».
Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 97.
[690] Martinón-Torres M. *et al.*, Agricola and Zwickau..., *op. cit.*, p. 95-111.

creuset s'échelonnant entre 2 et 20 cm, le *corpus* de creuset de La Rochelle témoigne tout de même d'une certaine standardisation[691]. La variation du volume utile des céramiques n'entraîne pas de changements morphologiques (Figure 132). De plus, compte tenu des analogies constatées, il apparaît que cette uniformisation existait déjà au sein de la fabrique de Montreuil-Bonnin.

La fonderie monétaire

En ce qui concerne la mise en œuvre des opérations de fonderie monétaires en générale, la confrontation des données collectées à partir des vestiges provenant de Montreuil-Bonnin et La Rochelle, permettent d'aborder différentes problématiques spécifiques.

Dans un premier temps, la question des fonds hémisphériques des poches de coulées les plus anciennes apparaît être un paramètre discriminant très significatif car associé aux structures métallurgiques employées. Cette présomption a notamment été évoquée lors de l'étude des creusets de Montreuil-Bonnin pour justifier les morphologies assez particulières de ces céramiques. Leurs fonds globulaires qui peuvent paraître peu stables dans la mesure où les récipients considérés doivent accueillir des alliages liquides, sont au contraire particulièrement adaptés pour être placés et maintenus au sein d'un foyer de charbon. Cependant, les fouilles de Montreuil-Bonnin n'ayant mis au jour aucune structure métallurgique, il n'était pas possible de vérifier cette hypothèse reliant les creusets à un type de four particulier. Les travaux archéologiques de La Rochelle apportent finalement l'éclairage manquant puisque ces mêmes morphologies de céramiques métallurgiques ont été découvertes dans des contextes contemporains d'un four en trou de serrure. Sa reconstitution a notamment montré que l'utilisation d'une telle structure impose des creusets précisément placés dans la masse de combustible du foyer. Le lien entre la forme des creusets et four de fonderie est ici attesté[692].

A partir de cette hypothèse, la transition morphologique qui voit apparaître au XVI^{e} siècle les formes à fond plat au sein de l'atelier de La Rochelle, remplaçant

[691] Martinón-Torres M. *et al.*, Mass-produced mullite crucibles..., *op. cit.*

[692] La fouille d'un atelier de faux-monnayeur daté du début de XIV^{e} siècle, dans la fortification de Plein-Mont (Hargnies), rend compte d'une relation identique. Un four en trou de serrure d'un mètre de diamètre a été découvert dans un contexte qui a également révélé plusieurs centaines de fragments de creusets définissant des formes similaires à celles de Montreuil-Bonnin et La Rochelle. Les volumes rencontrés se situent autours de deux litres.
Communication personnelle de J.-P. Lémant responsable de la fouille.

ensuite totalement au XVII[e] siècle les profils globulaires, doit être associée à un changement des types de fours employés. Cette évolution n'est toutefois attestée que par l'observation des céramiques puisque les niveaux de la fonderie correspondant à ces périodes de fonctionnement de la fabrique n'ont en revanche pas été mis au jour. Alors que les fonds hémisphériques présentent un intérêt particulier pour les introduire dans un foyer rempli de charbon, les fonds plats ne sont au contraire pas compatibles avec une telle utilisation. De par leur encombrement, ils sont difficiles à placer dans une masse de combustible et sont exposés à un plus grand risque de basculement durant la fonte du métal, car une consommation localement plus rapide du charbon sous la céramique peut la déséquilibrer. Les creusets à fond plat doivent être rapprochés de fourneaux dans lesquels ils sont déposés directement sur la sole. La technologie de telles structures est différente de celle des fours en trou de serrure. Elles correspondent *a priori* à des fours à réverbère sur le même principe que ceux décrits dans *Mémoire sur la fabrication des sols de billon...*[693]. Le principe de fonctionnement de ces fours sépare le foyer où brûle le charbon, du laboratoire où sont placés les creusets. Dans ce cas, les métaux fondus dans ce type de structures sont peut-être dans une atmosphère moins réductrice résultant des gaz de combustion, que lorsque la fonte des alliages intervient au sein de la masse de charbon d'un four en trou de serrure.

Des expérimentations de fontes dans différents types de four confirment l'importance de l'atmosphère de la zone de chauffe. Il est apparu qu'après avoir été coulés, des mélanges cuivre-argent préparés dans un four électrique présentaient dans leur structure interne un grand nombre d'inclusions. L'observation de la structure et de l'organisation de ces dernières ainsi que leur analyse élémentaire[694], permet de supposer qu'il s'agit d'oxydes de cuivre (Figure 134).

[693] Anonyme, *Mémoire sur la fabrication..., op. cit.*, chapitre 3.

[694] Les analyses ont été réalisées par spectrométrie en dispersion d'énergie couplée à un microscope à balayage. Des analyses par diffraction des rayons X auraient permis d'identifier les oxydes formés, toutefois elles n'étaient pas envisageables dans les conditions du problème.

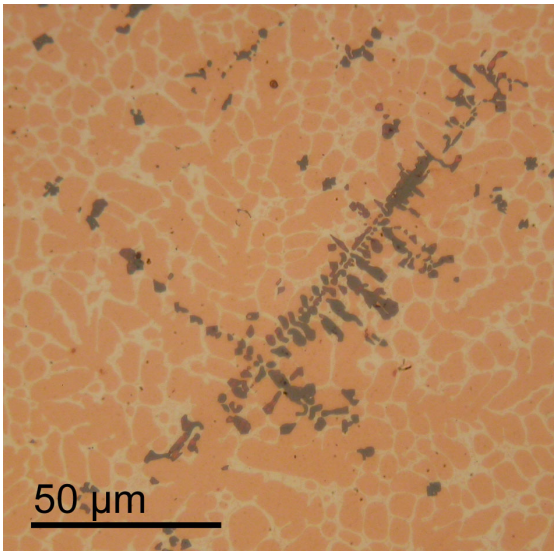


Figure 134 - Inclusions dans un alliage cuivra-argent expérimental contenant 70 %mass de cuivre et 30 %mass d'argent (n° 05-30).

Ces inclusions parfois très nombreuses se regroupent en chapelets et constituent dans ce cas des sites précurseurs de fissuration fragilisant la structure générale (Figure 134). Leur présence est toutefois justifiée par l'atmosphère de fonte. Dans le four électrique du laboratoire, le milieu de chauffe n'offre pas des conditions particulièrement réductrices. C'est pourquoi aux températures nécessaires pour les fusions, l'oxygène de l'air participe d'autant plus à l'oxydation du cuivre fondu[695]. Cette hypothèse est par ailleurs confirmée par l'observation d'alliages obtenus lors de nouvelles expérimentations, dans les fourneaux chauffés au charbon de bois[696]. Les observations de coupes métallographiques des échantillons fondus au milieu du combustible, ainsi que celles des objets archéologiques, ne rendent pas compte de la présence d'oxydes dispersés dans la matière. Finalement, les gaz de combustion carbonés maintiennent un milieu plus réducteur, en l'occurrence moins oxydant que celui de l'enceinte du four électrique. Cette constatation justifie dans ce cas l'une des consignes décrite dans le *Mémoire sur la fabrication des sols de billon...*[697]. Si les fours à réverbères permettent une meilleure chauffe, ils n'offrent pas *a priori* une

[695] cf. Figure 202, p. 481.
[696] Il s'agit ici de foyer semi-enterré dans lesquels les creusets contenant les métaux à fondre sont placés au milieu du charbon en combustion. L'organisation est finalement similaire à celle du four en trou de serrure présenté plus haut (cf. *supra*, p. 269) excepté que les dimensions sont plus limitées et que la ventilation est ici assurée par des soufflets.
[697] Anonyme, *Mémoire sur la fabrication..., op. cit.*, n. p.

atmosphère suffisamment réductrice lors des fusions, il est donc prescrit de précéder les coulées de plusieurs apports de matière carbonée, en l'occurrence de la poudre de charbon, dans le bain de métal fondu[698].

En définitive, les points communs qui existent entre la forme des creusets utilisés à Montreuil-Bonnin avec ceux correspondant à la première période de fonctionnement de l'atelier monétaire de La Rochelle attestent de la similitude des types de fourneaux utilisés. Ils sont à rapprocher du four en trou de serrure présenté plus haut. Par ailleurs, bien que les travaux archéologiques de la place de Verdun n'aient pas mis au jour les vestiges du nouveau type de fourneau qui a remplacé celui qui a été employé au début de l'activité de la fabrique, l'observation de la modification à partir du XVI^{e} siècle, de la morphologie globale des céramiques métallurgiques utilisées atteste ce changement technologique. De plus, bien que la technologie des fourneaux à réverbère soit déjà décrite au XI^{e} siècle par Théophile pour la fonte du verre, ce n'est qu'à partir du XVI^{e} siècle qu'elle commence à être employée en métallurgie[699].

Une autre problématique qui peut être abordée à partir de l'étude des *corpus* de Montreuil-Bonnin et de La Rochelle, est l'absence de vestiges témoignant de l'emploi de couvercle lors des fontes. Or, les sources monétaires attestent de l'utilité de recourir à de tels ustensiles[700]. Les différentes expérimentations réalisées confortent leur intérêt. Ils empêchent notamment que trop de charbons ne viennent recouvrir le bain de métal fondu. Ces derniers sont particulièrement gênants lors de coulées puisqu'ils peuvent boucher les orifices des moules[701]. Finalement, les arguments sont relativement nombreux pour expliquer que de tels objets n'aient pas été découverts lors des différentes opérations archéologiques.

---

[698] « Dans les premières fontes de billon que l'on fit à la monoye de Paris au fourneau à réverbère, la matière n'ayant pas eu le degré de chaleur necessaire [...] les lames qui en provinrent ne valurent rien [...] elles étoient venteuses et cassantes, dans les secondes fontes qui en furent faites, on redoubla de degré de chaleur, [...] étant en bain et prête à couler, on jetta dedans du poussier de charbon, lequel fit un tel effet sur la matière, quand il fut consommé, [...] que les lames qui en provinrent étoient douces comme du plomb, et depuis ce tems là on s'en est toujours servy utilement. ».
Ibidem, chapitre 3.

[699] Théophile *et al.*, *Essais sur divers arts..., op. cit.*, p. 79-81.
Jenkins R., The reverberatory furnace with coal fuel, 1612-1712, *Transactions of the Newcomen Society*, vol. 14, 1933, p. 67.

[700] « On met un creuset de terre sur cette platine, on charge le creuset de matière, on le couvre d'un couvercle de fer ou de terre, [...] et on charge le fourneau de charbon. ».
Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 69.

[701] « on a soin seulement avec une lame d'épée, ou quelque autre instrument, de retirer les petits charbons qui pouroient tomber dans les moules en coulant. ».
Anonyme, *Mémoire sur la fabrication..., op. cit.*, chapitre 3.

Soumis à des contraintes d'utilisation moins difficiles, les couvercles sont soumis à une usure autrement plus limitée que celle des céramiques métallurgiques, diminuant d'autant le nombre des ruptures. La quantité de déchet de couvercle est moins importante que celle des creusets, diminuant d'autant les chances de découverte de tels échantillons au cours de fouilles. De plus, un fragment d'ancien creuset peut par la suite être réutilisé en tant qu'opercule, qui, lors de sa découverte pourra difficilement être identifié comme tel si sa seconde utilisation ne laisse pas de traces caractéristiques. Enfin, dans le cas où un couvercle aura reçu des projections de métaux précieux, celui-ci aura été broyé afin de récupérer les particules déposées, éliminant dans ce cas toute possibilité de découverte.

En définitive, bien qu'aucun indice explicite ne témoigne de l'emploi de couvercle lors des fusions mises en œuvre dans ces ateliers, il apparaît qu'il ne faut pas totalement exclure cette possibilité. Car si rien ne prouve une telle utilisation pourtant simple et indispensable, d'un autre côté rien ne s'y oppose.

L'organisation du travail au sein d'une fonderie monétaire

Il faut maintenant confronter les différentes données archéologiques et expérimentales collectées notamment à partir de l'étude des creusets de Montreuil-Bonnin et de La Rochelle ainsi que lors des expérimentations du four en trou de serrure, à des chiffres de productions disponibles dans des comptes d'ateliers. Une telle approche doit notamment permettre de reconstituer l'organisation des opérations de fonderie dans un atelier monétaire. Le principal enjeu est de déterminer si les rythmes de productions imposent un fonctionnement continu des fours ou si la fonte des métaux peut être limitée à certaines périodes.

Pour ce qui est des informations obtenues à partir de l'étude des vestiges archéologiques, leur datation les répartit sur des périodes de centaines d'années, ce qui complique la possibilité de les associer avec des productions particulières. Si les fragments de creusets découverts à Montreuil-Bonnin ont pu être reliés à un monnayage précis, c'est notamment parce qu'ils présentent des restes métalliques ayant révélés la composition des alliages préparés. Parallèlement, les données expérimentales rassemblées ne doivent pas être trop extrapolées puisqu'elles ont été obtenues à partir d'une structure d'une certaine dimension et lors de la fonte d'argent pur. La taille du fourneau archéologique reconstitué est plus importante et ce dernier a été utilisé pour fondre des alliages monétaires dont les températures de fusion peuvent être, suivant les compositions, supérieures comme inférieures à celle de l'argent pur. Pour disposer d'un ordre de grandeur des variations

impliquées par les changements de composition sur les températures de fusion des alliages monétaires cuivre-argent, il suffit de consulter le diagramme de phase de ce composé binaire[702].

Quant aux données disponibles sur les niveaux de production, elles couvrent généralement des durées relativement importantes, d'un à plusieurs mois. Elles ne favorisent pas la mise en évidence du fonctionnement instantané d'une fabrique. Les chiffres consignés fournissent tout de même des estimations moyennes sur ces périodes. De plus, les phases de production associées aux plus fortes émissions sont potentiellement associées à une activité continue des ateliers.

A partir des différentes informations collectées, il a été décidé d'estimer qu'elles seraient les conséquences de l'utilisation d'un four de la dimension de celui qui a été expérimenté à Melle sur la mise en œuvre du monnayage au sein de l'atelier de Montreuil-Bonnin. En effet, c'est pour cette fabrique que les documents monétaires sont les plus précis et permettent de suivre la production sur une période relativement longue qui couvre une vingtaine d'années entre 1247 et 1272. Plusieurs comptes de fabrication ont été préalablement publiés par A. Bardonnet, puis complétés et commentés par M. Bompaire après que J. Belmont en ait retrouvé cinq supplémentaires[703].

D'un point de vue archéologique, les fouilles menées sur ce site n'ont mis au jour que des fragments de creusets monétaires. Bien que leur morphologie ait attesté du type de fourneau utilisé dans cette fabrique, les dimensions ce celui-ci, ainsi que la possibilité qu'il y en ait eu plusieurs fonctionnant en parallèle, ne sont pas connues puisqu'aucun vestige n'a été découvert. Dans ce cas, un four en trou de serrure du même type que celui reconstitué pouvait-il suffire à la production ?

Un premier postulat a du être posé puisque les quantités de métal fondu lors des expérimentations étaient différentes de celle fondues à Montreuil-Bonnin. L'hypothèse retenue consiste à assimiler la vitesse de fonte déterminée lors des essais à partir de la fusion de charge d'un kilogramme d'argent, à un rendement global du four. Les alliages ne fondent pas à la même température que celle de l'argent pur. De plus, lors des reconstitutions, les creusets étaient chargés d'un

[702] Ici, le diagramme de phase argent-cuivre ne doit être considéré que pour donner des ordres de grandeur puisqu'ils ont été établis à partir de métaux purs, ce qui n'est pas le cas des alliages monétaires anciens, comme l'ont montré les précédentes analyses.
cf. Annexe G.

[703] Bardonnet A., Comptes d'Alfonse de Poitiers (1243-1247), *Archives historiques du Poitou*, vol. IV, 1875, 234 p.
Bardonnet A., Comptes et enquêtes d'Alfonse, comte de Poitou, 1253-1269, *Archives historiques du Poitou*, vol. VIII, 1879, p. 13-14, 34-35 et 158-159.
Bompaire M., La production monétaire..., *op. cit.*, p. 5-32.

kilogramme de métal. Les estimations proposées pour la contenance des céramiques archéologiques sont plus importantes. Ce sont ces dernières qui sont prises en compte dans cette discussion. Cependant, sans de nouvelles expériences, il est impossible de prévoir, les conséquences sur les temps de fonte résultant du travail de masses plus importantes.

Dans les conditions qui viennent d'être définies quelles sont les possibilités de productions comparées à celles dont témoignent les comptes de l'atelier de Montreuil-Bonnin ? Dans une discussion précédente, les volumes des creusets associés à cette fabrique ont été préalablement ramenés à des volumes utiles, pour ensuite être assimilés à des masses d'alliage. La composition de ce dernier a été fixée à 65 % massiques de cuivre pour 35 % d'argent à partir de l'analyse de résidus métalliques déposés à la surface des fragments de céramiques étudiés. Il est à rapprocher d'un monnayage de deniers tournois[704]. En définitive, la masse d'alliage qui peut être contenue dans ces creusets se situe entre 10,5 et 11 kilogrammes[705]. Sachant que les deniers pesaient théoriquement 1,12 g et en tenant compte ici que la transformation des lames en flans par la suite monnayés ne devait théoriquement pas induire un déchet de plus de 12,5 %[706], la fonte d'une charge pouvait conduire à la frappe d'environ 8200 à 8600 monnaies. Les données de production relevées par M. Bompaire montrent à Montreuil-Bonnin, pour les années connues entre 1253 et 1260, des fabrications mensuelles moyennes de 720 000 à 3 760 000 de deniers[707]. Avec une moyenne globale de 1 480 000 de pièces mensuelles sur les 21 mois de production consignée dans les comptes, il faut mettre en œuvre, avec des coulées de 11 kg d'alliage, environ 172 fontes. Dans le four en trou de serrure dont le fonctionnement a été expérimenté à Melle, il est possible de disposer deux creusets dans le foyer. En considérant, les résultats des essais expérimentaux, il faut une heure pour fondre 5 kg d'argent, soit un peu plus de 2 heures pour fondre chaque charge. Sur une journée de huit heures de travail, l'utilisation d'un tel four aurait permis de réaliser 8 coulées de 11 kg d'alliages. En rapportant cette estimation aux 172 fontes mensuelles, cela correspond à 22 jours ouvrés. Il apparaît qu'un four de la taille de celui expérimenté à Melle est suffisant pour subvenir aux opérations de fonderie lors des périodes de fonctionnement de moyenne de l'atelier de Montreuil-Bonnin. Il n'est

[704] Teboulbi A. *et al.*, Etude du monnayage de Toulouse..., *op. cit.*
[705] cf. *supra*, p. 318.
[706] cf. *supra*, p. 93.
[707] Les comptes présentés révèlent les fabrications pour une période de 1247 à 1272, avec une lacune en 1261 et 1262. Toutefois, les données les plus précises correspondent à certains relevés de l'intervalle 1253-1260, avec des comptes couvrant entre trois et cinq mois de production.
Bompaire M., La production monétaire..., *op. cit.*, p. 24.

en outre pas indispensable que les opérations de fonderie soient mises en œuvre en continu puisqu'elles ne demandent que 22 jours de travail complet par mois. Toutefois, en considérant maintenant les productions les plus importantes de l'année 1259, avec une moyenne mensuelle de 3,76 millions de monnaies frappées dans cette même fabrique, demandant environ 437 fontes, il apparaît que le four retenu est trop petit. En prenant en compte le problème dans le sans inverse, c'est-à-dire en supposant que le fourneau fonctionne en continu durant un mois, il est possible de réaliser près de 212 coulées[708].

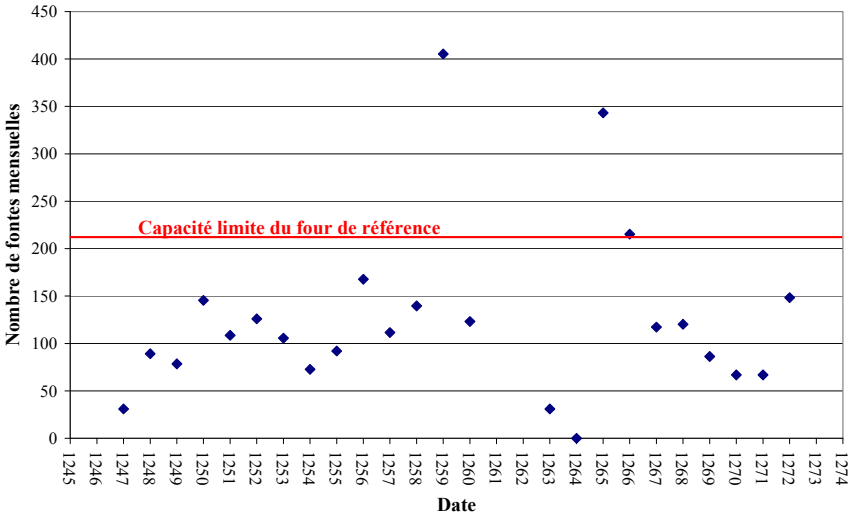


Figure 135 - Evaluation du nombre de fontes mensuelles nécessaires en fonction des estimations de productions de l'atelier de Montreuil-Bonnin[709].

En considérant maintenant les productions mensuelles moyennes calculées à partir des données annuelles évaluées par M. Bompaire pour la période 1247 à 1272, il est possible d'estimer les nombres de fontes devant être mises en œuvre chaque mois (Figure 135). Il apparaît finalement qu'un four en trou de serrure pourtant deux fois plus petit que celui découvert lors de fouilles de l'atelier monétaire de La Rochelle permet de subvenir aux besoins moyens de fonderie de la fabrique de Montreuil-Bonnin pendant la période considérée. De plus, il n'est pas non plus indispensable dans la plupart des cas qu'un fourneau de ce type fonctionne en continu. Il faut envisager un séquençage des opérations de préparation des alliages. Une partie du temps de travail des fondeurs pourrait dans

[708] Cette estimation ne tient pas compte des dimanches durant lesquels les ouvriers monétaires ne travaillaient pas.
Bompaire M., Les cadences de production..., *op. cit.*, p. 590.
[709] Bompaire M., La production monétaire..., *op. cit.*, p. 27.

ce cas être réservé par exemple à l'élaboration des moules de sable dont l'utilisation au sein des fabriques monétaires est attestée par différentes sources[710]. De plus, compte tenu de la consommation de charbon supplémentaire nécessaire à la mise en chauffe d'un tel four, il est plus économique lorsque le niveau de production ne requiert pas un fonctionnement en continu, de minimiser le nombre de démarrages en regroupant la préparation des alliages sur des périodes plus longues.

Finalement, en restant sur l'hypothèse d'une estimation du fonctionnement de l'atelier de Montreuil-Bonnin avec un four de la taille de celui qui a été expérimenté, il est possible de supposer que pour les années de plus forte production (Figure 135), l'utilisation d'un second four identique permet de compléter les besoins de fontes d'alliages de l'atelier[711].

Pour la fabrique de La Rochelle, il n'est pas envisageable d'avoir la même approche, notamment parce que les données nécessaires à cette discussion ne sont pas aussi complètes que celles disponibles pour l'atelier de Montreuil-Bonnin. Finalement, les principales informations accessibles sont celles de la taille et du volume des creusets. En effet, les capacités du four utilisées précédemment ne peuvent être extrapolées au fourneau découvert place de Verdun. Bien que sa structure générale ait été utilisée pour définir les capacités de fonctionnement d'un tel four, le changement d'échelle lors des essais, interdit d'appliquer le modèle expérimental au fourneau archéologique. Sans de nouvelles expérimentations, par ailleurs difficile à mettre en œuvre compte tenu de la taille de la structure, il est pour l'instant difficile de connaître les capacités du four en trou de serrure découvert place de Verdun. Cependant, la structure reconstituée fournie quand même une valeur basse, notamment à partir de la discussion proposée à partir de l'atelier de Montreuil-Bonnin. En admettant que durant la période de son fonctionnement, le four en trou de serrure de la fabrique rochelaise était la seule structure utilisée dans le monnayage d'argent et de billon[712], il apparaît que les dimensions très importantes du fourneau doivent être rapprochées de niveaux de

[710] cf. *supra*, p. 83.

[711] Les quantités de métal fondues par N. Thomas lors de ses expérimentations sur la reconstitution d'un four de bronzier présentant une architecture similaire à celle dont il est question ici, sont comparables à celles qui viennent d'être évoquées. Il a en effet pu fondre sur une période de trois jours près de 150 kg de bronze.
Benoit P. (dir.) *Métallurgie des alliages à base de cuivre du XIII^e^ au XV^e^ siècle en France : Reconstitution des chaînes opératoires de production des objets du quotidien*, Rapport de PNRC, Ministère de la Culture, 2006, p. 55-61.

[712] Il est impossible d'en être certain puisque les fouilles de l'atelier n'ont pas permis de caractériser toute son emprise.

production supérieurs à ceux évoqués plus haut pour Montreuil-Bonnin. D'autant que la taille du fourneau est également corrélée avec la découverte de certains fragments de creuset dont l'estimation des volumes utiles définit un intervalle de 1,5 à 4 litres, soit jusqu'à trois fois le volume des céramiques métallurgiques de l'atelier poitevin.

D'un autre côté, les fragments de creusets recueillis à La Rochelle, n'ont, par ailleurs, pas révélés de traces de métal qui comme à Montreuil-Bonnin auraient permis de connaître les alliages et donc les monnayages associés à ces céramiques. De plus, dans leurs études d'archives, les numismates F. de Saucly et par la suite C. Roy n'ont pas relevé de données concernant les quantités d'espèces produites durant la période du XV^{e} siècle dont il est ici question[713]. Ce n'est qu'à partir du XVI^{e} siècle que de telles données ont pu être proposées par F. C. Spooner à partir d'un dépouillement des comptes de production de la fabrique[714]. En définitive, il apparaît difficile de définir une organisation moyenne des opérations de fonderie qui ont pu être mises en place au sein de l'atelier de La Rochelle au XV^{e} siècle. Il faut cependant admettre que la taille très importante du four de fonte mis au jour lors des fouilles, suppose un fonctionnement séquencé. Plus un fourneau est grand, plus il demande de charbon pour être mis en chauffe, il est dans ce cas plus intéressant de concentrer les fontes sur certaines périodes. En revanche, une telle gestion suppose de disposer d'un stock de métal suffisant pour préparer un lot conséquent de lames qui peuvent être mises en forme durant les phases d'inactivité du four[715].

En conclusion, la confrontation des différentes données rassemblées sur les opérations de fonderie monétaires ont permis de proposer une organisation possible de cette étape de fabrication au sein des fabriques de monnaies. Compte tenu des dimensions des structures métallurgiques nécessaires à cette production de masse, il apparaît plus avantageux, lorsque les rythmes de fabrication n'imposent pas un fonctionnement des fourneaux en continu, d'organiser un séquençage des opérations de fonderie. Si les grands fours sont intéressants durant les périodes de forte activité, ils consomment en revanche beaucoup plus de charbon lors de chauffes ponctuelles. Rien ne prouve que les ateliers monétaires considérés ici aient disposé d'une gamme de fourneaux adaptée aux rythmes de

[713] Roy C., *La Rochelle, son atelier monétaire..., op. cit.*, 91 p.
De Saulcy F., *Eléments de l'histoire..., op. cit.*, p. 24-27 et 125-126.
[714] Spooner F. C., *L'économie mondiale..., op. cit.*, p. 231-236 et 419-425.
[715] On retrouve notamment une logique similaire dans les campagnes de fonte pour les hauts-fourneaux.

production. C’est pourquoi, le fonctionnement idéal pour la préparation des alliages consiste à trouver un compromis entre le stock de métal qui doit être fondu et celui qui a déjà été préparé sous forme de lames devant être travaillées.

Partie 2. La chaîne opératoire du monnayage au marteau

Cette chaîne de mise en forme se définit par différentes étapes métallurgiques. L'objet de cette partie est de présenter les opérations de fonderie, de déformations plastiques ainsi que les traitements thermiques et chimiques nécessaires à la fabrication de monnaies par la technologie du marteau.

I. Coulée et mise en forme des lames

Une fois l'alliage préparé pour chaque type monétaire selon la composition fixée par les ordonnances, il est coulé pour obtenir les lames. C'est à partir de ces formes préliminaires, par la suite amincies et découpées, que sont produits les carreaux.

Dans cette partie deux problématiques principales seront abordées : le moulage de ces ébauches et leurs mises en forme ultérieures.

Les fouilles du second atelier monétaire de La Rochelle ont dégagé au moins trois vestiges (Figure 136) qui sont définis avec certitude comme étant des lames ayant subi des déformations plus ou moins avancées. Il s'agit de témoignages uniques d'autant plus rares que les dimensions importantes de ces objets ne favorisent pas leur perte durant le travail[716]. Ces ébauches sont donc précieuses dans la compréhension des toutes premières opérations du monnayage au marteau.

Dans les traités monétaires, la description des opérations de préparation des lames, est en définitive relativement peu détaillée[717]. Or, la vocation de ces sources est pourtant de proposer une description exhaustive des étapes de fabrication monétaire. De telles omissions sont compréhensibles dans la mesure où les mises en forme en question sont celles associées au travail du métal en général et qu'elles n'ont pas vocation à être différentes dans le cadre de la fabrication monétaire. Cependant, elles se devaient d'être présentées dans cette étude technique, d'autant plus qu'elles obéissent à certaines règles spécifiques à un atelier monétaire.

[716] Compte tenu de la rareté de ces objets, il n'était en revanche pas possible de proposer des prélèvements pour réaliser des observations métallographiques.
[717] cf. *supra*, p. 75.

Figure 136 - Lames découvertes dans l'atelier monétaire de La Rochelle[718].

Parallèlement à la description du *corpus* archéologique, les discussions seront également développées à partir des différentes observations relevées lors de la réalisation de reconstitutions expérimentales menées sur la plateforme paléométallurgique des Mines des Rois Francs à Melle.

A. La coulée des lames

Dans la littérature monétaire, les lames sont moulées selon deux techniques différentes : dans des lingotières monovalves ouvertes ou dans des moules en sable bivalves[719]. Bien que la méthode qui demande l'utilisation de matrices de fer soit la première décrite, elle n'a pas été remplacée par la seconde. Il apparaît même qu'elles ont été mises en œuvre simultanément[720]. Quel est dans ce cas le paramètre qui impose le choix d'une technique par rapport à l'autre ? Sur ce point l'observation du matériel de La Rochelle semble fournir peu d'informations, notamment parce que les quelques lames découvertes ont toutes subi des mises en forme, aucune n'est brute de coulée. Leurs morphologies ne présentent pas *a priori* d'indices explicites de la méthode utilisée pour leur production dans cet atelier.

Dans une telle configuration, il a été intéressant de mettre en œuvre une série d'expérimentations pour produire un référentiel ensuite confronté au matériel archéologique. Le protocole retenu est relativement simple puisqu'il a consisté à mouler différentes lames de cuivre et de différents alliages argent-cuivre selon les deux techniques possibles.

[718] Références : A. 1067-07 ; B. 30745-4a ; C. 3009-16c.
[719] cf. *supra*, p. 82.
[720] Anonyme, *Mémoire sur la fabrication..., op. cit.*, chapitres 3 et 4.

Les fontes ont été principalement réalisées dans un foyer semi enterré où les creusets contenant les métaux à fondre sont placés au milieu du charbon en combustion. Dans un tel fourneau, il faut noter que les conditions de fusion sont assez similaires à celles que permettait d'obtenir le four en trou de serrure découvert à La Rochelle[721]. Les principales différences entre ces structures tiennent principalement à leurs tailles, le four utilisé ici présentant des dimensions plus limitées. En outre, sa ventilation est assurée par des soufflets.

Dans un premier temps, les alliages ont été coulés dans une lingotière de fer suivant la description de H. Poullain dans sa relation[722]. Il s'agit d'un moule horizontal. Le volume du métal versé contrôle l'épaisseur finale de l'objet. Préalablement chauffée dans un foyer de braise[723], la matrice est placée sur une brique disposée sur base de sable afin de définir une légère pente. La coulée est ensuite réalisée du côté le plus élevé sans déplacer le creuset, le métal s'organisant dans toute la matrice grâce à la faible inclinaison (Figure 137).

Figure 137 - Coulée en lingotière.

Figure 138 - Les deux parties du moule en sable avant d'être plaquées l'une contre l'autre.

Dans un second temps, des lames constituées des mêmes alliages ont été préparées dans un moule en sable. La littérature monétaire ne donnant pas une recette explicite pour la réalisation du mélange préparé dans les fabriques de monnaies, il a été décidé, afin de limiter les variables du système, d'employer un sable de fonderie utilisé aujourd'hui dans les ateliers de bronzier[724]. Quant au protocole de préparation de la matrice, il a été mis en œuvre selon la description que donne J. Boizard dans son *Traité des monoyes...*[725]. Il s'agit d'un moule

[721] cf. *supra*, p. 136.
[722] Poullain H., Relation de Me Henry Poullain..., *op. cit.*, p. 328.
[723] Environ 300 °C.
[724] Il s'agit de sable de fonderie à l'huile Spefol, de marque Speform.
[725] Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 70.

monovalve constitué de deux parties remplies de sable tassé et dont une seule est empreinte d'une préforme parallélépipédique (Figure 138). Le métal en fusion est ensuite coulé par l'ouverture supérieure de l'ensemble formé par les deux éléments.

La mise en œuvre de ces deux reconstitutions permet de rappeler l'intérêt de placer un couvercle sur les creusets lorsque ceux-ci sont introduits dans une masse de charbon compte tenu du type de four employé. Il est apparu lors des coulées expérimentales que la présence de charbons tombés sur le bain de métal fondu gêne le versement du métal dans les moules. Il est donc indispensable de les retirer avant la coulée. Le rôle de l'opercule utilisé durant la fonte est de minimiser le nombre de fragments de combustible tombant dans le creuset.

Dans quelle mesure les résultats de ces essais renseignent-ils sur les techniques en pratique au sein de l'atelier monétaire de La Rochelle ? Dans un premier temps, ils mettent en évidence les particularités morphologiques résultant de chacun des procédés. Les lames moulées en lingotières présentent des formes aux arêtes relativement arrondies, en particulier au niveau de la surface de refroidissement avec l'air (Figure 139 : Coulée en lingotière). Ce n'est pas surprenant puisque les alliages liquides se sont solidifiés librement dans le moule. En revanche, bien que lors des différentes expérimentations, les profils les plus fins possibles aient été recherchés, il est apparu impossible de descendre en dessous d'une épaisseur limite. Celle-ci est par ailleurs relativement importante car elle mesure environ 4 mm.

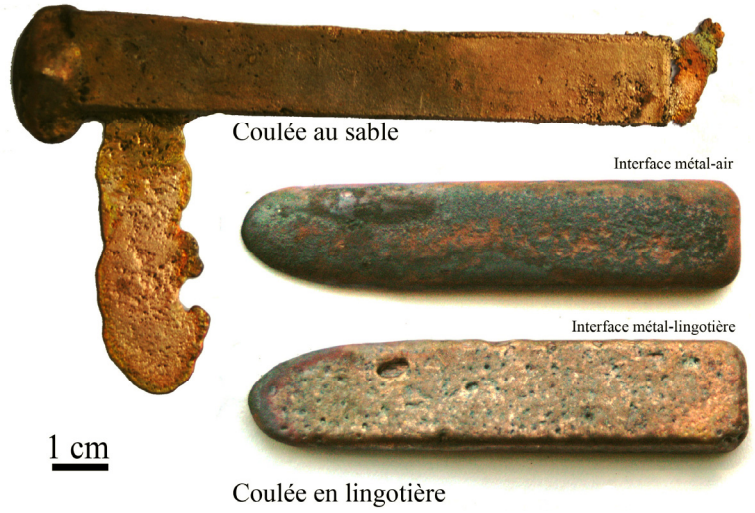


Figure 139 - Lames expérimentales (XP n° 05-01 et n° 04-01).

Quant aux lames coulées dans un moule en sable, leurs arêtes sont plus marquées grâce à l'utilisation d'un modèle (Figure 139 : Coulée au sable). Toutefois, alors que ce dernier a une forme parallélépipédique, le lingot moulé présente un profil légèrement trapézoïdal et non rectangulaire. Une telle caractéristique se comprend en considérant la préparation du moule. La forme qui sert de modèle est imprimée dans le sable une fois que celui-ci est tassé. Lorsque cette dernière est retirée pour laisser l'espace qui doit accueillir le métal, il faut veiller à ce que les bords du motif imprimé ne soient pas emportés lors de l'opération du retrait du positif. Malgré ces précautions, ils sont tout de même fragilisés et ce, d'autant plus que le modèle utilisé est fin car le matériau forme une masse moins cohérente. Ces faiblesses de la matrice de sable sont la cause de la forme biseautée des bords des lames expérimentales. En revanche, contrairement à l'utilisation d'une lingotière, le moulage en sable permet d'obtenir des profils beaucoup plus fins puisque lors des essais, il a été possible de couler des lames de 2 mm d'épaisseur. En outre cette dimension n'apparaît pas comme une limite basse comme en témoigne la finesse des coulures de métal qui résultent parfois de cette technique lorsque le contact entre les deux parties du moule n'est pas parfait (Figure 139 : Coulée au sable).

Les différences entre les lames produites par chacun des deux procédés expérimentés ne se constatent pas seulement au niveau de leurs morphologies, elles sont également révélées par une approche métallographique. L'observation de coupes préparées à partir d'échantillons « bruts de coulée » met en évidence un paramètre discriminant. Il apparaît que les phénomènes d'oxydation que subissent les lames au cours de leur moulage sont différents. Ils sont particulièrement favorisés lors d'un moulage en lingotière. Une telle remarque est d'ailleurs suggérée par l'observation d'un même alliage moulé par les deux techniques. Lors de sa solidification dans une lingotière, la surface en contact avec l'air d'une ébauche contenant du cuivre, noircit rapidement. Au contraire, ce n'est pas le cas de la face qui se trouve contre le métal du moule (Figure 139 : Coulée en lingotière). Dans le cadre d'une coulée au sable, la totalité du lingot est exempte de ce phénomène de noircissement, il n'est finalement observable que sur la masselotte qui présente une petite surface avec l'air au niveau du trou de coulée (Figure 139 : Coulée au sable). Les observations métallographiques révèlent la cause du noircissement et confirment par ailleurs les différences relevées macroscopiquement. La solidification des alliages en lingotière favorise la

formation d'oxydes[726], localisés dans les zones superficielles. Ces réactions ont lieu principalement à l'interface métal-air (Figure 140), jamais au niveau du contact métal-lingotière. De plus, le phénomène n'a pas pour seule conséquence de former une pellicule d'oxyde à la surface de l'échantillon puisque les composés néoformés sont également présents dans la couche superficielle interne de l'alliage d'environ 5 à 10 µm (Figure 140). H. De Leiris évoque le problème de la formation des oxydes lors de la solidification des alliages de cuivre dans son ouvrage *Métaux et alliages*[727]. Ce même phénomène d'oxydation est par ailleurs observé par L. Beck *et al.* dans leur étude des phénomènes de solidification d'alliages de billon[728].

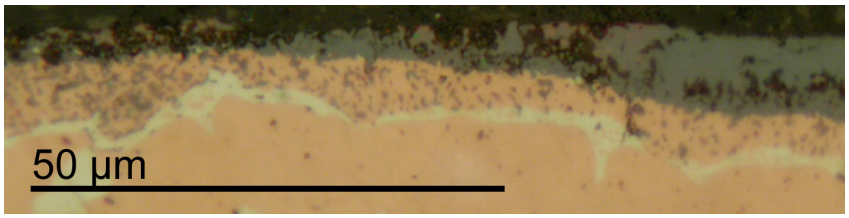


Figure 140 - Oxydes de cuivre à l'interface métal-air d'une lame lingotée (XP n° 04-01).

Si les oxydes qui forment une pellicule superficielle sont facilement brisés et éjectés lors des premiers martelages, en revanche, ceux qui se trouvent inclus dans l'alliage vont subsister plus longtemps durant les déformations. C'est pourquoi, ils peuvent être utilisés dans une discussion sur les différentes techniques de fonderie. Il n'était cependant pas envisageable de faire des prélèvements dans les lames de La Rochelle pour réaliser des observations métallographiques. En revanche, une telle approche a pu être proposée à partir du *corpus* de carreaux et de flans dans la mesure où il était plus conséquent. Néanmoins, la plupart des objets considérés présentent des structures de corrosion superficielles qui interférent avec la mise en évidence d'oxydes résultant des opérations de fonderie. De plus, les recuits nécessaires lors des multiples martelages ont aussi des conséquences sur l'oxydation superficielle des ébauches[729].

[726] Leur analyse par spectrométrie en dispersion d'énergie couplée à un microscope électronique à balayage indique la présence de composés à base de cuivre, mais également d'oxygène. Il est possible de supposer qu'il s'agit ici d'oxydes de cuivre sans toutefois être plus précis car aucune analyse de diffraction des rayons X n'a été réalisée.
[727] De Leiris H., *Métaux et alliages*, t.. 3, *op. cit.*, p. 6-7.
[728] Beck L. *et al.*, Silver surface enrichment of silver-copper alloys: a limitation for the analysis of ancient silver coins by surface techniques, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, vol. 226, n° 1-2, 2004, p. 153-162.
[729] cf. Blanchiment des flans, p. 459.

Finalement, c'est l'étude métallographique d'un carreau de billon qui apporte le plus d'informations sur les techniques de fonderie de La Rochelle. L'observation globale de sa structure révèle que la lame dans laquelle il a été découpé n'a subi que très peu de déformations. Elle peut être considérée comme brute de coulée puisque les dendrites de solution solide proeutectique de cuivre ne sont pas déformées et présentent les formes résultant de leur solidification originelle (Figure 141). A titre de comparaison, la figure 142 est une coupe du même alliage observé ici dans un flan de La Rochelle qui a donc subi de nombreuses déformations supplémentaires. Les dendrites n'ont pas conservé leurs formes initiales.

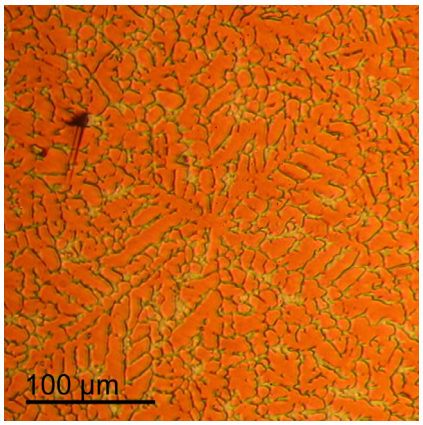


Figure 141 - Centre d'un réseau de dendrites de solution solide proeutectique de cuivre (3078-11, attaque à l'hydroxyde ammoniacal).

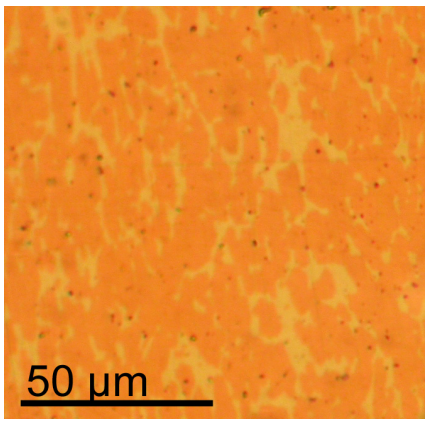


Figure 142 - Solution solide proeutectique de cuivre déformée d'un flan de billon (1020-01, sans attaque).

En considérant maintenant les zones superficielles, il apparaît que malgré quelques zones partiellement transformées lors de l'enfouissement de ce carreau, d'autres en revanche, ne présentent aucun indice d'une oxydation qui aurait pu être observée si la lame dont résulte l'échantillon en question avait été moulée dans une lingotière (Figure 143). Une telle constatation va dans le sens de l'hypothèse préalablement évoquée qui veut qu'au sein de l'atelier monétaire rochelais, ce soit la technique du moulage en sable qui ait été utilisée.

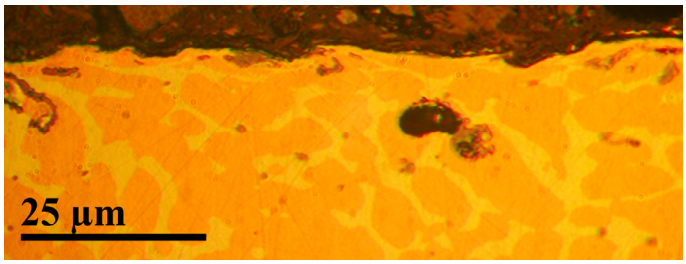


Figure 143 - Absence d'oxydes à la surface d'un carreau de La Rochelle présentant une structure très proche d'un brut de coulée (3078-11, sans attaque).

D'un autre côté, une seconde caractéristique de ce carreau suggère également la pratique du moulage en sable. En considérant maintenant son épaisseur, il apparaît qu'elle est en moyenne relativement fine puisqu'elle est comprise entre 1,9 et 2,6 mm. De plus, sa structure métallographique brute de coulée (Figure 141) indique que la lame dans laquelle il a été découpé n'a pas subi beaucoup de déformations. Elle présentait, dans ce cas, une épaisseur comparable lorsqu'elle a été coulée. Or, les expérimentations ont montré la difficulté d'obtenir des profils relativement fins dans une lingotière monovalve comparable à celles utilisées dans les ateliers monétaires. Preuve en est notamment le lingot de la figure 139 dont l'alliage n'a pas occupé tout le volume disponible du moule de fer préférant se regrouper pour former une masse plus épaisse. L'origine d'un tel phénomène se comprend en considérant que lors de la coulée, l'alliage est sous forme liquide. Il obéit dans ce cas aux lois physiques du mouillage[730]. Dans ce système le métal fondu forme une flaque dont l'épaisseur est un compromis entre la masse volumique du mélange et la tension superficielle de celui-ci sur la surface de la lingotière[731].

Lors des différents essais expérimentaux, l'utilisation d'un tel moule conjuguée avec les caractéristiques physiques des différents alliages monétaires à base de cuivre et d'argent, n'a pas permis d'obtenir des épaisseurs inférieures à 4 mm. Ce constat est en définitive lourd de conséquences sur les procédés de mise en forme du métal puisque les monnaies les plus fines dont les lames auront été moulées en lingotière demanderont un travail plus important d'amincissement. En outre, l'épaisseur du carreau qui a été attestée comme très proche de celle d'une

[730] Quéré D., *Lois du mouillage et de l'imprégnation*, n° J2140, Techniques de l'Ingénieur, 2003, 15 p.

[731] L'épaisseur e de la flaque s'exprime en fonction de la tension de surface γ du liquide sur la surface, de la masse volumique de ce liquide ρ, de l'accélération de la gravité g et de l'angle de contact θ :

$$e = 2\sqrt{\frac{\gamma}{g\rho}}\sin\frac{\theta}{2}$$

Ibidem, 5 p.

lame brute de coulée, confirme une nouvelle fois l'utilisation du moulage en sable. Elle est inférieure à la limite expérimentale pourtant déterminée à partir d'alliages semblables.

Compte tenu des précédentes observations, les lames qui constituent les ébauches initiales des différents monnayages, ont été produites par moulage en sable. La pertinence d'un tel choix peut être discutée à partir d'une critique des différents procédés décrits dans les sources monétaires.

En considérant les différentes occurrences de chacune des deux techniques dans les sources présentées plus haut[732], il apparaît que les textes qui décrivent l'utilisation du moulage en sable sont associés à un contexte de production de masse. Il s'agit en particulier des traités monétaires ainsi que *Mémoire sur la fabrication des sols de billon...*, précédemment décrit comme un compte rendu très pragmatique des opérations de fabrication monétaire[733]. D'un autre côté, l'utilisation de lingotières apparaît associée à de petites productions. C'est notamment ce procédé qui est utilisé pour mouler les quelques lames des monnayeurs lors de leur essai contradictoire avec N. Briot. De même, dans *Mémoire sur la fabrication des sols de billon...* qui présente le moulage en sable, il est fait mention du recours à une lingotière pour réaliser la coulée d'un mauvais alliage. Cet ustensile intervient alors en complément.

Finalement, ces constatations se comprennent par les avantages et les inconvénients des deux techniques. Dans un premier temps, l'emploi d'une lingotière apparaît beaucoup plus simple. La technique au sable est plus contraignante puisque chaque coulée doit être précédée de la préparation des moules, dans la mesure où ils ne peuvent être utilisés qu'une seule fois. D'un autre côté, l'utilisation de tels ustensiles est-elle compatible avec une production de masse ?

Les creusets retrouvés à La Rochelle permettent de fondre entre 1,5 et 4 litres de métal[734]. Combien de lames était-il possible d'obtenir en une seule coulée de tels volumes ? Il faut pour cela supposer la masse de métal que représente une seule ébauche. Sur ce point, celles découvertes à La Rochelle, ne donnent pas d'informations. Elles ne sont pas entières comme le prouvent leurs faciès de

[732] cf. *supra*, p. 82.
[733] Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 70.
Anonyme, *Mémoire sur la fabrication..., op. cit.*, n. p.
De Bettange M., *Traité des monoyes..., op. cit.*, t. 1, p. 7, 17, 19, 109.
Le Noir M., *L'art du monnayage*, *op. cit.*, p. 23.
[734] cf. Monnayage royal : La Rochelle (Charente-Maritime) : *Les céramiques métallurgiques*, p. 141.

découpes ou d'arrachements qui résultent des mises en forme qu'elles ont déjà subies (Figure 136). C'est pourquoi, dans cette discussion, il est nécessaire de s'appuyer sur l'une des descriptions de la relation de H. Poullain dans laquelle il rend compte des dimensions de la lingotière utilisée par les monnayeurs pour produire les lames de leurs essais[735]. Celle-ci mesure 38 cm de long pour 25 cm de large et 2,5 cm d'épaisseur[736]. La longueur des lames qui y étaient moulées, rappelle celle que décrit J. Boizard dans son traité. Selon lui les modèles utilisés pour préparer les moules de sable mesurent environ 38 cm de long, leur épaisseur ainsi que leur largeur dépendent en revanche des types monétaires fabriqués[737].

En définitive, quelle est la masse de métal qui pouvait être coulée dans la lingotière de H. Poullain ? Cette estimation aurait été plus précise si le conseiller avait également décrit les dimensions de chacune des lames produites. Sans ces informations, il a été décidé de raisonner par excès en calculant la masse de métal équivalent à une plaque coulée sur toute la surface de la lingotière, en ne conservant qu'un demi-centimètre pour chaque bord. Quant à son épaisseur, c'est la limite des 4 mm obtenue expérimentalement qui est prise en compte dans la mesure où elle pouvait être recherchée dans une volonté de minimiser les opérations de mise en forme ultérieures. Le volume correspondant à ce lingot théorique représente près de 350 cm^3 de métal. En considérant, qu'il s'agit d'un alliage monétaire composé de cuivre et d'argent, sa masse totale peut être estimée entre 3,2 et 3,7 kg[738]. Dans ce cas, lors des coulées des plus gros creusets découverts à La Rochelle, il faudra disposer d'une dizaine de lingotières[739]. Le nombre de moules indispensables aux plus grandes quantités d'alliage moulées dans l'atelier de La Rochelle apparaît relativement important sans être exceptionnel pour un atelier de cette importance. L'utilisation d'une lingotière est tout à fait compatible avec une production de masse. Pourquoi, alors que

[735] Poullain H., Relation de Me Henry Poullain..., *op. cit.*, p. 328.
[736] 15 pouces de long, 10 de large et 1 d'épaisseur.
[737] 15 pouces.
[738] Ces masses correspondent à un lingot de cuivre pur et d'argent pur, les alliages de ces deux métaux présentant des masses intermédiaires.
$\rho_{Cu\ (25°C)} = 8{,}96\ g.cm^{-3}$ $\rho_{Ag\ (25°C)} = 10{,}5\ g.cm^{-3}$
Lide D. R., ed., *CRC handbook..., op. cit.*, p. **12**-119 et **12**-120.
[739] Les plus gros creusets rendent compte d'un volume utile de 4 litres qui représente environ 32 kg de cuivre ou 37 kg d'argent.
Ce nombre est une estimation minimale puisqu'il s'agit d'un raisonnement à l'excès, la lingotière considérée accueille en définitive moins de métal.
D'un autre côté, ce nombre peut être également diminué en admettant que les lames peuvent commencer à se solidifier durant la coulée permettant ainsi la réutilisation successive des moules. Toutefois cette gestion apparaît hasardeuse dans la mesure où elle doit être réalisée rapidement et qu'elle sous-entend la manipulation d'objets à haute température.

l'utilisation de matrices de fer dispense de la préparation contraignante des moules en sable, cette technique n'est-elle pas préférée à la seconde ?

Pour répondre à cette question, il faut considérer les étapes de mise en forme que doivent subir les lames une fois produites. En fait, la mise en forme d'ébauches initialement très épaisses multiplie d'autant le nombre des phases de martelage et de recuits nécessaires pour amincir les ébauches jusqu'à approcher la finesse des monnaies fabriquées. Or, ce n'est qu'en utilisant des moules bivalves tels que ceux en faits en sable qu'il est possible d'obtenir les plus faibles épaisseurs. De plus, lors d'un moulage en lingotière ouverte, il est finalement difficile de contrôler l'épaisseur de la lame produite car elle dépend de la quantité de métal versée. Ce qui n'est pas le cas dans un moule en sable. D'un point de vue de la mise en forme des lames, il est préférable qu'elles aient initialement toutes la même épaisseur. Cette caractéristique est particulièrement importante dans la mesure où les recuits sont réalisés à partir de lots d'ébauches. Si elles ont des dimensions différentes, elles ne seront pas recuites toutes de la même manière, les plus épaisses risquant d'être encore écrouies. Enfin, le recours au procédé de moulage en sable permet également d'adapter les dimensions des lames produites suivant les types monétaires. C'est notamment J. Boizard qui souligne l'importance d'obtenir des lingots initiaux dont les largueurs et épaisseurs approchent celles des monnaies fabriquées. Il est possible de posséder une collection de modèles de lames pour produire les moules en sable. De même, si une nouvelle forme de référence est nécessaire, il est envisageable de la préparer au sein de l'atelier monétaire. En revanche, il est moins probable de disposer d'une gamme de lingotières offrant la même liberté dans le choix des tailles de lames produites. Dans ce cas, les ouvriers disposant de lames dont les dimensions correspondent peu au type monétaire fabriqué, sont obligés de les adapter par leurs mises en forme.

Finalement, la technique du moulage en sable, dont il est maintenant attesté qu'elle se pratiquait dans le second atelier monétaire de La Rochelle, est dans une production de masse, préférable à l'utilisation de lingotière ouverte. Car bien que cette dernière permette d'éviter la fabrication des matrices de sable qui ne peuvent être utilisées qu'une seule fois, leur temps de préparation est rapidement compensé lors des étapes ultérieures de travail des lames. Considérée individuellement, une opération gagnée sur la chaîne de mise en forme représente un gain de temps multiplié par le nombre des ébauches.

B. La mise en forme des lames

Une fois les lames moulées, elles subissent une phase de martelage pour les amincir jusqu'à approcher l'épaisseur des monnaies fabriquées[740]. L'une des problématiques principales qui doit être discutée ici, est de comprendre la nécessité de recourir à une telle préparation des ébauches initiales. La technique du moulage en sable permet d'obtenir des profils *a priori* très fins. Toutefois, avant de considérer cette question, il est indispensable de décrire les différents gestes et opérations à mettre en œuvre au cours du travail des lames au marteau. Dans la mesure où il existe encore un certain savoir-faire du travail des métaux qu'il est donc inutile de redécouvrir, les informations présentées ici ont été relevées au cours de plusieurs expérimentations qui se sont déroulées sous le contrôle et les conseils d'un forgeron-dinandier[741].

Ebarbage et brossage des lames

Contrairement à ceux moulés en lingotière, les lingots produits par moulage en sable doivent être préalablement préparés avant de subir leurs premiers martelages. Il s'agit de deux opérations simples qui consistent d'abord à brosser les lames afin d'enlever les grains de quartz qui ont pu rester collés à leur surface. Elles sont ensuite ébarbées ou esserpées pour éliminer les défauts résultant des fuites de métal en fusion aux jointures des deux parties du moule qui ne peuvent être parfaites. Ce sont d'ailleurs ces barbes ou bavures de joint qui sont observables sur l'une des lames produites expérimentalement (Figure 139 : Coulée au sable).

Finalement, il faut également empêcher que les irrégularités qui résultent du moulage, ne soient les prémisses de futures fissures lors des martelages. Il est dans ce cas nécessaire d'éliminer ces aspérités en limant partiellement la surface pour la rendre uniforme.

Martelages et recuits

Dans le *corpus* provenant de l'atelier monétaire de La Rochelle, les empreintes de martelage sont presque exclusivement observables sur deux des lames précédemment présentées. L'une témoigne de stigmates très profonds et bien marqués (Figure 136 B), alors qu'ils sont beaucoup plus effacés sur une seconde (Figure 136 A). Pour cette dernière, ils sont d'ailleurs plus facilement observables

[740] cf. *supra*, p. 85.

[741] Il s'agit d'A. Ervas forgeron-dinandier italien qui travaille avec des paléométallurgistes sur des problématiques de mises en forme d'alliages cuivreux. C'est dans le cadre d'études auxquelles il participe qu'il est parfois amené à travailler sur la plateforme paléométallurgique des Mines des Rois Francs à Melle.

à partir d'un moulage qui permet de faire abstraction des colorations de la surface (Figure 144).

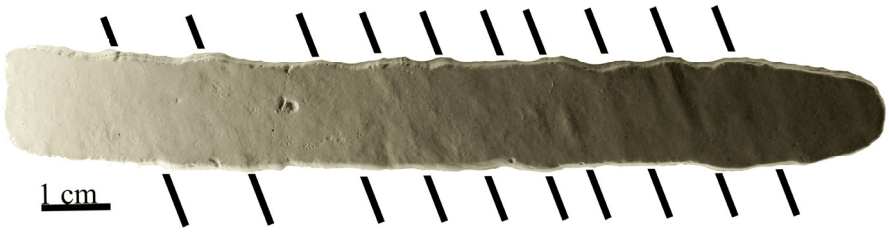


Figure 144 - Moulage mettant en évidence les marques de martelage sur une des lames découvertes dans l'atelier de La Rochelle (1067-07).

Même si les carreaux et les flans subissent également des martelages durant leur mise en forme, c'est tout de même sur les lames qu'il est plus probable de relever des traces laissées par le marteau. Une telle affirmation se comprend d'abord par les différents taux de déformations nécessaires aux étapes de fabrication. Alors qu'ils sont relativement importants sur les lames pour obtenir un amincissement du métal (Figure 136 B), ils sont plus faibles pour les carreaux. Les modelages ont dans ce cas pour but essentiel de leur donner une forme arrondie de flan. En outre, d'un point de vue technique, il est plus simple de marteler un objet de grande dimension plutôt que plusieurs petites ébauches individuellement. De par leur taille, les lames peuvent être tenues par l'ouvrier pendant qu'il les martèle. C'est ainsi qu'il est possible de guider la mise en forme des alliages.

Les expérimentations de mise en forme de lames rendent compte qu'il s'agit d'une opération qui demande la maîtrise de plusieurs savoir-faire. Le premier est celui qui permet de déformer le métal dans une direction donnée puisque l'amincissement recherché des lingots est compensé par leur élongation voire leur élargissement. Or, ces deux seules alternatives dans le monnayage médiéval supposent différentes méthodes de travail. Le second prérequis est impliqué par les déformations plastiques résultant du martelage. Il s'agit de la maîtrise des opérations de recuits dont font également état les sources monétaires consultées. Pour comprendre les savoir-faire mis en œuvre, il suffit dans une présentation préliminaire de considérer les transformations qui se distribuent au sein d'un alliage durant son martelage.

La mise en forme d'un alliage par martelage se traduit par une déformation plastique du matériau. Celle-ci correspond à un cisaillement du réseau d'atomes qui constitue les métaux entraînant le glissement des plans cristallins. Ce déplacement structural n'est pas instantané car il demanderait une énergie trop

importante. Il est finalement rendu possible par la formation de défauts internes appelés dislocations qui correspondent à des zones de glissement très localisées, se déplaçant progressivement dans le réseau en propageant la déformation. Dans ce cas, plus un métal est martelé donc déformé plastiquement, plus il présente de dislocations dans sa structure interne. Cependant, la multiplication de ces défauts dans le métal a pour conséquence le durcissement de ce dernier, défini sous le terme d'écrouissage. Lors de la rencontre et la jonction de deux dislocations celles-ci peuvent suivant leur type, soit s'annihiler, soit se repousser. Cette dernière configuration gêne le déplacement de ces défauts dont résultent les déformations. Par ailleurs plus les dislocations sont nombreuses, plus il est probable qu'elles interagissent diminuant d'autant la possibilité de déformer un matériau. Si la matière est par trop écrouie, il existe une limite de mise en forme au-dessus de laquelle une déformation plastique supplémentaire se traduira par une rupture de la structure signalée par l'apparition de fissures.

Avant d'atteindre cette altération irréversible du matériau, il est tout de même possible de diminuer son taux d'écrouissage afin de poursuivre sa déformation plastique par martelage. Il suffit de mettre en place un recuit. L'ébauche écrouie est portée à haute température afin de permettre et d'accélérer les phénomènes de recristallisation de la structure interne de l'alliage. Cette réorganisation a pour conséquence la diminution du nombre de dislocations. La durée nécessaire à cette opération de relâchement des contraintes de la matière dépend notamment de la température du recuit, du type de matériau considéré mais également du taux d'écrouissage de ce dernier avant qu'il ne soit chauffé. Finalement, plus la température de recuit est élevée, plus la recristallisation sera rapide. Cependant, dans certains cas, elle ne doit pas être non plus trop importante car cela peut conduire au « brûlage » de l'alliage. Un objet composé d'un alliage présentant une phase eutectique[742] garde sa forme lorsqu'il est recuit à des températures supérieures à celle du palier eutectique. Mais, lors d'une surchauffe, la phase eutectique fond. La cohésion interne du matériau est rompue sans qu'il ne soit possible d'observer de changement externe. En revanche, l'alliage se rompt facilement lors de nouvelles déformation.

Finalement, l'opération de recuit dépend du type d'alliage travaillé ainsi que de son taux initial d'écrouissage. C'est pour cela que la littérature n'en fait pas une description précise. Elle repose avant tout sur le savoir-faire de l'ouvrier et sur son approche correcte du matériau.

[742] Phase qui compose une partie de l'alliage et dont la température de fusion qui définit le palier eutectique est plus faible que celle de l'alliage.

Une mise en forme par martelage s'organise selon un cycle de déformations plastiques suivies d'un traitement de recuit qui permet de poursuivre les martelages. Dans cette séquence d'opérations il est important de respecter certaines limites. Elles concernent notamment le taux de déformation accessible sans que le matériau ne se fissure ou la température qu'il ne faut pas dépasser pour ne pas dégrader sa structure. Ces paramètres apparaissent à première vue relativement abstraits mais le métallurgiste dispose d'un certain nombre d'indices qui vont l'aider à se placer correctement dans la chaîne de mise en forme.

En fonction des données physiques qui viennent d'être évoquées, une description de la phase de préparation des lames peut être engagée. Car la capacité de l'ouvrier à déformer son métal dans une direction choisie se comprend par les transformations structurales qui résultent du martelage d'un alliage.

Lors de l'amincissement d'une lame, le principe général consiste à profiter de son écrouissage résultant de sa mise en forme. Lorsqu'il travaille sa pièce sur l'enclume, l'artisan va toujours veiller à déformer progressivement son objet, du côté écroui vers la zone non écrouie. Lorsque le métal est pincé entre le marteau et l'enclume lors de la frappe, il se déforme plastiquement. Or, deux directions permettent cette déformation. Cependant, un des côtés étant déjà durci par l'écrouissage, la matière se déplace vers la zone la plus plastique. Partant de cette constatation, il est possible de guider sa déformation puisque sa direction est définie par la perpendiculaire à l'axe de pincement du métal, quant au sens de déformation, il suit le matériau non écroui (Figure 145).

Figure 145 - Martelage sur l'arête de l'enclume.

Figure 146 - Elargissement d'une lame avec l'arête d'un marteau.

Pour obtenir un écrasement localisé du métal, il existe deux principales techniques. La première consiste à pincer la lame sur une arête de l'enclume avec un marteau (Figure 145). La seconde met en place une configuration opposée puisque le lingot est ici frappé sur l'enclume avec l'arête du marteau (Figure 146) ou la panne de ce dernier. C'est d'ailleurs cette technique qui a été utilisée pour déformer l'une des lames de La Rochelle puisque les marques qu'elle présente sont particulièrement profondes et peu larges (Figure 136 B).

L'ouvrier travaillant ses lames peut finalement choisir de les amincir en leur donnant de la longueur, en écrasant le métal suivant un axe perpendiculaire à l'axe des lingots (Figure 145). Comme il peut décider de les élargir en martelant cette fois dans une direction parallèle à la longueur des lames (Figure 146). Néanmoins, ce choix est normalement exceptionnel puisque les sources monétaires décrivent la préparation des lames comme un simple allongement. D'ailleurs, ces dernières sont censées avoir été moulées selon une largeur proche de celle des monnaies fabriquées, ce qui évite la nécessité d'un élargissement. L'observation des traces de martelage sur les ébauches de La Rochelle confirme notamment cette constatation puisque leur orientation indique qu'elles avaient une simple finalité d'allongement (Figure 136 B et Figure 144). Elles présentent cependant un angle restreint avec la direction perpendiculaire à l'axe des lames qui garantit l'allongement maximum. Ce décalage résulte de l'encombrement de la main qui tient l'ébauche lors du martelage et qui justifie ce compromis. Cette configuration est particulièrement visible sur la figure 145.

Il faut noter que cette technique de mise en forme, si elle est exécutée correctement conserve la forme générale de la lame, héritée de son moulage. Dans ce cas, avant sa découpe en carreau, celle-ci n'a pas besoin d'être préalablement rognée pour retrouver des côtés rectilignes. Il en résulte une économie de matière, de combustible et de travail. Le premier principe qui permet une telle préservation de la morphologie des ébauches, consiste à ce que l'écrasement du métal par le marteau soit uniforme sur toute la zone de frappe. Si tel n'est pas le cas, la matière plus étalée localement entraînera la courbure de la forme métallique (Figure 147). De même, lors d'une même phase d'élongation ou d'élargissement, il est indispensable que les axes d'écrasement du métal soient parallèles pour que la direction générale de déformation soit globalement la même. C'est d'ailleurs ce qui est observable sur les ébauches de La Rochelle (Figure 136 A et B et Figure 144).

Figure 147 - Lame courbée par des martelages non homogènes (n° 05-02).

La démarche à retenir suppose en définitive, une normalisation du martelage. C'est pourquoi, il est préférable que le marteau ne soit pas déplacé le long de la lame à déformer mais au contraire que cette dernière soit décalée progressivement sous la zone de frappe. L'ouvrier doit marteler toujours au même endroit et avec la même force. Il peut, à cette fin, choisir d'élever toujours son outil à une hauteur fixe. A titre d'exemple, notre dinandier recommandait lors des expérimentations de lever le marteau au niveau de la tête avant chaque frappe. C'est cette standardisation du geste qui améliore le travail de déformation.

Lors d'une phase de martelage des lames, il est parfois envisageable suivant le niveau de déformation obtenu et la vitesse d'écrouissage de la pièce, de mettre en place plusieurs passes de mise en forme. C'est-à-dire que l'objet peut, après avoir été une première fois martelé sur toute sa surface, l'être une seconde fois. Dans ce cas quels sont les paramètres qui permettent à l'ouvrier de savoir quand il doit recuire sa lame avant que celle-ci ne se fissure ou ne se brise à cause d'un écrouissage trop important ? En préliminaire, il faut admettre que l'expérience de l'ouvrier participe de façon importante à une telle décision. Elle s'appuie sur plusieurs indices dont certains ont pu être constatés grâce à la mise en œuvre des expérimentations ainsi que par les échanges avec les artisans métallurgistes.

La normalisation dont l'importance a été évoquée, permet par exemple à l'artisan d'évaluer le changement structural du métal qu'il est en train de travailler. Car s'il frappe toujours avec la même énergie sur la matière qui d'un autre côté durcit progressivement, il peut constater des variations dans l'amplitude des déformations. Un second paramètre consiste également à écouter sonner le métal martelé. Une pièce qui vient de subir un recuit qui a éliminé toutes ses contraintes internes produit un son clair et long, alors que celle-ci une fois de nouveau martelée et écrouie produit un son court, métallique. Il est évidemment impossible d'affirmer que les monétaires de l'atelier rochelais ont utilisé les même indices pour décider de leurs recuits. Finalement, le pragmatisme des repères considérés explique que ces derniers n'aient pas été décrits dans les traités monétaires. Il est plus facile de les appréhender à partir du travail de la matière. C'est pourquoi, il

est certain qu'à force de mises en forme répétées, les ouvriers monnayeurs ont su développer leurs propres références, éventuellement identiques à celles préalablement présentées.

D'un autre côté, il faut reconnaitre que des fissures peuvent tout de même apparaître dans une lame lorsqu'elle est martelée. C'est d'ailleurs ce qu'illustrent deux des ébauches découvertes (Figure 136 A et B) ainsi que certains déchets de coupe (Figure 148). Malgré les savoir-faire dont dispose un ouvrier, les références qu'il aura retenues reposent tout de même sur certains paramètres plus ou moins reproductibles. En outre, la matière travaillée présente parfois des imperfections favorisant sa fissuration prématurée.

Bien qu'une fissuration soit un phénomène irréversible, certaines techniques permettent de diminuer les possibilités qu'elle ne se propage et entraîne la rupture définitive du matériau. Il faut pour cela utiliser une lime pour élargir la zone de fissuration et, si possible, éliminer complètement le défaut. Il est toutefois difficile d'attester de la réussite de cette opération dans la mesure où les fissures peuvent être de dimension très limitée et difficilement visibles. En revanche, bien que leur élargissement apparaisse préjudiciable pour l'intégrité de la lame, il diminue justement la concentration des contraintes au niveau du défaut, diminuant les risques de propagation de la fracture. Une telle méthode n'a jamais été décrite dans les textes monétaires consultés, il s'agit néanmoins d'une technique utilisée dans la mise en forme des métaux[743].

Figure 148 - Déchets de coupe retrouvés à La Rochelle et présentant des fissurations avec grossissement d'un détail (3009-16).

[743] C'est notamment A. Ervas qui a conseillé une telle démarche lors des expérimentations. Lu J., *Concentration de contraintes*, n° BM5040, Techniques de l'Ingénieur, 1998, 24 p.

L'un des déchets de coupe découvert à La Rochelle présente au niveau de plusieurs fissures, des faciès relativement similaires à ceux résultant d'un élargissement à l'aide d'une lime (Figure 148). La prudence s'impose car les traitements de restauration par abrasion mis en œuvre sur cet objet peuvent également avoir produit de telles marques.

Autre aspect essentiel dans la mise en forme des lames, le recuit nécessite aussi un réel savoir-faire. Il s'agit ici de porter à haute température les pièces de métal écrouies suite à leur déformation afin de permettre une recristallisation de leur structure interne. Les défauts qui entraînent un durcissement de la matière sont finalement éliminés autorisant dans ce cas de nouveaux martelages.

Pour les principaux alliages monétaires mis en évidence dans le *corpus* de La Rochelle, il existe différentes températures qui favorisent un relâchement rapide des contraintes internes sans toutefois dégrader l'intégrité du matériau par un brûlage de l'alliage. Néanmoins, il suffit de considérer le diagramme de phase cuivre-argent pour constater que tous les alliages monnayés ne sont pas sujets à ce phénomène particulier puisqu'il ne concerne que ceux présentant une phase eutectique. Il est dans ce cas limité aux alliages de billon dont le titre en métal précieux dépasse 8,8 % massiques, ainsi qu'aux argents titrant moins de 92 %[744]. Dans ce cas, le recuit de lames dont la composition est comprise dans cet intervalle ne doit pas être mis en œuvre au-delà du palier de 779,1 °C[745], correspondant à la température de fusion de la phase eutectique. Pour les autres, le dépassement de cette température n'aura *a priori* pas de conséquence irréversible sur la structure de l'objet. Un chauffage excessif débutera éventuellement la fusion du matériau mais il n'est pas préjudiciable pour les futurs martelages.

D'un autre côté, les descriptions données des recuits par les différentes sources monétaires sont particulièrement succinctes, bien que le problème de « brûlage » des lames soit connu par ses conséquences[746]. Les procédures décrites pour réaliser ce traitement thermique indispensable, permettent d'éviter que les lames ne se dégradent. Les ébauches sont censées être recuites en lots dans un fourneau approprié, dont le chauffage par un feu de bois ne peut les soumettre à des températures très élevées[747]. De telles conditions de chauffe préviennent les risques de brûlage des lames ; néanmoins, les temps nécessaires à l'élimination de

[744] Il s'agit toutefois ici de références théoriques car dans le cadre du monnayage médiéval, il a été vu précédemment que les alliages cuivre-argent analysés présentent toujours d'autres éléments qui constituent des impuretés. La présence de ces derniers peut faiblement modifier le comportement thermodynamique de l'alliage.
[745] La présence d'impuretés dans l'alliage peut également faire varier légèrement cette température.
[746] Anonyme, *Mémoire sur la fabrication..., op. cit.*, n. p.
[747] cf. *supra*, p. 86.

toutes les contraintes du métal se voient augmentés. Cependant, la durée des recuits n'apparaît pas comme un paramètre critique, au contraire, les lames sont laissées à recuire jusqu'à extinction et refroidissement du feu et des braises. Une telle démarche se comprend puisque les ébauches sont traitées par lot et non individuellement. Le procédé retenu permet à l'ouvrier de mettre en forme un autre lot de lames pendant qu'il laisse recuire un premier sans grande surveillance puisque les températures de traitement ne dégradent pas ses ébauches. En définitive, une telle organisation est possible dans la mesure où il s'agit ici d'une production de masse qui favorise cette organisation du travail.

Dans une procédure au cours de laquelle les lames sont chauffées par lot, il est important qu'elles aient des épaisseurs similaires afin qu'elles soient traitées de manière uniforme. Cette observation rappelle l'intérêt du moulage en sable par rapport à l'utilisation d'une lingotière, cette dernière ne favorisant pas l'obtention de profils reproductibles.

Enfin, bien que le traitement thermique de lames semble faire l'objet de peu d'attention durant sa réalisation, l'ouvrier récupérant ses lames recuites peut facilement constater l'efficacité de l'opération mise en œuvre. D'un point de vue pratique, il va évidemment évaluer le comportement de son matériau lors de son martelage, mais il aura pu au préalable constater que l'alliage n'est plus écroui avec un test simple. En courbant légèrement son ébauche, si celle-ci présente encore des contraintes internes, elle aura tendance à ne pas se déformer alors que si elle est correctement recuite, elle sera très plastique.

L'amincissement des lames par les monétaires comprend finalement une séquence alternée de martelages et de recuits jusqu'à atteindre l'épaisseur recherchée. Cependant, il est parfois indispensable au cours de cette mise en forme, de fragmenter les lingots initiaux, dans la mesure où leur déformation a pour principale conséquence leur allongement. Trop important, il peut gêner le travail du métal à cause de l'encombrement qui en résulte.

Enfin, dans la mesure où la technique de frappe utilisée pour amincir les lames ne favorise pas l'obtention d'une surface parfaitement lisse, il est également nécessaire de rectifier ces défauts. Il suffit pour cela de marteler les ébauches entre le plat de l'enclume et la large panne du marteau afin ici d'écraser toutes les aspérités superficielles. C'est notamment ce qui justifie que les traces de martelage sont difficilement visibles sur l'une des lames de La Rochelle et invisibles sur une seconde (Figure 136 A et C et Figure 144).

Un dernier point qu'il faut évoquer ici, est suggéré par l'une des lames découvertes à La Rochelle (Figure 136 C), par certains déchets de coupe (Figure 148) ainsi que par la morphologie de plusieurs carreaux (Figure 149 et Figure 150). Ces derniers sont associés notamment à un monnayage de cuivre. D'autres sont à rapprocher de frappes de billon mais leur mise en forme plus avancée réclame la prudence pour soutenir une comparaison avec leur morphologie.

L'observation de certains carreaux très peu travaillés révèle quatre bords de coupe très nets (Figure 149). Les sources monétaires décrivent la découpe des carreaux dans des lames de largeur équivalente au type monétaire fabriqué (Figure 136 A : découpe de lame). Dans ce cas, l'observation de quatre bords de découpe résulte de la rectification des bords de lame déformés lors des mises en forme. Or, certains carreaux du même contexte n'ont pas subi de tels redressements (Figure 150). De plus, une telle pratique est peu économique d'un point de vue du métal utilisé et par ailleurs inutile si le martelage est correctement réalisé puisqu'il conserve la forme initiale obtenue lors du moulage.

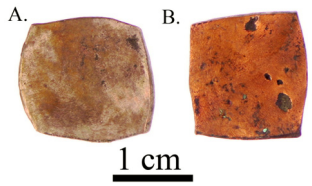


Figure 149 - Carreaux de La Rochelle présentant quatre bords de découpe, monnayages de billon et de cuivre[748].

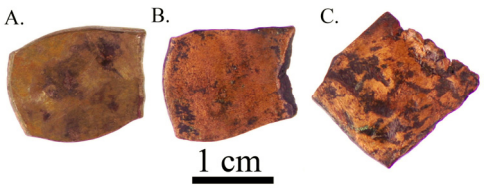


Figure 150 - Carreaux de La Rochelle présentant encore des bords de lame, monnayages de billon de cuivre[749]

En admettant maintenant que les lames puissent être élargies pour former une plaque dont la largeur permet de découper plusieurs carreaux, les précédentes observations sont dans ce cas justifiées. La découpe de cette ébauche produit les différentes morphologies observées (Figure 136 B : découpe de plaque). Les carreaux de la périphérie présentent des bords de lame, alors que ceux du centre de la plaque ont leurs quatre côtés cisaillés. Dans ce cas, les déchets de coupe retrouvés correspondent à des bouts de lame qui ne sont pas assez larges pour être découpés en carreaux supplémentaires.

[748] Références : A. 1084-02-01 (billon), B. 3009-13-06-06.
[749] Références : A. 1088-02-02 (billon), B. 3009-13-07-07, C. 3009-13-05-01.

Figure 151 - Carreau du monnayage d'argent présentant deux bords de lame opposés (1021-12).

Figure 152 - Carreau du monnayage de cuivre présentant deux bords de lame opposés (1021-19).

Cette hypothèse n'est cependant pas la méthode décrite dans les textes monétaires. En outre, d'autres échantillons du *corpus* présentent des morphologies résultant de la technique réglementaire. Il s'agit de carreaux appartenant au monnayage d'argent (Figure 151) mais également de cuivre (Figure 152) dont les bords de lame opposés indiquent qu'ils n'ont pas été découpés dans des plaques.

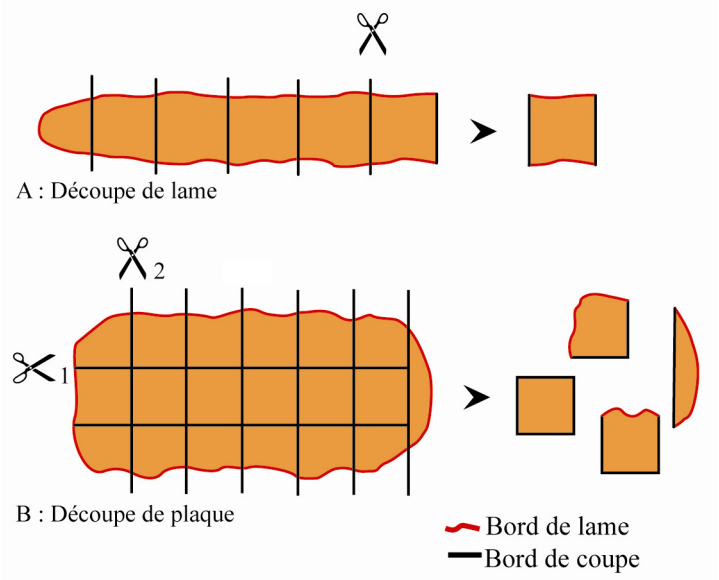


Figure 153 - Différentes découpes.

Finalement, il apparaît dans cet atelier que les carreaux ont été produits à la fois par la découpe de lames (Figure 153 A), mais également par celle de plaques (Figure 153 B). Si la chaîne B est limitée à la découpe de faibles épaisseurs puisque celles des échantillons qui en présentent les profils n'excédent pas 2 mm[750], ce n'est en revanche pas le cas de la chaîne A qui a permis de produire des carreaux d'argent très épais[751]. Finalement, l'épaisseur plus importante est un

[750] Elles ne dépassent pas 2 mm.
[751] 2,7 mm d'épaisseur pour le carreau de la figure 151 et jusqu'à 3,3 mm pour le 1045-01.

paramètre compréhensible pour justifier la découpe de lame. Il est en effet difficile de découper proprement à la cisaille une plaque trop épaisse. Cependant, ce paramètre morphologique est suffisant mais pas nécessaire puisque des ébauches du monnayage de cuivre d'épaisseurs comparables à celles cisaillées dans des plaques ont aussi été préparées selon la chaîne A[752]. De même, la composition n'apparaît pas être une raison pour décider de l'utilisation de l'une ou l'autre des méthodes. D'un point de vue stratigraphique, le rassemblement dans certains contextes d'échantillons associés à chacune des techniques[753] pourrait suggérer qu'elles correspondent à des pratiques de l'atelier durant des périodes précises. Toutefois, le nombre d'objets dont les mises en forme sont assez limitées pour être certain de la morphologie du lingot dans lesquels ils ont été découpés, est trop restreint pour donner assez de poids à cette hypothèse.

Parallèlement à ces constatations, le cas du monnayage de bas billon est particulier. L'observation des seuls trois carreaux bruts de découpe découverts, révèle qu'ils présentent trois bords de découpe ainsi qu'un bord de lame (Figure 154). Ils devraient dans ce cas être rapprochés du cisaillage d'une plaque. Cependant, la prise en compte de l'une des lames découvertes permet d'éclairer cette configuration.

Figure 154 - Carreaux de bas billon bruts de découpe[754].

Après avoir été analysée par spectroscopie en dispersion d'énergie couplée à un microscope électronique à balayage[755], il est apparu que la lame A (Figure 136) est constituée d'un alliage de cuivre contenant près de 10,5 % massique d'argent. Elle devait donc être associée au monnayage de bas billon. Elle est en outre en

[752] L'épaisseur du carreau présenté sur la figure 152 est de 1,5 mm.
[753] L'unité stratigraphique 1021 rassemble par exemple des faciès de découpe de lame, alors que l'utilisation de plaque est particulièrement illustrée à partir des vestiges du contexte 3009.
[754] Références : 1067-08-22 ; 1067-08-40 ; 3078-13.
[755] Cet échantillon présente des dimensions trop importantes pour être analysé par ANRC. Les résultats des analyses répertoriés en Annexe K sont une moyenne de cinq dosages d'une minute réalisés sur des surfaces d'1 mm² décapées lors de la restauration, réparties globalement sur l'objet.

liaison stratigraphique avec une partie de ce *corpus* typologique[756]. Compte tenu de la largeur moyenne de 1,5 cm de cette dernière, il apparaît qu'elle devait aboutir à la découpe de deux carreaux présentant des dimensions comparables à ceux de la figure 154. En revanche, la lame est en cours de mise en forme puisque son épaisseur moyenne de 2 mm est près de deux fois supérieure à celle des carreaux finis. Elle aurait dû être de nouveau allongée par martelage afin d'être amincie.

L'observation des marques résultant de la découpe des carreaux permet maintenant de supposer la séquence du processus de cisaillage. Lors du cisaillage d'un objet métallique, il peut résulter un gauchissement de ce dernier s'il n'est pas assez rigide. D'un autre côté, la déformation engendrée se répartit selon toute la longueur de coupe. En considérant les carreaux de la figure 154, il apparaît que c'est la découpe parallèle aux bords de la lame qui a le plus altéré la planéité de ces ébauches. Dans ce cas, la lame devait être dans un premier temps coupée selon sa largeur en fragments de métal équivalents à deux carreaux. La rigidité de la lame plus massive empêche le métal de trop se déformer. Les fragments obtenus étaient ensuite coupés en deux selon la direction correspondant à la longueur initiale de la lame (Figure 155). La courbure plus importante du profil de coupe est justifiée par la dimension des objets cisaillés dans cette séquence. La tenue mécanique d'un petit fragment est moins grande que celle de la lame.

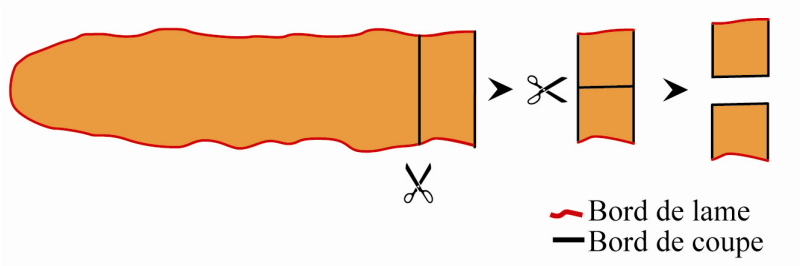


Figure 155 - Séquence de découpe d'une lame de bas billon.

Finalement, le monnayage de bas billon définit une chaîne opératoire propre pour sa production de carreaux. Elle est différente des deux autres processus par ailleurs mises en évidence dans le *corpus* global. Toutefois, la justification de cette méthode se comprend par la taille très restreinte des carreaux produits. Les stigmates de mise en forme observables sur la lame (Figure 144) montrent qu'une seule passe de martelage permet de préparer deux lames en même temps. Il est simple et donc plus économique en temps de mise en forme mais également de moulage, de travailler avec ces lames deux fois plus larges qu'elles ne devraient être.

[756] Il s'agit de l'unité stratigraphique 1067 qui a révélé la lame A (1067-07) ainsi qu'une collection de carreaux et de flans associés au monnayage de bas billon (1067-08).

En conclusion, si elle est mise en œuvre selon certaines règles précises, la mise en forme des lames est une opération relativement simple du monnayage. Les déformations recherchées qui ne consistent qu'à allonger voire élargir les ébauches reposent sur la seule maîtrise de l'écrouissage du métal. Quant au recuit qui peut avoir des conséquences dommageables et irréversibles pour certains alliages monétaires, notamment s'ils sont trop chauffés, c'est le procédé retenu dans les ateliers monétaires qui prévient ces risques. La perte de temps qui résulte des températures de recuit peu élevée est compensée par la fabrication de masse qui favorise un séquençage temporel important des opérations.

Il est maintenant possible de répondre à la question concernant la réelle nécessité de ces opérations de mise en forme puisqu'il a été vu précédemment que le moulage en sable des lames permet d'obtenir des faciès relativement fins. Il est finalement avantageux de mettre en place simultanément ces deux techniques. Dans la mesure où le martelage des lames est une mise en forme simple, elle dispense de la préparation d'un nombre trop important de moules en sable. Car pour une quantité de métal équivalente, plus les lames sont fines, plus le nombre de moules est élevé. Dans ce cas, le temps nécessaire à leur martelage se voit compensé par l'économie réalisée sur les préparations de fonderie. L'épaisseur des lames moulées définit finalement un compromis entre les deux opérations. L'apport du martelage sur les opérations de fonderie est par ailleurs confirmé par le travail associé au monnayage de bas billon. Les dimensions restreintes des ébauches produites permettent de diminuer le nombre de moulages de lames en produisant des lingots deux fois plus larges.

L'épaisseur limite qui est recherchée entre le moulage et la mise en forme est normalement proportionnelle à celle que doivent ultérieurement présenter les carreaux par la suite produits. Pour déterminer ce paramètre de réglage, il est en définitive nécessaire de connaître le taux de déformation que subissent les lames durant leur amincissement. Cependant, s'il est possible de connaître l'épaisseur finale des ébauches à partir de celle mesurée sur les carreaux du *corpus* qui n'ont pas encore été trop déformés, il est en revanche ici difficile de connaître la dimension initiale. Bien que leurs épaisseurs encore trop importantes et variables témoignent qu'elles doivent encore être amincies (Figure 156), elles possèdent également des stigmates qui trahissent leur mise en forme déjà avancée. La seule donnée disponible a été déduite de l'étude métallographique d'un carreau qui a montré que la lame dans laquelle il a été découpé, présentait un taux de déformation presque nul. Il s'agit d'un cas particulier puisque c'est finalement lors des étapes ultérieures de sa mise en forme que le carré de métal, épais en moyenne de 2,4 mm, aurait été aminci. C'est notamment ce que prouve la considération

d'un flan[757] qui ne mesure que 1,5 mm d'épaisseur et dont la composition et la masse sont à rapprocher de celles du carreau.

Finalement, la lame de bas billon (Figure 136 A) est particulièrement significative dans cette discussion. Dans la mesure où elle a déjà été martelée, son épaisseur moyenne de 2 mm comparée à celle d'1 mm des trois carreaux qui lui sont associés, permet de supposer que son taux de déformation final aurait été supérieur à 50 %. Malgré la statistique restreinte du nombre de lames retrouvées, il apparaît finalement qu'elles subissent globalement des mises en forme après avoir été moulées puisqu'elles en présentent les stigmates et qu'elles sont en moyenne plus épaisses que les carreaux du *corpus* (Figure 156).

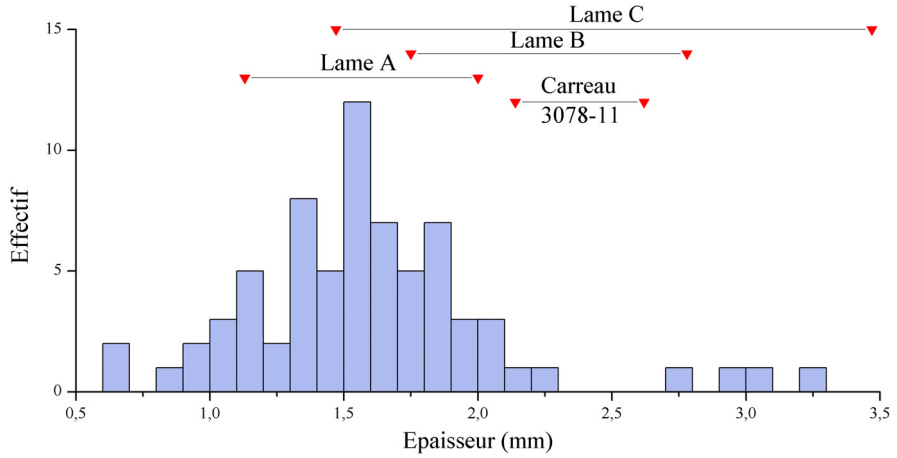


Figure 156 - Répartition de l'épaisseur des carreaux et mise en évidence de celles des lames.

Enfin, il sera vu plus loin lors de l'étude du procédé de blanchiment[758] que les opérations de mise en forme par martelages et recuits ont des conséquences non négligeables sur la qualité de ce traitement du monnayage médiéval, en particulier pour les alliages à base d'argent. Il est dans ce cas particulièrement intéressant qu'elles soient mises en œuvre à partir de lame : il reste plus simple de déformer un objet massif qui peut être manipulé durant le martelage plutôt qu'une collection de nombreux carreaux et flans.

[757] Référence : 1029-01. L'étude de ce flan est présentée en introduction de la partie qui traite de l'opération de blanchiment, p. 461.
[758] cf. Blanchiment des flans, p. 459.

II. Mise en forme des carreaux et des flans

La seconde étape principale de la chaîne opératoire du monnayage au marteau, est celle qui consiste à produire des flans à partir des lames préalablement préparées. Elle se développe selon différentes opérations de découpe et de martelage qui seront présentées dans cette partie. Outre la recherche de morphologies circulaires, les méthodes employées doivent également garantir que les objets produits respectent des caractéristiques précises de masse et de diamètre, propres à la fabrication de monnaie.

Dans une discussion préliminaire, il faut considérer l'ensemble de la chaîne de préparation de flans par le biais de l'opération qui conclut cette dernière : la restitution de leur brève par les ouvriers monétaires. Il s'agit de l'étape comptable ordonnée par les gardes de la fabrique qui consiste à évaluer le travail des monétaires. Ces derniers rendent après leur mise en forme, leur production de flans ainsi que leurs déchets de coupe. Il est ensuite possible de rapporter ces quantités à la masse de métal qui leur aura été confiée pour déterminer la quantité de matière perdue durant la fabrication, mais également la proportion des déchets de cisaillage pouvant par la suite être refondue.

Dans le cadre de la fabrication monétaire, ces évaluations interviennent selon une politique de contrôle légitime. Celle-ci l'est d'autant plus qu'il est ici question d'une mise en forme de métaux précieux. C'est pourquoi, l'existence de quotas qui fixent des quantités de pertes de métal à ne pas dépasser durant la fabrication, n'est pas surprenante[759]. Une telle gestion garantit contre le vol ou le détournement de métaux par les ouvriers.

En revanche, une seconde limitation à laquelle sont soumis les ouvriers monétaires est moins évidente. Durant leur travail de mise en forme, il est nécessaire qu'ils minimisent leurs découpes. Elle ne doit pas dépasser lorsqu'ils rendent leur brève, 12,5 % de la masse de métal qui leur aura été confiée initialement[760]. Lorsque cette exigence n'est pas respectée, les responsables sont censés dédommager le maître particulier de l'atelier pour la dépense de fonte supplémentaire qu'entraîne un cisaillage excessif[761].

---

[759] cf. *supra*, p. 93.
[760] cf. *supra*, p. 93.
Déclaration du roy Philippes de Valois..., op. cit.
De Laurière E. *et al.*, eds., *Ordonnances des rois..., op. cit.*, p. 802.
[761] *Déclaration du roy Philippes de Valois..., op. cit.*
Brisson B. *et al.*, eds., *Les basiliques..., op. cit.*, p. 955, 960.
De Laurière E. *et al.*, eds., *Ordonnances des rois..., op. cit.*, p. 804.

Finalement à quoi correspond cette limite de 12,5 % de cisailles ? Est-elle facile à respecter lors de la préparation des flans ? Ne représente-t-elle pas une contrainte importante qui gêne les ouvriers dans leur travail ? Dans ce cas, l'économie réalisée par le maître de la fabrique sur les refontes supplémentaires des déchets de coupe justifie-t-elle un règlement trop exigeant qui augmente les temps de fabrication ? Enfin, pourquoi un tel quota est-il inscrit dans les ordonnances rédigées par l'autorité émettrice alors qu'elle ne tire potentiellement aucun avantage de ce règlement ? C'est notamment à partir de la réponse à ces questions que doivent être abordés les problèmes de fabrications monétaires médiévales dans la mesure où ils s'inscrivent dans ce cadre réglementaire.

En introduction, il est intéressant de proposer une référence simple. En considérant la production d'un flan à partir d'un carreau en découpant seulement le cercle inscrit dans ce dernier (Figure 157), il est possible d'évaluer la quantité produite de déchets. Elle se calcule à partir de la différence des surfaces associées puisque l'épaisseur reste ici constante.

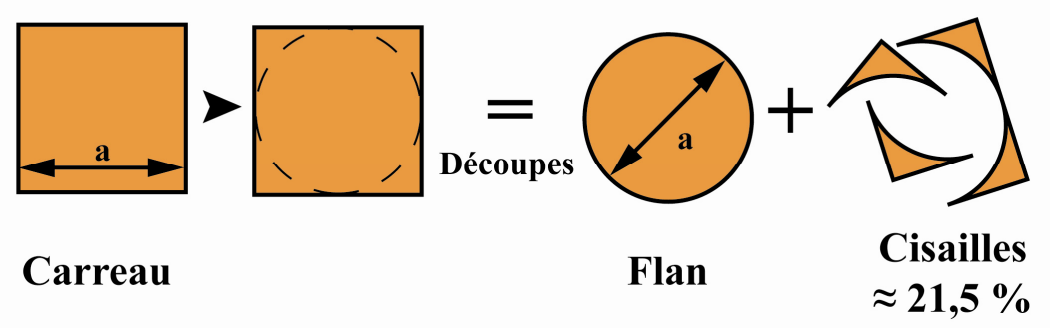


Figure 157 - Chaîne opératoire de découpe arrondie.

Soit le carreau présentant un côté de longueur a :

$$\%déchets\ de\ coupe = 100 \times \frac{Surface\ carreau - Surface\ flan}{Surface\ carreau}$$

$$\%déchets\ de\ coupe = 100 \times \frac{a^2 - \pi(a/2)^2}{a^2} = 100 \times (1 - \frac{\pi}{4}) \approx 21{,}5\ \%$$

Cette estimation équivaut à près du double de la limite des 12,5 % réglementaires. Toutefois, elle est associée à une méthode de fabrication qui *a priori* n'est pas mise en œuvre dans les fabriques monétaires médiévales. Ce n'est

pas la méthode réglementaire décrite par les sources monétaires étudiées. Dans ce cas, cette chaîne opératoire officielle permet-elle de produire effectivement moins de déchets et ainsi de respecter les ordonnances ?

Dans les traités monétaires et les descriptions disponibles des opérations de fabrication de monnaie, la question du quota de déchets de coupe imposé aux ouvriers n'est jamais abordée de leur point de vue. En d'autres termes, les exposés des étapes de mise en forme ne font pas état de consignes spécifiques permettant de respecter ce règlement. C'est pourquoi, il ne constitue peut-être pas une contrainte particulière sur le monnayage.

D'un autre côté, deux mentions donnent un éclairage différent. Interrogé sur la qualité du monnayage au marteau, N. Briot critique le travail des ouvriers monétaires. Il affirme que ces derniers ne respectent pas leurs quotas de cisailles[762]. Ce témoignage se voit par ailleurs indirectement confirmé par un observateur étranger aux questions monétaires. A partir du procès-verbal de J. de Thumery qui rend compte de l'épreuve qui a opposé en 1617 le même N. Briot aux monnayeurs de l'atelier de Paris, il est possible d'estimer les proportions de déchets de coupe résultant de leur fabrication. Avec 17 % pour le monnayage de l'argent et 14 % pour celui de l'or, il apparaît que la limite des 12,5 % n'a pas été respectée[763]. Dans ce cas la limite fixée par les ordonnances apparaît comme une contrainte. Cependant, ces informations doivent être considérées avec précaution. D'abord parce que le témoignage de N. Briot est peut-être contestable. Si, en tant que tailleur général, cet homme apparaît comme connaisseur des questions monétaires, il faut aussi rappeler que son intérêt repose également dans la disparition du monnayage au marteau, au profit d'appareillages qu'il a lui-même développés. De même, les données relevées pas J. de Thumery sont associées à un contexte de fabrication au marteau particulier puisque cette dernière intervient dans le cadre d'une épreuve contradictoire. Il est donc difficile d'être certain que les quantités de déchets inventoriées soient transposables à une production normale.

---

[762] Mazerolle F., *Les médailleurs français..., op. cit.*, t. 1, p. 395.

[763] Pour le monnayage d'argent, les ouvriers ont rendu 2 marcs 4 onces 7 gros de flans et 5 onces 2 gros de cisailles, soit respectivement 637 g et 130 g de métal. Le taux de cisailles est donc de :

$$\%cisailles = 100 \times \frac{130}{130 + 637} \approx 17\ \%$$

Pour le monnayage d'or, les monétaires ont rendu 2 marcs 4 onces 3 gros de flans pour 3 onces 2 gros de cisailles, soit 623 g et 99 g d'alliage. Le taux de cisailles correspondant est donc :

$$\%cisailles = 100 \times \frac{99}{99 + 623} \approx 14\ \%$$

De Thumery J., Epreuves contradictoires..., *op. cit.*, p. 342.
cf. Annexe A.

C’est pourquoi, il a été décidé de rechercher des données qui prêtent moins à discussions. Cette opportunité est notamment favorisée par les contrôles réguliers et documentés associés à l’industrie de fabrication monétaire.

A. Deux comptes monétaires de production

Dans cette partie, deux comptes de fabrication qui mettent en évidence deux politiques distinctes de gestion des déchets résultant des opérations de mise en forme de flans, seront présentés. Il s’agit de recueils dans lesquels ont été reportées les brèves quotidiennes de deux ateliers monétaires durant des périodes différentes[764].

Le premier document est un compte rendu du travail effectué au sein de l’atelier monétaire de Crémieu sur une période de quatre mois entre le 14 décembre 1419 et le 17 avril 1420[765]. Il témoigne d’une production de florettes de billon[766]. Il permet d’évaluer la proportion de déchets produits par les ouvriers de cette fabrique. Dans ce compte, sont en effet rapportées les quantités de métal fournies sous forme de lame à mettre en forme ainsi que les masses rendues à la fin de chaque journée. Les estimations sont très précises dans la mesure où les brèves sont inventoriées pour chacune des fournaises, c'est-à-dire pour les équipes d’ouvriers auxquelles était confiée une certaine quantité de métal. A partir de la constitution connue des fournaises qui ne regroupent jamais plus de cinq ouvriers, il est possible d’avoir une évaluation individuelle moyenne du travail au sein de cette fabrique.

Finalement, sur la période de quatre mois correspondant à ce compte de production, les monétaires ont travaillé effectivement 49 jours. En considérant la production de chaque fournaise, il a été possible de disposer de 188 estimations de la production de déchets associées au fonctionnement de cette fabrique monétaire. Elles ont été représentées sur la figure ci-dessous en les rapportant à la quantité moyenne de métal travaillé par chaque ouvrier. En outre, les fournaises qui

[764] Ces documents m’ont été communiqués par M. Bompaire. Il s’agit de deux études d’archives qu’il a partiellement publiées.
Archive départementales de l'Isère, B4403, 1420.
Archives nationales, Z1b 57, fol. 12, 1556.
Bompaire M. *et al.*, *Numismatique médiévale..., op. cit.*, t. 7, p. 489-492.
Bompaire M., Les cadences de production..., *op. cit.*, p. 579-613.
[765] Archive départementales de l'Isère, B4403, *op. cit.*
Bompaire M. *et al.*, *Numismatique médiévale..., op. cit.*, t. 7, p. 489-492.
[766] Duplessy J., *Les monnaies françaises..., op. cit.*, t. 1, p. 176.

comptent des *recuchons* dans leur rang sont mises en évidence puisque le travail moins assuré de ces apprentis peut avoir des conséquences sur la production des équipes.

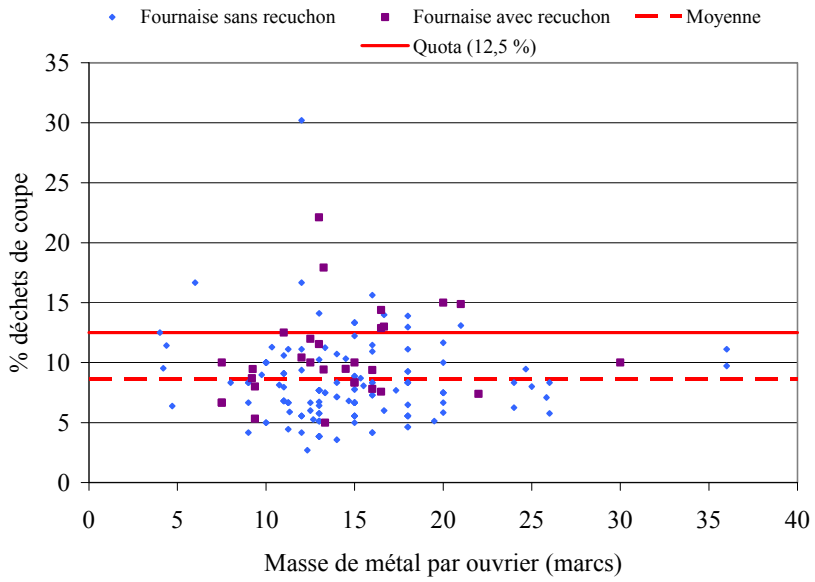


Figure 158 - Proportions de déchets de coupe dans la fabrication de l'atelier de Crémieu pour la période du 14 décembre 1419 au 17 avril 1420.

Le graphique ci-dessus montre que la limite des 12,5 % est respectée dans la très grande majorité des cas. Elle n'est dépassée que vingt fois lors de la restitution des 188 brèves. De plus, la moyenne générale est bien moins élevée puisqu'elle est égale à 8,6 %. L'évaluation des productions minimales de cisaille est d'autant plus surprenante puisque certains jours ces dernières s'élèvent seulement à 4 % de la masse confiée aux ouvriers.

D'autre part, la présence d'un apprenti dans une fournaise n'est que très rarement associée à une augmentation de la proportion des déchets de coupe. Les quantités produites sont tout à fait comparables à celles des équipes qui n'emploient pas de recuchon. Il faut voir dans cette représentativité un indice confortant la mention du traité des monnaies de J. Boizard, dans lequel il est indiqué que le travail des apprentis, ici appelés recuiteurs, se limite précisément au recuit des ébauches en cours de mise en forme[767]. Une telle occupation n'a pas de grande incidence sur la production de déchets de coupe.

[767] « les ouvriers sont appellez recuiteurs pendant leur année d'apprentissage [....]. Ce terme de recuiteurs vient de ce que les ouvriers faisoient recuire, pendant l'année de leur accueillement qu'ils faisoient leur apprentissage, les lames et les quarreaux, dans le temps qu'on fabriquoit les espèces avec le marteau..., ».
Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 175.

Qu'en est-il par ailleurs de la production de cisaille confrontée à la masse de métal travaillée ? Il est *a priori* envisageable qu'un ouvrier auquel est confié un ouvrage plus important produise plus de déchets en devant travailler plus vite. La considération de la figure 158 contredit cette hypothèse puisque la quantité de résidus de coupe ne suit pas une tendance croissante avec la masse de métal moyenne confiée à chaque monnayeur.

Finalement, dans la mesure où le type monétaire associé à cette fabrication est connu puisqu'il s'agit de florettes qui ont une masse théorique de 2,45 g, il est possible d'estimer la masse moyenne de déchets résultant de la préparation d'un seul flan. Leur répartition est présentée sur la figure ci-dessous.

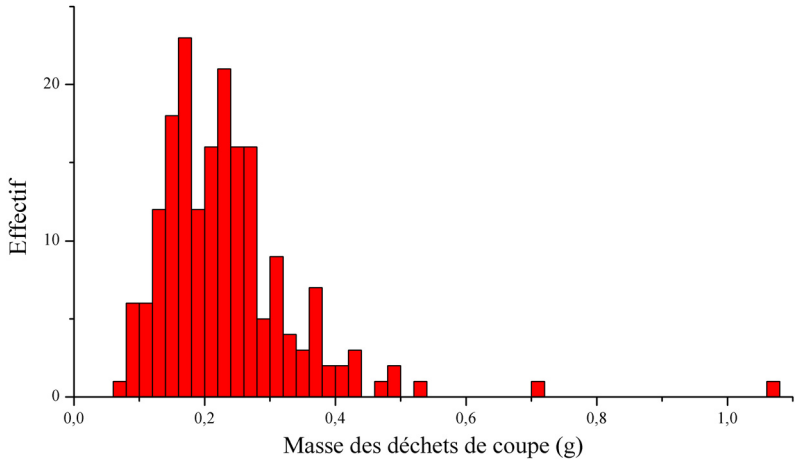


Figure 159 - Répartition de l'estimation des masses de déchets de coupe résultant de la préparation d'un flan.

Il apparaît que la majorité des moyennes de résidus de coupe résultant de la mise en forme d'un flan s'échelonne entre des masses de 0,1 à 0,3 g, soit une variation de 0,2 g. Celle-ci est finalement très faible rapportée aux 2,45 g que pèsent les ébauches une fois ajustées. D'autant qu'elle est certainement un peu moins élevée. L'estimation moyenne ici considérée impose d'associer toutes les découpes à l'ajustage des flans alors qu'une partie des déchets compte également ceux résultant de la préparation et de la découpe des lames ainsi que des rebuts de mise en forme.

Au sein de l'atelier monétaire de Crémieu, l'existence du quota réglementaire fixé par l'autorité émettrice concernant la proportion de déchets à ne pas dépasser durant les étapes de fabrication, ne définit pas une contrainte. La limite est majoritairement très largement respectée. En outre, un rythme de fabrication plus soutenu ne nuit pas de ce point de vue à la qualité du travail. Une telle observation

laisse à penser que la chaîne opératoire mise en œuvre dans cette fabrique est le paramètre commun à toutes les fabrications, assurant le respect du quota de déchets fixé par les ordonnances.

Parallèlement à ce premier document, un autre recueil met en évidence une politique différente par rapport à la gestion des déchets produits durant les mises en forme. Il s'agit du compte de production de l'atelier monétaire de Bayonne tenu sur une période d'un an et huit mois environ, entre le 2 janvier 1555 et le 11 août 1556[768]. Les informations consignées dans ce document sont similaires à celles associées à la fabrique de Crémieu. Elles sont toutefois moins précises dans la mesure où les fabrications quotidiennes sont reportées globalement sans distinction de fournaise, ni d'ouvrier. C'est pourquoi bien que le compte de Bayonne témoigne d'une durée d'activité près de cinq fois plus longue que celui précédemment cité, le nombre d'évaluations de quantités de déchets produits est presque semblable. Lorsque le premier présente une seule donnée quotidienne, le second en rend compte de cinq en moyenne correspondant aux différentes fournaises.

Les 193 estimations de production de cisailles au sein de l'hôtel de la Monnaie de Bayonne pour la période de janvier 1555 à août 1556 sont représentées sur la figure ci-dessous, en fonction des quantités de métal mises en forme quotidiennement. La précision de ces données est cependant complétée par les deux types monétaires associés aux fabrications. Le premier correspond à une frappe de monnaies fortes puisqu'il s'agit de testons valant 11 sous 4 deniers tournois. Ils pèsent 9,6 g d'un alliage titrant à 89,9 % en masse d'argent[769]. Le second est associé à un monnayage de douzains. Cette espèce est beaucoup plus faible que la précédente puisqu'elle ne vaut que 12 deniers tournois, soit près de douze fois moins que les testons[770]. En 1555, les douzains représentent 2,68 g d'un billon contenant 29,2 % de métal précieux.

La première observation du graphique suivant marque une nette différence avec la production de déchets de l'atelier de Crémieu. La moyenne représente ici avec 23,8 %, presque deux fois le maximum autorisé. Pour les 193 jours de fonctionnement, la limite fixée par les ordonnances monétaires est respectée quatre fois seulement.

[768] Archives nationales, Z1b 57, fol. 12, *op. cit.*
Bompaire M., Les cadences de production..., *op. cit.*, p. 579-613.
[769] Duplessy J., *Les monnaies françaises..., op. cit.*, t. 2, p. 78.
[770] Un sou équivaut à douze deniers tournois.

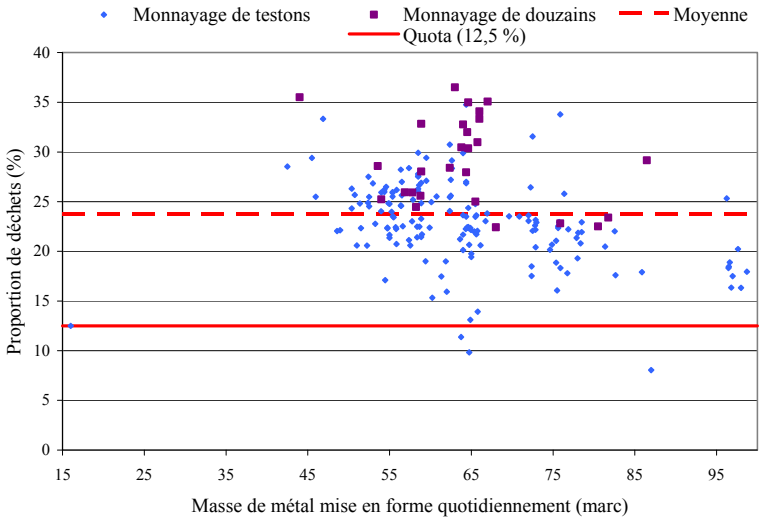


Figure 160 - Proportions de déchets de coupe dans la fabrication de l'atelier de Bayonne pour la période du 2 janvier 1555 au 11 août 1556.

D'un autre côté, si au sein de la fabrique de Crémieu, il est apparu que le rythme de production n'avait pas de conséquence sur le taux de rebuts de production, ici la figure 160 révèle une certaine influence. Toutefois, cette dernière est opposée à la logique qui suppose une plus grande proportion de déchets résultant d'une production plus importante. A Bayonne, l'augmentation de la masse de métal à mettre en forme est corrélée avec une diminution du volume des résidus à refondre. Il faut peut-être considérer ici que les ouvriers qui ont à traiter moins de métal, produisent plus de rebuts par un travail plus appliqué conjugué toutefois avec une technique qui ne permet pas le respect des limites réglementaires.

En outre, le type monétaire fabriqué semble également avoir une influence sur les quantités de cisailles puisque celles associées à la mise en forme de flans de douzains sont avec une moyenne de 29 %, globalement au-dessus du niveau général. Dans un contexte de respect des ordonnances concernant les proportions de découpes produites, une telle configuration aurait pu être rapprochée d'une plus grande attention portée au travail des alliages contenant plus de métal précieux. Ce n'est, semble-t-il, pas le cas ici puisque lors de la fabrication des testons bien que produisant en moyenne seulement 23 % de cisailles, certains taux de découpe sont tout de même élevés et équivalents à ceux estimés pour les monnayages de douzains.

Il apparaît que le maître de l'atelier monétaire de Bayonne était relativement laxiste dans sa gestion des déchets de fabrication. Car bien que le quota devant servir de référence soit fixé par des ordonnances monétaires, c'est à leur employeur local et non à l'autorité émettrice que les ouvriers devaient rendre compte d'une production trop importante de cisailles. Ils étaient notamment obligés de le dédommager pour les frais des fontes supplémentaires qui en résultent. Si cette règle avait été appliquée dans cet atelier, les dépassements de limite n'auraient pas été systématiques.

La tolérance est d'autant plus assurée qu'elle est constante sur les vingt mois couverts par le compte de fabrication. Il y n'a pas de tendance marquant une quelconque consigne visant à diminuer les quantités de déchets produits. Comme ce qui a été supposé pour l'atelier de Crémieu, la proportion globalement élevée, de déchets produits, est certainement associée à une chaîne opératoire de mise en forme propre à cet atelier.

Le quota de découpes défini par les ordonnances représente une contrainte sur le monnayage de l'atelier de Bayonne. Celle-ci est d'autant plus réelle puisqu'elle est en quelque sorte reconnue par le responsable de la fabrication. Bien qu'une production importante de déchets augmente ses frais de fonctionnement, le maître de la fabrique se montre tout de même tolérant à l'égard du travail de ses ouvriers.

En définitive, à partir de l'étude de deux comptes de production d'ateliers monétaires distincts, il est possible de mettre en évidence deux politiques différentes de gestion des déchets de coupe parfaitement opposées. Dans un cas, le quota de déchets est largement en accord avec les règlements alors que dans un autre, ils ne peuvent être respectés… Cependant, les observations relevées font *a priori* état de l'influence des chaînes opératoires de fabrication dans la proportion des résidus de mise en forme. Finalement, les inégalités constatées entre les fabriques de Crémieu et de Bayonne peuvent se justifier par des procédés spécifiques. Dans ce cas, la chaîne opératoire réglementaire du monnayage au marteau telle qu'elle a pu être proposée à partir de l'étude de différentes sources monétaires[771], est-elle justement celle qui permet de respecter les règlements définis par l'autorité émettrice ? D'autant que cette dernière a également produit des ordonnances exigeant la mise en œuvre de ces techniques de fabrication.

La réponse à cette question ne peut être apportée par l'étude des comptes de Crémieu ou de Bayonne. Bien qu'il soit possible de supposer que la production des monnaies dans ces fabriques se faisait selon des chaînes opératoires différentes,

[771] cf. La chaîne opératoire selon les sources, p. 66.

aucune mention des deux relevés de production consultés ne renseigne sur les pratiques des ouvriers… Tout au plus peut-on préciser que les taux plus faibles de déchets rendus par les ouvriers monétaires de l'atelier de Crémieu ne sont pas justifiés par des refontes au cours des mises en forme quotidiennes. Le métal qui est confié chaque jour aux monétaires est déjà sous forme de lames, les opérations de fonderie interviennent à un autre niveau[772]. Les métaux ne doivent pas être refondus avant que les monétaires aient rendu leur brève. Dans le cas contraire, le calcul serait faussé car l'évaluation de la quantité des déchets doit normalement contribuer à minimiser les refontes.

Afin de disposer de données associées à différentes chaînes de fabrication, il a été décidé de mettre en œuvre plusieurs expérimentations. Cette approche permet de vérifier l'influence de la chaîne opératoire sur la production de déchets.

B. Expérimentations : mise en forme et déchets de coupe

L'étude précédente des comptes de Crémieu et de Bayonne, a montré des variations significatives dans la production de déchets associée à une fabrication monétaire. De plus, il a été suggéré que les écarts constatés résultent potentiellement de différences dans les chaînes opératoires. La finalité des expérimentations est d'estimer les quantités des résidus de coupe associées à divers procédés de fabrication monétaire. Il était dans ce cas nécessaire de proposer plusieurs alternatives distinctes. Cependant, l'étude bibliographique des sources monétaires a permis de rendre compte qu'il n'existe qu'une seule technique réglementaire de monnayage au marteau. C'est pourquoi, il a été décidé de confronter cette chaîne opératoire à celle présentée en introduction de cette discussion et qui consiste simplement à découper des flans directement dans des carreaux. Ce procédé n'a aucun lien avec les techniques officielles, néanmoins il n'est pas totalement inconcevable puisqu'il a été employé dans le cadre de plusieurs activités médiévales de faux-monnayage[773]. En outre, bien que le propos de cette étude ne soit pas de discuter de la chaîne de production qui a été en vigueur dans l'atelier de Bayonne, il apparaît que les taux de rebuts observés sont

[772] « Le maître a baillé aux ouvriers rielx d'argent pour faire gros de 20 d. t. ». Les « rielx » sont les lames à mettre en forme.
Bompaire M. *et al.*, *Numismatique médiévale..., op. cit.*, t. 7, p. 489.
[773] Rancoule G. *et al.*, La grotte nord de Lauradieu..., *op. cit.*, p. 171.
Ayme R. *et al.*, Atelier de faux-monnayeurs..., *op. cit.*, p. 93-94.
Dhenin M. *et al.*, Un atelier de faux-monnayeurs..., *op. cit.*, p. 208, 210.
Minnitt S., A hoard of counterfeit..., *op. cit.*, p. 100.
Miquel J. *et al.*, Un atelier de faux-monnayeur..., *op. cit.*, p. 187.
Téreygeol F. *et al.*, *Grotte de La Catette..., op. cit.*, p. 44.

comparables à celui calculé plus haut, résultant théoriquement d'une découpe circulaire. Celui-ci représente environ 21,5 % de cisailles alors que le taux moyen de la fabrique de Bayonne est de 23,8 %.

Le plan d'expérience retenu consiste finalement à comparer deux chaînes opératoires principales. La première est associée à la fabrication officielle et la seconde ne met en œuvre qu'un cisaillage circulaire. Toutefois, si cette dernière procède d'une opération relativement simple, il n'en est pas de même de la première. Celle-ci se décompose suivant différentes étapes qui demandent une certaine maîtrise. La présente démarche n'a donc pu intervenir qu'après la mise en œuvre d'expérimentations préliminaires qui ont défini les prérequis indispensables à la réussite de la fabrication officielle.

Production des flans selon la chaîne officielle

Pour cette expérience, il était nécessaire d'utiliser un type monétaire de référence ou d'en définir un, propre à cette fabrication. Dans une démarche de réflexion globale, il a été décidé de proposer un type monétaire arbitraire afin de s'assurer que les résultats de ces essais soient généralisables à tout type de monnayage.

La démarche retenue a consisté à utiliser 34 carreaux de cuivre pur d'1 cm de côté et d'1,2 mm d'épaisseur. Ces derniers présentant une masse moyenne de 1,08 g sont dans un premier temps martelés comme le prévoit la chaîne opératoire officielle. Ils sont ensuite ajustés jusqu'à une masse fixée pour l'expérience à 1 g. La découpe est faite par rognages successifs de leurs coins. Chaque ébauche est pesée avant et après ajustage afin de calculer la quantité de déchet associée.

Figure 161 - Chaîne opératoire globale mise en œuvre lors de l'expérimentation (carreau, carreau battu, carreau ajusté avec 7,4 % de déchets, flan rechaussé, trois flans)[774].

[774] Expérimentation Melle 2008.

Après cette étape préliminaire, la chaîne opératoire est menée à son terme afin de valider le protocole de découpe (Figure 161). Les flans produits ont un diamètre moyen entre 1,3 et 1,4 cm pour une épaisseur d'environ 0,9 mm.

Les différents relevés de masse sont présentés en Annexe R.

Production des flans par une découpe circulaire

Les données devant être confrontées à celles associées à la chaîne opératoire réglementaire du monnayage au marteau ont été obtenues lors d'une expérimentation ayant été mise en œuvre dans le cadre d'une étude parallèle d'un exemple de faux-monnayage médiéval[775]. Le procédé de découpe circulaire a été l'une des techniques de cette reconstitution. Les résultats rassemblés pouvaient être utilisés ici à titre de comparaison.

Les flans produits lors de ces expériences préliminaires sont d'un diamètre et d'une épaisseur moins importants que ceux résultant de la chaîne opératoire réglementaire précédemment mise en œuvre. Cependant, les deux *corpus* peuvent tout de même être confrontés puisqu'il s'agit ici de comparer des pourcentages de découpe.

Le principe général de cette technique de fabrication de flan est de découper la rondelle de métal dans un carré dans lequel elle s'inscrit. Le diamètre final de l'ébauche correspond en définitive au côté du carreau utilisé. Il faut ici remarquer que ce n'est pas le cas dans la chaîne opératoire réglementaire dans laquelle le flan a un diamètre final plus important que la largeur du carreau initial.

L'expérimentation a consisté à découper des flans d'1 cm de diamètre et de 0,4 mm d'épaisseur dans des carrés de cuivre préalablement préparés. Deux principaux protocoles de cisaillage ont été retenus. Le premier se décrit par un rognage progressif des carreaux (Figure 162 a). Quand au second, baptisé « coupe arrondie », il correspond effectivement à une découpe circulaire. Elle est par ailleurs plus ou moins productrice de déchets suivant que les coins sont éliminés progressivement (Figure 162 b) ou les quatre à la fois (Figure 162 c), comme cela peut être observé dans un second exemple de faux-monnayage[776].

[775] cf. Les faux-monnayages de la grotte de La Catette, p. 553.
[776] cf. Un faux-monnayage d'opportunité : La grotte de Lauradieu, p. 512.

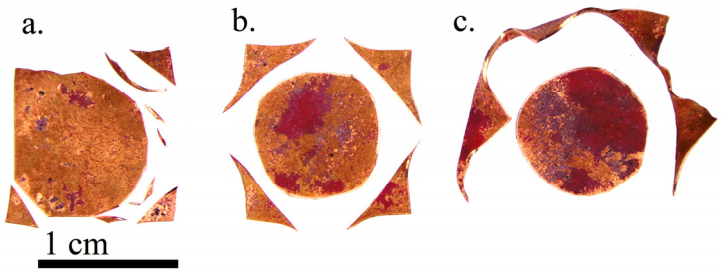


Figure 162 - Différentes découpes circulaires[777].

Finalement, 15 flans ont été produits selon la coupe arrondie et 9 par rognages successifs, chacun d'eux ayant été pesé avant et après découpe. Les différents relevés sont présentés en annexe R.

Résultats expérimentaux

Pour tous les échantillons préparés selon les différentes méthodes, il a été possible de calculer une masse de déchets ayant été produite et donc d'évaluer le pourcentage de découpe résultant des mises en forme. Ils sont représentés sur la figure ci-dessous, en regard du quota théorique autorisé par les ordonnances monétaires.

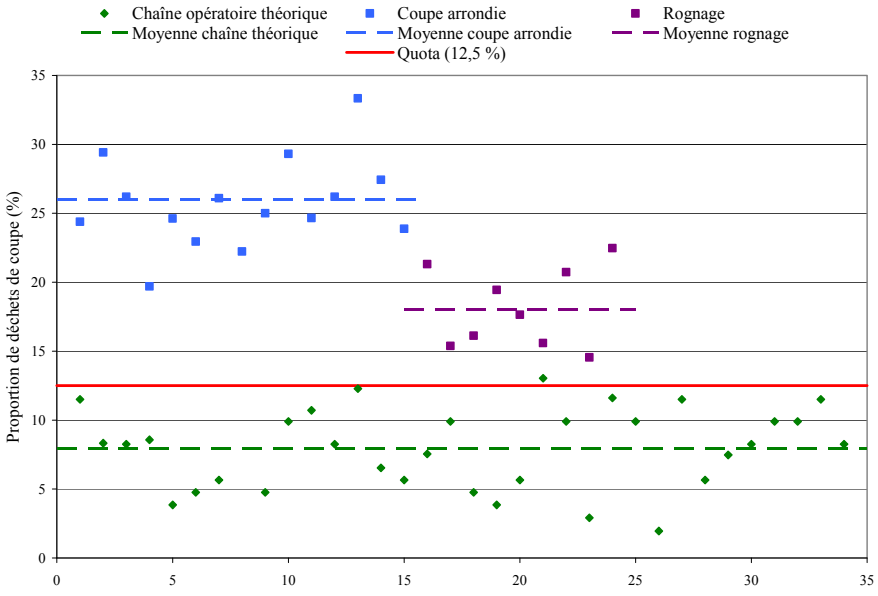


Figure 163 - Pourcentages expérimentaux de déchets de coupe.

[777] Experimentation n° 08-01 à 48.

Il apparaît que chacune des chaînes opératoires retenues définit un taux moyen de production de déchets qui lui est propre. C'est finalement la découpe arrondie qui entraîne la proportion de découpe la plus importante, avec une moyenne de 25,7 %. Ceci n'est pas surprenant dans la mesure où une partie du métal éliminé n'est pas justifiée par la mise en forme circulaire. Elle n'intervient que pour permettre une découpe continue (Figure 162 c). La découpe circulaire par rognage, beaucoup plus progressive et limitée à l'essentiel pour obtenir une forme ronde, diminue la quantité de découpe. Cependant, bien que plus restreint puisqu'il se situe en moyenne autour de 18,1 %, le taux de rebuts est tout de même systématiquement au-dessus du plafond réglementaire de 12,5 %. Globalement, la technique la plus simple mais qui n'est décrite dans aucune source monétaire, ne permet pas de respecter le quota de résidus de fabrication imposé par l'autorité émettrice.

Ce n'est en revanche pas le cas pour la chaîne opératoire réglementaire. La figure 163 montre qu'elle peut être menée à terme et produire des flans monnayables sans produire une quantité importante de chutes de découpe. Avec un taux de cisaillage moyen de 8 %, la limite réglementaire est respectée assez largement pour la presque totalité des échantillons obtenus.

Il est en outre remarquable que le taux moyen de déchets résultant de la reconstitution de la chaîne opératoire réglementaire du monnayage au marteau, soit en définitive très proche de celui calculé à partir des relevés du compte de production de l'atelier monétaire de Crémieu. La moyenne de 8,6 % de résidus est légèrement supérieure aux 8 % expérimentaux, toutefois les quantités de métal transformé ne sont pas comparables. Les données de Crémieu correspondent à une production de masse. De plus, les déchets considérés lors des expérimentations ne correspondent qu'aux chutes de découpe résultant de l'ajustage des carreaux. Les relevés de la fabrique de Crémieu prennent parallèlement en compte dans les quantités de métal non ouvrées, les chutes de découpes, les rebuts de fabrication ainsi que les fragments résultant de la découpe des lames. Il est donc légitime que le taux expérimental soit sous-évalué. Il est cependant difficile de proposer une estimation fiable de cet écart. Il dépend en effet de caractéristiques propres à chaque production, la morphologie des lames utilisées notamment, mais également d'aléas de fabrication, telle que la fracture d'un flan durant son martelage à cause d'un défaut interne de l'alliage.

C. Le poids des ordonnances monétaires sur le travail des monnayeurs

L'une des questions posée en introduction de cette discussion sur les opérations de mise en forme associées au monnayage au marteau, cherchait à évaluer si les ouvriers monétaires se trouvaient contraints dans leur travail par des règlements trop stricts définis par l'autorité émettrice. Cette question porte en particulier sur la quantité de déchets qu'ils produisent durant leur fabrication.

Dans un premier temps, à partir de l'étude de compte de production, notamment celui tenu dans l'atelier monétaire de Crémieu entre janvier 1419 et avril 1420, il a été possible de constater que le quota fixé par les ordonnances monétaires peut être largement respecté sans qu'il y ait de conséquence notable sur les rythmes de fabrication.

D'un autre côté, plusieurs reconstitutions expérimentales ont révélé que la chaîne opératoire de préparation des flans monétaires est directement liée aux taux de déchets de coupe. En outre, seul le procédé défini à partir de l'étude bibliographique des sources monétaires apparaît comme l'alternative garantissant largement le respect de la limite réglementaire, sans contrainte particulière.

Au cours des précédentes discussions, il est apparu nécessaire de mettre en question l'intérêt de l'autorité émettrice d'ordonner une limitation de la production de déchets de fabrication, dans la mesure où elle n'a pas de conséquence sur la qualité du monnayage. Dans les sources monétaires, cette contrainte est d'ailleurs présentée comme permettant de restreindre les dépenses supplémentaires résultant de découpes trop importantes. L'intérêt se trouve donc chez les maîtres d'ateliers qui peuvent notamment se faire dédommager par les ouvriers dont le travail bâclé augmente leurs frais de fonderie. Toutefois, l'étude du compte de Bayonne ainsi que les témoignages de N. Briot et de J. de Thumery, montrent également que les responsables des fabriques ont pu être relativement tolérants sur cette question[778].

Finalement, ne faut-il pas considérer ce problème d'un point de vue différent ? Dès lors que seule la chaîne opératoire réglementaire de fabrication monétaire est compatible avec le respect des ordonnances fixées pas l'autorité émettrice, l'intérêt de cette dernière ne repose-t-il pas sur la mise en œuvre de ces opérations au sein des ateliers ? En effet, en mettant de côté la production plus importante de chutes pouvant être par la suite refondues, la préparation des flans par rognage apparaît

[778] Mazerolle F., *Les médailleurs français..., op. cit.*, t. 1, p. 395.
De Thumery J., Epreuves contradictoires..., *op. cit.*, p. 342.

beaucoup plus simple. Elle se résume à trois principales étapes qui sont l'amincissement de lames à l'épaisseur des monnaies, puis leur découpe en carreaux et enfin en flans. En revanche, la chaîne officielle se décompose en un minimum de douze opérations principales[779]. Dans ce cas, pourquoi la complexité a-t-elle été imposée ?

Pour répondre à cette question, il faut rappeler les paramètres réglementaires qui définissent un type monétaire. Il en existe seulement deux, contrôlés par les gardes de chaque atelier monétaire avant toute délivrance : la masse et le titre en métal précieux des monnaies. Du point de vue de l'utilisateur, en revanche, le seul moyen de vérifier simplement la qualité d'une espèce, est d'effectuer une pesée. Elle doit notamment lui indiquer si les pièces qui lui sont proposées ont la masse réglementaire. Plus légères, elles perdent de la valeur. D'abord parce qu'elles ne représentent pas la bonne quantité de métal précieux, et de surcroît parce qu'une diminution de masse résulte *a priori* de la pratique illégale du rognage. Elles risquent finalement d'être refusées lors d'un échange commercial.

C'est pourquoi, il est important pour l'autorité émettrice de garantir selon les types monétaires, une uniformité de la masse des pièces. Et si elle accorde aux monnayeurs un remède de poids[780], les écarts tolérés sont néanmoins relativement limités. Les références relevées par N. de Wailly pour le monnayage d'argent et de billon rendent compte que les variations pouvaient être de 0,01 gramme dans le premier et jusqu'à 0,1 gramme dans le second[781]. A titre d'exemple, en considérant des monnaies frappées sous le règne d'Henri III, un teston pesant théoriquement 9,6 g pouvait voir sa masse varier de 0,01 g, soit 0,1 %[782]. Pour un douzain de 2,4 g, présentant un taux d'argent inférieur, la différence autorisée pouvait aller jusqu'à 0,1 g, soit une variation de 4,2 %[783]. Le domaine de tolérance est finalement limité, en particulier pour le monnayage d'argent.

Du point de vue de l'ajustage de la masse des flans, les deux chaînes opératoires évoquées plus haut présentent également des différences importantes. Alors que la découpe circulaire est apparue dans un premier temps comme le moyen le plus simple pour produire des rondelles métalliques, elle est en revanche beaucoup plus contraignante pour s'assurer de l'uniformité de leur masse.

---

[779] cf. *supra*, p. 109.
[780] cf. *supra*, p. 70.
[781] Wailly N. D., *Mémoire sur les variations..., op. cit.*, p. 7-13.
Blanchet J.-A. *et al.*, *Manuel de numismatique française*, *op. cit.*, t. 2, p. 38.
[782] Duplessy J., *Les monnaies françaises..., op. cit.*, t. 2, p. 130.
[783] *Ibidem*, p. 135.

Dans le cadre de la fabrication réglementaire, l'opération d'ajustage des carreaux par rapport à la masse légale intervient dès le début du processus de mise en forme. A cet instant les monnayeurs n'ont eu comme consigne que de découper des carrés de métal dont les dimensions se rapprochent globalement de la morphologie des flans et des monnaies produits[784]. Si les carreaux qu'ils ont préalablement préparés sont trop légers avant d'avoir été ajustés, ils peuvent être mis au rebut sans qu'il en résulte une perte de temps de mise en forme importante. Quant au diamètre final des flans qui doit permettre l'inscription de tous les motifs monétaires lors de la frappe, il est obtenu à partir des mises en forme qui n'ont que ce seul objectif après que les carreaux aient été ajustés. L'épaisseur finale des flans constitue ici un degré de liberté puisqu'il n'y a aucune consigne particulière la concernant. Celle-ci est finalement définie en fonction de la surface de la monnaie frappée et du volume d'alliage de cette dernière.

Dans le cadre de la préparation des flans par une simple découpe arrondie, les contraintes à respecter sont à la fois plus nombreuses mais également corrélées les unes avec les autres, multipliant les risques de variation par rapport aux limites réglementaires. Dans une coupe circulaire, la masse finale d'un flan dépend à la fois de son diamètre ainsi que de son épaisseur. Ces deux paramètres définissant le volume de l'ébauche, se conjuguent avec la masse volumique de l'alliage travaillé pour permettre la production de monnaies de masse légale. Dans un premier temps, le module de la pièce apparaît fixé par les figures monétaires qui doivent être imprimées. En supposant pour l'instant que la découpe des flans soit parfaitement circulaire et reproductible, l'épaisseur des lames devient ici une caractéristique fondamentale. Alors que dans la chaîne officielle, le réglage de la masse des carreaux se fait par des découpes successives de métal, ici, il doit se faire, par la définition d'une épaisseur très précise des lames découpées. Une petite variation de la finesse d'un flan entraîne rapidement une modification significative de sa masse[785]. C'est notamment cette même observation qui est proposée par D.

---

[784] « Quand les lames étoient étendues à peu près de l'épaisseur des espèces à fabriquer, […] pour les couper en morceaux à peu près de la grandeur des espèces… ».
Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 82.

[785] Il faut considérer qu'un flan d'épaisseur e, correspond à un cylindre de section S, de masse m, d'un alliage de masse volumique ρ. Il existe donc la relation :

$m = Se\rho$

La variation de la masse du flan Δm engendrée par une variation Δe de son épaisseur correspond à l'ajout ou le retrait d'un cylindre d'alliage. D'où :

$\Delta m = S\Delta e\rho$

Il est finalement possible de calculer le pourcentage de variation massique engendré par un écart d'épaisseur du flan :

$$\%\ \text{variation massique} = 100\times\frac{\Delta m}{m} = 100\times\frac{S\Delta e\rho}{Se\rho} = 100\times\frac{\Delta e}{e}$$

Sellwood pour justifier l'introduction difficile du laminoir dans la fabrication monétaire. Selon lui, les premières machines ne permettaient pas d'obtenir des épaisseurs assez reproductibles. Or, comme les lames devaient une fois laminées être découpées à l'emporte-pièce pour produire des flans, un procédé plus expéditif mais en définitive similaire à la découpe circulaire, les monnaies ne pouvaient avoir une masse uniforme[786].

A titre d'exemple pour la chaîne opératoire du monnayage au marteau, les variations de masse ont été estimées pour les exemples de monnaies présentées plus haut (Figure 164).

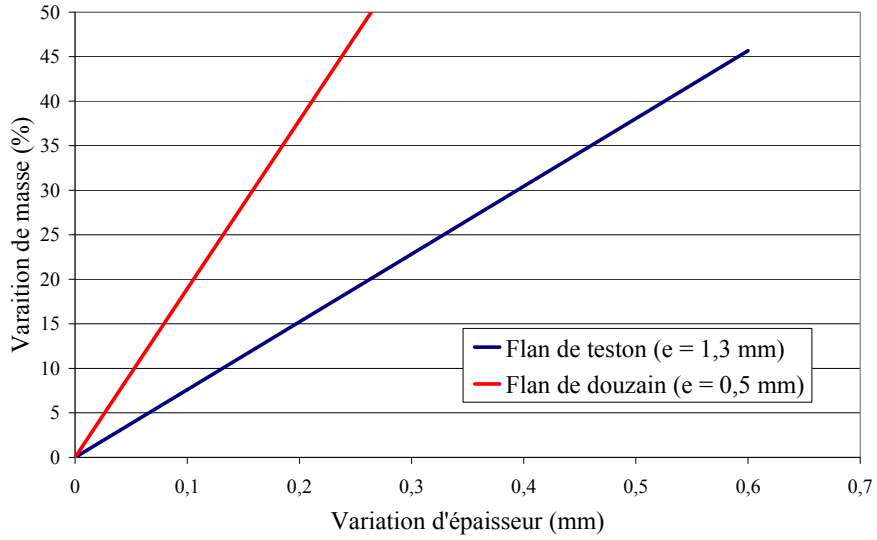


Figure 164 - Variation de la masse de différents flans suivant leur épaisseur.

Pour les types du teston et du douzain, une différence de seulement 0,1 mm avec l'épaisseur théorique de la lame dans laquelle devraient être produits les flans, entraîne des variations de masse de 7,8 % pour un teston et de 19 % pour un douzain[787]. Elles dépassent largement les remèdes de 0,1 % et 4,2 % consentis par

[786] « When dealing with a coin which is only 1 mm or so thick, and about 25 mm diameter, an eccentricity of 0,1 mm in the rollers would give rise to a thickness variation of 0,2 mm, i.e. a weight fluctuation of 20 %, quite unacceptable in a precious metal currency. ».
Sellwood D., Early Austrian and German..., *op. cit.*, p. 109.

[787] Les épaisseurs théoriques des flans ont été calculées à partir de leurs masses et diamètres théoriques ainsi que des masses volumiques des alliages associés. Ces dernières ont été estimées à partir d'une règle empirique proposée dans la thèse de J. Poirier.
Duplessy J., *Les monnaies françaises..., op. cit.*, t. 2, p. 130.
Ibidem, p. 135.
Poirier J., *Contribution à l'analyse de l'or antique. Application aux monnayages du monde méditerranéen du II^e^ au XIV^e^ siècle*, Thèse de doctorat de Sciences Physiques de l'Université d'Orléans, Orléans, 1983, p. 159.
ρ_{Cu} = 8,96 g.cm^{-3} ρ_{Ag} = 10,5 g.cm^{-3}
Lide D. R., ed., *CRC handbook..., op. cit.*, p. **12**-119 et **12**-120.

l'autorité émettrice. Cette configuration impose avant toute découpe une mise en forme très serrée et complexe puisqu'un martelage excessif entraînant un amincissement trop important ne peut être corrigé.

En outre, pour définir au préalable l'épaisseur théorique des lames permettant d'obtenir des flans présentant une masse réglementaire, il a été nécessaire de poser comme constant le diamètre de ces derniers. Or, il faut admettre que la précision relative du cisaillage ajoute un paramètre supplémentaire de variation difficilement prévisible. Il est d'autant plus difficile de produire des flans de masse identiques compte tenu de la dépendance de ces paramètres.

La chaîne opératoire de découpe arrondie, apparue dans un premier temps comme une alternative relativement simple pour la production de flans doit être finalement reconsidérée. Dans le cadre de la fabrication officielle de monnaies, elle ne peut garantir une production à grande échelle conforme aux attentes métrologiques imposées par l'autorité émettrice, en particulier concernant la masse des monnaies. En revanche, la chaîne opératoire réglementaire, bien que définissant un nombre d'opérations de mise en forme plus important permet, sans contrainte particulière, de produire des monnaies présentant des caractéristiques réglementaires.

Afin de proposer un système monétaire dans lequel la population peut avoir confiance, l'autorité émettrice qui en est responsable, doit s'engager à fournir des monnaies toutes relativement identiques selon les types. Dans la mesure où la production des espèces est déléguée aux ateliers monétaires, cette dernière est contrôlée pour attester de la qualité du monnayage qui en résulte. C'est notamment le rôle des gardes et contre-gardes qui en tant que représentants du pouvoir émetteur au sein des fabriques, ont pour rôle de vérifier la masse des pièces émises par rapport aux limites et remèdes fixés par les ordonnances monétaires. S'ils constatent des écarts, les monnaies concernées sont cisaillées. Les ouvriers responsables doivent ensuite en rendre compte. Cependant, si pour les monnayages les plus précieux, les pesées sont effectuées pièce à pièce, ce n'est pas le cas pour les plus faibles. Ils sont évalués à partir d'un échantillonnage[788]. Ce choix favorise un gain de temps non négligeable dans les opérations de délivrance, puisque les monnayages les plus faibles sont par ailleurs ceux auxquels sont associées les productions les plus importantes d'espèces. Néanmoins, il résulte de ces contrôles limités, un risque d'émission de monnaies non réglementaires.

[788] « Ainsi ces espèces [de billon] n'ont point été […] pesées pièce à pièce par les gardes..., ».
Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 79.
Bompaire M. *et al.*, *Numismatique médiévale..., op. cit.*, t. 7, p. 467.

Suivant la chaîne opératoire de fabrication retenue, il peut être difficile voire impossible de subvenir à une production de masse conforme aux exigences légales. Dès lors, il est nécessaire pour l'autorité émettrice de proposer un procédé de fabrication permettant de tenir les objectifs qu'elle impose. Toutefois, dans la mesure où la chaîne opératoire officielle définie n'apparaît pas dans un premier temps, comme la plus simple, ne faut-il pas voir dans la définition du quota de déchets que ne doivent pas dépasser les ouvriers durant la préparation des flans, un pouvoir délégué aux maîtres des ateliers pour garantir le recours au procédé réglementaire ? Il apparaît que si ces derniers peuvent demander un dédommagement à leurs employés produisant trop de déchets à refondre, ils vont en exerçant leurs droits, contraindre les ouvriers à produire peu de cisailles. Or, la chaîne opératoire dont résulte le moins de découpes est également celle qui favorise la production de flans de masse uniforme.

Finalement, les monétaires responsables de la fabrication se trouvent encouragés sur différents plans, à produire des flans de masse homogène, en conformité avec les caractéristiques légales de chaque type de monnaie. Dans un premier temps, la consigne est explicite puisque les gardes doivent vérifier la conformité des monnaies produites avec les exigences réglementaires. Néanmoins, cette surveillance a ses limites, notamment pour les monnayages les moins précieux qui ne sont pas contrôlés pièce à pièce. C'est pourquoi, la définition d'un quota de déchets de coupe à ne pas dépasser dans le cadre d'une fabrication de monnaie, apparaît sur un second plan, comme un moyen implicite de garantir la qualité de la production. Afin de pouvoir respecter les objectifs qui leur sont fixés, les ouvriers se voient encouragés à mettre en œuvre une chaîne de production relativement complexe qui finalement permet d'obtenir un monnayage uniforme et réglementaire.

Le choix d'une alternative plus simple comme la découpe arrondie des flans est exclue, à la fois par les irrégularités métrologiques des monnayages associés mais aussi par une production de déchets de coupe au-dessus du quota réglementaire. D'autant qu'à ce niveau, c'est à leur maître d'atelier que les ouvriers doivent rendre des comptes pour les dépenses occasionnées par de trop grandes quantités de cisailles.

D. La chaîne opératoire officielle dans le monnayage de La Rochelle

La chaîne opératoire de fabrication monétaire proposée à partir de l'étude des sources monétaires, intervient pour une part très importante dans la qualité du monnayage. Dans ce cas, a-t-elle été mise en œuvre au sein de la fabrique de La Rochelle ? Les discussions de cette partie devront répondre à cette question à partir de la recherche de stigmates des différentes opérations de mise en forme dans le *corpus* rochelais. Une telle approche est notamment possible grâce aux différents essais expérimentaux réalisés et auxquels les structures des objets archéologiques peuvent être confrontées. Ces reconstitutions permettent en outre de comprendre et de présenter la finalité des multiples étapes de la chaîne opératoire.

La chaîne opératoire dont il va être question ici, se décompose en une succession d'étapes qui ont plusieurs finalités. La première est de transformer un fragment de métal carré en une forme ronde. La seconde est de garantir l'uniformité de certains critères morphologiques et métrologiques des objets produits alors qu'ils résultent d'une fabrication de masse. La discussion qui va suivre doit permettre de définir comment s'inscrit chacun des processus de mise en forme du monnayage au marteau, dans les objectifs globaux proposés.

1 - Découper les lames en carreaux

Après que les lames moulées aient été travaillées pour approcher l'épaisseur des monnaies fabriquées, elles sont découpées en carreaux. A ce stade de la chaîne opératoire, il n'y a pas encore d'exigences strictes concernant la masse des ébauches. Il est difficile, voire impossible de cisailler un objet massif en plusieurs fragments de poids uniforme défini *a priori* et, à plus forte raison, dans une production de masse. C'est pourquoi, l'objectif est de produire des carreaux de masse initialement excédentaire[789]. La *Relation de Me Henry Poullain...* est à ce sujet particulièrement explicite[790]. Le conseiller à la Cour des monnaies relève que l'ouvrier chargé de cette découpe, pèse chaque ébauche qu'il produit par rapport à un poids de référence. Celui-ci est au fort de l'espèce, c'est-à-dire plus lourd que les monnaies fabriquées. Un tel contrôle tout au long des cisaillages facilite la production d'objets de masse uniforme. La précision obtenue n'est cependant pas

[789] « affez pres du poids duquel doit eftre la monnoye..., ».
Estienne H., *Project du livre intitulé..., op. cit.*, p. 106.
[790] Poullain H., Relation de Me Henry Poullain..., *op. cit.*, p. 329.

équivalente aux attentes imposées par les règlements monétaires. La masse étalon utilisée marque la volonté réelle de ne pas se placer au niveau de la limite réglementaire durant cette opération. C'est en imposant une masse initialement plus importante qu'il est ensuite possible de rectifier les carreaux individuellement lors de l'ajustage.

Dans le *corpus* de La Rochelle, l'étude du monnayage de cuivre a mis en évidence un important *corpus* de carreaux ayant justement été préparés au fort de l'espèce[791]. Ils ont tous été découverts dans la même unité stratigraphique[792]. L'écart constaté ne correspond pas à une découpe mal maîtrisée puisqu'il se mesure à l'échelle d'un grand nombre d'échantillons. Ces derniers qui ont été associés à une fabrication de deniers tournois de cuivre pesant théoriquement 1,57 g, dépassent cette limite réglementaire[793]. La répartition moyenne de la population excédentaire s'organise plutôt autour de 2,2 g. Ceux-ci auraient donc dû être ensuite ajustés jusqu'à la masse légale.

Le second point qu'il faut aborder porte sur l'outil utilisé pour découper les lames en carreaux et par la suite les ajuster. Les sources monétaires s'accordent sur l'emploi de cisailles[794]. C'est encore H. Poullain qui propose une description très précise de l'outil utilisé dans l'atelier monétaire de Paris en 1617. Il s'agit de « grandes cisoires attachées au-dessus d'un pilier de bois [...], sellé en plastre dans terre... » [795]. La taille importante de l'objet fait référence aux bras de levier qui doivent permettre de découper des épaisseurs relativement importantes de métal. A titre d'exemple, certains carreaux et déchets de coupe de La Rochelle, dont les morphologies trahissent l'emploi d'un tel instrument, mesurent plus de 3 mm d'épaisseur[796].

Une méthode alternative consisterait à recourir à un ciseau à métal, c'est-à-dire un seul tranchant utilisé avec un marteau. Toutefois, les cisailles sont préférables à l'emploi d'un tel outil car elles sont plus simples et rapides d'utilisation. Ces deux caractéristiques sont très intéressantes dans la mesure où les découpes interviennent ici dans une production de série. L'opération d'ajustage des ébauches

[791] cf. Etude du monnayage de cuivre de La Rochelle, p. 365.
[792] Il s'agit des carreaux découverts dans l'unité stratigraphique 3009.
[793] Duplessy J., *Les monnaies françaises..., op. cit.*, t. 2, p. 139.
[794] Poullain H., Relation de Me Henry Poullain..., *op. cit.*, p. 329.
Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 82.
[795] Poullain H., Relation de Me Henry Poullain..., *op. cit.*, p. 329.
[796] Références : 2020-04, 3009-16c, 1045-01, 3000-05, 3009-14.

gagne particulièrement à utiliser des cisailles puisqu'elle met en œuvre un rognage progressif des fragments de métal, chaque découpe étant suivie d'une pesée.

Certains carreaux découverts à La Rochelle présentent encore des bords de coupe suffisamment nets pour que les morphologies observées puissent renseigner sur la méthode de coupe en vigueur dans cet atelier.

Certaines ébauches montrent des profils de découpe très caractéristiques de l'utilisation de cisailles. Il s'agit de bords en double biseau dont la symétrie augmente avec l'épaisseur des fragments de métal découpés (Figure 165 b et Figure 166 b). Cependant, d'autres profils apparaissent à première vue moins distinctifs. Ils ne sont pas biseautés. A l'inverse, ils sont presque droits (Figure 166 a). Le carreau d'argent de figure 165, met par ailleurs en évidence non pas une coupe droite mais une cassure droite. Le plus surprenant est que des morphologies de coupes différentes soient observables sur un même échantillon. Faut-il voir dans ces variétés l'utilisation de deux outils distincts ? L'exemple du carreau d'argent est particulièrement significatif puisque les deux faciès de découpe sont associés à des opérations de finalités différentes. Les bords droits cassés correspondent à la coupe de la lame quant aux profils en double biseau, ils sont en relation avec l'ajustage du carreau obtenu. Dans ce cas, un premier outil aurait été employé pour la préparation des ébauches et un second pour leur rectification.

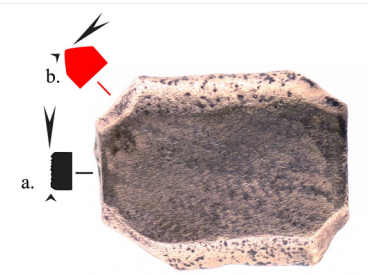


Figure 165 - Carreau d'argent épais. Bord de coupe droit en cassure et en double biseau (3009-14).

Figure 166 - Carreau de cuivre. Bord de coupe droit et en double biseau (3009-13-03).

Pour définir les instruments qui ont pu être employés, plusieurs essais de coupes ont été réalisés. Ils devaient notamment vérifier si le ciseau à métal bien que moins facile d'utilisation qu'une paire de cisailles justifiait les profils de coupe droits ou en cassure observés sur les carreaux de La Rochelle.

Comme la découpe à l'aide de cisailles, celle qui utilise un ciseau de métal produit des stigmates caractéristiques. Ils sont visibles sur les deux figures ci-dessous.

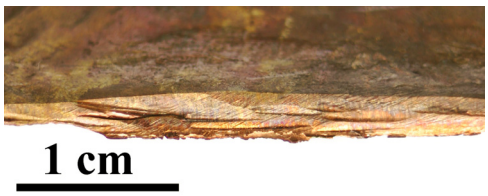


Figure 167 - Bord de coupe avec fracture (n° 06-01).

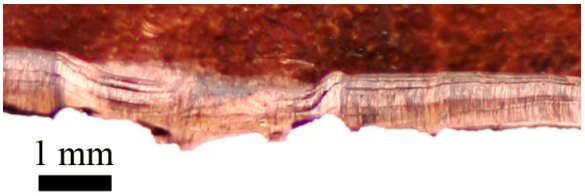


Figure 168 - Bord de coupe avec arrachement (n° 06-03).

Les premières traces propres à la coupe au ciseau à métal résultent du séquençage nécessaire de cette opération. Contrairement au cisaillage qui peut être continu tout le long de la découpe, l'utilisation du ciseau est progressive. Suivant la longueur à traiter, le métal est incisé petit à petit lors de chaque frappe du marteau sur l'outil tranchant. C'est pourquoi le profil de coupe n'est pas régulier (Figure 167). En outre, dans la mesure où ce procédé met en œuvre des frappes successives très localisées au niveau de la section, le métal se voit dans ce cas écroui et risque de se fissurer. Ceci justifie que certains profils de coupe expérimentaux montrent des faciès de rupture (Figure 167 et Figure 169) d'autant plus importants que la pièce tranchée est épaisse ou dure. Toutefois, la fracture intervient dans un second temps, après que l'alliage contraint ait été suffisamment écroui par les premières frappes incisives. D'un autre côté, lorsque l'alliage est relativement ductile, l'utilisation d'un ciseau produit un autre bord de coupe particulier. Lors de la dernière incision dont résulte la découpe, le métal contraint tend à s'étirer. La section présente finalement un faciès d'arrachement peu régulier (Figure 168).

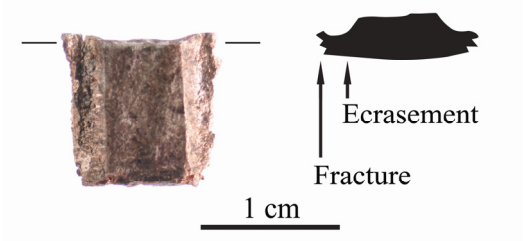


Figure 169- Carreau de bas billon découpé au ciseau à métal (n° 06-02).

Enfin, la dernière caractéristique des fragments métalliques coupés avec un ciseau est un écrasement observable sur la face opposée à celle où est appliqué l'outil (Figure 169). Il n'est pas surprenant puisque cette technique met en œuvre une percussion du métal avec un marteau, par l'intermédiaire de l'instrument

tranchant. La déformation entraînée est d'autant plus importante qu'il est indispensable de ne pas mettre en œuvre cette méthode directement sur le plat de l'enclume. Il faut choisir une surface moins dure, du bois par exemple. Celle-ci doit garantir que le tranchant de l'outil ne soit pas émoussé. Si une telle précaution n'était pas prise, le tranchant incisant le métal serait abimé lorsqu'il viendrait percuter l'enclume. Celle-ci le serait également, sa surface utile étant dégradée par les incisions.

Le bilan de ces essais de coupe au ciseau à métal permet d'exclure l'utilisation de cet outil à La Rochelle, du moins pour les échantillons présentés plus haut car ils ne montrent aucun des stigmates qui viennent d'être décrits. En revanche, ces expérimentations ont demandé de reconsidérer un autre ensemble de vestiges. Ils appartiennent par ailleurs à une même unité stratigraphique[797]. Il s'agit d'un lot de carreaux de laiton ayant subi des mises en forme après découpe mais qui présentent encore des marques qui caractérisent ces dernières[798]. Celles-ci sont encore particulièrement visibles sur l'échantillon de la figure ci-dessous où le faciès en arrachement du bord de coupe est particulièrement remarquable.

Figure 170 - Carreau découpé au ciseau à métal (1021-19).

Il apparaît que le ciseau à métal a été utilisé ponctuellement dans la fabrication monétaire de La Rochelle. Son emploi se limite toutefois à un monnayage particulier, composé d'alliages de laiton. En outre, le recours à cet outil de coupe n'est pas ici contraignant car il intervient pour fractionner des lames relativement fines[799]. De plus, elles sont peu larges, ce qui autorise *a priori* une découpe en un seul placement du tranchant. Bien qu'il soit certainement nécessaire de donner plusieurs coups de marteau, l'outil n'a pas besoin d'être déplacé comme il devrait l'être s'il s'agissait d'une découpe de lame dans une plaque.

[797] Unité stratigraphique 1021.
[798] Ils ont comme références : 1021-15, 1021-16, 1021-17, 1021-18, 1021-19, 1021-20, 1021-29.
[799] L'épaisseur des carreaux considérés ne dépasse pas 1,6 mm.

Finalement, les expériences ont dû être poursuivies pour comprendre la variété précédemment constatée des profils qui n'est pas expliquée par l'utilisation d'un ciseau. Il est rapidement apparu que celle-ci n'est en définitive pas liée à l'emploi d'instruments distincts[800].

Les différences résultent de la forme initiale de l'objet découpé et non de la méthode choisie pour y parvenir. En considérant le carreau de cuivre présenté sur la figure 166, les expériences ont mis en évidence qu'une première coupe a produit le profil droit (a) et que la coupe en biseau est intervenue dans un second temps. En observant en détail le faciès (a), il apparaît qu'il se décompose comme la coupe biseautée, selon deux arêtes dont l'une est cependant très légèrement marquée. C'est cette configuration qui donne une impression de coupe droite. Le fragment de métal cisaillé était beaucoup plus massif lors de la première coupe que lors de la seconde. Il s'agit ici d'une séquence de cisaillage qui a d'abord prélevé une lame dans une plaque de métal relativement large et rigide. L'ébauche obtenue a ensuite été détaillée en carreaux (Figure 171). De la moins grande largeur de la lame ici fragmentée, résultent de plus grandes déformations des morceaux d'alliage sectionnés. Ils se voient déformés lors de l'opération comme l'indique le profil courbé associé, visible sur le profil (a) de la figure 166. De même, le faciès en biseau déjà présent mais peu marqué lors de la première découpe, est exagéré lors de la seconde.

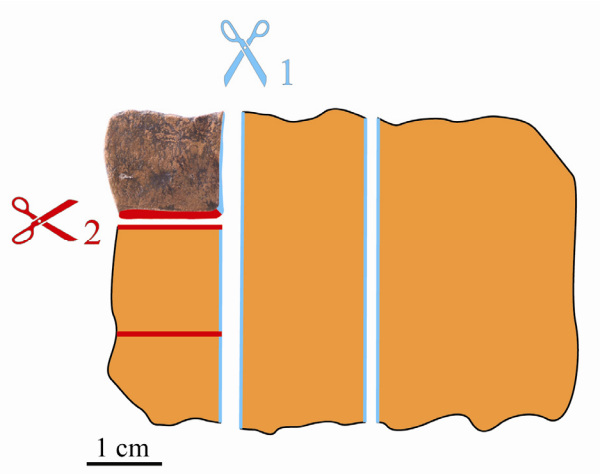


Figure 171 - Séquence de coupe[801].

Les expérimentations rendent également compte du fait que l'arête la plus large lors d'une découpe à la cisaille, résulte de l'action du couteau mobile. Même

[800] Référence d'expérimentations : n° 06-A.
[801] Référence : 3009-13-03.

si le bras fixé dans le sol présente un tranchant équivalent à celui du bras mobile, il n'y a jamais une symétrie des deux facettes du biseau de découpe (Figure 166).

Pour le carreau d'alliage d'argent (Figure 165), le principe est identique. La section initiale est celle qui a produit le faciès fracturé lors du cisaillage de la lame. Un début de découpe en biseau très limité est finalement observable des deux côtés du bord de coupe. La rupture doit être associée à l'épaisseur importante de la découpe[802] ainsi qu'à la composition de l'alliage. En revanche, les opérations d'ajustage n'ont pas produit de fracture puisqu'elles n'ont prélevé que de petits fragments. Ces derniers sont par ailleurs moins épais que la lame dans la mesure où les bords de cette dernière présentent un biseau hérité de son moulage.

En définitive, des cisailles ont été effectivement utilisées à La Rochelle. Quant aux différents profils de coupe observés évoquant l'utilisation de plusieurs outils sur certains échantillons, ils sont associés à la morphologie initiale de la pièce fragmentée et les faciès permettent de comprendre le séquençage du processus de découpe. D'un autre côté, le *corpus* rochelais a mis en évidence l'emploi en parallèle d'un ciseau à métal pour un monnayage particulier. Cette alternative n'est décrite dans aucune source monétaire, certainement parce qu'elle est dans une production de masse, moins simple que l'utilisation de cisailles. Ici, c'est notamment la morphologie des lames considérées qui n'a pas interdit le recours à cet outil particulier.

2 - Battre et ajuster les carreaux

Après avoir été découpés, les carreaux sont battus avant d'être ajustés à leur masse réglementaire. Au cours de cette opération, les ébauches sont martelées individuellement à plat sur l'enclume. Dans sa description du procédé H. Poullain souligne l'importance de cette étape dans la qualité finale des monnaies[803]. Cette remarque se comprend à condition de la prendre en compte avec l'étape d'ajustage qui suit. La conjugaison de ces deux opérations donne un premier arrondi aux ébauches qui doivent devenir des flans.

Le battage des carreaux permet de passer d'une morphologie initiale avec des côtés rectilignes (Figure 172), à une seconde avec des arêtes courbes (Figure 173). Contrairement à ce qui a été préalablement décrit pour l'amincissement de la lame lors de sa mise en forme, le principe n'est pas ici de pincer le métal. Il faut l'écraser globalement à coups de marteau présentant une surface parallèle à celle

[802] Le carreau est épais de 3 mm.

[803] « les flans ou espèces sur lesquels on ouvre ne portans jamais bien quand ils sont mal assis et mal frapez. ».
Poullain H., Relation de Me Henry Poullain..., *op. cit.*, p. 329.

de l'enclume sur laquelle sont déposés les carreaux. Dans cette configuration, le métal est contraint de se déformer dans toutes les directions.

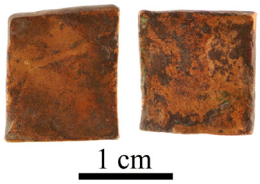


Figure 172 - Carreaux brut de découpe[804].

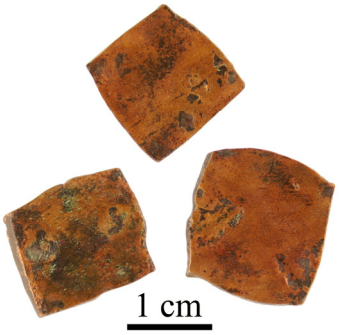


Figure 173 - Carreaux battus[805].

Après avoir été battus les carreaux sont ajustés. Ils sont rognés progressivement avec des cisailles afin d'approcher la masse réglementaire des monnaies fabriquées[806]. Cependant, cette opération a également pour finalité de donner une forme plus arrondie aux carreaux[807]. Ainsi, ce sont les coins de ces derniers qui sont exclusivement éliminés[808].

La frappe des carreaux avant un tel ajustage permet d'obtenir, une fois cette opération de découpe effectuée, une forme arrondie plus simple à déformer pour la rapprocher du cercle presque parfait.

Au sein de l'atelier de La Rochelle, cette séquence de mise en forme a été respectée comme l'atteste notamment la morphologie des carreaux retrouvés dans l'unité stratigraphique 3009 et dont l'étude métrologique a montré qu'ils n'avaient pas encore été ajustés (Figure 173)[809]. D'autres carreaux bien qu'ayant été rectifiés montrent encore des stigmates résultant de leur frappe préparatoire (Figure 174 et Figure 175). Les bords de coupe résultant de l'élimination de leurs coins, sont

[804] Références : 3009-14l et 3009-14j.
[805] Références : 3009-13ay, 3009-13ba, 3009-13ax.
[806] « on les rendoit [les carreaux] ainsi du poids juste qu'ils doivent être, en les pesant avec les dénéraux, à mesure qu'on en couppoit, ce qu'on appelloit approcher quarreaux. ».
Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 82.
[807] « en les adjutant, elle a commencé à les arrondir. ».
De Thumery J., Epreuves contradictoires..., *op. cit.*, p. 341.
[808] « il en oste sur les pointes et carnes avec les cisoires..., ».
Poullain H., Relation de Me Henry Poullain..., *op. cit.*, p. 330.
« on en coupoit les pointes avec des cisoires..., ».
Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 82.
[809] cf. *supra*, p. 434.

droits alors que d'autres présentent les courbures caractéristiques de leur déformation préliminaire.

Figure 174 - Carreau d'argent battu et ajusté (1021-12).

Figure 175 - Carreau de billon battu et ajusté (1672-02-07).

Il apparaît pour l'instant que la chaîne opératoire mise en œuvre à La Rochelle est en accord avec le procédé réglementaire. D'autant que l'opération d'ajustage est l'une des étapes les plus importantes du point de vue de l'autorité émettrice puisqu'elle garantit la régularité de la masse des monnaies produites.

La collection de carreaux de l'unité stratigraphique 3009 explicitement battus mais dont la masse indique qu'ils n'ont pas encore été ajustés, offre la possibilité de quantifier une production de déchets de coupe résultant d'un monnayage de cuivre de La Rochelle. Il suffit pour cela de soustraire à leur masse, celle qu'ils auraient présentée après leur rectification, c'est-à-dire 1,57 g, correspondant à un denier tournois. En rapportant cette différence à leur masse initiale, il est possible d'évaluer la proportion de déchets produits (Figure 176).

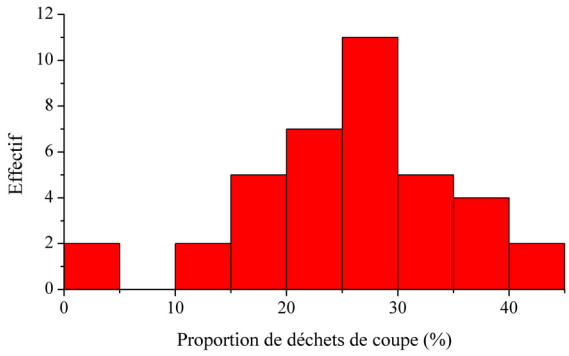


Figure 176 - Estimation des déchets de coupe résultant de l'ajustage des carreaux de deniers tournois de l'unité stratigraphique 3009[810].

[810] L'estimation des proportions de déchets ne prend en compte que les carreaux présentant une masse supérieure à 1,57 g et inférieure à 2,75 g. La limite haute a été posée précédemment (cf. Etude du monnayage de cuivre de La Rochelle, p. 365) comme séparant le *corpus* de carreaux de deniers et de doubles tournois. Finalement, l'histogramme prend en compte 38 carreaux.

La quantité de résidus de coupe qui aurait résulté de l'ajustage de ces carreaux de cuivre est en moyenne très supérieure à la limite normalement autorisée des 12,5 % puisqu'elle se situe autour de 25,7 %. Et bien que la présente estimation ne prenne pas en compte les remèdes de poids consentis dans toute fabrication monétaire, les valeurs relevées sont tout de même hautes. Dans ce cas, la contrainte imposée n'est pas respectée. Cependant ceci n'a pas d'incidence sur la qualité du monnayage du point du vue de l'autorité émettrice. La chaîne opératoire mise en évidence à La Rochelle impose que l'ajustage des carreaux soit une étape initiale de la chaîne de fabrication, garantissant ainsi la qualité métrologique du monnayage. Les échantillons associés au monnayage d'argent ne permettent pas de développer une discussion similaire. Il est impossible de savoir si cette production relativement importante de déchets était seulement tolérée pour les frappes de cuivre ou si elle l'était également pour celles des alliages plus précieux, comme cela a pu être constaté dans l'atelier de Bayonne[811].

3 - Flatir et rechausser les carreaux pour produire des flans

Une fois les carreaux ajustés à la masse légale du type monétaire fabriqué, le travail des ouvriers consiste à les transformer en flans. Il s'agit en définitive de transformer des fragments de métal qui ont initialement une forme globalement similaire, en objets finis les plus semblables possible. Ceci est notamment facilité par l'uniformité de la masse des carreaux ajustés qui définit un volume d'alliage commun à toutes les ébauches. C'est à partir de deux types de martelage que la forme à peu près octogonale des carreaux ajustés (Figure 174) est convertie en un disque standardisé.

Les ébauches sont soit rechaussées, c'est-à-dire frappées sur leur tranche, soit flaties par un martelage à plat sur l'enclume. Les déformations induites par ces opérations sont différentes. Elles n'ont en outre pas obligatoirement les mêmes finalités.

La première mise en forme à laquelle sont soumis les carreaux après avoir été ajustés, consiste à les maintenir en pile alors que l'on martèle leur tranche. Cette opération qui est par la suite renouvelée à plusieurs reprises a deux objectifs principaux. Le premier est prépondérant lors des premiers rechaussages. Il consiste à adoucir les angles que présentent les carreaux qui ne sont pas encore qualifiés de flans (Figure 174). A ce stade de la chaîne opératoire, il n'est plus envisageable d'éliminer les défauts de rotondité par cisaillage. Dans ce cas, le martelage constitue une alternative possible pour leur rectification. Toutefois, la mise en

[811] cf. *supra*, p. 419.

œuvre de ce raisonnement n'est pas aussi simple. La déformation du métal se fait avec une conservation du volume. La matière définissant l'irrégularité des carreaux n'est que déplacée. Lors d'un rechaussage, l'opérateur doit veiller à chasser le métal le long de la tranche sans créer de renflement sur les faces du flan. Bien qu'il soit possible d'effacer ces aspérités de la surface des ébauches par une frappe à plat sur l'enclume, la seule conséquence de cette opération sera de recréer l'angle préalablement martelé lors du rechaussage, par un déplacement inverse du métal. La solution permettant de minimiser la formation de renflements lors d'une frappe sur la tranche des carreaux consiste à les travailler en pile. Au cours du martelage de la tranche d'un carreau maintenu entre deux autres, le métal n'a pour seule liberté que de se déformer dans le sens de la tranche. Cependant, cette hypothèse suppose que les ébauches comprimées les unes aux autres aient des morphologies identiques.

Le but principal de l'ajustage étant de régler la masse des ébauches, le résultat final est que celles-ci ne sont que globalement uniformes. C'est pourquoi, H. Poullain relève que les ouvriers monétaires procèdent au tri de leurs carreaux avant de les rechausser afin de les travailler par taille[812]. Ce n'est qu'au cours des mises en forme progressives qu'elles vont devenir identiques. Les différents rechaussages des ébauches produisent tout de même des renflements de métal à leur surface. Toutefois, les défauts deviennent moins importants avec l'avancée dans la chaîne opératoire.

Figure 177 - Rechaussages expérimentaux (n° 08-A).

La figure ci-dessus illustre cette hypothèse à partir de reconstitutions expérimentales. Il est possible de constater la disparité de la morphologie des carreaux venant d'être ajustés (Figure 177 a). Après un premier rechaussage, des renflements ont pu se créer dans les vides laissés par certains échantillons moins

[812] « Avant de rechausser, l'ouvrier fait sont triage, [...] il met ses quarreaux triez, sçavoir les grands à part, les moyens à part et les petits à part. ».
Poullain H., Relation de Me Henry Poullain..., *op. cit.*, p. 330.

uniformes (Figure 177 b). A un stade plus avancé, l'uniformatisation des flans entraîne une diminution des défauts de surface (Figure 177 c).

Il n'est, dans ce cas, pas surprenant de mettre en évidence dans le *corpus* de La Rochelle des échantillons avec des renflements plus ou moins importants (Figure 178 a et b).

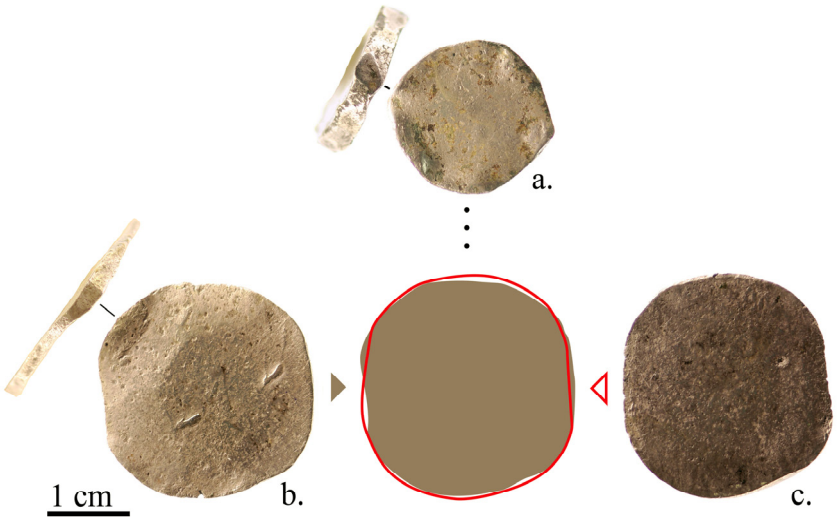


Figure 178 - Monnayage de quarts d'écu de La Rochelle à différents stades de mise en forme[813].

Une seconde condition doit toutefois être respectée pour éviter que l'opération de rechaussage ne produise trop de défauts sur les carreaux ou les flans concernés. Il est en effet nécessaire de les maintenir plaqués les uns aux autres avec force. Si la cohésion n'est pas garantie lors du martelage, celui-ci entraîne un fléchissement des ébauches. C'est pourquoi la pile travaillée est obligatoirement maintenue avec des tenailles désignées sous le terme d'estanques dans les sources monétaires[814].

L'utilisation d'un tel instrument à La Rochelle est attestée par la découverte de vestiges qui présentent des stigmates très caractéristiques[815]. L'un d'eux est illustré sur la figure 179.

[813] Références : a. 1045-01, b. 1021-03, c. 2010-03.
[814] *Id.*
Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 82.
[815] Références : 3009-14a et 3009-14b.

Figure 179 - Carreau présentant les stigmates de l'utilisation d'estanques (3009-14b).

Figure 180 - Carreau expérimental placé à l'extrémité de la pile lors d'un rechaussage (n° 08-14).

Il s'agit d'un carreau[816] associé au monnayage de cuivre qui a été rechaussé. Ses particularités morphologiques, il les tient de sa position dans la pile lors de cette opération. Il se trouvait en définitive à l'une des extrémités tenue par les estanques. Dans la mesure où sa place ne lui garantit pas un maintien lors des martelages, il a vu ses coins se déformer fortement. En outre, son contact avec l'un des deux mors des tenailles a laissé des marques profondes à sa surface (Figure 179). Des traces similaires ont d'ailleurs été obtenues lors de reconstitutions de cette étape de mise en forme (Figure 180). Compte tenu des stigmates observés, la pression exercée par le mors des pinces utilisées à La Rochelle, apparaît mieux répartie à la surface du carreau que lors des expérimentations. Les tenailles utilisées (Figure 177) ne permettaient qu'un maintien relativement ponctuel. L'intérêt d'employer un outil une avec aire de contact relativement importante se comprend en considérant qu'elle se substitue dans une certaine mesure au carreau qui n'est pas plaqué contre celui de l'extrémité de la pile pour maintenir ce dernier. Cependant, la morphologie de l'ébauche retrouvée montre que cette utilité n'est que relative.

Parallèlement au rechaussage, les carreaux sont flatis. A cette fin, ils sont battus à plat sur l'enclume. Au cours de cette opération, comme lors de la frappe des carreaux, c'est une déformation globale qui est recherchée. Ici, lors de la frappe, il faut présenter la panne du marteau parallèle au plat de l'enclume. Le métal se déforme uniformément autour du point d'impact. Cette opération a pour conséquence un arrondissement global. Les ébauches qui ont une forme octogonale après avoir été ajustée, ont naturellement tendance à évoluer vers un profil circulaire.

[816] Référence : 3009-14b.

Au cours de ce travail, les carreaux voient leur diamètre augmenter parallèlement à une diminution de leur épaisseur. Cette transformation est particulièrement visible sur la figure 178. Il s'agit de trois ébauches de masses similaires qui ont toutes été reliées par leur masse et leur titre en argent à un monnayage de quart d'écu[817]. Leurs morphologies différentes indiquent que la première d'entre elles (Figure 178 a) est à un stade de mise en forme moins avancé que les deux autres (Figure 178 b et c). Plus fines, ces dernières ont en revanche un diamètre plus important d'environ 26 mm, se rapprochant plus de celui du type monétaire fabriqué qui mesure près de 30 mm[818]. Cette différence avec la dimension finale indique également que les flans bien qu'avancés dans la chaîne opératoire, ne sont pas encore finalisés, ils présentent d'ailleurs encore quelques angles à leur périphérie.

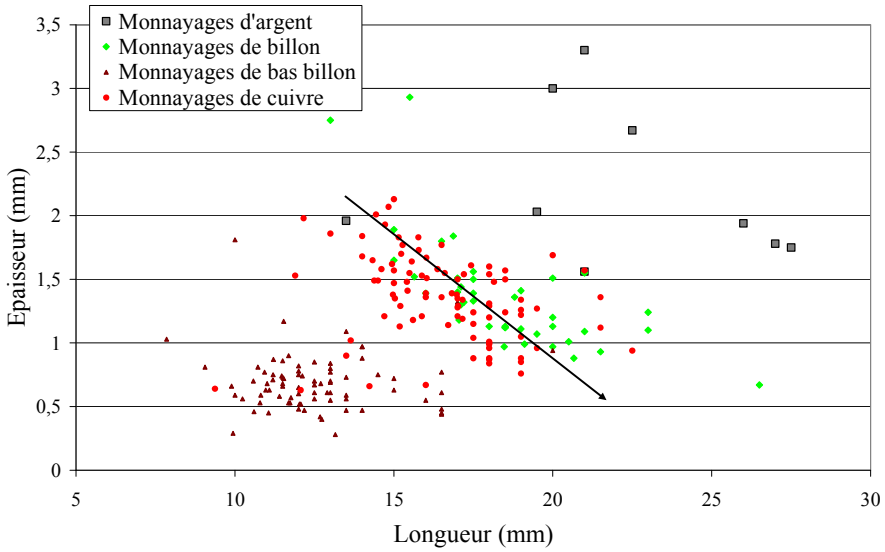


Figure 181 - Evolution de l'épaisseur des ébauches en cours de mise en forme en fonction de leur longueur selon les différents monnayages de La Rochelle[819].

La figure ci-dessus rend compte de l'évolution morphologique due aux mises en forme. La statistique des différents monnayages de La Rochelle définis précédemment permet de suivre la tendance à l'élargissement des longueurs et diamètres des flans compensée pas la diminution de leur épaisseur.

[817] cf. Les monnayages du XVI[e] siècle à La Rochelle : groupe A, p. 360.
[818] Duplessy J., *Les monnaies françaises..., op. cit.*, t. 2, p. 133.
[819] cf. Les monnayages du XVIe siècle à La Rochelle, p. 357.

D’un autre côté, l’un des vestiges de La Rochelle met en évidence une technique particulière pour flatir les ébauches. Il s’agit de l’un des flans de quart d’écu qui présente la marque de l’impact d’un coup de marteau. Celui-ci a été porté sur le plat de l’échantillon au niveau de sa périphérie (Figure 182).

Figure 182 - Martelage en bordure d'un flan de quart d'écu (2010-03).

Cette méthode est limitée à des monnayages particuliers. La taille des ébauches mises en forme devient ici un paramètre à prendre en compte. Un martelage aussi précis apparaît difficile à réaliser sur des carreaux trop petits. Ceux du monnayage de cuivre évoqué plus haut (Figure 172 et Figure 173), ne peuvent pas, par exemple, profiter d’une telle technique.

Le processus de transformation des carreaux en flans circulaires est progressif. Il est permis par la succession et le renouvellement de différents martelages. Les ordonnances monétaires fixent normalement le nombre de fois que les ébauches doivent être rechaussées et flaties[820]. Cependant, lors de l’épreuve de monnayage dont rendent compte H. Poullain et J. de Thumery, les monnayeurs ne les respectent pas. Ils mettent en œuvre moins d’opérations qu’ils ne devraient[821]. Il faut admettre que pour ces étapes de mise en forme, les ouvriers devaient être relativement libres, le but principal étant d’obtenir une forme arrondie dont le diamètre doit correspondre au type monétaire fabriqué. Dans ce cas, s’ils atteignent la forme réglementaire en ayant flati et réchaussé leurs ébauches qu’une seule fois, il est inutile de renouveler ces opérations même si les ordonnances le prévoient. Si tel était le cas, les nouvelles déformations engendrées n’auraient aucune autre finalité que de risquer de modifier la forme déjà achevée. D’un autre côté, si la forme circulaire recherchée n’est pas obtenue après le nombre d’étapes

[820] Brisson B. *et al.*, eds., *Les basiliques..., op. cit.*, p. 954.
Poullain H., Relation de Me Henry Poullain..., *op. cit.*, p. 330.
Mazerolle F., *Les médailleurs français..., op. cit.*, t. 1, p. 397.
[821] cf. Remarques sur la chaîne opératoire réglementaire du monnayage au marteau, p. 109.

imposées par les ordonnances, la mise en forme doit être tout de même poursuivie. Le travail des ouvriers est jugé sur l'aspect final des monnaies et non sur le nombre d'étapes de fabrication.

Le processus d'arrondissement est permis par un cycle au cours duquel les ébauches sont rechaussées et flaties. Il faut que celui-ci soit renouvelé jusqu'à atteindre le module final des monnaies fabriquées. L'étape durant laquelle les flans sont flatis pour la dernière fois, porte un nom particulier. Ils sont eslaizés[822]. Bien que dans sa mise en œuvre cette opération soit similaire à celle de flatir les flans, H. Poullain décrit un martelage moins appuyé. C'est en définitive la finalité de cette technique qui marque sa différence. Elle correspond à une phase de finition de l'élaboration des flans. Elle intervient pour les redresser après un rechaussage, rectifier la surface des ébauches qui présentent des marques de martelage ou des traces laissées par les mors des estanques.

Après avoir été rechaussés et flatis un certain nombre de fois, pour être finalement eslaizés, les flans produits ont par définition une forme arrondie. Au cours de ces mises en forme, les opérations de rechaussage qui sont en outre poursuivies dans la suite de la chaîne opératoire, voient leur finalité principale évoluer vers celle d'arrondir des fragments de métal, vers celle d'uniformiser la morphologie des flans produits. Cette conséquence intéressante de ce procédé est particulièrement visible sur la figure 178. Les deux flans de quart d'écu, b et c, ont des profils presque superposés. Une telle similitude ne peut être obtenue facilement en travaillant les ébauches individuellement, même en utilisant un modèle. Le martelage des ébauches maintenues en pile permet de corriger les défauts morphologiques propres à chaque flan par rapport à la moyenne globale. C'est pourquoi, cette opération est renouvelée jusqu'à la fin de la préparation des flans alors que leur arrondissement ne prend place qu'au début de la chaîne de fabrication.

4 - Bouer les flans

Avant de rendre leur brève, les ouvriers réalisent une dernière opération. Ils vont bouer leurs ébauches[823]. Au cours de leur préparation, ces dernières subissent des déformations qui vont modifier leur planéité. Or, un tel défaut est inesthétique

[822] Estienne H., *Project du livre intitulé..., op. cit.*, p. 106.
Poullain H., Relation de Me Henry Poullain..., *op. cit.*, p. 331.
De Thumery J., Epreuves contradictoires..., *op. cit.*, p. 341.
Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 82.
[823] Poullain H., Relation de Me Henry Poullain..., *op. cit.*, p. 331.
De Thumery J., Epreuves contradictoires..., *op. cit.*, p. 341.

pour des monnaies. Il faut au contraire qu'elles se touchent d'assiette. C'est ainsi selon H. Poullain que les espèces « se serrent et coulent aisément au compte et à la main. »[824].

En outre, la méthode nécessaire pour redresser les ébauches est particulière. A ce stade de la mise en forme, il n'est plus question de déformer les flans qui présentent leur morphologie finale. Dans ce cas, il ne faut pas que les coups de marteau qui doivent les redresser soient trop appuyés. Il en résulte que le point d'impact d'une telle frappe est limité. Si une ébauche est travaillée individuellement de cette manière sur le plat de l'enclume, la pression exercée n'est pas répartie sur l'ensemble de sa surface. Elle ne permet pas, des essais l'ont montré, le redressement global recherché. C'est pourquoi les flans sont boués en pile (Figure 183). Celle-ci est élevée sur l'enclume puis frappée avec un marteau relativement massif[825]. Cette technique garantit la répartition de la force de la frappe sur toute la surface des flans entraînant finalement leur redressement.

Figure 183 - Pile de flans avant et après avoir été bouée (n° 08-A).

Pourquoi le redressement des flans n'est-il pas réalisé lors de la frappe des monnaies ? Lors de cette ultime opération du monnayage, les flans sont placés individuellement entre deux matrices qui vont imprimer les motifs monétaires. Or, dans une telle configuration, les ébauches vont se trouver martelées entre deux surfaces qui permettent également de répartir la force de frappe sur toute la surface de la future pièce, comme lorsqu'elles sont bouées. Cependant, des essais effectués dans le cadre de cette étude, ont montré qu'il était indispensable que les flans soient parfaitement plans lorsqu'ils sont placés entre les coins. Si tel n'est pas le cas, il est difficile d'imprimer uniformément les motifs monétaires. Dans la mesure

[824] Poullain H., Relation de Me Henry Poullain..., *op. cit.*, p. 331.
[825] « en tenant à deux mains un gros marteau [...] frappe un coup sur ce bloc de flans entassez l'un sur l'autre..., ».
Ibidem, p. 331.

où les deux faces des matrices monétaires ne sont pas parallèles lors de la frappe, les empreintes risquent de n'être marquées que partiellement. Or, pour qu'une telle configuration soit possible, il est indispensable que le parallélisme soit défini avant le coup de marteau. C'est pourquoi, il est important que les flans soient préalablement boués. C'est leur planéité qui permet de placer correctement les coins monétaires l'un par rapport à l'autre pour garantir une impression régulière.

Dans le *corpus* archéologique, ce sont également les défauts résultant parfois de cette opération de mise en forme qui indiquent qu'elle a été pratiquée au sein de la fabrique de La Rochelle. Si un flan de la pile vient à être décalé par rapport au reste de la colonne, la pression de la frappe ne va être répartie que partiellement sur sa surface. Dans ce cas, l'ébauche contre laquelle il se trouve plaqué lui imprime son profil.

Figure 184 - Flans boués expérimentalement mettant en évidence un défaut potentiel de cette opération (n° 08-15).

C'est notamment ce que met en évidence la figure ci-dessus à partir de deux flans expérimentaux. Dans la mesure où de tels défauts sont préjudiciables à la qualité des monnaies produites, ils doivent être évités. C'est pourquoi, ils ne se rencontrent qu'en très peu d'exemples dans le *corpus* de La Rochelle (Figure 185 et Figure 186). Ils attestent cependant de la mise en œuvre de cette opération dans la fabrication rochelaise.

Figure 185 - Flan de billon présentant un défaut après avoir été boué (3068-05).

Figure 186 - Flan de bas billon présentant un défaut après avoir été boué (1071-02-01).

5 - Les traitements de recuit au cours de la préparation de flans

Dans la discussion qui a porté sur les opérations de martelage des lames, l'intérêt de décider de recuits réguliers a été démontré[826]. Ils permettent en particulier de relâcher les contraintes internes résultant du martelage des matériaux métalliques. Leur dureté est ainsi de nouveau diminuée. Les risques de fissuration sont réduits parallèlement à la facilité de mise en forme qui augmente. Dans le cadre de leur préparation, les flans se trouvent aussi contraints à la suite de martelages, ils nécessitent donc d'être recuits régulièrement. Selon les ordonnances monétaires, ces traitements thermiques doivent intervenir après chaque opération de martelage, c'est-à-dire une fois les ébauches flaties, eslaizées et bouées. De même, il est imposé que les carreaux battus soient recuits après avoir été ajustés[827]. Dans la relation de H. Poullain, les ouvriers bien que contraints par les mêmes règlements à réaliser un certain nombre de fois chaque opération du monnayage, ne respectent pas toutes les consignes[828]. En revanche, sur la question des recuits, les monétaires apparaissent beaucoup plus rigoureux, ils sont sur ce point en accord avec leurs ordonnances[829]. Cette constatation se justifie sur plusieurs plans. Dans un premier temps, ces traitements thermiques ne sont en aucun cas facultatifs. Ils ont une influence non négligeable sur la qualité du monnayage. De plus, la mise en œuvre de ces traitements n'est pas contraignante dans la mesure où elle s'inscrit dans une production de masse qui définit différentes étapes de préparation. Le moyen le plus simple d'organiser le travail est de diviser une production en plusieurs lots. Après avoir subi une opération, un ensemble est recuit avant la suivante, pendant le travail d'un second lot.

A La Rochelle, le traitement thermique des ébauches en cours de production a été mis en œuvre, comme l'atteste notamment un flan du monnayage de double tournois de cuivre[830]. Cet objet à un stade avancé de transformation, a subi de nombreux martelages. Or, l'observation de sa coupe métallographique (Figure 187) ne met en évidence aucune macle mécanique. En revanche, celle-ci révèle des structures qui sont les conséquences de deux modes de relaxation des contraintes

[826] cf. *supra*, p. 398.
[827] Brisson B. *et al.*, eds., *Les basiliques..., op. cit.*, p. 954.
Poullain H., Relation de Me Henry Poullain..., *op. cit.*, p. 330.
[828] « trois ouvriers et un monnoyer observèrent en cette espreuve de fabrication des monnoyes au marteau toutes les façons cy-dessus sans les répéter (alors qu'il y sont contraints)..., ».
Ibidem, p. 333.
[829] *Ibid.*, p. 330-333.
De Thumery J., Epreuves contradictoires..., *op. cit.*, p. 341-342.
[830] Il s'agit du flan 3009-13bi préparé et attaqué au perchlorure de fer selon le protocole présenté en Annexe F.

internes du matériau intervenant lors d'un recuit. Le premier est le maclage thermique qui intervient à l'intérieur des cristaux qui constituent le métal. Il est caractérisé par les larges bandes qui barrent les grains les plus gros.

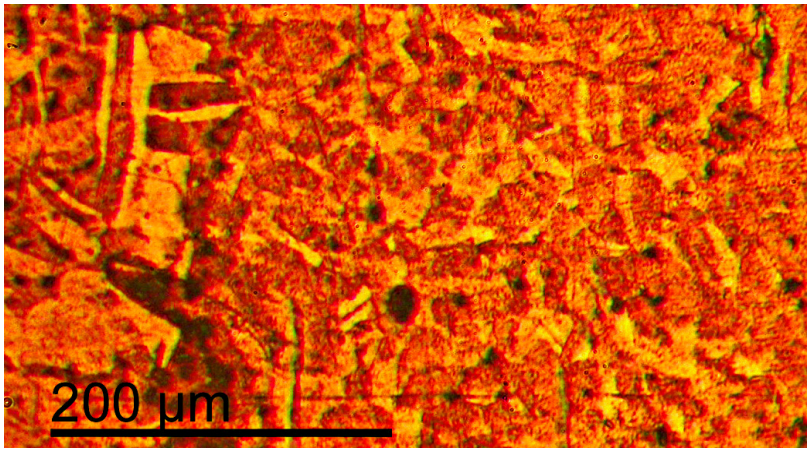


Figure 187 - Coupe métallographique, macles thermiques et grains de recristallisation (3009-13bi).

D'un autre côté, l'observation de morphologies granulaires permet d'appréhender un autre mode d'élimination des contraintes. En chauffant un matériau lors d'un recuit, il se produit à une certaine température, la formation de nouveaux grains sur des sites de germination. Ces derniers sont les défauts produits lors des déformations précédentes qui se seront concentrés aux joints de grains. C'est pourquoi, ils vont être les zones à partir desquelles vont grossir de nouveaux grains, au détriment de leurs voisins. Les nouvelles structures sont arrondies et incluses dans les anciennes qui ont des profils plus angulaires. De telles architectures sont observables dans l'échantillon présenté sur la figure 187 et semblent être concentrées dans des zones regroupant des grains de petite taille. Le grand nombre de nouveaux grains en formation est synonyme d'une forte proportion de sites de germination, c'est-à-dire d'un taux d'écrouissage local important. Une telle configuration a aussi pour conséquence une diminution de la température nécessaire à la recristallisation qui ne commence qu'à partir d'un certains palier. Il est donc possible qu'elle n'ait eu lieu que localement, les zones regroupant des grains plus gros n'ont pas bénéficié d'une température de recuit assez importante et ont alors relâché leur énergie par un maclage thermique principalement.

De même, dans le cadre du monnayage de billon, il sera vu plus loin, lors de l'étude des procédés de blanchiment, qu'un flan de La Rochelle révèle des

structures d'enrichissement superficiel en argent[831]. Or, il apparaît que cette dernière résulte de la mise en forme de cette ébauche et non de celle de la lame. Cette hypothèse est attestée par la structure métallographique d'un carreau qui de par sa composition, s'inscrit également dans ce monnayage et ne présente pas une structure riche en argent à sa surface[832]. Dans la mesure où la formation d'une telle couche n'est possible qu'avec la pratique de recuits durant la mise en forme[833], celle qui est observable sur le flan atteste qu'il a subi de tels traitements.

D'un autre côté, bien que la mise en œuvre de recuits ait pu être constatée dans le monnayage de La Rochelle, il est difficile d'assurer que de tels traitements ont été systématiquement décidés après chaque opération du monnayage, comme cela a été constaté lors de l'épreuve dont rendent compte H. Poullain et J. de Thumery[834]. Certains flans du *corpus*[835] exposent des fissures qui traduisent un travail trop important des ébauches (Figure 188 et Figure 189). Or, les recuits s'ils sont faits à temps doivent prévenir la formation de tels défauts lorsqu'ils ne sont pas amorcés par des faiblesses initiales du matériau.

Figure 188 - Carreau du monnayage de cuivre fissuré (1058-01).

Figure 189 - Flan du monnayage de bas billon (1018-02).

Ces dégradations sont d'autant plus caractéristiques qu'elles sont limitées aux monnayages de faible valeur, en cuivre (Figure 188) ou bas billon (Figure 189). *A priori*, ce ne sont pas seulement les propriétés mécaniques des alliages d'argent et de billon qui permettent de justifier une telle différence. A mise en forme identique, le cuivre qui est un métal très ductile et facile à travailler, n'est pas voué à subir plus de dommages. Or, c'est ce qui est observable dans le *corpus* rochelais. Il apparaît que le monétaires ont porté certainement plus de soins aux fabrications

[831] Flan 1029-01.
cf. Blanchiment des flans : Observations archéologiques, p. 461.
[832] Carreau 3078-11.
[833] cf. Blanchiment des flans : Proposition de mécanisme, p. 478.
[834] Poullain H., Relation de Me Henry Poullain..., *op. cit.*, p. 319-335.
De Thumery J., Epreuves contradictoires..., *op. cit.*, p. 335-345.
[835] Références : 1018-02, 1021-02, 1058-01, 1066-71_01, 3009-14d, 3074-5_3, 3078-02, 3078-03.

de monnaies fortes qu'aux plus faibles. Et c'est certainement par une pratique moins systématique des recuits pour ces dernières que se justifient les différences.

6 - Le monnayage de bas billon de La Rochelle

Lors de l'étude métrologique et analytique du *corpus* de La Rochelle, il a été possible de mettre en évidence un ensemble particulier de carreaux et de flans en cours de production[836]. Celui-ci définit une très grande homogénéité et a pu être associé à un monnayage de doubles et deniers tournois de bas billon. L'observation des ébauches, pourtant très nombreuses, que compte cette famille, ne permet pas de relever toutes les caractéristiques de mise en forme qui viennent d'être associées à la chaîne opératoire réglementaire de fabrication monétaire. En l'occurrence, cette collection est associée à un processus de production qui lui est propre.

Cette méthode de fabrication est beaucoup plus simple que celle qui devrait être normalement pratiquée. La figure ci-dessous illustre l'évolution morphologique des ébauches durant cette seule opération. Aucun des vestiges associés à ce monnayage ne rend compte d'ajustage par découpe des coins ni de rechaussage. D'ailleurs, l'absence d'étape de rectification de la masse de ces artefacts a été préalablement constatée puisque des flans dont la morphologie trahit un stade avancé de transformation présentent des masses relativement éloignées des attentes réglementaires.

Figure 190 - Evolution de la morphologie des carreaux de bas billon au cours de leur mise en forme[837].

[836] cf. Les monnayages du XVIe siècle à La Rochelle : groupe C, p. 363.
[837] Références par colonne de gauche à droite puis de haut en bas : 3078-13, 1067-08-40 ; 1067-08-07, 1067-08-10, 1067-08-03 ; 1071-02.02, 1067-08-06, 1067-08-05 ; 1071-02-04, 1072-01-02, 1067-08-23.

L'observation de la coupe métallographique d'un flan associé à ce monnayage est particulièrement significative[838]. Elle met en évidence une structure fibreuse d'écrouissage qui résulte de déformations très importantes du matériau. Dans ce procédé de mise en forme, les carreaux préalablement découpés dans une lame sont seulement flatis à plat sur l'enclume. Ils vont progressivement gagner en rondeur sans toutefois définir un cercle parfait. Cependant, un tel défaut n'est pas contraignant dans ce monnayage de faible valeur. Pour conforter cette hypothèse, il suffit de consulter le catalogue des monnaies royales publié par J. Duplessy. Le monnayage de bas billon est presque systématiquement associé à des morphologies similaires à celles constatées dans le *corpus* rochelais, et ce, dès les première frappes de ce type d'alliage jusqu'à ce qu'elles soient remplacées par l'utilisation du cuivre pur[839].

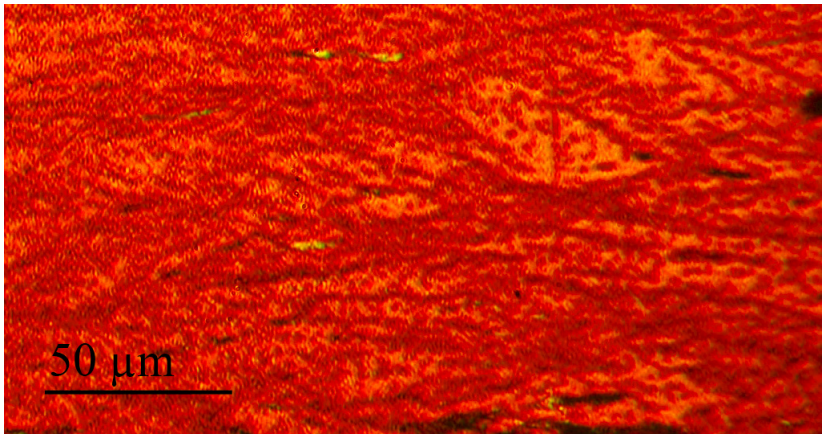


Figure 191 - Coupe métallographique mettant en évidence une structure fibreuse associée au monnayage de bas billon (1061-02).

Ce *corpus* conforte l'importance de bouer les flans avant leur frappe puisque cette opération est tout de même réalisée sur les ébauches de bas billon, comme l'atteste l'un des flans qui présente un défaut qui en résulte (Figure 186).

En définitive, la préparation des flans de ce monnayage de faible valeur se résume à quatre étapes : la découpe des carreaux qui sont flatis et boués avant d'être recuits. Ce traitement est particulièrement nécessaire dans cette chaîne opératoire compte tenu des fortes déformations mises en œuvre. Les risques de rupture lors de la frappe sont très importants.

---

[838] Il s'agit du flan 1061-02 préparé et attaqué au perchlorure de fer selon le protocole présenté en Annexe F.

[839] Duplessy J., *Les monnaies françaises..., op. cit.*, t. 1, p. 146-147, 150-152, 160, 179, 182, 199-200, 205, 226-227, 241-242, 257, 274-276, 299-300, 303.
Duplessy J., *Les monnaies françaises..., op. cit.*, t. 2, p. 42, 60, 62, 86-87, 118, 137-138.

7 - Bilan : l'épaisseur comme paramètre de réglage

D'un point de vue général, la chaîne opératoire de production des flans monétaires dans le cadre du monnayage au marteau de la fabrique de La Rochelle, est similaire au procédé réglementaire qui a pu être défini à partir de l'étude des sources monétaires. Les principales opérations relevées qui consistent à battre les carreaux, les ajuster, les rechausser, les flatir, les eslaizer et finalement les bouer, sont toutes illustrées par différents vestiges qui en présentent des stigmates caractéristiques.

De plus, la discussion proposée a permis de comprendre la finalité de ces étapes de préparation. Aucune n'est facultative dans l'obtention d'un monnayage de qualité, répondant à la fois au critère métrologique qui est la masse des flans produits mais également à des attentes concernant la rondeur et le diamètre de ces derniers. Ces deux derniers paramètres n'ont pas une importance seulement esthétique mais ils doivent aussi garantir que les monnaies ne soient pas rognées. Lorsque celles-ci sont parfaitement rondes, il est plus difficile de prélever une partie de leur métal tout en maintenant leur morphologie régulière. De même, si le diamètre des pièces est juste suffisant pour marquer toutes les figures monétaires, un rognage entraînant une dégradation des motifs devient facilement décelable.

Il faut par ailleurs rappeler que l'étude du *corpus* rochelais a également révélé certains particularismes associés à cet atelier. Néanmoins, les écarts les plus significatifs sont liés au monnayage de bas billon et sont *a priori* justifiés par la faible valeur des monnaies qui y sont associées. C'est notamment ce qu'atteste la mise en évidence de monnaies émises par d'autres fabriques françaises avec des morphologies similaires à celles observées parmi les flans de La Rochelle.

Dans le cadre des deux principales chaînes opératoires qui ont été relevées, l'épaisseur finale des monnaies n'apparaît pas comme une contrainte. Elle n'est d'ailleurs jamais définie comme telle dans les sources monétaires. Elle constitue ici au contraire, un paramètre de réglage. C'est notamment lorsque les flans sont flatis qu'ils gagnent progressivement leur profil arrondi. Plus ils ont la possibilité de se déformer, plus ils approchent du cercle parfait. C'est l'épaisseur initiale des ébauches qui permet de poursuivre leurs déformations puisque celles-ci se traduisent par une augmentation des diamètres, compensée par l'amincissement des flans. C'est en ce sens que l'épaisseur devient un paramètre de réglage. Lorsque J. Boizard indique que les carreaux doivent être découpés dans des lames d'une dimension avoisinant celle des espèces fabriquées, il reconnaît l'existence

d'une certaine liberté[840]. Ce sont les ouvriers monétaires qui, à force de mises en forme, vont déterminer la finesse initiale des carreaux qui garantit, suivant les différents martelages, l'obtention des morphologies circulaires recherchées.

Après avoir boué une dernière fois leur flans et avant qu'ils soient portés au blanchiment, les ouvriers rendent leur brève. C'est à cet instant que les gardes évaluent la production de déchets de coupe ainsi que la perte de métal des monétaires.

La caractérisation d'un monnayage de cuivre n'ayant pas encore été ajusté a permis de constater que dans le cadre de cette fabrication précise le quota de cisailles imposé par l'autorité émettrice n'aurait pas été respecté. Cependant, du point de vue de cette administration, cette observation n'est vraisemblablement pas grave dans la mesure où la chaîne opératoire globalement mise en œuvre garantit la qualité des monnaies produites. Cette hypothèse se comprend en particulier dans la mesure où l'opération d'ajustage se place à un stade préliminaire du processus de transformation.

[840] « les lames étoient étendues à peu près de l'épaisseur des espèces à fabriquer..., ».
Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 82.

III. Blanchiment des flans

Dans la fabrication monétaire, le blanchiment est la dernière opération que subissent les flans avant leur frappe pour devenir des monnaies[841]. Il s'agit d'un traitement chimique faisant intervenir une solution dans laquelle sont trempées les ébauches une fois mises en forme. Selon les textes monétaires, ce procédé doit en premier lieu éliminer les crasses et les oxydes qui auront été accumulés à la surface des flans lors de leur préparation. Cependant, les réactions en jeu ont également la propriété de mettre en évidence, lorsqu'il est présent, l'argent contenu dans les alliages travaillés. Grâce à un enrichissement de surface, les flans paraissent plus argentés que leur titre en métal blanc ne permet de l'espérer. C'est d'ailleurs cette conséquence esthétique qui a donné son nom au procédé.

En définitive, d'après la description qui en est faite, le blanchiment est en quelque sorte assimilé à une méthode d'argenture. Or, la littérature scientifique est riche d'études qui ont abordé cette question. Toutefois, le point de vue des différentes recherches exposées est difficilement transposable directement à la nôtre. Les articles considérés se classent selon deux principales catégories. Les premiers se bornent généralement à constituer un catalogue de nombreuses techniques d'argenture différentes à partir d'objets archéologiques qui n'ont souvent aucun lien entre eux[842]. De plus, c'est l'Antiquité qui semble intéresser préférentiellement leurs auteurs puisque les époques plus récentes sont moins souvent évoquées[843]. C'est finalement peut-être la méconnaissance des rares

[841] cf. *supra*, p. 96.

[842] Cope L. H., Surface-silvered ancient coins, *op. cit.*, p. 261-278.
King C. E. *et al.*, An analysis of some third-century Roman coins for surface silvering and silver percentage of their alloy content, *Archaeometry*, vol. 16, n° 2, 1974, p. 189-200.
La Niece S., Silvering, dans La Niece S. *et al.*, eds., *Metal plating and patination: cultural, technical and historical developments,* Oxford, Butterworth-Heinemann, 1993, p. 201-210.
Zwicker U. *et al.*, Roman techniques of manufacturing silver-plated coins, dans La Niece S. *et al.*, eds., *Metal plating and patination: cultural, technical and historical developments,* Londres, Angleterre, Butterworth-Heinemann, 1993, p. 223-246.
Anheuser K. *et al.*, Silver plating on Roman and Celtic coins from Britain, a technical study, *The British numismatic journal*, vol. 64, 1994, p. 22-32.
Giumlia-Mair A., Colouring treatments on ancient copper-alloys *La Revue de Métallurgie*, vol. 9, 2001, p. 767-776.
Anheuser K. *et al.*, Silver plating technology of the late 3 rd century Roman coinage, *Historical metallurgy*, vol. 36, 2002, p. 17-23.
Ingo G. M. *et al.*, Microchemical investigation of Greek and Roman silver and gold plated coins: coating techniques and corrosion mechanisms, *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, vol. V83, n° 4, 2006, p. 623-629.

[843] Giumlia-Mair A., Colouring treatments..., *op. cit* p. 767-776.

sources disponibles pour les époques considérées qui explique que les structures d'argentures étudiées soient principalement prises en compte par rapports aux mécanismes réactionnels potentiellement impliqués.

Le second type de recherches qui s'intéressent aux questions d'argenture est d'autant plus éloigné des procédés opératoires associés puisque les discussions ont pour but principal de décrire dans un premier temps les conséquences des couches superficielles d'argenture sur la qualité des analyses de surfaces. Elles proposent dans un second temps des protocoles permettant de s'en affranchir[844]. Un accent est parfois porté sur les origines chimiques des enrichissements superficiels en ne faisant toutefois que rarement référence aux textes anciens[845].

Finalement, les approches qui ne font référence qu'à une seule technique et qui s'appuient sur des données historiques ou un *corpus* archéologique cohérent sont peu nombreuses[846]. Au terme d'une première étude bibliographique, le blanchiment pratiqué dans les ateliers monétaires médiévaux n'apparaît explicitement que dans l'étude de G. Russo dont le propos est justement de discuter des techniques de monnayage des ateliers monétaires italiens au Moyen Age[847]. Certaines descriptions de pratiques indispensables à l'obtention de couches d'argenture apparaissaient comparables au procédé de blanchiment tel qu'en rendent compte les sources monétaires précédemment étudiées[848]. Avant de proposer un protocole d'étude de ce procédé médiéval, il était nécessaire de confronter le matériel de La Rochelle aux observations et interprétations disponibles dans la littérature qui vient d'être évoquée.

Ingo G. M. *et al.*, Combined use of surface and micro-analytical techniques for the study of ancient coins, *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, vol. 79, n° 2, 2004, p. 171-176.

[844] Condamin J. *et al.*, Etude de quelques problèmes analytiques propres aux monnaies antiques (Argent - Cuivre), *Revue Numismatique*, vol. 6, 1964, p. 69-89.
Condamin J. *et al.*, Changes suffered..., *op. cit.*, p. 49-66.
Zwicky-Sobczyk C. N. *et al.*, X-ray fluorescence and density measurements on surface-treated Roman silver coins, *Archaeometry*, vol. 39, n° 2, 1997, p. 393-405.
Klockenkämper R. *et al.*, Detection of near-surface silver enrichment on Roman imperial silver coins by X-ray spectral analysis, *Archaeometry*, vol. 41, n° 2, 1999, p. 311-322.
Linke R. *et al.*, Energy dispersive X-ray fluorescence analysis and electron probe microanalysis of medieval silver coins, *Mikrochim. Acta*, vol. 133, 2000, p. 165-170.
Beck L. *et al.*, Silver surface enrichment..., *op. cit.*, p. 153-162.

[845] Zwicky-Sobczyk C. N. *et al.*, X-ray fluorescence..., *op. cit.*, p. 393-405.
Beck L. *et al.*, Silver surface enrichment..., *op. cit.*, p. 153-162.

[846] Russo G., Sulla tecnica di produzione..., *op. cit.*, p. 167-181.
Deraisme A. *et al.*, A study of the silvering process of the Gallo-Roman coins forged during the third century AD, *Archaeometry*, vol. 48, n° 3, 2006, p. 469-480.

[847] Russo G., Sulla tecnica di produzione..., *op. cit.*, p. 167-181.

[848] cf. *supra*, p. 96.

A. Observations archéologiques

Dans le cadre de l'étude du *corpus* de La Rochelle, il est apparu lors de l'observation de la coupe d'un flan de billon que celui-ci présentait à sa surface une structure particulière (Figure 193)[849]. Sa comparaison avec l'âme de l'objet a rapidement mis en évidence qu'il s'agissait en fait d'une transformation locale de l'alliage. De telles caractéristiques ont suggéré dans un premier temps qu'elles pouvaient être les conséquences d'un traitement de blanchiment subi par cette ébauche.

D'un point de vue global, le flan dont il est question ici n'a pas un aspect argenté mais au contraire une couleur vert-foncé correspondant semble-t-il à celle d'une patine superficielle (Figure 192). Cependant, celle-ci résulte *a priori* de l'enfouissement du vestige.

Figure 192 - Flan de billon découvert à La Rochelle (1029-01).

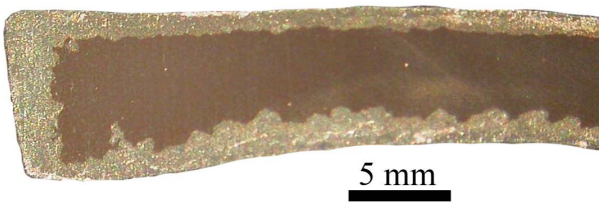


Figure 193 - Coupe métallographique d'un flan de billon découvert à La Rochelle (1029-01).

L'alliage qui compose son âme non transformée est identique à celui d'un carreau présenté plus haut[850]. Il s'agit d'un billon dont les éléments majeurs sont le cuivre et l'argent dans des proportions respectives de 68,8 % et 29,7 % massiques. Le plomb avec seulement 1,5 % est considéré comme un composé mineur. Sa structure métallographique est constituée de dendrites de solution solide de cuivre entourées d'une phase riche en argent[851]. La lecture du diagramme binaire argent-cuivre, permet de supposer que la première phase contient, par ailleurs, quelques pourcents d'argent[852]. La structure originelle de l'alliage est observable sur la figure ci-dessous (Figure 194 : Ame non transformée du flan).

C'est également à partir de cette figure qui représente la coupe métallographique de la proche surface du flan qu'il est maintenant possible de décrire l'organisation de la couche transformée.

[849] Echantillon 1029-01.
[850] cf. *supra*, p. 393.
[851] Il s'agit de la phase eutectique de composition : 71,9 % argent, 28,1 % cuivre.
[852] cf. Annexe G.

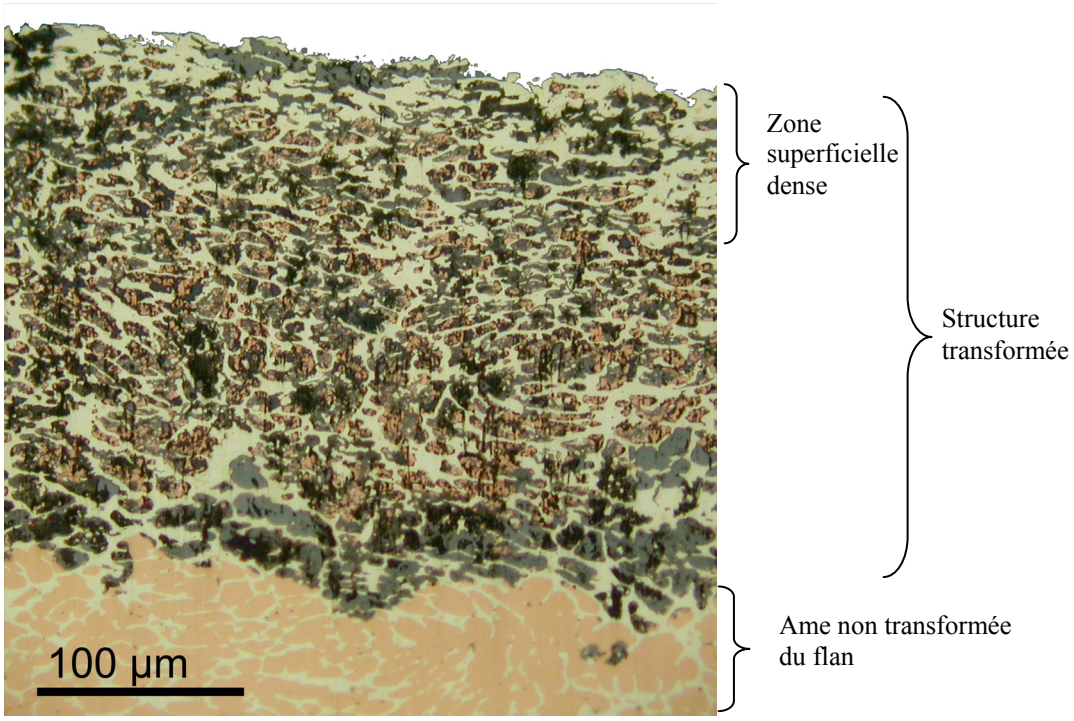


Figure 194 - Observation de la coupe du flan : structure d'alliage modifiée à la surface (Echantillon 1029-01, sans attaque métallographique).

Globalement, il apparaît que la structure de la zone modifiée dérive de celle de l'alliage utilisé. En effet, le réseau que forme la solution solide d'argent autour des dendrites cuivreuses est identique au cœur comme en périphérie du flan avec toutefois certaines exceptions discutées plus loin. La phase de solution solide de cuivre est en revanche très différente. Elle semble s'être partiellement transformée ou avoir laissé place à un composé qui présente une couleur gris-bleu en lumière naturelle, alors qu'à d'autres endroits l'espace apparaît vidé de son contenu. L'analyse par spectroscopie en dispersion d'énergie couplée à un microscope électronique à balayage, montre que la phase rémanente est effectivement composée de cuivre, mais également d'oxygène et de chlore (Figure 195). L'association du cuivre et de l'oxygène doit indiquer qu'il s'agit certainement d'oxydes[853]. Quant au chlore, il provient peut-être de la solution de blanchiment utilisée qui contient notamment du chlorure de sodium[854].

[853] Le ou les oxydes présents ne sont pas identifiés car il n'a pas été possible de réaliser une analyse par diffraction des rayons X.
[854] cf. *supra*, p. 98.

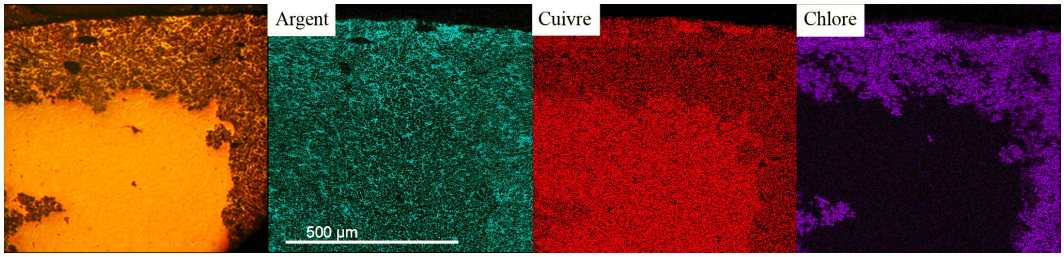


Figure 195 - Cartographie X mettant en évidence l'appauvrissement en cuivre dans la couche transformée ainsi que la présence de chlore (1029-01)[855].

Une observation plus fine de l'organisation de la couche superficielle rend compte d'une relative hétérogénéité structurale, illustrée par la figure 194. L'extrême périphérie de cette dernière apparaît localement plus dense que l'intérieur de la couche transformée mais également du cœur de l'alliage. Il faut certainement voir dans une telle organisation le résultat de plusieurs phénomènes.

Enfin, parallèlement à ce flan qui semble avoir été blanchi, l'étude métallographique exposée plus haut[856], d'un carreau de même composition globale et qui se place par définition à un stade préliminaire dans la chaîne de fabrication monétaire, révèle une structure superficielle différente. Bien que certaines cellules dendritiques cuivreuses présentent le même composé transformé, les zones affectées sont moins homogènes, moins épaisses et ne sont pas réparties sur toute la périphérie du carreau, comme c'est le cas pour le flan. Ces modifications localisées ne sont pas, dans ce cas, associées au procédé de blanchiment. Elles pourraient en revanche résulter d'un phénomène de corrosion durant l'enfouissement de l'objet.

Il apparaît que si le blanchiment des flans peut résulter d'un enrichissement superficiel en argent résultant d'une disparition ou du moins une transformation de la phase cuivreuse, il ne faut toutefois pas négliger les potentiels phénomènes de corrosion post enfouissement. A partir de cette première hypothèse générale, il est maintenant possible de reconsidérer les précédentes études des procédés d'argenture pour vérifier si elles n'éclairent pas le procédé médiéval.

[855] Images réalisées avec un microscope électronique à balayage en mode cartographie X. Chaque pixel de l'image est associé à une analyse de spectrométrie en dispersion d'énergie. L'intensité de la couleur correspondant à un élément représenté est proportionnelle à sa concentration.
cf. Annexe D.
[856] cf. *supra*, p. 393.

Blanchiment ou argenture de dévaluation

Finalement, c'est L. Cope qui le premier décrit et propose d'expliquer l'origine d'une structure similaire à celle du flan de La Rochelle[857]. Son approche est uniquement basée sur l'observation de coupes métallographiques de deniers romains. Il ne considère pas les descriptions de procédés anciens et présente les phénomènes d'enrichissement qu'il constate uniquement d'un point de vue réactionnel. C'est pourquoi, il est amené à baptiser cette technique, d'argenture de dévaluation[858] de l'argent puisqu'il l'associe à une diminution du titre en métal précieux dans les alliages monétaires argent-cuivre romains. De même, il tire ses hypothèses seulement de structures déjà organisées au sein des objets archéologiques. Il n'a pas envisagé une approche expérimentale. Toutefois, ses conclusions sont intéressantes pour comprendre le blanchiment, dans la mesure où certaines des opérations décrites par L. Cope se retrouvent dans la fabrication monétaire médiévale.

Dans les publications suivant cette première interprétation, les différents auteurs confrontés à des structures similaires dans leurs échantillons, ont repris cette théorie initiale en l'adaptant à leurs cas particuliers. Toutefois, une étude récente de L. Beck *et al.*, qui s'appuie sur des observations métallographiques d'échantillons expérimentaux d'alliages d'argent-cuivre solidifiés, confirme les hypothèses suggérées par certains auteurs quant à la participation des mécanismes de solidification d'un point de vue des ségrégations constatées[859]. Or, cette possibilité n'est pas considérée par L. Cope.

Avant de proposer un protocole afin de comprendre les phénomènes d'enrichissement appliqués au blanchiment médiéval, il faut rendre compte des différentes hypothèses de L. Cope, de L. Beck *et al.* :

- Le paramètre que n'a pas pu relever L. Cope dans son étude est celui d'un enrichissement initial résultant de la solidification de l'alliage argent-cuivre considéré[860]. Car s'il reconnaît que la structure de solidification de ce genre de

[857] Cope L. H., Surface-silvered ancient coins, *op. cit.*, p. 265-271.
[858] *Debased silver* et *much debased silver*.
Ibidem, p. 265-266.
[859] Smit Z. *et al.*, Elemental analysis of Celtic coins, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, vol. 3, n° 1-3, 1984, p. 416-418.
Weber G. *et al.*, Is the external beam PIXE method suitable for determining ancient silver artifact fineness?, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, vol. 161-163, 2000, p. 724-729.
Beck L. *et al.*, Silver surface enrichment..., *op. cit.*, p. 153-162.
[860] Smit Z. *et al.*, Elemental analysis of Celtic coins, *op. cit.*, p. 416-418.
Weber G. *et al.*, Is the external beam PIXE..., *op. cit.*, p. 724-729.

mélange est constituée à l'échelle microscopique de deux phases, l'une plus riche en cuivre et l'autre en argent, le fait qu'il ne considère que des échantillons déjà mis en forme, ne lui permet pas d'avoir conscience d'un possible enrichissement lors de la solidification. C'est grâce à leur approche expérimentale que L. Beck *et al.* ont pu constater que des alliages argent-cuivre présentaient initialement une couche superficielle enrichie en métal précieux[861]. Cependant, la méthode expérimentale retenue dans cette étude pour solidifier les alliages ne correspond pas à un procédé métallurgique courant, puisqu'une fois fondu dans un creuset, les mélanges ont été laissés à refroidir dans le four sans être coulés[862].

- Dans la chronologie des phénomènes dont résulte l'enrichissement proposé par L. Cope, celui-ci indique l'importance de porter à haute température les alliages qui doivent être argentés[863]. Ce traitement favorise l'oxydation de la phase cuivreuse. Cette hypothèse est également reprise par S. La Niece[864]. Toutefois, aucun de ces deux auteurs ne considère que cette opération peut être involontaire ou du moins indirecte et résulter des recuits qui interviennent notamment au cours de la mise en forme des alliages. C'est en particulier ce qu'il faut considérer dans le cas du blanchiment médiéval. Car bien que l'importance de traitements thermiques dans l'aspect final du blanchiment ne soit que très rarement suggérée dans les sources monétaires, ils sont de toute façon mis en œuvre lors des nombreux recuits nécessaires à la préparation[865].

- L'opération qui intervient ensuite dans cette chaîne opératoire réglementaire est finalement celle qui rappelle le plus le blanchiment médiéval. L. Cope indique la nécessité d'utiliser un acide pour dissoudre les oxydes préalablement formés[866]. Sans faire référence à des sources anciennes, il conclut que du vinaigre ou de l'acide citrique de fruits pourrait convenir à cette réaction. Cette hypothèse d'attaque acide est celle qui est le plus souvent reprise par la majorité des auteurs qui ont été confrontés aux structures d'enrichissement[867].

---

[861] Beck L. *et al.*, Silver surface enrichment..., *op. cit.*, p. 153-162.
[862] *Ibidem*, p. 155.
[863] Cope L. H., Surface-silvered ancient coins, *op. cit.*, p. 265-266.
[864] La Niece S., Silvering, *op. cit.*, p. 206.
[865] Anonyme, *Mémoire sur la fabrication..., op. cit.*, chapitres 5 et 9.
[866] Cope L. H., Surface-silvered ancient coins, *op. cit.*, p. 266-267.
[867] La Niece S., Silvering, *op. cit.*, p. 206.
Zwicky-Sobczyk C. N. *et al.*, X-ray fluorescence..., *op. cit.*, p. 396.
Horz G. *et al.*, The treasure of gold and silver artifacts from the Royal Tombs of Sipan, Peru - a study on the Moche metalworking techniques, *Materials Characterization*, vol. 45, n° 4-5, 2000, p. 407.
Giumlia-Mair A., Colouring treatments..., *op. cit.*, p. 770.

- Une fois la surface attaquée, il apparaît indispensable dans certains articles de brunir la surface afin de refermer les porosités laissées par la disparition superficielle de la phase cuivreuse[868]. L. Cope évoque également la possibilité que ce traitement final résulte d'une frappe à chaud des monnaies.

Bien que cette description théorique qui permet d'obtenir des structures d'enrichissement similaires à celle observées dans le flan de La Rochelle ne soit jamais mise en relation avec des procédés anciens, il apparaît qu'elle présente certains liens avec les descriptions du blanchiment médiéval. D'autant que des méthodes semblables ne sont pas seulement décrites dans des références monétaires. Pour la période antique par exemple, une recette du papyrus de Leyde souligne déjà l'intérêt de pratiquer des recuits nombreux avant de tremper les alliages cuivre-argent travaillés dans une solution acide de vinaigre, d'alun et de sel[869]. Pour le Moyen Age, Théophile décrit un procédé similaire pour améliorer un argent impur : « faites une préparation de lie claire et de sel, où vous éteindrez l'argent chaque fois que vous l'aurez recuit »[870]. Ces descriptions mettent en évidence des ingrédients similaires voire identiques à ceux du blanchiment monétaire et rendent compte explicitement de l'importance des traitements thermiques.

Dans son étude du monnayage médiéval italien, G. Russo décrit un traitement pour blanchir, qui, dès le premier quart du XIV^{e} siècle, utilise déjà un mélange de gravelle et de sel, comme en France. Il reconnaît à cette occasion des similitudes avec le mécanisme réactionnel proposé par L. Cope.

D'un autre côté, l'influence des phénomènes de corrosion ne doit pas être négligée. Cette possibilité est admise par L. Cope et par ailleurs décrite par de nombreux auteurs qui en ont constaté les conséquences dans le cadre d'études analytiques et métallographiques d'alliages à base d'argent[871]. En définitive, c'est

---

Giumlia-Mair A., On surface analysis and archaeometallurgy, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, vol. 239, n° 1-2, 2005, p. 41.

[868] Cope L. H., Surface-silvered ancient coins, *op. cit.*, p. 267-268.
La Niece S., Silvering, *op. cit.*, p. 206.
Giumlia-Mair A., Colouring treatments..., *op. cit.*, p. 770.
Giumlia-Mair A., On surface analysis..., *op. cit.*, p. 41.

[869] « Plus vous trempez en mettant au feu, plus il devient beau. ».
Halleux R., ed., *Les alchimistes grecs, tome I : Papyrus de Leyde - Papyrus de Stockholm - Recettes*, Paris, Les Belles Lettres, coll. « Collection des universités de France Série grecque », 1981, p. 88-89 et 171.

[870] Théophile *et al.*, *Essais sur divers arts..., op. cit.*, p. 145.

[871] Hall E. T., Surface-enrichment..., *op. cit.*, p. 62-66.
Condamin J. *et al.*, Etude de quelques..., *op. cit.*, p. 69-89.
Condamin J. *et al.*, Changes suffered..., *op. cit.*, p. 49-66.

peut-être la succession des procédés volontaires de mise en forme conjugués avec les transformations ayant eu lieu au cours de son enfouissement qui justifie l'hétérogénéité de la structure d'enrichissement préalablement constatée dans la coupe du flan de La Rochelle (Figure 194). Cette possibilité est notamment considérée par S. La Niece[872].

Finalement, ce compte rendu bibliographique montre que des transformations superficielles d'objets archéologiques à base d'alliages argent-cuivre ont été décrites dans de nombreuses études. Lorsqu'elles n'ont pas été associées à des réactions naturelles résultant de l'enfouissement des vestiges considérés, elles ont été reconnues comme volontairement mises en œuvre lors des étapes de fabrication. Une description d'une chaîne opératoire réglementaire à même été proposée. Cependant, les auteurs qui reconnaissent les qualités des mécanismes décrits, ne cherchent pas à les associer à des procédés anciens pouvant correspondre aux opérations nécessaires. De plus, ils ne construisent leur réflexion qu'à partir d'observations réalisées sur des objets finis dont les structures résultent en définitive de la somme des transformations subies. C'est d'ailleurs cette approche qui justifie que L. Cope n'ait pas pu considérer dans sa chaîne opératoire, l'importance potentielle des processus de solidification des alliages, tels qu'ils ont été décrits par L. Beck *et al.* à partir d'une étude expérimentale. Enfin, c'est également l'approche retenue qui interdit à ces chercheurs de discuter du temps de traitement, notamment dans la solution acide, pour obtenir une couche superficielle enrichie. C'est pourquoi, afin de vérifier dans quelle mesure le processus d'enrichissement des alliages argent-cuivre qui vient d'être présenté, est applicable à l'étape de blanchiment pratiquée dans le cadre du monnayage médiéval, il a été décidé de réaliser différentes expérimentations. Elles ont, en

---

Cope L. H., Surface-silvered ancient coins, *op. cit.*, p. 268-269.
Carter G. F., Reproducibility of X-ray fluorescence analyses of Septimius Severus denarii, *Archaeometry*, vol. 19, n° 1, 1977, p. 67-73.
Smit Z. *et al.*, Elemental analysis of Celtic coins, *op. cit.*, p. 416-418.
Brissaud I. *et al.*, Analysis of Gaulish coins by proton induced X-ray emission, synchrotron radiation X-ray fluorescence and neutron activation analysis, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, vol. 49, n° 1-4, 1990, p. 305-308.
Klockenkämper R. *et al.*, Detection of near-surface..., *op. cit.*, p. 311-320.
Linke R. *et al.*, Energy dispersive X-ray..., *op. cit.*, p. 165-170.
Linke R. *et al.*, The application of photon, electron and proton induced X-ray analysis for the identification and characterisation of medieval silver coins, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, vol. 226, n° 1-2, 2004, p. 172-178.
[872] La Niece S., Silvering, *op. cit.*, p. 206.

outre, été définies à partir des données rassemblées à partir des sources monétaires préalablement exposées.

B. Approche expérimentale

La description du procédé de blanchiment donnée dans les sources monétaires, assimile cette opération à un traitement chimique, puisqu'il consiste à tremper les flans qui ont été mis en forme dans une solution réactive : initialement, un mélange d'acides forts, remplacé par la suite par une solution aqueuse de gravelle et de sel de mer. Dans ce cas, la détermination des réactions chimiques impliquées dans la transformation recherchée doit permettre de comprendre la finalité des produits utilisés et des opérations à mettre en œuvre. Une telle démarche peut également apporter un éclairage sur la maîtrise de ce procédé par les ouvriers monétaires.

Dans une première approche, il a été décidé de considérer l'opération de blanchiment à la gravelle, notamment parce que les sources qui décrivent cette technique sont plus nombreuses et plus détaillées. Le procédé initial à l'eau forte qui utilise une solution d'acides forts, sera considéré dans un second temps car il présente en définitive plusieurs points communs avec celui qui lui a succédé.

Le protocole expérimental retenu pour mettre en évidence les mécanismes réactionnels du procédé de blanchiment est construit à partir de l'observation d'échantillons ayant subi ce traitement ainsi qu'à partir de l'analyse des réactifs utilisés et des produits formés. En outre, l'étude bibliographique suggérant que les structures d'enrichissement observées ne résultent pas seulement du traitement en solution mais aussi des opérations de mise en forme qui le précèdent, il a été décidé de produire des échantillons en reconstituant une chaîne opératoire similaire à celle d'une fabrication monétaire.

Enfin, puisque la littérature monétaire ne fournit pas d'indication sur le temps de traitement nécessaire au blanchiment des flans, il a été décidé d'observer les conséquences de la durée des réactions en solution sur l'épaisseur de la couche d'enrichissement. Il est par la suite envisageable de comparer les données archéologiques à ce référentiel expérimental pour supposer les temps de blanchiment retenus dans les fabriques monétaires.

1 - Préparation des échantillons

L'alliage retenu dans cette approche expérimentale est un binaire de cuivre et d'argent purs dans un rapport massique 71-29 %. Il s'agit d'un mélange du même type que celui mis en évidence dans le carreau et le flan découverts à La Rochelle, ce dernier présentant une structure d'enrichissement. Un tel choix autorise la confrontation des données archéologiques avec les observations expérimentales. De plus, des essais préliminaires prospectifs sur la plate-forme expérimentale de Melle ont permis d'obtenir des résultats intéressants d'un point de vue du blanchiment. Après une estimation de la masse de la lame coulée, l'alliage a été préparé à partir de 21,4 g de cuivre et 9,2 g d'argent.

La masse de cuivre est placée dans un creuset en graphite et portée à 1100 °C dans un four électrique de laboratoire. Lorsque le métal est fondu, l'argent est ajouté et fond rapidement puisqu'il a une température de fusion plus faible[873]. L'alliage est homogénéisé par mélange avec une baguette en bois. Puis il est coulé dans une lingotière de fer. Dans la mesure où ce protocole expérimental a été mis en œuvre dans un laboratoire, il était plus simple d'utiliser ce type de moule. Il faut noter cependant que l'orifice de coulée est restreint puisque la lame est obtenue verticalement et non horizontalement. La configuration est finalement à rapprocher de celle d'un moulage en sable. Le lingot obtenu a pour dimensions 6 cm x 1 cm x 0,4 cm (Figure 196). Des oxydes superficiels sont observables à l'extrémité de la forme, au niveau du trou de coulée définissant la seule interface entre l'alliage et l'air lors du refroidissement.

Figure 196 - Lame coulée en lingotière (n° 05-30).

La lame a été mise en forme par martelage et recuits, avec un marteau à panne plane sur une enclume. Les recuits ont été faits à 700 °C pendant 10 minutes dans un four électrique. Une telle température évite de brûler cet alliage qui est

[873] La température de fusion de l'argent pur est de 960,5 °C, celle du cuivre est de 1084,9 °C. Gale W. F. *et al.*, eds., *Smithells metals reference book*, *op. cit.*, p. **14**-10.

constitué d'une phase eutectique qui fond à partir de 779,1 °C[874]. Pour arrêter le recuit et permettre les nouveaux martelages, l'ébauche est trempée à l'eau. Il résulte de cette opération l'éjection de battitures de couleur rouge, noire et argentée qui se retrouvent dans le bain de trempe. Elles ont été qualifiées ainsi car les martelages de l'ébauche décollent les mêmes types de particules. Elles ont été prélevées pour être analysées. Finalement, la lame a été allongée selon quatre passes de martelage suivies de recuits.

Les dimensions finales de la lame sont de 9,94 cm x 1,85 cm x 0,16 cm. Elle est ensuite découpée au massicot pour obtenir les échantillons devant être blanchis selon différentes durées de traitement (Figure 199 b).

Afin de contrôler les conséquences possibles des recuits sur le processus d'enrichissement superficiel des échantillons, des prélèvements de métal ont été faits à plusieurs stades de la préparation, notamment juste après la coulée et le premier martelage, ainsi qu'après le dernier recuit. Il faut rappeler ici que dans la chaîne opératoire de fabrication monétaire, le blanchiment est toujours précédé d'un ultime recuit. Il élimine les dernières contraintes de mise en forme avant la frappe. Cependant, il ne doit pas être réalisé après le traitement en solution car l'une de ses finalités est entre autres d'éliminer également les dépôts superficiels carbonés voire d'oxydes résultant justement des recuits.

Figure 197 - Lame après le troisième recuit (a. n° 05-36), lame après le dernier martelage (b. n° 05-37).

Au cours de la mise en forme, il se produit un changement global de la couleur de la lame. Le lingot brut de coulée est de couleur cuivrée claire (Figure 196). A la sortie du four de recuit, les couleurs sont sombres. Il s'agit d'une couche superficielle qui disparaît en partie après la trempe, laissant apparaître une couleur

[874] cf. Annexe G.

qui se rapproche de celle de l'argent tout au long de la chaîne opératoire. La surface mate qui suit la trempe (Figure 197 : haut) devient brillante après martelage (Figure 197 : bas). Après le dernier recuit, les échantillons produits présentent une couleur rose très claire (Figure 199 a). Le blanchiment semble effectivement débuter durant la mise en forme.

2 - Protocole de blanchiment

A partir de la lame préalablement préparée, ont été découpés dix-huit échantillons prêts à être blanchis. Ils ont pu ensuite être traités en solution selon des durées différentes pour déterminer l'influence de ce paramètre sur la qualité du procédé d'argenture.

Le montage expérimental est simple. Il se compose d'un erlenmeyer surmonté d'une colonne réfrigérante. Il est placé sur une plaque chauffante qui permet une agitation magnétique.

Figure 198 - Montage expérimental de blanchiment.

Le mélange réactif est décrit dans les sources monétaires comme étant une solution de sel commun et de gravelle portée à ébullition. Pour l'expérience, il a été choisi d'utiliser de l'eau distillée, du chlorure de sodium pur. En revanche, la gravelle utilisée a été récupérée dans des fûts de vieillissement du vin à Cognac[875].

[875] Le choix de ce vignoble n'est fondé que sur des raisons pratiques.

Dans la mesure où il ne s'agissait pas d'un composé pur de laboratoire, un prélèvement de ce réactif a été analysé.

D'un autre côté, il était nécessaire de proposer dans quelles proportions devait être préparé le mélange. L'étude bibliographique a révélé que les sources monétaires pouvaient être très exhaustives sur certains points de cette question, alors qu'elles sont beaucoup moins précises sur d'autres[876]. D'une part, elles ne donnent pas le taux de dilution de la solution utilisée et d'autre part, en particulier dans le *Mémoire sur la fabrication des sols de billon...*, il est relevé un très grand nombre de rapports différents pratiqués dans les ateliers monétaires français[877]. L'un des paramètres qui décide des proportions entre réactifs est leur prix d'achat respectif. C'est pourquoi, dans le cadre de cette expérience, un rapport moyen déterminé à partir de l'ensemble des données disponibles a été choisi : une part de chlorure de sodium pour 1,14 part de gravelle[878]. Quant au rapport de dilution, il était plus simple de travailler avec une solution saturée maintenant une concentration constante des réactifs durant toute l'expérience[879].

La colonne réfrigérante permet d'assurer un volume constant du bain de traitement tout au long de la réaction qui s'est déroulée sur une semaine en continu. La solution à ébullition définit l'instant initial (t = 0), les échantillons sont alors introduits. Une agitation est maintenue grâce à un barreau aimanté. Il faut veiller à ce qu'elle ne soit pas trop puissante de manière à éviter une usure des analogues par friction. Le planning de prélèvement se présente ainsi :

Temps	Echantillons
t = 0	1
3 min	1
4 min	2
9 min	2
16 min	1
32 min	2

Temps	Echantillons
2 h	2
4 h	1
8 h	2
1 jour	1
2 jours	2
1 semaine	2

Chaque échantillon blanchi est ensuite lavé à l'eau distillée dans une cuve à ultrasons. Séchés, ils ont ensuite été préparés[880] pour observer leur coupe métallographique.

[876] cf. *supra*, p. 98.
[877] Anonyme, *Mémoire sur la fabrication..., op. cit.*, chapitre 9.
[878] cf. *supra*, p. 98.
[879] Ces choix ont été toutefois validés par des essais préliminaires afin de garantir l'efficacité du bain de traitement retenu.
[880] cf. Annexe F.

Afin d'appréhender la totalité des conditions expérimentales, la solution de blanchiment a été prélevée pour être analysée. Elle est d'une couleur bleue après l'expérience, ce qui trahit *a priori* une présence d'ions cuivriques. De même, les sels en équilibre avec cette solution après son refroidissement à température ambiante ont été échantillonnés.

3 - Résultats expérimentaux

D'un point de vue général, cette expérimentation a permis d'obtenir des échantillons blanchis. Les futures discussions peuvent dans ce cas s'appuyer sur des observations aux échelles macroscopique et microscopique des structures d'enrichissements potentiels, mais également sur l'analyse des réactifs et produits de réaction collectés.

a. Analyse des réactifs et des produits de réaction

Le protocole d'expérimentation mené en laboratoire a facilité l'échantillonnage des divers réactifs et produits associés à ce procédé de fabrication. La caractérisation des différents composés a imposé la mise en œuvre de différentes méthodes d'analyse. Les moyens utilisés sont l'analyse par diffraction des rayons X, la spectrométrie de fluorescence des rayons X ainsi que par analyse X en dispersion d'énergie couplée à un microscope électronique à balayage (EDS-MEB) pour les produits solides et la spectrométrie de masse couplée à un plasma inductif (ICP-MS) pour la solution de blanchiment.

Les premières analyses ont été réalisées sur l'un des réactifs. La solution de blanchiment étant composée de sel commun et de gravelle, seule cette dernière nécessitait d'être caractérisée car il s'agit, pour l'expérience, d'un composé prélevé dans des fûts de vieillissement de vin et dont la composition n'est pas connue précisément. Le sel commun a été remplacé par du chlorure de sodium de laboratoire, un produit pur.

La diffraction des rayons X ne caractérise que la phase cristallisée de la gravelle[881]. La phase organique non cristallisée aurait pu être par exemple déterminée par spectroscopie infra-rouge. Cependant, il a été supposé que s'agissant d'un dépôt prélevé, cette phase ne représente pas une grande partie du composé, celle-ci restant en solution. Le spectre de diffraction réalisé en macro faisceau au LECA[882] a montré que le produit étudié était particulièrement propre, c'est-à-dire composé de deux produits cristallisés seulement : le bitartrate de potassium ((HOOC-CHOH-CHOH-COO)K) et le bitartrate de calcium hydraté

[881] cf. Annexe C.
[882] Laboratoire d'Etude de la Corrosion Aqueuse, CEA de Saclay.

((OOC-CHOH-CHOH-COO)Ca, $4H_2O$)[883]. Bien qu'il ne soit pas possible de proposer une quantification, le rapport des intensités des pics suggère que le bitartrate de potassium est majoritaire. Cette hypothèse est confirmée par des analyses par EDS-MEB d'une pastille de gravelle avec des rapports molaires de 9 moles de potassium pour une de calcium, ce qui conduit finalement à un rapport équivalent entre les deux composés car ils sont mono-ioniques. Ces analyses rappellent les consignes données dans la littérature qui préconise l'emploi de tartre de Montpellier ou gravellé[884]. De plus, seul le bitartrate de potassium est réellement réactif, car il a une fonction acide.

La seconde série d'analyses a été menée sur les produits échantillonnés après la réaction. Le but de ces analyses était de mettre en évidence la dissolution partielle des métaux qui composent les flans, en particulier de constater l'existence d'une attaque préférentielle de la phase cuivreuse. C'est dans cette optique qu'il est particulièrement nécessaire de considérer les rapports cuivre-argent dans la solution de blanchiment ainsi que dans la phase solide en équilibre avec la solution. Celle-ci se compose *a priori* en majorité du mélange chlorure de sodium et gravelle qui n'a pas été dissout dans le bain de traitement saturé. Toutefois, il est tout de même envisageable que se soient formés des précipités.

La phase aqueuse a été analysée par ICP-MS au laboratoire Pierre Süe. Le tableau ci-dessous présente les résultats de trois analyses successives ainsi que la moyenne et l'écart-type correspondant à chaque élément caractérisé[885].

Analyses	Ti	Cu	Zn	As	Au	Ag	Pb
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
1	5,64	810	0,31	0,43	1,68	10,4	0,27
2	3,79	793	0,07	0,64	1,50	10,3	0,27
3	4,58	818	0,07	0,30	1,30	10,5	0,28
Moyenne	4,67	807	0,15	0,45	1,49	10,4	0,27
% écart-type	19,9	1,58	93,4	38,5	12,5	1,12	2,77

Tableau 6 - Analyse par ICP-MS de la solution de blanchiment.

Il apparaît qu'il y a 80 fois plus de cuivre que d'argent en solution. De plus, une petite quantité d'argent se solubilise, car, bien que faible, sa concentration est nettement supérieure à celle des autres métaux dosés. L'analyse en EDS-MEB des précipités extraits de cette solution, ne montre pas en revanche, la présence du

[883] Les spectres ont été traités avec le logiciel DIFFRAC^{plus} EVA et sont présentés en Annexe S.
[884] cf. *supra*, p. 98.
[885] Les valeurs multiples données pour certains éléments sont équivalentes. Pour doser un élément en spectrométrie de masse, il est possible de considérer indépendamment ses différents isotopes.

métal précieux qui aurait pu résulter de la précipitation de chlorure d'argent. Globalement, il y a effectivement une dissolution préférentielle de composés cuivreux dans le bain de blanchiment.

Enfin, les battitures récupérées lors de la mise en forme de la lame d'alliage argent-cuivre ont été analysées au laboratoire Pierre Süe, par diffraction des rayons X[886]. Elles sont composées d'argent métallique et d'oxydes de cuivre : un mélange de cuprite Cu_2O et de ténorite CuO. Ceci est notamment en accord avec la couleur des produits recueillis, le CuO étant noir et le Cu_2O rouge.

b. Observations macroscopiques et métallographiques

D'un point du vue macroscopique et sans avoir réalisé de coupe des échantillons, il semble qu'il n'y ait pas de différence de couleur entre les échantillons laissés seulement trois minutes dans la solution et ceux ayant été traités jusqu'à une semaine dans le bain. Globalement, ils ont tous évolué d'une coloration légèrement rosée vers une teinte grise argentée. Cependant, l'aspect mat s'oppose au brillant de l'argent métal. La figure 199 permet d'évaluer la différence et de constater l'invariance temporelle.

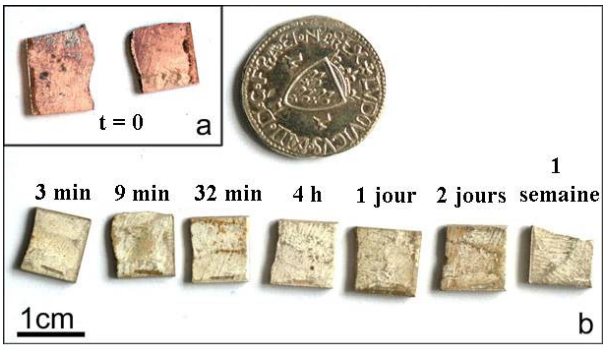


Figure 199 - Echantillons avant et après avoir été blanchis (la monnaie en argent permet de comparer la couleur et la brillance)[887].

Après avoir été indurés et polis, les échantillons prélevés au cours de la mise en forme de la lame mais également ceux blanchis selon différentes durées, ont été observés en coupe au microscope, sans attaque métallographique préliminaire. Le contraste des principales phases qui composent l'alliage argent-cuivre étudié est suffisant pour rendre compte de l'évolution des structures d'enrichissement qui intéressent cette étude.

[886] Les spectres ont été traités avec le logiciel DIFFRAC*plus* EVA et sont présentés en Annexe S.
[887] Références : n° 05-38 (t=0) ; 05-39 (3 min) ; 05-41 (9 min) ; 05-45 (32 min) ; 05-49 (4 h) ; 05-52 (1 j) ; 05-53 (2 j) ; 05-55 (1 semaine) ; 05-58 (flan argent).

Dans un premier temps, la considération du brut de coulée révèle une structure de solidification en accord avec celle que permet de proposer l'étude du diagramme de phase de l'alliage retenu[888]. Il est constitué d'un réseau de dendrites de solution solide de cuivre (Figure 200 A : rose), dans lequel s'est solidifiée en dernier la phase eutectique riche en argent (Figure 200 A : blanche). Contrairement à ce dont rend compte l'article de L. Beck *et al.*, la coupe observée ne met pas en évidence d'enrichissement superficiel initial[889]. Toutefois, la méthode de solidification retenue lors des expérimentations de cette publication, est éloignée des pratiques monétaires médiévales. En revanche, l'utilisation d'une lingotière dans l'expérience présentée ici devait justement garantir des similitudes avec les techniques du monnayage.

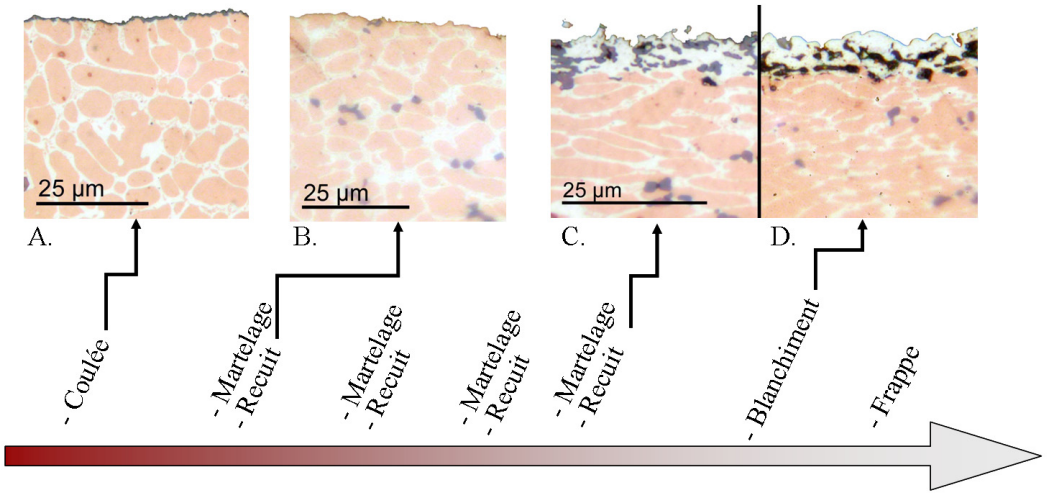


Figure 200 - Processus d'enrichissement superficiel résultant de la mise en forme et du blanchiment de l'alliage expérimental[890].

Enfin, l'échantillon est recouvert d'une très fine pellicule que les dosages en EDS-MEB permettent de qualifier d'oxydes de cuivre, sans doute les mêmes que ceux qui ont été caractérisés précédemment (Figure 200 A)[891]. Ce sont ces mêmes composés qui sont inclus dans la structure de l'alliage (Figure 200). Dans une discussion précédente, ils ont été associés à l'utilisation du four électrique pour réaliser les fontes[892]. Le milieu de chauffe qui n'est pas particulièrement réducteur favorise la formation d'oxydes par la suite incorporés à l'alliage lors de son

[888] cf. Annexe G.
[889] Beck L. *et al.*, Silver surface enrichment..., *op. cit.*, p. 153-162.
[890] Références des échantillons dans l'ordre de la chaîne opératoire : n° 05-30 ; 05-32 ; 05-38 ; 05-39.
[891] Il n'a pas été fait ici d'analyse par diffraction des rayons X.
cf. *supra*, p. 475.
[892] cf. *supra*, p. 376.

homogénéisation. Toutefois, ces inclusions ne sont pas particulièrement gênantes du point de vue du processus d'enrichissement.

En suivant la chaîne opératoire de mise en forme, l'échantillon ayant seulement subi un premier martelage présente de légères déformations internes mais ne révèle pas l'apparition d'une ségrégation particulière (Figure 200 B). Néanmoins, les oxydes formant une couche superficielle sur la lame brute de coulée ne sont plus visibles. Ils ont été éjectés durant le martelage comme en témoignent les battitures récupérées après ces opérations de mise en forme, certainement à cause de leur fragilité et de leur adhésion limitée.

Le dernier échantillonnage avant le blanchiment révèle un enrichissement en argent. La surface de l'échantillon présente une couche de solution solide d'argent, plus ou moins régulière, dans laquelle est incluse en quantité variable, une phase assimilable aux oxydes de cuivre précédemment évoqués (Figure 200 C).

L'augmentation de la quantité de métal précieux en surface est donc un processus qui commence à partir de la mise en forme et qui est terminé par l'action de la solution de blanchiment. Qu'en est-il des morphologies issues de ce traitement ? L'invariance temporelle constatée macroscopiquement, se confirme dans l'observation des coupes métallographiques des analogues expérimentaux. Bien que la couche superficielle ne puisse être homogène à l'échelle microscopique puisqu'elle résulte de martelages, il a été possible de mettre en évidence des épaisseurs de ségrégation comparables après les traitements en solution variant de trois minutes jusqu'à une semaine. La puissance maximale des structures ne dépasse cependant pas 15 µm d'épaisseur.

Il apparaît que le bain de blanchiment n'a pour seul effet que de dissoudre les oxydes de cuivre formés lors des étapes précédentes (Figure 200 D). Le faciès épuré présente une morphologie en éponge, très aérée et assimilable à celle observée sur l'échantillon de La Rochelle. Les différences portent sur son importance, plus épaisse archéologiquement et sur sa densité, plus dense expérimentalement. Quant à son uniformité, elle semble meilleure sur les objets historiques, car il existe des zones des analogues expérimentaux, où la couche enrichie paraît avoir été dégradée, montrant un relief très accidenté. Ceci explique sans doute la présence de paillettes d'argent métal dans les battitures[893].

[893] cf. Analyse des battitures, p. 475.

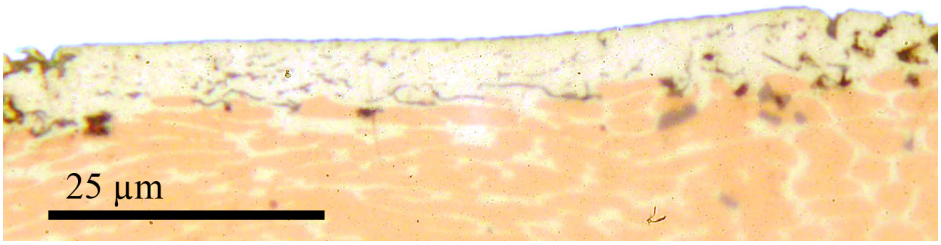


Figure 201 - Couche superficielle très dense d'enrichissement expérimental (n° 05-55).

L'argenture est à certains endroits, assez impressionnante lorsque l'on considère qu'elle n'existait pas avant la mise en forme, localement épaisse et totalement composée de solution solide d'argent (Figure 201). Il faut tout de même noter que ces densifications sont assez localisées et en moins grande proportion que les structures en éponge. Elles sont sans doute la manifestation du point d'impact direct du marteau, compactant localement le réseau argenté.

4 - Proposition de mécanisme

Les diverses expérimentations de reconstitution du traitement de blanchiment ont été concluantes car elles ont permis d'obtenir une argenture des échantillons. A partir d'observations menées sur ces objets et d'analyses des réactifs en jeu, il est maintenant possible de proposer un mécanisme des réactions impliquées.

Les premières réflexions développées s'appuyaient sur l'idée que le blanchiment était défini comme un traitement des flans par une solution aqueuse acidifiée par la présence de bitartrate de potassium[894]. Les hypothèses initiales suggéraient une corrosion préférentielle du cuivre par rapport à l'argent. Le moyen de vérifier cette supposition est de considérer les potentiels standards redox de ces deux métaux. Or, il apparaît que les divers couples redox faisant intervenir le cuivre et l'argent sont tous positifs[895], ils ne peuvent donc pas réagir avec les ions oxonium H_3O^+, de la solution[896]. De plus, en considérant les autres espèces en solution de traitement, tels que le potassium, le chlore, ou le sodium, il n'y a pas de réaction pouvant expliquer une attaque préférentielle du cuivre par rapport à l'argent. Or, l'observation des structures d'enrichissement des échantillons blanchis selon des temps différents, confirme cette hypothèse. Si le cuivre avait été

[894] Une telle solution saturée présente à 20 °C un pH de 3,5.
[895] A 25°C : $E°(Ag^+/Ag) = 0,7996$ V, $E°(Cu^+/Cu) = 0,522$ V, $E°(Cu^{2+}/Cu) = 0,3402$ V.
Weast R., ed., *Handbook of chemistry and physics*, 46th ed., Cleveland, The Chemical Rubber Co, 1966, p. D-76.
[896] A 25 °C : $E°(H^+/H_2) = 0$ V.
Ibidem, p. D-76.

préférentiellement dissout par rapport à l'argent, l'épaisseur de la couche d'enrichissement aurait augmenté proportionnellement à la durée du traitement en solution.

La considération des coupes métallographiques des échantillons de lames prélevés en cours de préparation révèle que le phénomène précurseur du procédé de blanchiment n'est pas une réaction aqueuse, mais qu'il s'agit d'une corrosion en phase sèche à haute température. Les transformations prépondérantes ne se produisent pas dans le bain de blanchiment, mais lors des traitements de recuit au cours de la mise en forme. En effet, les observations aux divers stades de préparation des échantillons ont montré la présence d'oxydes de cuivre que les analyses ont caractérisée comme étant un mélange de cuprite Cu_2O et de ténorite CuO[897]. Si l'argent est oxydé, il l'est en proportions négligeables.

La compréhension de cette transformation préférentielle doit être traitée d'un point de vue thermodynamique. Il faut pour cela utiliser l'approximation d'Ellingham[898] afin d'exprimer l'enthalpie libre standard de réaction des métaux et de leurs oxydes, ramenée à une mole de dioxygène. Leur représentation en portant la température sur l'axe des abscisses et l'enthalpie libre sur l'axe des ordonnées, permet d'obtenir un diagramme d'Ellingham. A partir de ce diagramme, il est notamment possible de comparer la stabilité des différents composés en fonction de la température. Les données nécessaires au calcul de l'enthalpie libre de réaction sont disponibles dans la littérature[899] :

Composé	**Cu**	**Cu_2O**	**CuO**	**Ag**	**Ag_2O**	**O_2**
$\Delta H°_{f,\,298}$ (kJ/mol)	0	-166,66	-155,2	0	-30,58	0
$S°_{298}$ (J/mol.K)	33,3	100,82	43,51	42,71	121,69	205,0

[897] cf. Analyse des battitures, p. 475.
[898] Les variations avec la température de l'enthalpie et l'entropie standard de réaction sont négligées
Rist A. *et al.*, *Equilibres thermodynamiques dans l'élaboration de la fonte et de l'acier*, n° M1730, Techniques de l'Ingénieur, 1974, 20 p.
[899] Weast R., ed., *Handbook of chemistry and physics*, *op. cit.*, p. D-41 et D-46.

A partir de ces valeurs, les enthalpies libres de formation des différents oxydes en fonction de la température, s'expriment selon les expressions :

$4Ag + O_2 <-> 2\ Ag_2O$

$$\Delta G°(T) = 2\Delta H°_{f,298}(Ag_2O) - T \times (2S°_{298}(Ag_2O) - 4S°_{298}(Ag) - S°_{298}(O_2))$$
$$\Delta G°(T) = -30{,}58 \times 2 - T \times (121{,}69.10^{-3} \times 2 - 42{,}71.10^{-3} \times 4 - 205.10^{-3})$$
$$\Delta G°(T) = -61{,}16 + 132{,}46.10^{-3} T$$

$4\ Cu + O_2 <-> 2\ Cu_2O$

$$\Delta G°(T) = 2\Delta H°_{f,298}(Cu_2O) - T \times (2S°_{298}(Cu_2O) - 4S°_{298}(Cu) - S°_{298}(O_2))$$
$$\Delta G°(T) = -166{,}66 \times 2 - T \times (100{,}82.10^{-3} \times 2 - 33{,}3.10^{-3} \times 4 - 205.10^{-3})$$
$$\Delta G°(T) = -333{,}32 + 136{,}56.10^{-3} T$$

$2\ Cu_2O + O_2 <-> 4\ CuO$

$$\Delta G°(T) = 4\Delta H°_{f,298}(CuO) - 2\Delta H°_{f,298}(Cu_2O) - T \times (4S°_{298}(CuO) - 2S°_{298}(Cu_2O) - S°_{298}(O_2))$$
$$\Delta G°(T) = (-155{,}2 \times 4 + 166.66 \times 2) - T \times (43{,}51.10^{-3} \times 4 - 100{,}82.10^{-3} \times 2 - 205.10^{-3})$$
$$\Delta G°(T) = -287{,}48 + 232{,}6.10^{-3} T$$

En posant des hypothèses sur l'atmosphère réactionnelle, ces expressions permettent de définir les domaines de stabilité des oxydes dépendant de la température. Il faut particulièrement discuter du milieu dans lequel sont réalisés les recuits car c'est aux hautes températures que les cinétiques de réaction sont les plus élevées.

Le four dans lequel a été recuite la lame après chaque martelage est électrique. L'atmosphère de la chambre de chauffe est dans ce cas identique à l'air ambiant. C'est pourquoi, il a été décidé de raisonner avec une pression partielle en dioxygène pO_2, égale à celle de l'air, soit pO_2=0,2 atm. Les gaz carbonés réducteurs tels que le monoxyde (CO) et le dioxyde de carbone (CO_2) sont en quantité négligeable. Cette hypothèse s'applique pour l'instant aux échantillons produits en laboratoire. Elle sera par la suite discutée à partir de résultats expérimentaux obtenus dans des conditions plus proches de celles qui ont été en vigueur dans les ateliers monétaires.

Il est maintenant possible de tracer le diagramme d'Ellingham du système considéré. Il représente les enthalpies libre de réaction $\Delta G°(T)$ des métaux ainsi que la droite de l'oxygène, -RTln(pO_2), en fonction de la température (Figure 202).

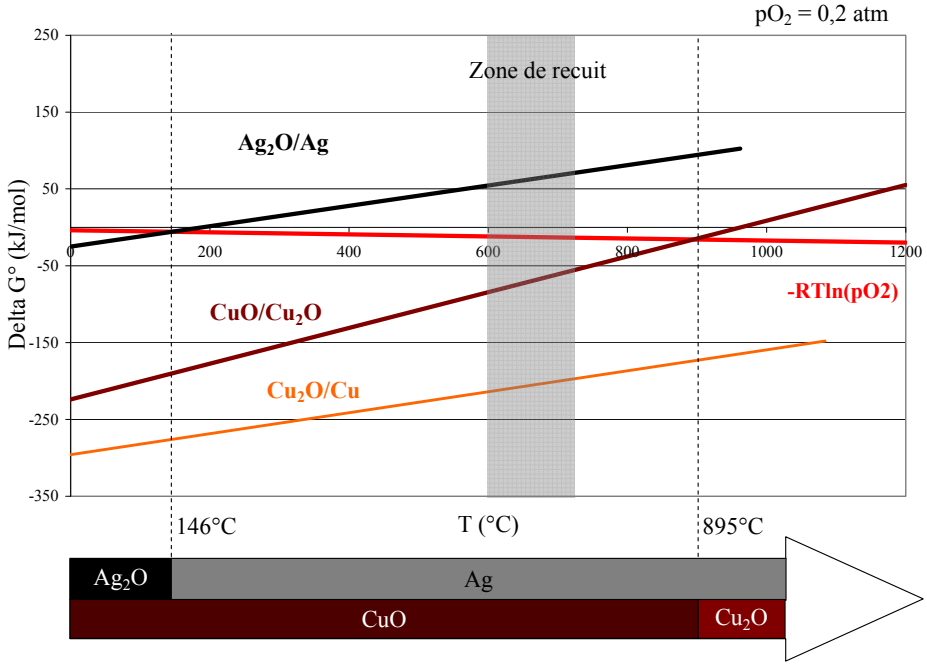


Figure 202 - Diagramme d'Ellingham du système avec mise en évidence des domaines de stabilité des composés en fonction de la température.

La droite du couple Ag_2O/Ag coupe celle du dioxygène à 146 °C alors que celle du couple Cu_2O/CuO la coupe à 895 °C. Cela signifie que dans les conditions supposées, au-dessus de 146°C, c'est l'argent métal qui est la forme stable. Oxydé à température ambiante, il est réduit à haute température. Cependant les cinétiques n'étant pas les mêmes, en considérant simplement la loi d'Arrhenius, les réactions sont plus rapides aux températures élevées. Il est possible de supposer que l'argent n'est pratiquement pas oxydé durant le processus de mise en forme et de blanchiment. Cette hypothèse est confirmée par les analyses des produits formés lors des expérimentations qui attestent de concentrations très faibles de métal précieux. Ce n'est en revanche pas le cas du cuivre.

Le diagramme montre que les formes stables qui se succèdent lors de la montée en température sont : le CuO jusqu'à 895 °C, puis le Cu_2O (Figure 202). Le cuivre métal se conserve à des températures beaucoup plus élevées, présentant alors une phase liquide, incompatible avec la mise en forme. Dans les conditions en jeu lors du travail de la matière, le système évolue vers l'oxydation du cuivre en CuO. Comme pour l'argent, cette évolution est négligeable à température ambiante, durant les martelages. En revanche, lors des traitements de recuits, elle

est accélérée et dans ce cas à prendre en compte. L'existence de Cu_2O et CuO dans les battitures est imposée par la thermodynamique[900]. Le diagramme d'Ellingham ci-dessus montre que l'oxyde cuivrique CuO est sous toutes conditions, instable en présence de cuivre. Pour des températures inférieures à 895 °C, le métal va d'abord s'oxyder en Cu_2O, composé intermédiaire instable aux températures considérées, pour ensuite se transformer en CuO qui est la forme stable.

Il apparaît qu'il existe en effet une corrosion préférentielle du cuivre par rapport à l'argent. Cependant, elle n'a finalement pas lieu dans le bain de blanchiment mais lors des recuits de mise en forme.

Cette hypothèse est-elle toujours valable dans le cadre des procédés du monnayage médiéval ? C'est notamment le milieu réactionnel des recuits qui peut varier dans la mesure où le four utilisé est chauffé au feu de bois[901]. En considérant le diagramme d'Ellingham, il apparaît qu'une variation de la pression partielle en dioxygène a pour seule conséquence le déplacement des domaines de stabilité suivant la température du milieu. La séquence de corrosion préférentielle du cuivre par rapport à l'argent, est en revanche conservée. Quant aux dégagements de gaz carbonés (CO, CO_2) qui pouvaient intervenir dans les foyers médiévaux à cause de la combustion du bois et des braises formées, ils peuvent être considérés comme très dilués et donc négligeables. Car les températures nécessaires aux recuits ne demandent pas d'enfouir son métal dans le charbon. Cette hypothèse est confirmée par la ressemblance des structures expérimentales obtenues dans un foyer au charbon et celles résultant de l'utilisation du four électrique. En définitive, les mécanismes réactionnels proposés à partir des échantillons de laboratoire sont transposables au processus du blanchiment utilisé dans les ateliers monétaires médiévaux.

Finalement, la fonction du bain de blanchiment est d'éliminer les oxydes de cuivre qui se sont préférentiellement formés durant les recuits qui sont intervenus durant la mise en forme de la lame. Il s'agit d'une réaction avec les ions hydroniums libérés par le bitartrate de potassium de la solution :

$$Cu_2O + 2\,H_3O^+ \longrightarrow 2\,Cu^+ + 3\,H_2O$$

$$CuO + 2\,H_3O^+ \longrightarrow Cu^{2+} + 3\,H_2O$$

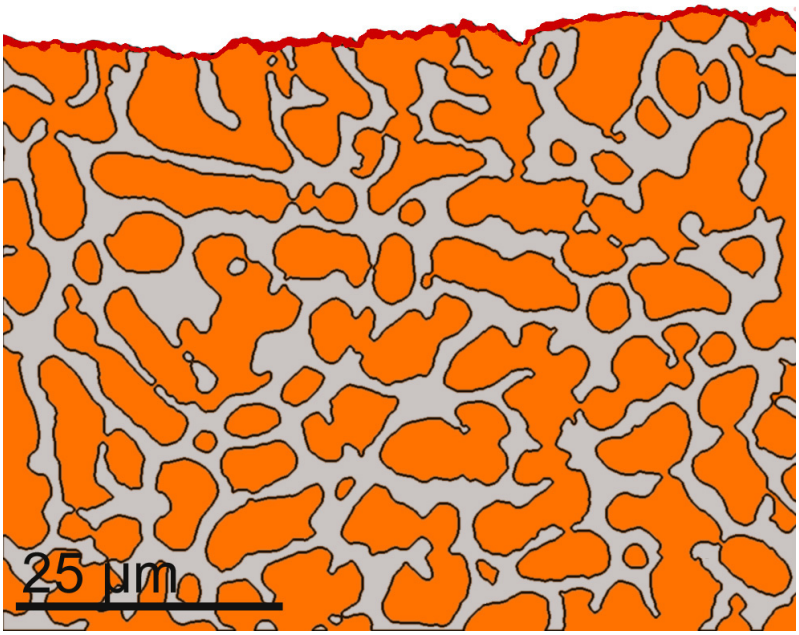
[900] Zhu Y. *et al.*, Oxidation mechanism of copper at 623-1073 K, *Materials Transactions*, vol. 43, n° 9, 2002, p. 2173-2176.
Mathis F., *Croissance et propriétés des couches d'oxydation et des patines à la surface d'alliages cuivreux d'intérêt archéologique ou artistique*, Thèse de doctorat de Sciences des matériaux - Métallurgie de l'Université de Paris-Sud, U.F.R. scientifique d'Orsay, Paris, 2005, p. 62-63.
[901] cf. *supra*, p. 86.

Le mécanisme global qui décrit la séquence d'enrichissement dont résulte le blanchiment des alliages monétaires argent-cuivre se présente ainsi :

Légende :

- Phase eutectique riche en argent
- Solution solide riche en cuivre
- Oxydes de cuivre

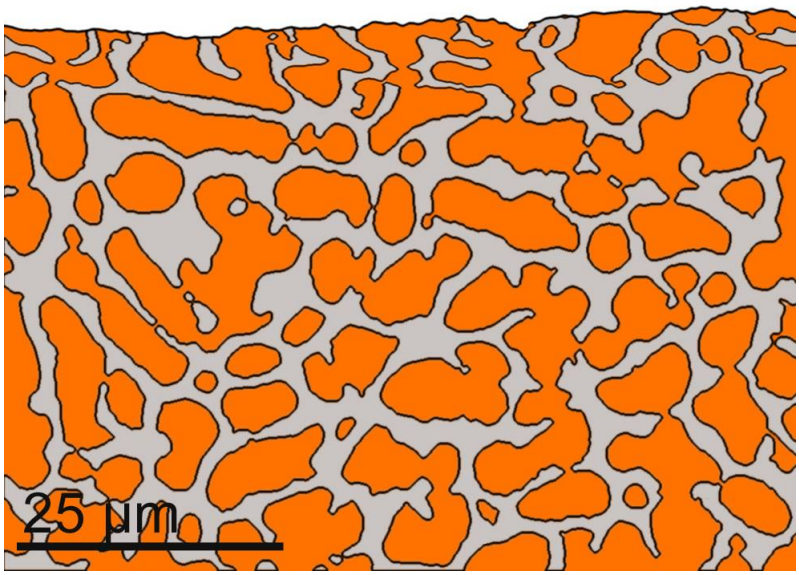
Structure brute de coulée



Après avoir été coulé, l'alliage présente une structure de solidification qui ne met pas en évidence un enrichissement superficiel initial. En revanche, l'alliage est tout de même globalement hétérogène à l'échelle microscopique avec une phase cuivreuse et une seconde riche en argent.

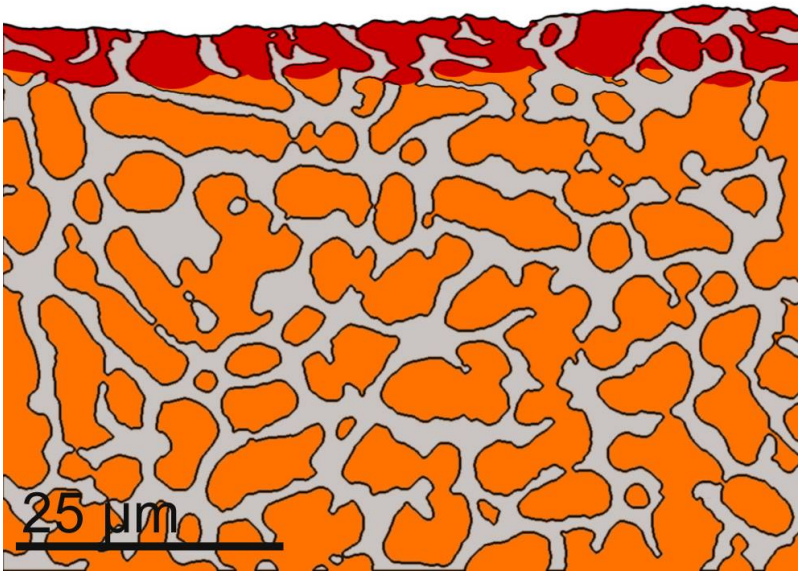
Lors du refroidissement après la coulée, il est possible que se forme une fine couche d'oxydes de cuivre à la surface du lingot. Cependant, celle-ci n'a pas d'incidence sur le processus d'enrichissement.

Premier martelage



A la suite d'un premier martelage, les oxydes superficiels, plus fragiles que le métal sont brisés. Ainsi divisés, ils peuvent aussi se détacher. A cet instant du processus de mise en forme, il n'y a aucun phénomène précurseur de l'enrichissement recherché. Il n'y a qu'une légère déformation du réseau dendritique.

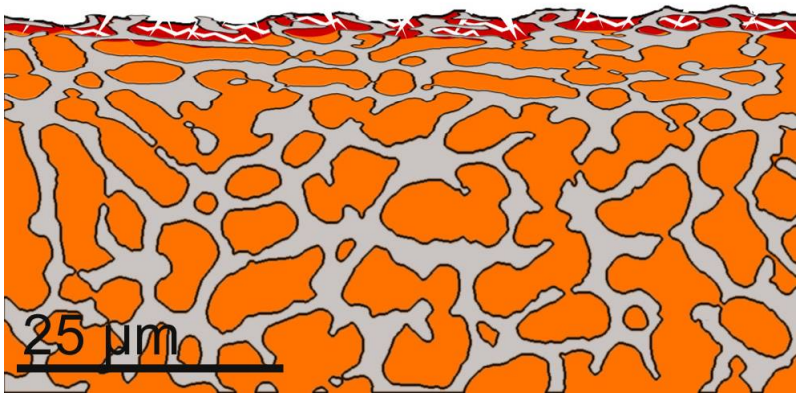
Premier recuit



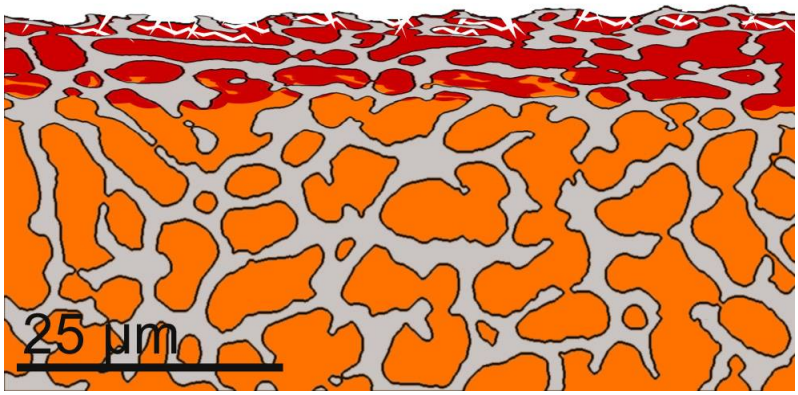
Lors du premier recuit, le milieu de réaction et la température mis en œuvre accélèrent l'oxydation de la phase cuivreuse. Les dendrites de solution solide de

cuivre qui se trouvent à la surface de l'échantillon vont commencer à être oxydées en Cu_2O, composé intermédiaire instable, pour ensuite se transformer en CuO. L'épaisseur de cette couche d'oxydes croît depuis la surface de l'échantillon vers l'intérieur de celui-ci. Le dioxygène nécessaire à la réaction doit, dans ce cas, arriver par un phénomène diffusif dans une zone de plus en plus profonde. Ceci suppose que la cinétique de la réaction d'oxydation soit de moins en moins rapide. L'épaisseur finale de la couche transformée dépend du temps de traitement mais également de la température du recuit. Elle augmente parallèlement à ces paramètres.

Martelages et recuits supplémentaires

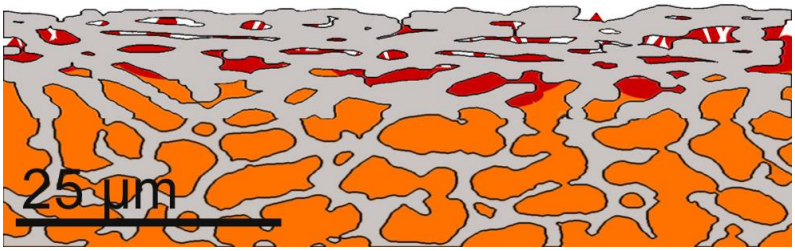


Durant les martelages suivants, les oxydes seront à nouveau fracturés. De plus, les produits formés étant plus durs que l'alliage travaillé, ils vont être déplacés vers la surface et éjectés, selon un phénomène comparable à celui mis en jeu lors du cinglage du fer pour éliminer les inclusions. L'argent qui persiste superficiellement, au cours des séries de martelages, forme une pellicule plus ou moins compacte selon les déformations subies.



Lors des recuits, le cuivre peut à nouveau s'oxyder. La cinétique des réactions est relativement importante juste après les martelages puisque ces derniers ont éliminé une partie des oxydes formés lors des précédents recuits. La couche transformée, que le dioxygène doit traverser pour arriver à la zone de réaction, est initialement moins épaisse. De plus, cette dernière aura été fracturée facilitant davantage le passage du gaz oxydant. Toutefois, la vitesse du processus va diminuer progressivement pour plusieurs raisons. La première est celle évoquée précédemment et résulte de l'augmentation de la puissance de la couche d'oxydes néoformés à traverser. La seconde est due à la fermeture des fissures créées lors des martelages. Comme la cuprite et la ténorite ont des rapports de Pilling-Bedworth[902] respectifs de 1,67 et 1,59, ces oxydes occupent une fois formés, un volume plus important que celui du cuivre[903]. Dans ce cas, il résulte que l'expansion de ces composés au sein du réseau de solution solide d'argent, provoque des contraintes internes et la fermeture des fractures nécessaires au passage du dioxygène vers la zone de réaction.

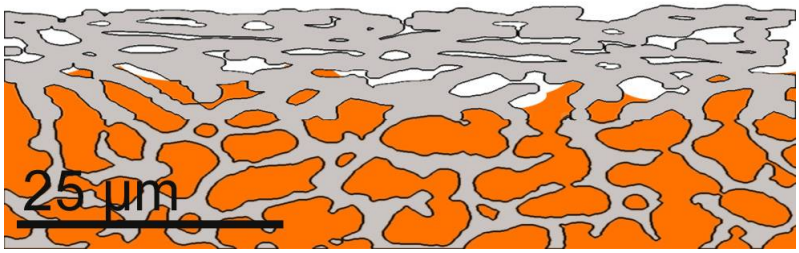
Structure avant le traitement de blanchiment



Lorsque l'alliage préparé va être blanchi, il présente une couche superficielle enrichie d'une phase riche en argent dans laquelle se trouvent inclus des oxydes de cuivre. Le recuit qui intervient avant le traitement en solution permet d'augmenter une dernière fois l'épaisseur de la couche oxydée. L'enrichissement obtenu à la fin de cette séquence a déjà acquis sa puissance définitive. Elle dépend du nombre de passes de martelages et de recuits, mais également de la durée et de la température de ces derniers. Elle n'augmentera plus lors des opérations ultérieures.

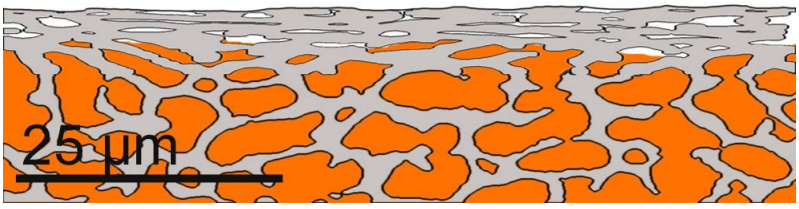
[902] Rapport entre le volume de l'oxyde formé et le volume du métal qui a été nécessaire pour sa formation.
[903] Mellottee H., *Combustion des métaux, prévention et lutte*, n° M580, Techniques de l'Ingénieur, 1978, p. 3.

Structure après le traitement de blanchiment



Globalement l'enrichissement observé précédemment n'est pas modifié. Le bain acide de gravelle et de chlorure de sodium élimine seulement les oxydes de cuivre du réseau riche en argent. Ces derniers ont laissé des vides dans la couche superficielle, lui conférant une structure spongieuse aérée. Cette configuration très accidentée donne un aspect mat à la surface traitée.

La frappe



Finalement la dernière opération que subissent les alliages monétaires blanchis correspond à la frappe des monnaies. Celle-ci a pour conséquence un dernier compactage de la couche d'enrichissement en phase argentée par ailleurs vidée de ses oxydes interstitiels. Cette densification qui s'accompagne d'une uniformisation de la surface frappée donne l'aspect argenté brillant final.

C. Discussion

A partir du mécanisme réactionnel proposé dont la construction s'appuie sur des observations expérimentales et un raisonnement thermodynamique, il faut maintenant s'interroger sur ses implications sur la chaîne opératoire de fabrication monétaire et comprendre quelles ont été les bases de sa définition.

Les monnayages de cuivre, de bas billon, de billon et d'argent

Le phénomène d'enrichissement n'est possible que pour certains alliages argent-cuivre qui doivent présenter une structure biphasée. Dans ce cas, la considération du diagramme de phase de ce mélange permet d'établir différents domaines de compositions théoriques qui garantissent la formation d'une couche superficielle argentée durant la mise en forme de ces alliages. Il apparaît que ces intervalles ne sont pas sans lien avec les appellations retenues pour les différents alliages monétaires (Figure 206) :

- Pour le monnayage de cuivre, la finalité du bain de blanchiment n'est pas de mettre en évidence un quelconque enrichissement de surface. Il intervient seulement pour éliminer les oxydes superficiels formés lors des étapes de mise en forme (Figure 203).

Figure 203 - Evolution de la couleur d'un monnayage de cuivre :
a - Flan avant blanchiment (n° 08-10), b - Flan après blanchiment (n° 08-11),
c - Monnaie frappée (n° 08-12), d - Monnaie oxydée (n° 08-13).

- C'est finalement le mécanisme de blanchiment qui justifie que les espèces frappées dans du bas billon aient été qualifiées de monnaies noires. Théoriquement, les alliages cuivre-argent qui contiennent moins de 8 % en masse de métal blanc forment une solution solide de cuivre (Figure 206). Dans un tel mélange, il n'y a qu'une seule phase dans laquelle l'argent minoritaire est dissout. Lors des martelages et recuits, il ne peut pas, dans ce cas, y avoir un phénomène d'enrichissement par la suite mis en évidence lors du blanchiment. Ce traitement a en définitive le même effet que pour le monnayage de cuivre. La surface devenue

rouge après le décapage qui précède la frappe redevient ensuite progressivement plus sombre, marron foncé, avec la formation d'oxydes de cuivre superficiels (Figure 204).

Figure 204 - Flan de bas billon dont la surface oxydée présente une couleur sombre (1072-01).

D'un autre côté, il existe des alliages de bas billon dont le titre en métal précieux dépasse la limite des 8 %. Ils peuvent contenir jusqu'à 12 % de métal blanc. Dans ce cas, les mélanges qui se situent dans cet intervalle présentent effectivement une structure biphasée. Néanmoins, la dispersion de la phase argentée dans la matrice cuivreuse (Figure 205) empêche sa densification lors des étapes de mise en forme.

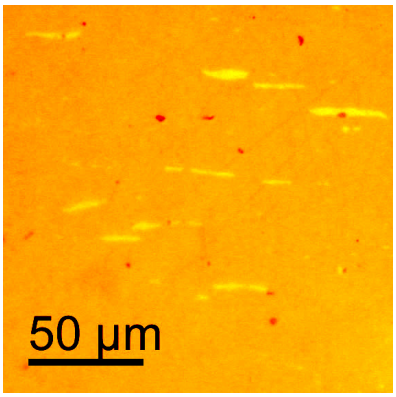


Figure 205 - Alliage cuivre-argent titré à 10 % de métal précieux (n° 04-10). La phase riche en argent (blanche) est trop dispersée dans la solution de cuivre pour permettre un enrichissement.

- Les alliages monétaires de billon et d'argent dont les taux de métal précieux dépassent 10 à 15 % de la masse totale, ont globalement un aspect argenté, une fois mis en forme et frappés. Néanmoins, l'origine de l'apparence finale n'est pas uniquement due au phénomène d'enrichissement décrit précédemment. Avec l'augmentation du titre en argent dans ces alliages, le diagramme de phase permet de suivre les changements structuraux qui en résultent[904]. Finalement, seuls les mélanges dont les taux de métal blanc sont compris entre 8 % et la composition eutectique de 71,9 % massiques sont constitués de dendrites de solution solide de

[904] La Niece S., Silvering, *op. cit.*, p. 207.

cuivre entourées d'une phase enrichie en argent. Cette structure est identique à celle des échantillons expérimentaux. Le mécanisme d'enrichissement qui leur est associé est identique à celui proposé.

Alors que les alliages contenant moins de 71,9 % de métal précieux voient dans un premier temps la formation de dendrites de solution solide de cuivre, au-delà de cette limite, il y a une inversion de la séquence de solidification. C'est maintenant des dendrites de solution solide d'argent qui se solidifient en premier. Finalement, dans un domaine de composition qui voit le titre d'argent varier entre la composition eutectique et 91,2 % massique la ségrégation entre des phases riches en cuivre et d'autres riches en argent est maintenue. Elle est toutefois visible à une échelle plus fine puisqu'elle se retrouve au sein de la phase eutectique qui entoure les dendrites de solution solide d'argent. Les processus d'enrichissement sont néanmoins toujours applicables. Pour les alliages contenant plus de 91,2 % de leur masse totale en métal précieux, ils ne forment *a priori* qu'une phase de solution solide d'argent qui ne permet pas la mise en place du phénomène de ségrégation durant leur mise en forme, cependant ceci n'est pas gênant d'un point de vue de leur argenture dans la mesure où ils ont déjà un aspect argenté de par leur composition.

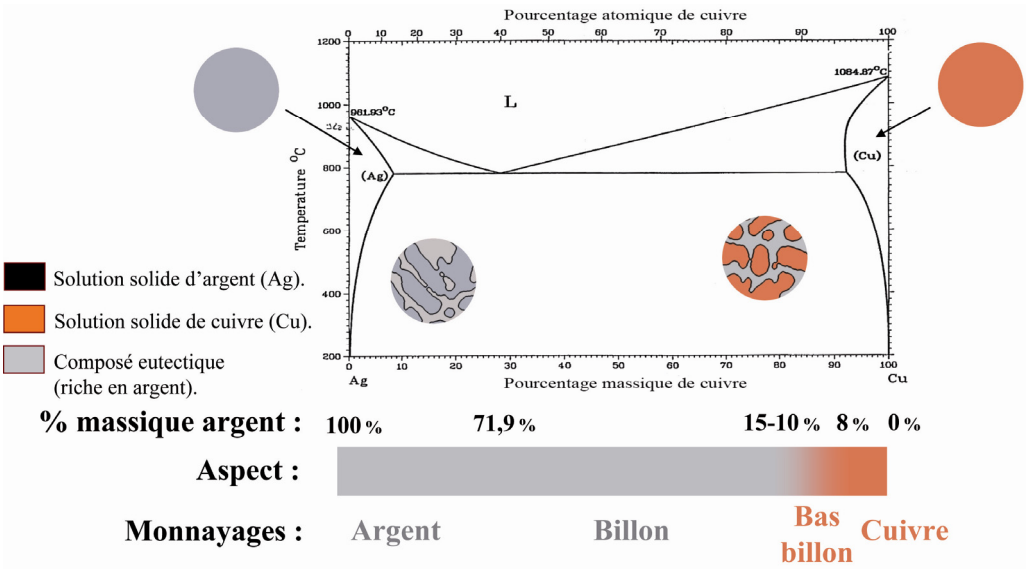


Figure 206 - Domaine d'enrichissement des alliages monétaires.

La figure ci-dessus qui résume les précédentes observations, montre que la majorité des alliages argent-cuivre présentent une structure interne qui conduit durant leur mise en forme, à un enrichissement superficiel en métal précieux. Ces

propriétés étaient par ailleurs connues des monétaires qui ont notamment qualifié leurs alliages suivant leur couleur finale, une fois transformés en monnaies, le bas billon étant également qualifié de billon noir.

L'importance des mises en forme et des recuits

Les reconstitutions expérimentales mises en œuvre dans cette étude ont révélé le rôle indispensable des recuits ainsi que celui non négligeable des martelages, dans l'efficacité du blanchiment monétaire. Bien qu'il s'agisse de l'une des dernières opérations de fabrication de la monnaie, celle-ci prend finalement son origine dès le début de la chaîne de production. D'autant que l'épaisseur finale de l'enrichissement superficiel ne résulte pas du temps de traitement dans le bain de blanchiment mais des nombreuses passes de déformation et de recuit que subissent les alliages durant la transformation des lames en flans. Sans ces préparations, il est impossible d'obtenir un aspect argenté, la solution d'attaque n'ayant pas d'effet sur les métaux. Finalement, les différentes sources monétaires étudiées font-elles état de l'importance des étapes qui précédent le blanchiment dans la qualité de ce dernier ?

Dans une première lecture, c'est principalement dans le *Mémoire sur la fabrication des sols de billon...* qu'apparaissent des mentions suggérant l'influence des recuits sur la qualité de l'argenture des flans[905]. Les plus explicites concernent cependant la possibilité que la qualité du blanchiment soit dégradée par un traitement thermique trop important. Trop chauffées les ébauches s'écaillent et ne se blanchissent pas bien par la suite[906].

Ce phénomène se comprend à la lumière du mécanisme réactionnel proposé. Les oxydes de cuivre formés durant les recuits ont un volume final plus important que celui du métal réduit, comme l'indique leurs rapports Pilling-Bedworth respectifs[907]. Le besoin d'expansion des nouveaux composés formés voit l'apparition de contraintes localisées à la surface des alliages travaillés. Il apparaît, dans ce cas, que si les pressions sont trop importantes, elles peuvent conduire à une fragilisation de la couche enrichie qui se détache sous forme d'écailles, en

[905] Anonyme, *Mémoire sur la fabrication..., op. cit.*, chapitre 5.
[906] « le cuivre qui se brûle forme sur la surface une espèce d'écaille qui s'enlève […] et l'on a remarqué que les flaons de billon provenant des lames brûlées au recuit par trop grand feu, ne blanchissoient jamais bien. »
Ibidem, chapitre 5.
[907] Mellottee H., *Combustion des métaux..., op. cit.*, p. 3.

particulier lors de martelages ultérieurs. Un exemple de ce phénomène a pu notamment être observé dans une proportion raisonnable lors des expérimentations puisque les battitures récupérées à la suite des martelages ont montré la présence d'argent. Il apparaît que des fragments de la couche d'enrichissement se sont détachés. De même, l'observation de certaines coupes métallographiques d'échantillons blanchis a révélé quelques zones potentiellement dégradées par les coups de marteau. Cependant, le phénomène est véritablement gênant si la pellicule formée vient à s'exfolier complètement laissant apparaître le cœur non transformé de l'alliage puisque le bain de blanchiment n'entraînera aucun effet particulier.

Afin de vérifier ces hypothèses, un flan ayant la même composition que les échantillons précédemment utilisés a été préparé par une série de six passes de martelages suivies de recuits. Il a ensuite été placé dans un four chauffé quotidiennement pendant une semaine. L'aspect final extérieur de l'ébauche ainsi que sa coupe métallographique sont observables sur la figure ci-dessus. Au terme de cet essai, la surface présente effectivement des écailles et leur analyse montre qu'elles sont essentiellement composées d'oxydes de cuivre.

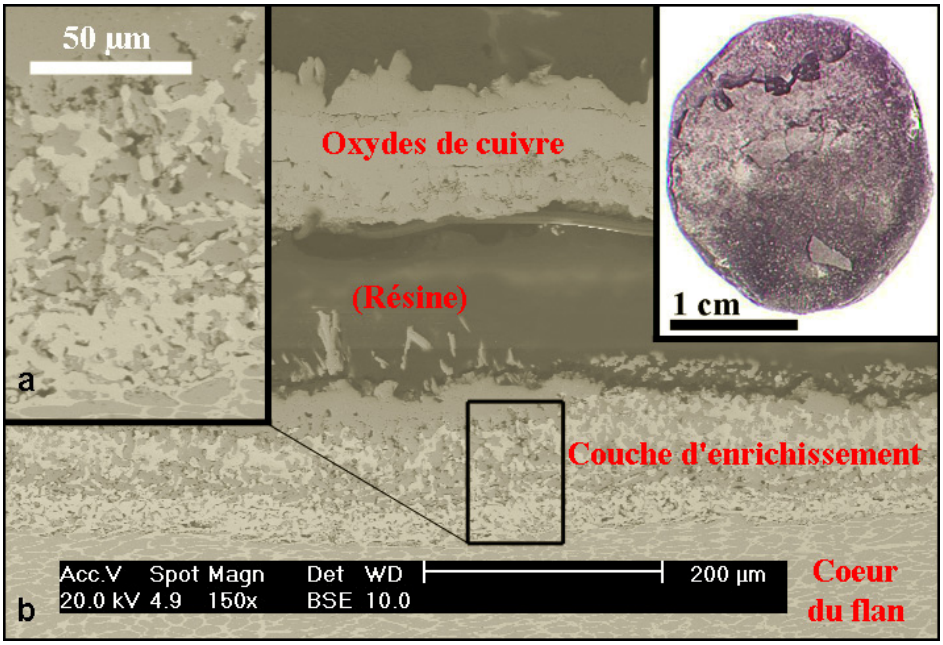


Figure 207 - Flan de billon recuit pendant une semaine et dont la surface s'écaille (n° 05-10)

Avec une épaisseur moyenne de 100 µm, la couche d'enrichissement est très importante. Son taux de compactage est variable. Il croît de la surface vers l'intérieur du flan (Figure 207 a). L'expansion lors de la formation des oxydes de

cuivre a repoussé le réseau de la phase argentée. La cohésion de l'ensemble se voit modifiée. C'est au niveau de la zone centrale où le volume occupé par les oxydes apparaît plus important que celui de l'enrichissement (Figure 207 a). C'est à cet endroit que la fragilité de la structure est la plus importante en cas de nouveaux martelages.

Cet échantillon expérimental est un cas particulier puisque la succession de recuits qu'il a subis pendant une semaine n'est pas comparable à un processus de mise en forme. Il montre néanmoins qu'un cycle de martelage conjugué à des recuits trop importants peut progressivement dégrader la couche d'enrichissement plutôt que de la développer.

Parallèlement à cette consigne explicitement formulée dans le *Mémoire sur la fabrication des sols de billon...*, deux des observations également exposées sont particulièrement significatives dans cette discussion. Elles ne définissent cependant pas un modèle général puisqu'elles sont chacune associée à différents ateliers monétaires. A la Monnaie de Poitiers, il est indiqué que les flans sont recuits deux fois : une première avant d'être blanchis, puis une seconde avant un dernier blanchiment[908]. Pour la fabrique de Lyon, c'est un essai infructueux de blanchiment sans recuit qui est présenté, rappelant l'intérêt de cette opération[909]. Ces deux mentions démontrent la conscience de la part des monétaires de l'intérêt des traitements thermiques dans la qualité du blanchiment.

Dans une relecture des sources monétaires, il est possible de mettre en évidence une attestation implicite de la connaissance par les monétaires de l'intérêt des recuits dans le traitement de blanchiment. Celle-ci transparait dans les descriptions données de l'organisation du travail au sein des ateliers monétaires. En définitive, le recuit final que doivent subir les flans avant la frappe *a priori* afin de ne pas se fissurer durant cet ultime martelage, n'est pas réalisé dans le même lieu que celui de leur préparation. Ils sont pour cela portés au blanchiment, la pièce où ils sont chauffés une dernière fois à haute température avant d'être blanchis[910]. Sans avoir préalablement démontré le poids des traitements thermiques dans le résultat de cette opération de décapage, une telle délocalisation du dernier recuit pourrait paraître surprenante, en particulier parce que les ébauches sont recuites

[908] Anonyme, *Mémoire sur la fabrication..., op. cit.*, chapitre 9.
[909] *Id*.
[910] Poullain H., Relation de Me Henry Poullain..., *op. cit.*, p. 333.
« On porte les flaons qui ont été ajustez dans un lieu appellé blanchiment [...]. On fait recuire les flaons..., ».
Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 73.
« On recuit les flans au blanchiment..., ».
Anonyme, *Mémoire sur la fabrication..., op. cit.*, chapitres 5 et 9.

tout au long de leur mise en forme et qu'elles auraient pu dans ce cas l'être une dernière fois avant d'être données à blanchir. Le dernier recuit bien que tout de même indispensable d'un point de vue mécanique est ici explicitement associé à l'opération de blanchiment. Il est ici reconnu comme participant au processus.

Il apparaît finalement que les monétaires étaient conscients des différents mécanismes impliqués dans l'obtention d'un aspect argenté de leurs monnaies après le traitement de blanchiment. Bien qu'ils n'en connaissent pas les causes, ils ont pu en observer les conséquences. C'est d'ailleurs ce dont rendent compte les expériences réalisées dans le cadre de cette étude, puisqu'il a été possible d'observer un éclaircissement des échantillons durant leur mise en forme, avant qu'ils soient blanchis en solution. Ces observations pouvaient être également faites par les ouvriers monétaires.

Le bain de blanchiment

Une autre question que soulève la mise en évidence du mécanisme de blanchiment, est le choix des réactifs utilisés. Le bain de traitement doit être composé d'un acide pour dissoudre les oxydes de cuivre formés, pourquoi l'eau forte a-t-elle été remplacée par une solution de bitartrate de potassium ? D'un autre côté, quel est le rôle de l'ajout de chlorure de sodium à la solution, puisqu'il n'intervient pas directement dans la réaction de dissolution acide ?

Les expériences ont montré qu'il n'est pas indispensable d'utiliser un réactif avec un acide très fort pour obtenir une mise en solution des oxydes de cuivre relativement rapidement. Un traitement de trois minutes seulement dans une solution d'un pH de 3,5 a été suffisant pour obtenir une totale disparition des composés cuivreux. Du point de vue de la réactivité de la solution de traitement, l'eau forte qui a précédé l'utilisation du bitartrate de potassium dans les ateliers monétaires français, ne se justifie donc pas. Il s'agit en effet d'un mélange d'acides forts : acides nitrique et sulfurique[911]. Or, la raison invoquée pour expliquer l'abandon de la solution initiale est que cette dernière est beaucoup trop onéreuse[912]. En outre, il apparaît qu'elle entraîne également une dissolution partielle de l'argent contenu dans les alliages traités[913]. Cette constatation peut

[911] cf. *supra*, p. 96
[912] « Cette manière […] coûtoit beaucoup plus que la manière dont on se sert aujourd'hui (au bitartrate)..., »
Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 74.
[913] « Cette manière […] diminuoit le poids de flaon d'argent..., »

aujourd'hui être expliquée à partir d'une considération électrochimique. Ce sont les ions nitrates, NO_3^-, apportés par l'acide nitrique qui réagissent avec l'argent et le cuivre métal. Cette hypothèse est justifiée par le potentiel standard du couple redox associé NO_3^- / $NO_{(g)}$ qui est supérieur à ceux des deux métaux considérés[914]. Ces derniers régissent comme suit :

$$2\ NO_3^- + 8\ H_3O^+ + 3\ Cu \rightarrow 3Cu^{2+} + 2\ NO_{(g)} + 12\ H_2O$$

$$NO_3^- + 4\ H_3O^+ + 3\ Ag \rightarrow 3Ag^+ + NO_{(g)} + 6\ H_2O$$

Parallèlement à la dissolution des oxydes de cuivre formés lors des opérations de mise en forme comme pour le blanchiment au bitartrate de potassium, la structure métallique des flans est également attaquée. En outre, dans la mesure où elle est la première exposée, c'est la couche d'enrichissement en phase argentée qui est la première concernée est non le cœur de l'alliage. De plus, ce volume d'enrichissement est particulièrement réactif puisqu'il présente une surface particulièrement importante à cause de sa structure spongieuse. En outre, au-delà de conduire à une perte de métal précieux dans la solution de traitement, la qualité globale du blanchiment se voit aussi amoindrie. Pour s'en rendre compte, il suffit d'observer la coupe d'un flan expérimental blanchi par ce procédé antérieur (Figure 208).

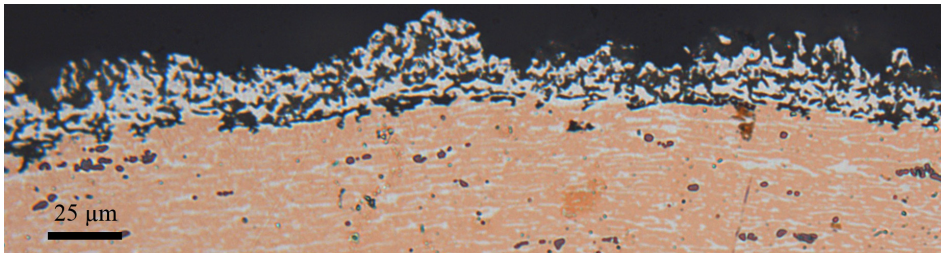


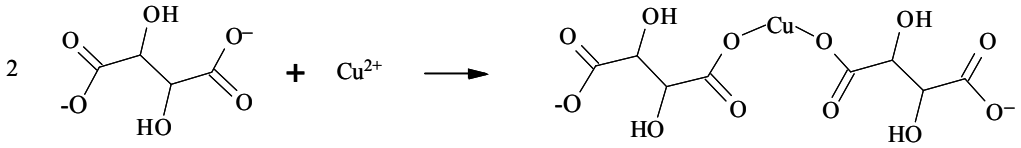
Figure 208 - Echantillon expérimental blanchi à l'eau forte (n° 08-60).

Il apparaît que l'eau forte n'est pas le réactif le plus approprié pour être utilisé dans le blanchiment des alliages monétaires puisqu'il dissout une partie de l'argent qu'ils contiennent, entraînant une dégradation de la couche d'enrichissement précisément recherchée. C'est pourquoi les monétaires l'ont remplacée par une autre solution d'attaque. Ils ont dû pour cela choisir un acide ne réagissant pas

---

Ibidem, p. 74.
Anonyme, *Mémoire sur la fabrication..., op. cit.*, chapitre 9.
[914] A 25 °C : E°($NO3^-$ / $NO_{(g)}$) = 0,9657 V > E°(Ag^+/Ag) = 0,7996 V > E°(Cu^+/Cu) = 0,522 V > E°(Cu^{2+}/Cu) = 0,3402 V.
Lide D. R., ed., *CRC handbook..., op. cit.*, p. **8**-20.

avec l'argent. Dans ce cas, les acides organiques tels que ceux présents dans les légumes et les fruits, ou dans les produits de fermentation[915] pouvaient convenir. Les hypothèses proposées pour justifier leur non emploi sont dans un premier temps que les quantités indispensables au traitement de blanchiment sont importantes dans le cadre de la production de masse d'un atelier monétaire. Le choix d'un réactif par rapport à un autre est principalement dicté soit par son coût, soit par la dépense indirecte associée à la charge de travail supplémentaire nécessaire à son obtention. Le facteur économique semble être important comme dans toute production. C'est notamment ce dont rendent compte le *Traité de monoyes...* de J. Boizard ainsi que le *Mémoire sur la fabrication des sols de billon...*[916]. En appliquant cette remarque à la recherche d'un acide pour le traitement des flans, le bitartrate de potassium, en tant que déchet de production du vin, ne devait pas représenter une dépense importante, et s'avère dans ce cas être un produit idéal. Par ailleurs, le bitartrate de potassium présente un avantage supplémentaire à être utilisée dans ce système chimique qui fait intervenir des ions Cu^{2+}. L'utilisation de ce composé permet d'accélérer la vitesse de la réaction. En effet, le bitartrate de potassium réagit avec les ions cuivre II pour former un complexe :



Cette seconde réaction à donc pour effet d'accélérer la dissolution des oxydes CuO par un phénomène de déplacement de réaction. Dans la mesure où les ions cuivriques une fois formés deviennent les réactifs d'une seconde réaction, cette dernière va encourager leur formation, c'est-à-dire l'attaque acide des oxydes.

D'autre part, qu'en est-il de l'intérêt d'utiliser du sel commun dans le procédé ? L'ajout de cet élément dans la solution de blanchiment a un certain coût, or une expérience de traitement d'échantillons de cuivre dans une solution de blanchiment ne contenant pas de chlorure de sodium permet de conclure à l'efficacité de ce bain (Figure 209).

---

[915] L'acide acétique ou lactique par exemple.

[916] Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 74.
« Dans les monoyes des provinces, […] chacun a cherché à faire le blanchiment avec le plus d'économie… »
Anonyme, *Mémoire sur la fabrication..., op. cit.*, chapitre 9.

Figure 209 - Le sel de la solution de blanchiment n'est pas indispensable (n° 05-20).

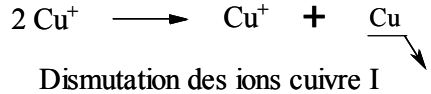
La réaction est cependant moins rapide que lorsque le sel est ajouté au mélange. C'est notamment ce dont rendent compte C. N. Zwicky-Sobczyk et W. B. Stern dans leur article en constatant une plus grande efficacité du mélange avec du sel[917]. Ils n'avancent toutefois pas d'hypothèse pour expliquer cette différence.

Une première proposition permettant de justifier l'ajout de chlorure de sodium dans le bain de blanchiment était la possibilité qu'il intervienne dans une volonté de récupération. Celle-ci est compréhensible dans la mesure où il s'agit ici de traitements associés au travail de métaux précieux. Elle est par ailleurs courante dans le cadre de la fabrication monétaire[918]. L'analyse du bain de blanchiment a mis en évidence une petite quantité d'argent dans la solution. La concentration bien que non négligeable, était très faible et ce, grâce aux propriétés thermodynamiques de ce métal. Cependant, dans une configuration de production de masse, la concentration de l'argent passé en solution est au prorata du nombre de flan traités, plus importante. La présence d'ions chlorure dans la solution est un moyen envisageable de récupérer l'argent qui aurait pu passer en solution, grâce à la formation d'un précipité de chlorure d'argent. Cette réaction est fortement déséquilibrée en faveur de celui-ci comme l'indique le très faible coefficient de solubilité de ce composé[919]. Le recyclage de l'argent se faisant ensuite par calcination du précipité filtré de la solution de traitement. Toutefois, bien qu'une telle démarche soit décrite dans une opération monétaire, elle n'est pas associée au blanchiment des flans, mais au traitement des terres de lavure à l'eau forte[920]. En outre, la source qui y fait référence est datée du XVIII^{e} siècle.

---

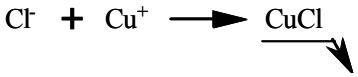
[917] Zwicky-Sobczyk C. N. *et al.*, X-ray fluorescence..., *op. cit.*, p. 396.
[918] cf. *supra*, p. 105.
[919] A 25 °C : Ks AgCl = $1{,}77.10^{-10}$.
Lide D. R., ed., *CRC handbook..., op. cit.*, p. **8**-43.
[920] « Quand l'eau forte est chargée d'argent il faut [...] mettre sur un marc d'eau forte une livre peu moins de sel [...] pour faire précipiter l'argent [...] et l'argent qui est au fond on peut le mettre à fondre..., »
Delaguerre, *Rés. ms. 17004 PRI 8°*, *op. cit.*, n. p.

Finalement, l'ajout de sel au bain de blanchiment doit être considéré à deux autres niveaux. Le premier est particulièrement important pour la qualité finale du traitement. En effet, les ions cuivre I formés par la dissolution des oxydes de cuivre Cu_2O sont instables en solution. Ils se dismutent en ions cuivre II et en métal cuivre solide :



Dismutation des ions cuivre I

C'est la formation de cuivre qui est particulièrement pénalisante pour le procédé de blanchiment dans la mesure où ce dernier peut se déposer à la surface des flans traités. Le traitement est dans ce cas rendu inutile. L'ajout de chlorure de sodium dans le bain de permet de prévenir cette réaction défavorable grâce à la formation préférentielle d'un chlorure :



En outre, cette seconde réaction intervient aussi dans un déplacement de réaction et accélère le processus de blanchiment.

L'augmentation des vitesses de réaction est particulièrement intéressante dans le cadre d'une fabrication massive de monnaies mais surtout la prévention de la formation de cuivre solide justifie l'emploi de sel malgré la dépense supplémentaire qui en résulte dans les frais de fabrication.

L'utilité des ustensiles de cuivre

Un autre point sur lequel s'accordent les sources monétaires qui font état du procédé de blanchiment est l'importance d'utiliser des ustensiles de bois et, dans une plus grande mesure, de cuivre[921]. C'est de ce métal que sont notamment constituées les cuves dans lesquelles sont mis à blanchir les flans. Il compose aussi le crible nécessaire à leur récupération une fois traités, ainsi que les différents

[921] Vaisseau de cuivre porté à jour.
Poullain H., Relation de Me Henry Poullain..., *op. cit.*, p. 333.
Crible de cuivre rouge, vaisseau de cuivre.
Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 73.
Poêle, pelle, crochet, pelle percée de cuivre et spatule de bois.
Anonyme, *Mémoire sur la fabrication..., op. cit.*, chapitre 9.
Bouilloir : est un vase de cuivre rouge.
De Bettange M., *Traité des monoyes..., op. cit.*, t. 1, p. 5.

instruments utilisés pour brasser les ébauches lors du blanchiment. Sans explicitement l'interdire, il n'est jamais fait mention de l'emploi d'un quelconque outillage de fer. Le choix d'exclure ce métal alors qu'il se retrouve dans les instruments utilisés dans les étapes de mise en forme qui précédent le blanchiment, se justifie également par une considération électrochimique. Le couple redox du fer Fe/Fe^{2+}, présente un potentiel standard très inférieur à celui du couple Cu^{2+}/Cu [922]. Les ions cuivriques qui passent en solution lors de la dissolution acide des oxydes de cuivre favorisent l'oxydation du fer. De l'utilisation d'ustensiles de fer peut résulter une configuration entraînant une corrosion galvanique. Dans un tel système les réactions de réduction et d'oxydation n'ont pas lieu au même endroit. Cette délocalisation est rendue possible par un déplacement d'électrons entre les sites d'oxydation et de réduction.

Dans ce cas, l'utilisation d'outils en fer peut avoir pour conséquence la formation d'une pellicule de cuivre recouvrant l'enrichissement superficiel des flans qui cherche à être révélé par le traitement de blanchiment. Il suffit de considérer l'exemple du prélèvement d'un flan dans le bain de blanchiment à l'aide d'une cuillère de fer. Le système désavantageux est présenté sur la figure ci-dessus. Les ions cuivriques passés dans la solution lors du blanchiment se trouvent réduits à la surface du flan alors que le fer de la cuillère est oxydé et fini dans le bain d'attaque :

$$Cu^{2+} + Fe \rightarrow Cu + Fe^{2+}$$

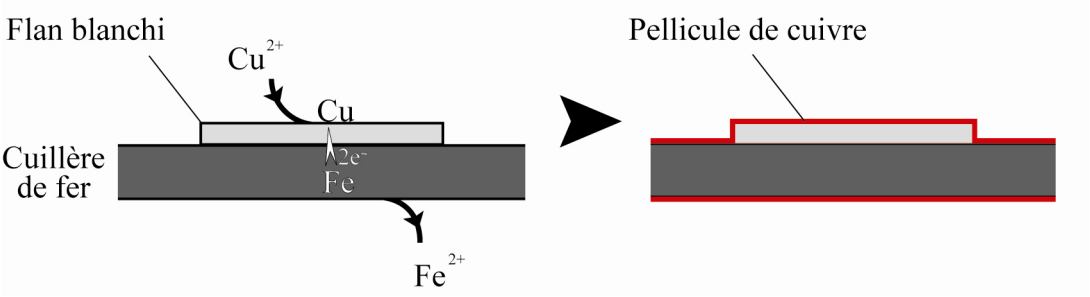


Figure 210 - Corrosion galvanique dans le bain de blanchiment.

Cette configuration est très préjudiciable au résultat du blanchiment puisqu'il en résulte un recouvrement de la surface des flans qui doit normalement être d'un gris argent, par une couche de cuivre rouge. De plus, le seul moyen d'éliminer la

[922] A 25 °C : $E°(Cu^{2+}/Cu) = 0{,}3402$ V > $E°(Fe/Fe^{2+}) = -0{,}41$ V.
Lide D. R., ed., *CRC handbook..., op. cit.*, p. **8**-20.

pellicule superficielle formée est de blanchir de nouveau l'objet après l'avoir toutefois de nouveau porté à haute température pour oxyder le métal déposé.

Il est donc très important de ne pas utiliser d'ustensile de fer dans les opérations de blanchiment afin de prévenir de potentiels dépôts de cuivre[923]. Il est d'ailleurs surprenant que les traités monétaires ne soient pas plus explicites sur la nécessité de proscrire ce métal.

Qu'en est-il du blanchiment au sein de l'atelier monétaire de La Rochelle ?

En conclusion, il est important de revenir sur les structures observées sur l'échantillon archéologique de La Rochelle (Figure 192 et Figure 193). Il a été vu que ce flan met en évidence une couche importante enrichie en argent et que cette dernière présente une densification superficielle (Figure 211). A partir d'une analyse d'image[924], il est possible de calculer le taux de compactage de la phase argentée selon trois zones distinctes visibles sur la coupe métallographique[925]. La première est celle qui se trouve au niveau de la surface du flan. La seconde correspond à l'âme non transformée de l'ébauche. Quant à la troisième, elle constitue le volume intermédiaire dont la phase cuivreuse a été oxydée au moins partiellement mais dont la phase riche en argent ne semble pas aussi dense qu'en périphérie de coupe. Une telle structure n'est par ailleurs pas observable sur les échantillons expérimentaux caractérisés.

[923] A titre d'exemple, lors d'une campagne d'expérimentations menée sur la plateforme paléométallurgique de Melle, un expérimentateur travaillant sur des problématiques liées au travail de l'argent a utilisé le bain de blanchiment reconstitué pour la présente étude afin de décaper un lingot d'argent. Cependant, dans la mesure où il a trempé son échantillon dans la solution avec une pince de fer, il l'a vu se couvrir d'une pellicule de cuivre, ce qui n'était pas le but recherché.

[924] La méthode proposée est basée sur l'utilisation du logiciel Photoshop. La première étape consiste à améliorer les contrastes de phases. L'utilisation du filtre sharpen permet d'augmenter la netteté des contrastes. La phase argentée est ensuite globalement sélectionnée à partir de sa couleur. Il est ensuite possible d'estimer sa surface par rapport à celle de la coupe métallographique en se rapportant au nombre de pixels correspondants.
Il s'agit d'une estimation qui dépend de la définition de la photographie utilisée définissant la taille des pixels. Elle dépend également de la possibilité d'obtenir un contraste suffisant entre les phases. L'échantillon dont il est question ici est un cas très favorable car le contraste entre ses phases est initialement bien marqué.

[925] Cette évaluation suppose que le taux de compactage ne varie que selon la profondeur de la couche d'enrichissement.

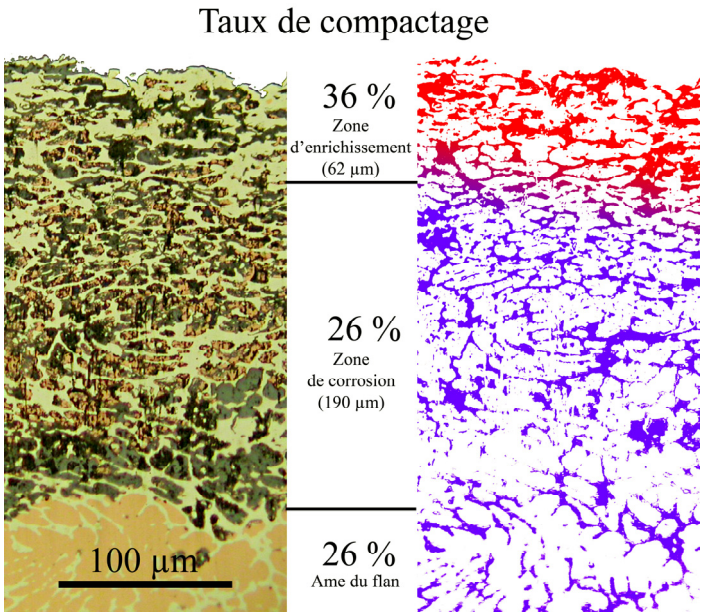


Figure 211 - Variation du taux de compactage de la couche d'enrichissement (1029-01).

La comparaison des estimations de taux de compactage, confirme la différence marquée visible sur la coupe métallographique (Figure 211). En périphérie, la phase argentée est plus dense de près de dix points par rapport au cœur de l'alliage. D'un autre côté, dans la zone intermédiaire, elle présente une densité identique à celle estimée dans l'âme du flan[926]. Dans ce cas, seule la zone superficielle plus compacte doit être assimilée à une structure d'enrichissement résultant de la mise en forme du flan et ayant potentiellement subi un blanchiment. Le volume sous-jacent bien que relativement similaire du point de vue de la phase cuivreuse est en revanche à rapprocher du cœur du flan. Dans ce cas, il faut supposer qu'elle résulte des processus de corrosion auxquels a été soumis l'alliage durant son enfouissement et non au cours de sa fabrication. La présence de chlore constatée dans la couche d'enrichissement lors de l'analyse préliminaire de la phase corrodée, ne résulte pas d'un traitement de blanchiment mais du milieu d'enfouissement, La Rochelle étant une ville de bord de mer…

C'est pourquoi, l'épaisseur de la couche d'enrichissement effectivement en relation avec la chaîne opératoire du monnayage au marteau ne doit pas être mesurée à partir de l'ensemble de la couche transformée mise en évidence sur les coupes métallographiques et qui mesure en moyenne 200 à 250 µm. Elle se limite en définitive ici à sa partie superficielle plus dense qui est épaisse d'environ 60 µm (Figure 211). En comparaison avec les analogues expérimentaux, elle est tout de

[926] Dans la mesure où les différences sont ici peu marquées, elles ont été vérifiées à partir de l'analyse d'image de six coupes métallographiques présentées en Annexe T.

même plus importante. L'ébauche ici considérée a subi une préparation différente. La couche densifiée apparaît globalement moins compacte que les structures obtenues expérimentalement. Il est envisageable que les inégalités résultent de martelages moins importants du flan de La Rochelle, compensés par des recuits plus longs favorisant le développement de la couche oxydée. Ces hypothèses sont confortées dans un premier temps par la coupe métallographique du carreau[927] constitué du même alliage que le flan dont il est question ici. Sa structure dendritique peu déformée, présentée plus haut[928], a permis de conclure à une mise en forme limitée de la lame dans laquelle il a été découpé. Les déformations structurales observées dans le flan résultent essentiellement de son arrondissement et non de l'amincissement de la lame. Or, c'est cette dernière opération qui demande le martelage le plus déformant. D'un autre côté, les recuits mis en œuvre dans une fabrication monétaire sont potentiellement plus longs que ceux réalisés lors des expérimentations. Bien qu'il soit impossible d'évaluer la différence exacte de traitement, la production de masse peut entraîner un allongement des périodes de recuit au-delà du temps réellement nécessaire. Notamment parce que durant ces opérations, les ouvriers travaillent parallèlement à mettre en forme d'autres lots laissant recuire leurs flans sans contrôle particulier[929].

Concernant le procédé de blanchiment mis en œuvre au sein de l'atelier monétaire de La Rochelle, aucune donnée archéologique ne permet de supposer les réactifs réellement utilisés. Cependant, compte tenu de sa période de fonctionnement, c'est certainement le mélange à base de bitartrate de potassium et de chlorure de sodium qui a cours puisqu'il est connu au moins depuis le milieu du XV^{e} siècle en France[930]. D'autant que du point de vue des composés utilisés dans ce procédé et notamment de l'ajout de sel, la proximité de La Rochelle avec l'océan atlantique représente un intérêt certain.

A partir de l'approche expérimentale proposée, il a été possible de définir le mécanisme réactionnel associé au procédé de blanchiment pratiqué dans les ateliers monétaires français au Moyen Age. Le traitement en solution ne constitue finalement qu'une partie du processus global dont résulte l'enrichissement superficiel en argent des alliages monétaires d'argent et de billons. Celui-ci prend

[927] Il s'agit de l'échantillon 3078-11.
[928] cf. *supra*, p. 393.
[929] cf. *supra*, p. 86.
[930] cf. *supra*, p. 97.

place dès le début du travail des lames et ne prend fin qu'après la frappe de la monnaie qui lui donne un aspect brillant.

C'est notamment un échantillonnage selon les différentes étapes de fabrication qui a permis de révéler l'importance des recuits mais également des phases de martelage. Or, ce dernier point est globalement très peu pris en compte dans la littérature scientifique. En particulier parce que les démarches exposées s'appuient uniquement sur la caractérisation d'objets déjà mis en forme et dont les structures observées correspondent au résultat de l'accumulation de toutes les étapes de préparation.

Le mécanisme réactionnel défini a permis de justifier différentes consignes et observations dont a rendu compte l'étude des sources monétaires. L'organisation au sein des ateliers et en particulier la délocalisation du recuit final que subissent les flans durant leur préparation, dans la pièce où ils sont blanchis, constituent la preuve de la maîtrise du procédé par les monétaires. Ils étaient conscients du poids des traitements thermiques dans la qualité du blanchiment. Les expérimentations révèlent d'ailleurs qu'ils en étaient nécessairement avisés puisque des changements de couleurs des alliages sont observables dès leur mise en forme.

De même, la composition des ustensiles, comme celle des réactifs utilisés sont éclairées par la mise en exergue des différentes réactions électrochimiques impliquées. La présence de chlorure de sodium dans le bain de blanchiment est particulièrement intéressante. Bien que cet élément ne soit pas directement indispensable à la réaction de blanchiment, il est tout de même ajouté pour accélérer le traitement. Finalement, les frais supplémentaires engagés par l'achat de cet additif se justifient en considérant que la fabrication monétaire est une production de masse.

Enfin, les échantillons archéologiques de l'atelier monétaire de La Rochelle rendent compte de structures associées au processus de blanchiment. Toutefois, des faciès résultant de phénomènes de corrosion se superposent à ces dernières. Des réactions supplémentaires sont intervenues lors de l'enfouissement des objets, *a posteriori* des mises en forme et ne doivent pas y être assimilées. La discrimination entre les différentes structures est finalement possible en considérant le taux de compactage de la phase d'enrichissement. Il faut qu'il soit supérieur à celui qui se mesure au niveau des zones d'alliage non transformé des objets.

IV. La Frappe au marteau en conclusion

Blanchis, les flans sont confiés aux monnayeurs pour qu'ils réalisent l'ultime étape de la fabrication des monnaies : la frappe[931]. A partir de l'imposition des motifs monétaires à la surface des pièces, l'autorité émettrice atteste de la quantité de métal précieux qu'elles représentent, donc de leur valeur. Dans la chaîne opératoire globale, c'est finalement le procédé considéré comme étant le plus simple à mettre en œuvre. Il se limite au matriçage des flans entre deux coins gravés des figures et légendes réglementaires (Figure 212). Dans le cadre d'une production de masse qui demande ce travail extrêmement répétitif, la précision et l'assurance du geste ne doivent cependant pas être négligées. Ces deux qualités qui s'acquièrent avec l'expérience, permettent de garantir la qualité finale du monnayage. C'est en premier lieu l'esthétisme des espèces, du moins pour celles de plus grande valeur, qui garantit la confiance des usagers dans ces dernières.

Figure 212 - Paire de coins monétaires utilisée lors des expérimentations.

Finalement, la frappe est le symbole de la fabrication monétaire. Cette seule étape transforme un disque de métal, certes contenant généralement une part d'or ou d'argent, en objet de plus grande valeur. C'est pourquoi, les sommes produites ainsi que l'utilisation des coins monétaires, font de ce vulgaire matriçage, une opération particulièrement sensible, donc contrôlée. C'est d'ailleurs certainement pour cette raison que les fouilles de l'atelier de La Rochelle ont livré peu

[931] cf. La chaîne opératoire selon les sources : Frappe au marteau, p. 101.

d'informations et de matériels concernant cette dernière phase du monnayage. Avec seulement 5 monnaies retrouvées effectivement frappées dans cette fabrique rapportées aux 128 flans du *corpus* global, le contraste est très explicite. Il faut croire que les ouvriers étaient contraints à plus d'attention dans la manipulation de leurs pièces.

Malgré le peu de données dont rendent compte les fouilles de la Monnaie de La Rochelle, les différentes expérimentations dans le cadre de cette étude ont tout de même permis de relever différentes observations sur cette opération[932]. Elles renseignent notamment sur la simplicité de sa mise en œuvre.

Un premier commentaire fait le lien avec le traitement de blanchiment qui précède le battage des monnaies. Ce n'est qu'après la compression de la surface des flans lors de l'impression mécanique des motifs et légendes que les pièces révèlent une surface brillante (Figure 213).

Figure 213 - Evolution de la brillance,
un flan blanchi mat ne devient brillant qu'après sa frappe (n° 04-59 et 60).

Par cette caractéristique, la frappe s'impose effectivement comme l'ultime étape de mise en forme du monnayage.

Une seconde observation résulte d'un premier biais expérimental initial. En effet, pour des raisons de sécurité, le trousseau préparé par M. Ducouret disposait d'un manche latéral. Cette configuration devait prévenir les risques d'accident de frappe si le marteau venait à manquer la zone d'impact. Ce choix a imposé que l'opération soit réalisée par deux personnes, l'une tenant le coin, l'autre frappant (Figure 214).

[932] La paire de coins utilisée a été préparée par le graveur de médailles M. Ducouret. Les motifs utilisés ne sont pas des reproductions exactes de monnaies du XVI^{e} siècle. Le graveur a cependant créé une monnaie présentant les motifs caractéristiques de l'époque avec une gravure peu profonde. Afin d'éviter les confusions avec des monnaies anciennes, le millésime 2004 a été gravé sur la matrice.

Figure 214 - Frappe expérimentale en binôme avec un coin emmanché.

Cette méthode n'est pas celle qui est décrite par les sources monétaires, ni dans l'iconographie. Ces dernières représentent le battage des monnaies comme le travail d'un seul monnayeur assis sur un banc. Les essais préliminaires de frappe en binôme attestent de la difficulté d'appliquer une telle configuration au monnayage médiéval. Celui-ci se caractérise par des pièces particulièrement fines dont les motifs sont peu marqués. Dans ce cas, pour obtenir une impression satisfaisante des légendes et figures, c'est-à-dire également poinçonnée sur toute la superficie des pièces, il est indispensable que les surfaces des deux coins soient sensiblement parallèles durant l'impact du marteau. Si tel n'est pas le cas, l'épaisseur limitée des flans ne permet pas une déformation suffisante du matériau lors de la sollicitation mécanique pour qu'en définitive l'écrasement soit réparti sur l'ensemble de la monnaie. Le défaut principal qui en résulte est illustré par la pièce présentée sur la figure 213. Une partie des inscriptions n'a pas été imprimée malgré la très importante puissance développée (Figure 214). C'est notamment pour éviter ce genre de défaut qu'il est indispensable que les flans soient boués. Cependant, cette précaution est amoindrie par l'utilisation d'un coin emmanché pour lequel la préhension déportée ne facilite pas le maintien de la surface du trousseau parallèle à celle de la pile.

Une frappe supplémentaire, après avoir rengrené le flan insuffisamment marqué, constitue normalement un moyen possible de correction. Cependant, cette opération n'est pas particulièrement favorisée par la faiblesse des gravures des espèces médiévales. Car, si elles sont suffisamment épaisses pour replacer la pièce à la bonne place dans les gravures des matrices, elles ne sont pas assez prononcées pour aider au maintien en bonne position d'un coin tenu avec un manche. La surfrappe devient, dans ce cas, relativement difficile et augmente les chances de tréflage.

A partir de ces constatations, et après avoir finalement désemmanché le trousseau utilisé lors des reconstitutions expérimentales, les nouvelles frappes réalisées alors par une personne, ont montré l'intérêt de ce choix. Bien que la puissance développée par un seul batteur utilisant un marteau soit bien inférieure à celle du binôme pouvant employer une masse, cette différence se voit contrebalancée par plusieurs avantages. La tenue du coin à l'aplomb de la zone d'impact du marteau permet un maintien beaucoup plus facile de la matrice dans la configuration idéale d'impression des motifs. De même, alors qu'il est impossible, compte tenu de la violence du choc, de réaliser plusieurs frappes à la masse sans rengrener la monnaie, ce n'est pas le cas lors du travail d'un seul opérateur. En maîtrisant ses gestes, il peut très facilement donner les deux à quatre coups de marteau dont témoignent les sources monétaires, sans devoir replacer ses coins[933]. En outre, s'il arrive qu'il doive tout de même rengrener une monnaie insuffisamment marquée, il est également simple de maintenir le trousseau en place jusqu'à l'instant des nouvelles frappes.

Compte tenu des caractéristiques morphologiques des espèces médiévales, il est donc plus intéressant que les pièces soient battues au marteau par un seul monnayeur qui a plus d'assurance pour garantir des conditions de frappe optimales.

Les essais expérimentaux ont également permis d'appréhender la dureté des différents alliages monétaires. Au-delà d'illustrer la plasticité attestée du cuivre et de l'argent purs, ils ont confirmé certaines descriptions monétaires considérant les alliages de bas billon comme un matériau particulièrement dur[934]. En outre, cette approche pragmatique a permis de considérer deux raisons qui justifient des dimensions limitées des monnayages de bas billon[935]. La première n'est pas mécanique puisqu'elle est liée à la faible valeur de ces espèces. Les sommes équivalentes ne représentent pas des masses importantes de métal. La seconde en revanche, tient à la difficulté de mettre en forme ces mélanges. Le principal moyen d'accommoder cette caractéristique est en définitive de frapper des petits modules. La force de frappe se voit répartie sur une surface plus petite augmentant la pression exercée lors de la frappe.

---

[933] Poullain H., « Relation de Me Henry Poullain », *op. cit.* , p. 334.
Boizard J., *Le traité des monoyes*, *op. cit.* , p. 82.

[934] *Mémoire sur la fabrication*, *op. cit.* , n. p.

[935] Duplessy J., *Les monnaies françaises..., op. cit.*, t. 1, p. 146-147, 150-152, 160, 179, 182, 199-200, 205, 226-227, 241-242, 257, 274-276, 299-300, 303.
Duplessy J., *Les monnaies françaises..., op. cit.*, t. 2, p. 42, 60, 62, 86-87, 118, 137-138.

L'étude multidisciplinaire du *corpus* archéologique provenant des fouilles de l'atelier monétaire royal de La Rochelle mais également de celui de Montreuil-Bonnin a permis de mettre en évidence une chaîne opératoire globale de fabrication de la monnaie par la technologie du marteau. Même si elle présente parfois quelques différences avec le processus réglementaire défini à partir de l'inventaire bibliographique, celles-ci sont relativement peu importantes et, de surcroît, associées aux monnayages de moins grande valeur.

A partir de cette référence officielle, il est maintenant intéressant de prendre en compte deux exemples de faux-monnayages contemporains de la fabrique rochelaise. Ils permettront de souligner les techniques propres à ces fabrications clandestines. L'un d'entre eux est par ailleurs particulier puisqu'il révèle des analogies aves les procédés réglementaires.

Chapitre IV. Deux fabrications de fausses monnaies : le faux-monnayage audois

Dans ce chapitre, j'aborderai deux exemples d'activités de faux-monnayages. L'intérêt de les mettre en parallèle se justifie par plusieurs de leurs similitudes. D'abord par la région où elles ont pris place, puisqu'elles étaient localisées dans l'actuel département de l'Aude (11), soit, un territoire du sud de la France proche de la chaîne des Pyrénées et de la frontière avec l'Espagne. Cette position, en confins, était potentiellement intéressante d'un point de vue de ces productions, tout comme les emplacements caractéristiques choisis pour accueillir ces fabrications. Leurs installations au sein de deux grottes se justifient par une recherche de clandestinité. Cependant, un tel choix implique également le recours à certaines techniques de mises en forme permises par les conditions de travail propres aux lieux retenus. Et bien qu'une centaine d'années semble séparer ces deux activités, établies entre la fin du XV^{e} et la fin du XVI^{e}, la confrontation des différences et points communs de leurs chaînes opératoires permet de juger de leurs caractéristiques respectives.

Ces comparaisons sont nécessaires dans une réflexion sur les conditions qui ont pu pousser les faux-monnayeurs à décider de leurs techniques. D'autant qu'à l'inverse de ce qui a cours dans les ateliers officiels, les « normes » du faux monnayage sont propres à chaque production. Elles sont suggérées par des paramètres pratiques. A titre d'exemple, les différents savoir-faire du faux-monnayeur, son matériel, voire le type de ses matières premières, sont autant de variables qui vont l'influencer dans la définition de sa chaîne opératoire.

Ces deux sites seront dans un premier temps considérés séparément, pour des raisons chronologiques bien sûr mais aussi parce qu'ils ont bien montré leur caractère unique. Le croisement par la suite des données collectées à partir de ces deux exemples, permettra de proposer un modèle plus général des prérequis nécessaires à une entreprise de faux-monnayage au Moyen Age.

Les deux activités dont il sera question mettent en évidence plusieurs types de faux-monnayage. Si le *corpus* mis au jour au sein de la grotte de Lauradieu peut déjà être reconnu comme une réelle contrefaçon de monnaies, celui révélé par la fouille de la cavité naturelle de La Catette est plus ambigu. Il semble définir une production qui pourrait être assimilée à un faux-monnayage d'imitation. Certaines

espèces qui y ont été produites sont, par leurs caractéristiques de titre, de masse ainsi que de mise en forme, très similaires à celles d'un monnayage officiel. L'ambiguïté vient ici du fait qu'en parallèle de cette première fabrication, il en existe une seconde qui présente, au contraire de par les techniques et moyens utilisés, toutes les caractéristiques d'une réelle contrefaçon équivalente dans ce sens à celle de Lauradieu.

Afin de simplifier les présentations, les études métallographiques menées sur les différents *corpus* seront présentées en annexes. Elles seront rappelées dans chacune des discussions pour étayer les hypothèses proposées sur des questionnements précis.

Partie 1. Un faux-monnayage d'opportunité : La grotte de Lauradieu

Située sur la commune d'Auriac, au nord de la ferme de Lauradieu, la grotte baptisée du même nom, apparaît être un lieu opportun pour l'implantation d'une activité de faux-monnayage. C'est ce qu'a permis de mettre en évidence la fouille de la cavité qui, au milieu des années soixante-dix, a vu la découverte d'une grande quantité de matériel métallique caractéristique d'une contrefaçon de monnaies[936].

Cette cavité naturelle est relativement restreinte. Elle s'étend sur une profondeur de dix mètres pour une largeur de cinq à sept mètres sous une hauteur maximale de voûte de deux mètres trente. Son porche s'ouvre vers le Sud-Ouest et présente d'importants vestiges d'une entrée faite de murs de pierres sèches. Il en subsiste encore environ un mètre en élévation[937].

Après avoir situé cette activité dans le temps, en supposant par une approche numismatique de la période durant laquelle elle a été établie, trois problématiques principales seront abordées à partir du matériel archéologique mis au jour. L'analyse et les relevés métrologiques des nombreux déchets qu'a laissés cette production permettent d'appréhender au préalable les différents types des matières premières utilisées. Il est aussi possible de proposer une description de la chaîne opératoire de fabrication en pratique dans cette grotte à partir de l'observation des

[936] cf. Faux monnayage : la grotte de Lauradieu (Aude) : Le matériel archéologique associé à la production de fausses monnaies, p. 156.
Rancoule G. *et al.*, La grotte nord de Lauradieu..., *op. cit.*, p. 171-176.
[937] *Ibidem*, p. 171.

stigmates hérités des différentes étapes de mise en forme. Enfin, la quantification des différents types de déchets qui, d'un certain point de vue, représentent le négatif de la production, constitue la base d'une évaluation d'un nombre minimum de monnaies finalement produites.

I. Datation du faux-monnayage de la grotte de Lauradieu

La fouille qui a pris place au sein de la grotte n'a pas mis en évidence de matériel céramique permettant de dater l'activité de faux-monnayage. Cependant, la présence de deux monnaies dont l'une est un faux visiblement issu de cette production, fournit de bons jalons pour situer l'époque de fabrication.

Le blanc à la couronne (ou aux couronnelles) :

La première des deux monnaies découvertes est un blanc à la couronne (Figure 215). Ce type monétaire fut frappé sous le règne de Charles VII ainsi qu'au milieu de celui d'un de ses descendants, Charles VIII[938]. Il correspond à un monnayage d'argent car frappé dans des alliages de billon cuivre-argent.

L'étude analytique de cette monnaie est présentée plus loin. Toutefois, la couche argentée qui n'en recouvre que partiellement la surface permet déjà d'attester du caractère truqué de cette pièce. Sous cette couche, une âme en métal jaunâtre se distingue laissant penser à l'utilisation d'un laiton comme support.

Figure 215 - Blanc à la couronne.

[938] Blanchet J.-A. *et al.*, *Manuel de numismatique française*, *op. cit.*, t. 2, p. 295.
Duplessy J., *Les monnaies françaises..., op. cit.*, t. 1, p. 236-237 (n° 519a-519c) et p. 267 (n° 587).

D’un point de vue de la datation de ce type monétaire, les premiers exemplaires ont été créés sous le règne de Charles VII. Les libérations ont été faites à la suite de quatre différentes émissions. Elles ont été l’occasion de modifier les titres et masses des monnaies produites :

- Pour la première émission du 28 janvier 1436, les monnaies devaient présenter une masse de 3,06 g, pour un titre d’argent de 39,9 % massiques allié à du cuivre.

- Lors de la seconde émission du 20 janvier 1447, le titre et la masse diminuent avec des monnaies de 2,95 g, contenant 38,9 % massiques de métal blanc. Le premier O de chaque légende est pointé.

- La troisième émission du 26 mai 1447, voit un retour aux ordonnances de la première fabrication. Les légendes des monnaies débutent par des fleurs de lys et présentent diverses ponctuations.

- La dernière émission, ordonnée le 16 juin 1455, mais exécutée un an plus tard, le 26 juin 1456, a prescrit la frappe de monnaies dans une masse de 3,02 g d’un alliage cuivre-argent titré à 35,9 % massiques de précieux. Les monnaies présentent des croisettes au début de leurs légendes, ponctuées de molettes.

A ces quatre fabrications du règne de Charles VII, il faut ajouter une cinquième qui a pris place sous celui de Charles VIII. A partir du 24 avril 1488, des monnaies de 2,85 g d’un billon contenant 35,9 % massiques d’argent, ont été émises selon un type identique à celui de la dernière émission de Charles VII.

Sur son droit, le faux blanc de la grotte de Lauradieu présente un écu de France flanqué de trois couronnelles dans un trilobe. Ce dernier est entouré d’une légende débutée par une croisette (+) et ponctuée par des molettes (*) : +KAROLUS*FRANCORUM*REX*. Sur son revers, on observe une croix cantonnée de deux lys et de deux couronelles dans un quadrilobe cerclé de la légende : +SIT*NOMEN*DNI*BENEDICTUM*. La présence d’annelets sous la cinquième lettre des deux légendes indique que la monnaie qui a servi de modèle, a été frappée dans l’atelier monétaire de Toulouse, où, mais cela devra être discuté, que le coin utilisé dans cette contrefaçon provenait de cette fabrique.

Le faux présente un diamètre de 26 mm correspondant à celui des monnaies qu’il imite, pour une masse de 2,6 g inférieure de manière générale à celle observée pour les différentes émissions des monnaies officielles. L’axe des coins qui l’ont frappée est à 3 h.

Il apparaît que le type du faux blanc retrouvé dans la grotte de Lauradieu peut être rapproché de celui correspondant à deux émissions. La présence de croisettes en début des légendes, par ailleurs ponctuées de molettes, permet de restreindre le

choix aux productions de 1456 et 1488, sous le règne de Charles VII et de Charles VIII. Cependant, si l'estimation du titre et de la masse avait constitués des paramètres discriminants pour relier une vraie monnaie à son émission, le fait qu'il s'agisse ici d'un faux rend hasardeux le recours à ces informations.

Car si un faux-monnayeur peut chercher à rapprocher la masse de sa contrefaçon de celle du modèle copié, avec 2,6 g, la pièce retrouvée à Lauradieu est de toute façon plus légère que les deux types de monnaies falsifiées.

D'un point de vue de son titre de métal précieux, l'observation de son l'aspect extérieur (Figure 215) ainsi que les analyses qui en ont été faites, permettent d'affirmer qu'il s'agit ici d'une contrefaçon et non d'une imitation. Elle ne répond pas par définition à des exigences de respect du titre de la monnaie qu'elle contrefait. Cependant, dans le cas contraire, la caractérisation de l'alliage utilisé n'aurait pas non plus permis de relier l'imitation à l'une des deux émissions potentielles dont les monnaies délivrées présentaient théoriquement les mêmes compositions[939].

D'après les numismates, la discrimination de ces deux types monétaires n'est pas aisée[940]. Elle doit se faire par une étude numismatique et stylistique comparative avec des monnaies dont les attributions respectives auront été attestées à partir d'études de trésors bien datés, ce qui n'est pas envisageable dans cette étude.

Il faut donc pour l'instant admettre une incertitude sur la date d'émission du blanc qui a été copié. Il ne permet donc pour l'instant de situer qu'un début probable de cette activité à partir de juin 1456.

En outre, ce type monétaire de blanc à la couronne est relativement commun et il a circulé sur une longue période puisqu'il se retrouve près d'un siècle après les premières émissions de Charles VII, dans le monnayage de François 1[er 941]. La datation de l'émission de la monnaie originale ne permettrait finalement de ne donner qu'un *terminus ante quem* d'un large intervalle de temps durant lequel l'atelier a pu être établi.

De cette ambiguïté sur la datation découle toutefois une incertitude sur la somme que pouvait en espérer son contrefacteur. D'une valeur libératoire de dix deniers sous le règne de Charles VII, un blanc à la couronne similaire échangé sous Charles VIII en valait deux de plus.

---

[939] Il est intéressant de rappeler ici que le terme d'imitation défini est une fausse monnaie qui copie également le titre et la masse du modèle imité.
[940] Blanchet J.-A. *et al.*, *Manuel de numismatique française*, *op. cit.*, t. 2, p. 66.
[941] Grand blanc à la couronne : Duplessy J., *Les monnaies françaises..., op. cit.*, t. 2, p. 30, n° 835.

Cette information est d'importance dans le cadre d'une estimation des sommes produites par le faussaire. Il est donc nécessaire de rechercher dans la suite de l'étude d'autres données qui permettront de supposer d'une datation plus précise du blanc ou du moins d'une estimation de sa valeur libératoire. Quelles sont alors les précisions qu'apporte la considération de la seconde monnaie retrouvée au cours de la fouille de la grotte ?

Le denier de François-Phébus

La fouille de la couche associée au contexte de l'activité de faux-monnayage a révélé une seconde monnaie (Figure 216) qu'il est, à première vue, difficile de juger comme fausse. Elle a été identifiée par le numismate M. Nogué, comme étant un denier frappé sous François-Phébus, vicomte de Béarn entre 1479 et 1483[942]. Il s'agit d'une monnaie féodale de faible valeur libératoire valant un denier.

Figure 216 - Denier de François-Phébus.

Dans ce contexte de faux-monnayage, il est nécessaire de s'interroger sur l'authenticité de cette monnaie. Si la contrefaçon d'une pièce de si faible valeur peut représenter une alternative surprenante, il existe des exemples de fabrications qui prouvent le contraire dans des contextes économiques et politiques particuliers[943]. Ce cas sera notamment illustré dans l'étude du matériel de La Catette[944].

[942] Rancoule G. *et al.*, La grotte nord de Lauradieu..., *op. cit.*, p. 176
Poey d'Avant F., *Les monnaies féodales de France*, 3 tomes, Graz, Autriche, Akademische Druck - u. Verlagsanstalt, t. 2, 1961, p. 169, n° 3294.
[943] Feller L., *Faux-monnayeurs..., op. cit.*, p. 21.
Bompaire M. *et al.*, *Numismatique médiévale..., op. cit.*, t. 7, p. 120.
Miquel J. *et al.*, Un atelier de faux-monnayeur..., *op. cit.*, p. 194.
[944] cf. Les faux-monnayages de la grotte de La Catette, p. 553.

L'analyse par spectrométrie de fluorescence X de ce denier[945] a montré un spectre équivalent[946] à celui d'un alliage cuivre-argent avec 5 % en masse de métal précieux. Cette composition correspond à un bas billon cuivre-argent, dans lequel les monnaies originales sont frappées. Si le contrefacteur avait cherché à frapper ce type monétaire, il n'aurait pas pris la peine d'ajouter de l'argent à son alliage d'autant que l'aspect d'un tel bas billon est identique à celui du cuivre pur[947]. Il semble que ce denier soit au final une monnaie véritable.

Ce denier pèse 0,76 g pour un diamètre de 15,7 mm. Il porte sur son droit une vache surmontée d'une couronne. La légende partielle doit se lire, selon M. Nogué : +F:F:D:G:DNS:BEARNI, c'est-à-dire, *Fransiscus Fhebus Dei Gratia Dominus Bearni*[948]. Le revers diffère légèrement de celui qu'a décrit F. Poey d'Avant à partir de l'exemplaire de sa propre collection. Il ne porte dans le champ qu'une croix pattée sans motif dans ses cantonnements. Néanmoins, la légende est, semble-t-il, la même : + PAX:ONOR:FORQUIE. L'axe des coins qui l'ont frappée est de 3 h.

A partir de l'étude de ces deux monnaies, il est donc possible de dater cette activité de faux-monnayage de la fin du XV^{e} siècle. Il est toutefois difficile d'être plus précis, en particulier à cause des doutes subsistant quant à la datation du blanc à la couronne. Or, si la datation du denier ne permet pas une installation avant 1479, il est toujours envisageable qu'elle soit décalée après 1488 si le blanc copié a été frappé sous Charles VIII. Par ailleurs, la persistance des types monétaires considérés sur de longues périodes n'exclut pas une période de fonctionnement plus tardive.

II. Les matières premières du faux-monnayage de la grotte de Lauradieu

La présentation du *corpus* issu des fouilles de la grotte de Lauradieu a montré une très forte présence de déchets résultant d'opérations de découpes[949]. Leur analyse doit révéler leurs compositions élémentaires trahissant les matériaux

[945] cf. Annexe C.
Spectromètre du Centre Ernest-Babelon avec une tension d'accélération de 45 kV et une intensité de 500 µA. Le faisceau incident est collimaté à 1 mm de diamètre. Analyses d'une minute.
[946] Avec une petite quantité de plomb.
[947] cf. Figure 190 - Evolution de la morphologie des carreaux de bas billon au cours de leur mise en forme, p. 454.
[948] Rancoule G. *et al.*, La grotte nord de Lauradieu..., *op. cit.*, p.176
[949] cf. *supra*, p. 160.

utilisés dans cette fabrication illégale. Par ailleurs, l'étude de leur morphologie renseigne sur leur forme initiale avant que le faussaire ne les transforme.

Les alliages employés

Pour traiter de la composition des alliages métalliques employés dans cette frappe de fausse monnaie, le protocole d'analyse devait permettre de traiter rapidement 399 carreaux, flans, déchets de coupe ainsi que la monnaie représentant ce faux-monnayage[950]. En définitive, la démarche est la même que celle décrite précédemment pour la caractérisation du matériel métallique de La Rochelle[951]. Compte tenu du délai nécessaire aux analyses quantitatives par activation aux neutrons rapides de cyclotron[952], le principe est de restreindre leur nombre à partir de la définition d'un classement d'échantillonnage basé sur des données de spectrométrie de fluorescence X[953]. Cette dernière méthode, utilisée ici seulement en mode qualitatif permet, grâce à sa rapidité de mesure, de traiter ce grand ensemble d'objets. A la différence du logiciel utilisé pour traiter les données de fluorescence X du matériel de La Rochelle qui permettait de compenser les effets de matrices[954], celui exploité ici ne met pas en place ce genre de correction.

La comparaison des différents spectres obtenus à partir du *corpus* a été entreprise à partir de l'hypothèse, confirmée par la suite, d'un ensemble homogène ou du moins rassemblant des alliages d'un même type.

La présence d'argent associé à du mercure sur la surface de certains flans révélée par les analyses préliminaires de spectrométrie de fluorescence, peut déjà être reliée au procédé d'argenture utilisé par le faux-monnayeur pour donner un aspect de monnaies d'argent à ses faux. Dans une réflexion sur la composition des alliages utilisés pour former l'âme des contrefaçons, il a été fait abstraction de ces deux éléments dans un premier temps.

---

[950] Les 41 rectifications de flans n'ont pas été analysées.
[951] cf. *supra*, p. 323.
[952] Compte tenu de la nature cuivreuse des alliages analysés ici, c'est la méthode de l'étalon interne cuivre qui a été choisie pour la caratérisation par activation aux neutrons rapides de cyclotron.
cf. Annexe B.
[953] cf. Annexe C.
Spectromètre du Centre Ernest-Babelon avec une tension d'accélération de 45 kV et une intensité de 500 µA. Le faisceau incident est collimaté à 1 mm de diamètre. Analyses d'une minute.
[954] cf. Annexe C.

A partir des résultats des analyses par spectrométrie de fluorescence X, il est déjà possible d'attester d'une grande homogénéité générale du *corpus*. L'étude des spectres de fluorescence a permis de définir trois ensembles de composition. Le plus réduit d'entre eux ne compte que trois artefacts mais contraste clairement avec le reste des objets puisqu'il regroupe des échantillons mis en forme à partir d'un alliage s'approchant d'un cuivre pur. Il s'agit d'un carreau ainsi que de deux flans dont les dimensions ne semblent pas différentes de celles observées dans le reste du *corpus*. Ils correspondent, semble-t-il, à la même production mais potentiellement à une phase différente. Quant aux deux autres groupes révélés par les analyses, ils montrent l'emploi dans ce faux-monnayage, d'un alliage à base majoritaire de cuivre et de zinc. Il s'agit donc d'un laiton. La discrimination des deux compositions n'a pu finalement être faite qu'à partir de l'importance du pic de fluorescence correspondant au zinc ; les autres différences entre les spectres portant sur les éléments provenant *a priori* des sédiments agglomérés à la surface des échantillons au cours de l'enfouissement : fer, calcium, chlore. Si sur l'ensemble des 396 objets rassemblés dans ce groupe de composition, l'intensité de fluorescence du zinc décrit une variation pseudo-continue entre des valeurs hautes et des plus basses, il n'y a pas de tendance marquée. Il a toutefois été décidé de définir deux sous-groupes dont la limite formelle de discrimination est la valeur médiane de l'intervalle d'amplitude mis en évidence.

Dans chacun des trois ensembles proposés à partir des analyses de spectrométrie de fluorescence X, plusieurs échantillons ont été isolés : le carreau de cuivre, ainsi que deux flans dans chacun des deux groupes de laiton. Ces cinq objets métalliques ont été analysés par ANRC. Le choix d'analyser seulement des éléments en cours de mise en forme et non des déchets de coupe s'est fait d'abord à partir de considérations pratiques liées à l'analyse, étant donné qu'il est préférable d'avoir une géométrie d'échantillon plane sur le détecteur de rayonnement gamma[955]. D'autre part, cette distinction était permise par les caractérisations préliminaires qui n'ont pas montré de différences de composition selon les types d'objets. Les flans présentant du mercure et de l'argent sur leur surface n'ont pas été sélectionnés.

Les résultats de ces analyses corroborent la constatation initiale jugeant de l'homogénéité de ce *corpus* archéologique.

La caractérisation du carreau issu du premier groupe montre que du cuivre pratiquement pur a pu être utilisé dans ce monnayage (Tableau 7). Cependant, la

[955] cf. Annexe B.

représentativité de cette source de matière première doit être discutée puisque seuls trois objets sur les 399 que compte le matériel analysé, témoignent de son emploi.

L'étain et le plomb, dont les concentrations sont inférieures au pourcent massique, correspondent sans doute à des impuretés non véritablement voulues dans le mélange, tout comme les traces de nickel, antimoine, arsenic, argent et fer. Même si ce dernier peut également provenir en partie des sédiments dans lesquels ont été retrouvés les échantillons.

	Groupe de fluorescence	Ni	Sn	Zn	Sb	Pb	Au	Ag	As	Fe	Cu
Aur_18	Groupe cuivre	0,03	0,76	n.d.	0,29	0,54	0,001	0,12	0,08	0,10	98,1

Tableau 7 - Analyses par ANRC de l'échantillon de cuivre (% massiques).

Les analyses des quatre flans de laiton sont plus significatives car elles permettent en définitive de conclure à l'équivalence des deux groupes de compositions préalablement proposés. En effet, les différences observées à partir des spectres de fluorescence X se sont finalement révélées inexistantes après les caractérisations globales des échantillons, montrant chacun des compositions à peu près identiques (Tableau 8).

N°	Groupe de fluorescence	Ni	Zn	Sn	Sb	Pb	Au	Ag	As	Fe	Cu
Aur_03	Zn élevé	0,26	20,6	0,004	0,032	1,07	n.d.	0,05	0,10	0,14	77,8
Aur_08	Zn élevé	0,23	19,1	n.d.	0,018	0,83	n.d.	0,03	0,04	0,20	79,5
Aur_09	Zn plus faible	0,25	20,0	0,004	0,041	1,18	10^{-3}	0,05	0,12	0,18	78,2
Aur_10	Zn plus faible	0,22	19,6	0,003	0,022	0,82	n.d.	0,05	0,07	0,12	79,1
	Moyenne	0,24	19,8	0,004	0,028	0,97	10^{-3}	0,042	0,084	0,16	78,6

Tableau 8 - Analyses par ANRC des échantillons de laiton (% massiques).

Les variations apparues lors du premier classement s'expliquent par la conjugaison de deux paramètres propres aux échantillons analysés ainsi qu'à la méthode d'analyse choisie. En effet, lors de leur mise en forme, mais également lors de leur enfouissement, les objets considérés ont subi à leur surface des réactions d'oxydation au contact de l'air et des sédiments, induisant des modifications de leur composition superficielle. D'autre part, la spectrométrie de fluorescence X est une technique d'analyse de surface qui ne permet la caractérisation d'un matériau que sur une profondeur limitée[956].

Ainsi, les différences observées lors des premiers dosages ont finalement mis en évidence la variation de la composition à la surface des échantillons résultant de leur mise en forme et enfouissement. Ces dernières ne pouvaient se retrouver dans les analyses par ANRC qui, en tant que méthode globale, fournit une moyenne

[956] cf. Annexe C.

pondérée des compositions depuis la surface jusqu'au cœur de l'objet. Compte tenu du volume des échantillons caractérisés, la part saine très majoritaire dans les échantillons impose sa composition dans ces estimations. Ces dernières fournissent les informations concernant les métaux employés.

Compte tenu de l'homogénéité globale du *corpus* révélée par les analyses de spectrométrie de fluorescence X, la composition du mélange de métaux majoritairement utilisés dans ce faux-monnayage est fournie par la moyenne des dosages obtenus par ANRC. Il s'agit d'un alliage de laiton composé en majorité de cuivre (78,7 %) et de zinc (19,8 %). Il montre par ailleurs une faible quantité de plomb, de l'ordre du pourcent, correspondant sans doute à une impureté non véritablement voulue dans le mélange, tout comme les traces de nickel, antimoine, arsenic et argent. Quant au fer, il provient sans doute des sédiments dans lesquels ont été retrouvés les échantillons.

Les résultats principaux de la caractérisation de ce *corpus* archéologique montrent qu'il regroupe une écrasante majorité d'objets de laiton de composition très homogène. L'alliage qui compose le cœur du faux blanc est le même que celui des déchets de coupe. L'ensemble défini correspond donc à la mise en forme d'un même stock de métal. Ce qui est, en outre, compatible avec une hypothèse qui veut que cette collection d'ébauches de monnayage corresponde à un volume de production limité[957].

Quant aux seuls trois échantillons ayant révélé l'emploi de cuivre pur, si leur morphologie permet de les associer au reste du *corpus*, leur importance statistique interdit de leur attribuer trop de poids dans la proposition d'un usage associé à cette activité. L'hypothèse la plus probable de leur présence doit envisager un mélange potentiel de matières premières. Ce dernier, s'il n'était pas intentionnel, n'en était pas moins connu du faussaire, compte tenu des couleurs différentes des deux alliages utilisés.

Outre ces considérations archéométriques, le protocole d'analyse proposé a une nouvelle fois montré sa capacité à traiter rapidement et de manière exhaustive un très grand nombre d'objets.

Les analyses menées sur les restes de ce faux-monnayage ont révélé la principale matière première utilisée par le fraudeur, c'est-à-dire celle qui constituait le cœur de ses monnaies : du laiton. Cependant, il a été préalablement évoqué que le faux-monnayeur a donné l'aspect de vraies monnaies à ses faux en les

[957] cf. L'estimation de la production du faux-monnayage de la grotte de Lauradieu, p. 544.

recouvrant d'une pellicule argentée. Les éléments qui la composent ainsi que ceux qui ont permis de la mettre en œuvre doivent également être pris en compte dans le cadre de matériaux nécessaires à ce faux-monnayage.

L'observation au microscope électronique à balayage de la coupe d'un de ces flans argentés atteste de cette pellicule superficielle. D'autre part, son analyse en parallèle par spectrométrie de dispersion d'énergie montre qu'elle n'est composée que de mercure, d'argent ainsi que de petites quantités de cuivre et de zinc.

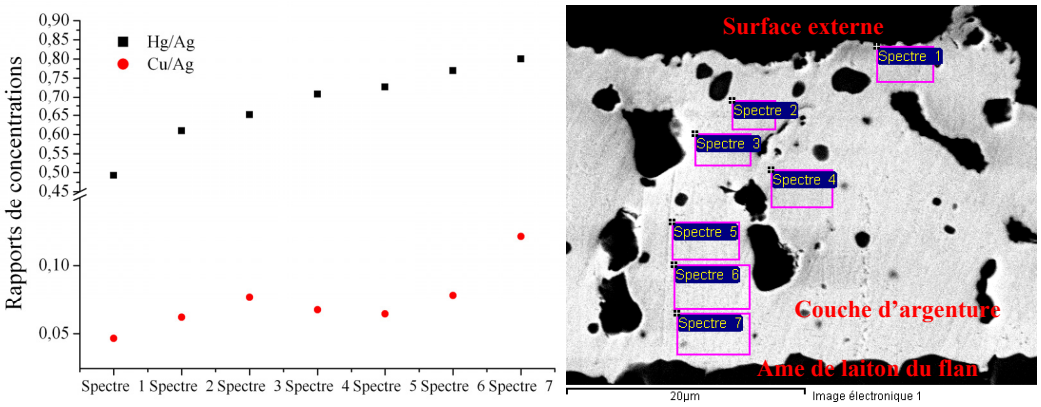


Figure 217 - Concentrations de cuivre et de mercure rapportées à celle de l'argent dans la couche d'argenture d'un flan de la grotte de Lauradieu.

La justification de la présence des deux premiers métaux tient du procédé d'argenture qui sera présenté par la suite. Ils doivent donc être comptés parmi les éléments employés dans cette activité illégale.

Le faux-monnayeur a donc utilisé une petite quantité de métal précieux pour argenter ses fausses monnaies. A l'époque considérée, la monnaie constitue l'une des sources possibles pour disposer facilement de métal blanc. Ce dernier y est cependant toujours allié à du cuivre. La présence de ce métal détectée dans la couche d'argenture peut-elle signifier un tel emploi ? Dans un premier temps, le fait qu'il y ait également une petite quantité de zinc dans cette pellicule alors que du laiton est utilisé dans le cœur du flan, recommande d'en douter. Par ailleurs, l'évaluation du rapport de la quantité de cuivre sur celle d'argent selon un profil allant de l'extérieur vers l'intérieur de la couche permet de constater une variation (Figure 217). Or, la quantité d'argent peut être considérée comme une constante dans toute la couche étant donné son mode d'application. L'augmentation du rapport à l'approche du cœur de la fausse monnaie indique donc une augmentation de la quantité de cuivre à son voisinage. En définitive, la présence de cuivre et de zinc dans la pellicule superficielle argentée résulte certainement d'une diffusion de ces derniers lors de l'étape d'argenture, mais également des phénomènes

d'oxydation qui ont eu lieu par la suite et qui ont induit la présence d'oxydes de cuivre et de zinc à l'intérieur de la couche argentée[958].

Le faux-monnayeur n'a donc pas utilisé d'argent provenant de véritables monnaies dans sa production, il a semble-t-il, préféré employer dans sa fabrication de l'argent préalablement purifié.

Les formes des matières premières

Outre la composition élémentaire des matières premières utilisées, le problème de leur forme initiale doit aussi être abordé. Pour la partie de la chaîne opératoire qui traite de la production des flans en alliages cuivreux, elle peut se résumer à une question principale : quelle était la première étape de cette fabrication au sein de la grotte ? La réponse à cette interrogation doit être soutenue par le croisement de plusieurs observations à la fois archéométriques et archéologiques. Elle se limite cependant à la discussion de deux alternatives majeures : le faux-monnayeur a-t-il mis en place, au sein de la cavité ou à proximité, des opérations de fonderie et de préparation des lames, ou a-t-il démarré sa production à partir de matières premières sous des formes préalablement ébauchées ?

Dans un premier temps, la morphologie des fragments de tôles rectangulaires indique que ces fragments doivent être reliés aux étapes initiales de la fabrication. Il s'agit de morceaux de lames dont les mensurations irrégulières interdisent de supposer qu'ils puissent correspondre à des carreaux en cours de mise en forme. En calculant pour chacune des rognures de métal le rapport de leurs côtés[959], seuls quatre d'entre eux se rapprochent de l'unité traduisant des morphologies quasiment carrées.

[958] Le cas du mercure peut être évoqué en parallèle car il met en évidence une variation comparable à celle du cuivre. Elle est cependant différente car elle résulte du procédé d'argenture au cours duquel ce métal est en partie évacué de la couche d'argenture par chauffage. Il en résulte un gradient de concentration entre l'intérieur de la pellicule et la surface extérieure.
[959] Les longueurs sont divisées par les largeurs.

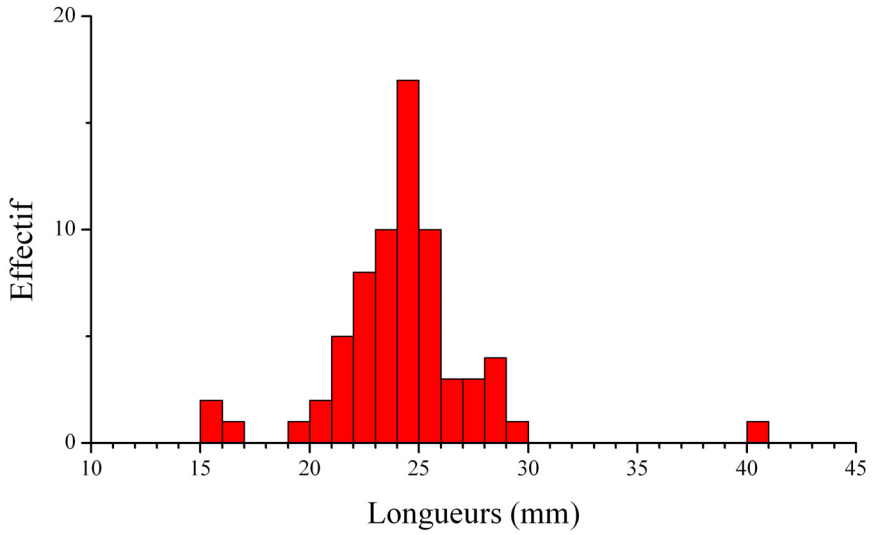


Figure 218 - Répartitions des longueurs de lame.

La mise en évidence des répartitions propres aux longueurs des fragments (Figure 218) révèle une distribution peu étendue et montre une variation des mensurations d'une dizaine de millimètres autour d'un pic situé à 24,5 mm. D'autre part, elle présente une distribution asymétrique avantageant les longueurs inférieures à celles des valeurs comprises entre 24 et 26 mm. Une telle organisation est une caractéristique propre aux matières premières utilisées. Le faussaire semble avoir disposé de tôles qui présentaient une dimension commune située autour de 24,5 cm, tout à fait comparables, avec de légères incertitudes, aux 26 mm correspondant au diamètre du blanc à la couronne qui a été contrefait dans cette activité.

Ces déchets correspondent donc aux restes de découpe par le faux-monnayeur de ses lames en carreaux. Dans une première étape, il cisaille une plaque de métal en bandes d'une largeur équivalente à celle des monnaies à contrefaire. Dans ces lames, il coupe ensuite des carreaux. Les dimensions originales des lames ne permettant pas d'obtenir un nombre entier de carrés métalliques, les chutes de cette opération se présentent sous forme de rectangles de métal correspondant aux extrémités restantes.

Enfin, parmi les quatre fragments présentant des morphologies carrées qui pourraient correspondre à des carreaux n'ayant pas été par la suite mis en forme, seuls deux d'entre eux peuvent être comptés comme tels. Les deux autres portent des défauts dont il sera question dans le paragraphe suivant, les rendant inutilisables d'un point de vue monétaire.

La principale particularité de la collection de fragments de lames découverts dans la grotte de Lauradieu, est associée à la présence de perforations sur certains d'entre eux (Figure 219). Dix-neuf fragments sur les 72 que compte le *corpus*, semblent avoir été perforés par poinçonnage avec un outil pointu. Ce dernier a induit des déformations importantes allant jusqu'à des déchirures du métal.

Figure 219 - Exemples de perforations des fragments de tôles.

Les diamètres des perforations observés variant entre 2,3 et 3,6 mm pourraient être expliqués par une profondeur différente de pénétration de la pointe utilisée. Cependant, la présence sur trois échantillons de petits disques de métal non arrachés, de 1,4 et 2,8 mm de diamètre, indique toutefois l'emploi de deux outils différents et peu acérés.

Il a été vu dans le paragraphe précédent que les fragments dont il est question ici, sont les résidus de la découpe de lames en carreaux. Le fait que certains trous aient été recoupés lors de ces cisaillements, témoigne de leur présence sur les ébauches avant la découpe.

Ces observations montrent l'absence de relation technologique entre la perforation des plaques et la réalisation des carreaux. Elles dégradent par ailleurs l'intégrité des plaques en rendant une partie inutilisable pour la production monétaire.

C'est pourquoi la finalité de telles altérations pourrait être recherchée en amont de l'activité de faux-monnayage.

Les seuls indices qui pourraient indiquer que ces percements sont reliés à l'activité clandestine de Lauradieu sont leurs positionnements particuliers. Ils semblent avoir été faits au milieu des extrémités des lames utilisées par le faussaire. Les plaques ainsi traitées présentaient dans ce cas déjà des dimensions préférentielles.

Toutefois, la question de l'utilité de ces perforations dans la chaîne opératoire de ce faux-monnayage n'est pas évidente. L'hypothèse la plus probable aurait été la nécessité de faire subir aux lames un traitement préliminaire avant qu'elles soient découpées en carreaux. Les trous auraient servi à suspendre les tôles dans un bain réactif. Cependant, en anticipant sur la démonstration des étapes de fabrication de ce monnayage, une telle préparation des lames n'est pas nécessaire.

Il faut, dans ce cas, considérer que la présence de ces trous n'est pas liée à cette fabrication monétaire clandestine et que le faussaire a pu se procurer des lames préalablement trouées, sans particulièrement les vouloir ainsi. La finalité de ces trous serait justifiée par l'emploi de ces tôles métalliques dans une autre activité qu'il est difficile toutefois de préciser, compte tenu du nombre de possibilités. Cette hypothèse permet de suggérer que les matières premières du faux-monnayeur ont pu se présenter sous forme de plaques mises en forme auparavant dans un autre lieu, voire même par une autre personne que le fraudeur.

Les épaisseurs mesurées sur les différents objets mis au jour dans la grotte de Lauradieu (Figure 220) mettent en évidence une homogénéité remarquable de l'ensemble du matériel. L'intervalle global de variation traduit une différence de seulement 1 mm entre les valeurs extrêmes, comprises entre 0,34 et 1,3 mm. Par ailleurs, l'estimation de l'écart-type (σ) de l'ensemble des épaisseurs relevées[960] permet de restreindre ce premier domaine à un second, plus représentatif du *corpus*. Statistiquement, 95 % des valeurs considérées se retrouvent dans un voisinage de 2σ de part et d'autre de leur moyenne, égale à 0,66 mm. Il apparaît en définitive, que la très grande majorité des plaques utilisées dans cette activité présentent une variation d'épaisseur inférieure à un demi-millimètre, ce qui est extrêmement réduit dans le cadre d'un martelage.

En outre, cette reproductibilité s'observe chez chacun des types d'objet retrouvés, excepté pour les deux fragments assimilés à des carreaux mais dont le nombre est loin d'être représentatif. Les données des six autres classes (flans et différents déchets) représentées sur la figure 220 montrent par leurs moyennes, la même répartition observée globalement avec un faible écart de variation[961].

[960] Il est égal à 0,12 mm et calculé à partir des 385 épaisseurs.
[961] Ecarts-types tous inférieurs à 0,17 mm.

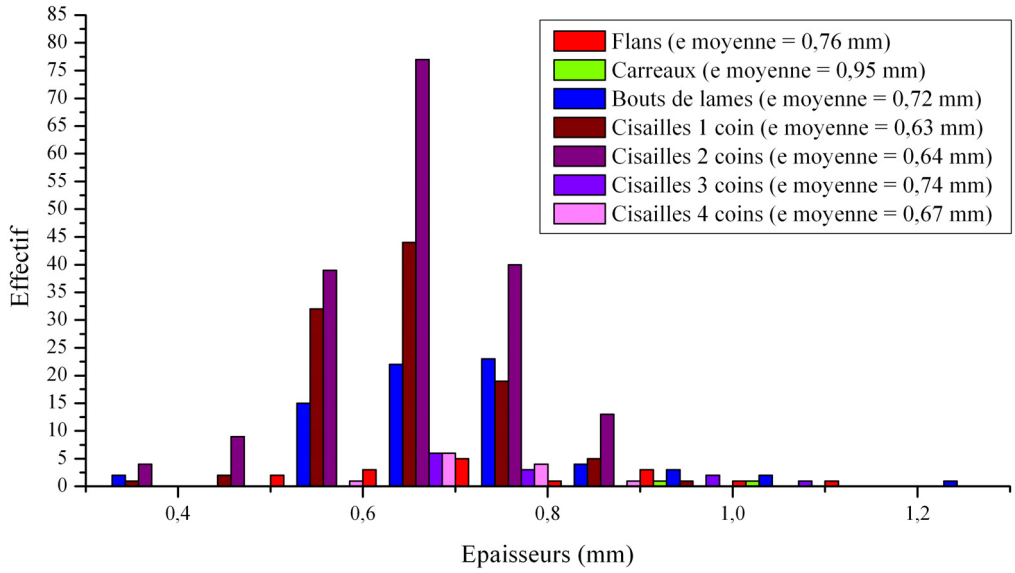


Figure 220 - Répartitions des épaisseurs des objets de la grotte de Lauradieu.

Une telle régularité au sein de ce *corpus* doit être prise en compte dans la mesure où elle peut trahir une technique, l'emploi d'un certain type de matière première ou encore une action limitée dans le temps.

Un raisonnement contemporain attribuerait sans doute à une machine la qualité de cette mise en forme. Le recours à un laminoir pour produire des tôles métalliques d'épaisseurs constantes serait idéal. Cependant, la période supposée de fonctionnement de cet atelier clandestin s'accorde difficilement avec l'utilisation d'un laminoir. En effet, il a été vu que la période d'établissement de cette activité devait être située à partir de la fin du XV^{e} siècle, or c'est en définitive à cette même époque que le laminoir semble avoir été mis au point en Allemagne.

Incompatible d'un point de vue chronologique, l'utilisation d'un laminoir est également exclue, finalement plus pragmatiquement, par la présence dans le *corpus* étudié de deux bords de lame dont les morphologies sont caractéristiques d'une déformation au marteau. En revanche, si l'impossible présence d'un laminoir au sein de la grotte imposait de placer la fabrication des lames dans un autre lieu, qu'en est-il d'une mise en forme au marteau ?

Tout en reconnaissant à l'artisan une maîtrise de sa technique, les conditions de travail dans la cavité ne sont cependant pas optimales. La très grande reproductibilité des épaisseurs mesurées de l'ensemble des objets retrouvés, est

plus compatible avec une mise en forme dans un atelier disposant des infrastructures nécessaires[962].

D'autre part, l'essentiel du *corpus* mis au jour au sein de la grotte correspond à des fragments résultant des différentes découpes nécessaires à la production de carreaux puis de flans. L'observation des morphologies de ces déchets met en évidence une particularité surprenante. Au cours des étapes préliminaires de mise en forme des lames qui n'ont pas obligatoirement été effectuées dans la cavité, ces dernières vont voir leurs bords déformés. Or, parmi 439 déchets retrouvés lors de la fouille, seuls deux d'entre eux présentent de tels types de morphologies caractéristiques (Figure 221). Les 437 autres font état de bords rectilignes, nettement cisaillés. Ils ont fait l'objet de rectifications qui interviennent après la préparation des lames qui ont pour but d'en éliminer les extrémités irrégulières avant leurs découpes en carrés pour former les carreaux.

Figure 221 - Morphologies de bords de lames.

La fouille de la cavité a révélé une localisation des déchets à l'endroit *a priori* de leur découpe. Le redressement des lames aurait-il eu lieu hors de l'emprise de l'intervention archéologique ? Il serait surprenant d'un point de vue de l'organisation du travail au sein de cet atelier clandestin que cette opération ait été faite dans un autre emplacement que celui choisi pour la découpe des carreaux et des flans. Il n'est pas non plus vraisemblable que les déchets de ce cisaillement aient fait l'objet d'une récupération plus appliquée. Il faut donc envisager que cette opération ait été faite préalablement dans un autre lieu que la cavité.

En continuant sur des considérations archéologiques, il apparaît que la fouille n'a pas non plus permis de révéler d'indices témoignant d'opérations de fonte au sein de la grotte. Restons toutefois critique sur ce point car si aucun foyer n'a pu

[962] Le matériel minimum nécessaire à cette mise en forme comprend un marteau et une enclume pour les phases de martelage. Pour les recuits, il est important d'avoir un four dont la température est bien contrôlée. Il implique en parallèle une consommation de combustible et impose le recours à des pinces ou tisonniers pour manipuler les objets qui y sont placés. Enfin, il peut également être intéressant de disposer de cisailles comme d'une lime pour rectifier les potentiels défauts pouvant apparaître au cours des mises en forme, pour éviter qu'ils ne se développent.

être fouillé, cela ne doit en aucun cas signifier qu'il n'en existait pas puisqu'il sera vu plus loin que le procédé de fabrication tel qu'il a été mis en place dans cette activité, notamment pour les opérations d'argenture, a nécessité le recours à une structure de combustion. En considérant la taille de la grotte, le faussaire aura peut-être préféré placer son foyer à l'extérieur, s'évitant ainsi le désagrément lié au dégagement de fumées. C'est d'ailleurs ce type de configuration qui se retrouve à la grotte du « Crès de la Louve » ayant également abrité un faux-monnayeur. La découverte de coulées de métal ainsi que de scories ont permis de situer une zone de combustion devant le porche de cette cavité[963].

La dimension des plus petits objets mis au jour lors de la fouille fait état de la rigueur de l'expertise archéologique. Dans l'hypothèse d'une préparation des lames dans la grotte par le faux-monnayeur, il est permis de s'étonner qu'aucun indice d'une métallurgie à haute température n'ait pu être mis en évidence.

Finalement, l'avantage principal de la mise en place d'une démarche de fonte et de mise en forme des lames dans ce lieu reculé se comprendrait par une augmentation possible de la productivité globale de la chaîne opératoire. Elle permettrait en effet un recyclage des déchets de découpes qui, une fois refondus, constitueraient une nouvelle source de matières premières.

Une telle volonté de récupération pourrait être illustrée par la pauvreté du *corpus* des flans et carreaux de cuivre dont les déchets associés à leurs mises en forme n'ont pas été retrouvés. Cependant, leur faible représentation s'oppose à celle du lot autrement plus important de déchets de laiton. En supposant bien sûr que cette activité n'ait pas été brusquement arrêtée, la définition d'une volonté de retraitement se voit pondérée par les 186 g d'alliage que représentent ces derniers. Ramenés aux 2,6 g de la fausse monnaie retrouvée, ils auraient pu permettre la fabrication de nombreux faux supplémentaires qui ne semblent pourtant pas avoir suscité un désir de réutilisation.

Par ailleurs, un dernier point permet de douter de la préparation des lames par le faussaire. Si ce dernier avait eu l'opportunité de mettre en forme lui-même ses tôles de métal, n'aurait-il pas cherché à obtenir des morphologies compatibles avec la finalité de sa production ? En d'autres termes, la quantité de bouts de lames retrouvée lors des fouilles est surprenante dans une optique d'optimisation de l'utilisation des matières premières.

Au terme de cette discussion à la fois archéométrique et archéologique portant sur les formes de matières premières utilisées dans ce faux-monnayage, il semble se dégager que le faussaire ait pu disposer de tôles préalablement mises en forme.

[963] Bompaire M. *et al.*, La grotte du Crés..., *op. cit.*, p. 71.

Cette hypothèse définit par ailleurs la démarche la plus cohérente avec cette activité qui a pris place au sein d'une cavité naturelle. Le choix du faussaire d'établir son atelier dans un tel lieu, se justifie principalement par une volonté de dissimulation de son activité illégale. Or, il n'est en définitive possible pour un observateur de juger du caractère frauduleux de cette production qu'à partir de l'étape de la chaîne opératoire au cours de laquelle sont découpés les flans. Il n'y a pas d'interdiction à mettre en forme des tôles de laiton, de même que ces dernières ne trahissent pas initialement le fait qu'elles puissent être détournées à des fins de faux-monnayage. Pourquoi le faussaire ne se serait-il pas épargné l'inconvénient de la mise en œuvre complexe de ses lames au sein de la cavité ? Il pouvait sans éveiller aucun soupçon, réaliser beaucoup plus facilement ces opérations préliminaires dans un atelier métallurgique.

En conclusion, on peut exclure les étapes préliminaires de préparation des alliages ainsi que de mise en forme des lames de la chaîne opératoire du faux-monnayage au sein de la grotte de Lauradieu. La première des opérations qui y prend place, est, semble-t-il, celle de la découpe de plaques préformées présentant par ailleurs des morphologies préalablement rectifiées.

L'homogénéité du *corpus* d'un point de vue des épaisseurs relevées ainsi que de sa composition atteste, d'autre part, d'une donnée importante. Le lot de laiton utilisé constitue un seul et unique stock de matière première. Il est donc très probable qu'il ne corresponde qu'à une seule phase de fonctionnement de cet atelier clandestin. L'absence de variation de composition qui s'observe pour près de la totalité des objets retrouvés au sein de la grotte, traduit également une stabilité de la source métallique. Elle permet de supposer que la durée d'activité dont font état les objets archéologiques mis au jour, correspond à une période relativement restreinte. Elle pourrait ne s'étendre que sur quelques mois, au cours desquels la qualité du métal utilisé n'aurait pas changé. D'autant que la production qu'il sera possible d'associer à ce matériel[964], semble être d'une quantité modeste renforçant l'hypothèse d'une entreprise limitée dans le temps.

Enfin, l'emploi de laiton pour constituer le cœur des monnaies contrefaites peut paraître surprenant. Alors que le rouge d'une âme en cuivre pur aurait pu être assimilé, en cas de dégradation de la couche d'argenture superficielle, à la frappe d'un mauvais billon, le jaune du laiton ici utilisé, trahit d'emblée la fraude. Bien que le faussaire ne soit pas le premier inquiété en cas d'apparition de tels défauts,

[964] cf. L'estimation de la production du faux-monnayage de la grotte de Lauradieu, p. 544.

le recours à cet alliage contenant du zinc n'apporte pas d'avantage particulier dans sa fabrication. Il ne doit donc pas être considéré comme le résultat d'un choix délibéré de la part du faux-monnayeur.

III. La chaîne opératoire du faux-monnayage de la grotte de Lauradieu

L'étude numismatique préliminaire de l'unique fausse monnaie retrouvée eu sein de la grotte ainsi que les observations menées à partir des déchets de coupe mis au jour, ont permis de disposer d'un aperçu de la chaîne opératoire de fabrication suivie par le faux-monnayeur. Son principe général se résume finalement à la production de fausses pièces à l'aide d'un alliage commun, recouvert *in fine* d'une pellicule argentée. L'obtention d'un tel résultat est permise par une succession de plusieurs étapes dont certaines suivent un ordre précis.

Cette discussion sur les techniques associées à cette activité de faux-monnayage doit être envisagée par une analogie avec celles en vigueur dans les ateliers officiels afin de mettre en exergue les différences entre ces deux fabrications. Elles permettent de définir les normes propres à cette production particulière de monnaies. La définition des paramètres ayant conduit à l'établissement de ces modes opératoires fournit *a priori* autant d'informations sur les savoir-faire du faussaire que sur ses conditions de travail.

La chaîne opératoire est présentée suivant la chronologie de production de ses monnaies par le faux-monnayeur. En outre, compte tenu des hypothèses formulées dans la partie précédente traitant des matières premières utilisées dans cette activité[965], il est admis que ces dernières se présentaient initialement sous forme de tôles de métal préalablement étendues à une épaisseur voisine de celle observable sur le type monétaire copié.

La découpe des lames et des carreaux

Dans cette partie, la question abordée est celle des mensurations des lames dans lesquelles sont découpés les carreaux. Il existe en effet deux cas de figure extrêmes. Le premier se définit dans une analogie avec la chaîne de fabrication officielle, les carrés de tôle métalliques sont cisaillés dans des bandes de métal qui ont pour largeur celle des carreaux que l'on souhaite obtenir. Cependant, il est

[965] cf. Les matières premières du faux-monnayage de la grotte de Lauradieu, p. 517.

aussi envisageable selon une seconde méthode que cette découpe soit progressive dans une plaque ne présentant pas de mensurations prédéfinies.

La discrimination entre ces deux types de coupes est possible à partir de plusieurs constatations. D'abord d'un point de vue pratique, il est en effet plus simple de former des carrés dans des bandes de métal dont la largeur est équivalente à celle des carrés formés à partir d'un seul cisaillement. La même opération à partir d'une tôle plus large demande en revanche deux coups de cisailles perpendiculaires, devant se rejoindre dans le coin du carreau découpé. Cette opération est particulièrement complexe compte tenu de la relative imprécision du découpage de tôle métallique. Cette technique peut être mise en évidence par l'observation d'amorces de coupe résultant de cette maîtrise difficile des cisaillements. Parmi les 398 fragments de tôles mis au jour, seuls deux d'entre eux présentent de tels défauts[966].

Figure 222 - Amorces de découpes.

Il faut donc conclure à un découpage des carreaux dans des lames présentant initialement des largeurs équivalentes au diamètre du faux blanc fabriqué. Cette hypothèse est du reste tout à fait en accord avec la découverte au sein de la grotte, des fragments métalliques, précédemment assimilés aux extrémités des lames.

En outre, la discussion sur les perforations observables sur certaines tôles avait conclu à l'utilisation par le faussaire, de lames présentant initialement des largeurs compatibles avec son monnayage.

Lors des premières étapes de découpes, le faux-monnayeur a donc simplement taillé ses carreaux dans des lames de laiton ou de cuivre présentant toutes des largeurs comparables au diamètre du faux blanc retrouvé.

[966] Les 41 petites rognures ne sont pas comptées dans ce *corpus* car elles sont trop petites pour mettre en évidence ce type de défauts.

La préparation des flans

La préparation des flans semble être dans ce faux-monnayage et finalement comme pour la chaîne officielle, l'étape qui suit la découpe des carreaux. Cependant, la technique employée ici est différente de celle des ateliers royaux. Il a été vu précédemment que dans les ateliers monétaires, la mise en forme des flans à partir des carreaux regroupe une succession de nombreuses opérations à la fois de découpe, de martelages et de recuits[967]. Leurs finalités principales sont de garantir la conformité des masses des monnaies avec les valeurs fixées par les ordonnances, et d'assurer une production limitée de déchets de coupe. Il apparaît ici que le faussaire ne s'est pas imposé ces types de contraintes.

L'étude des épaisseurs des nombreux déchets provenant à la fois de la découpe des carreaux mais aussi des flans, a montré une homogénéité générale. Elle prouve qu'aucun martelage dans un but d'amincissement n'intervient tout au long de la fabrication. Les morphologies tout à fait caractéristiques de la très grande majorité des chutes de coupe mises au jour, témoignent de la technique retenue pour former les flans à partir des carreaux. Ces derniers ont vu simplement leurs coins cisaillés selon une forme arrondie.

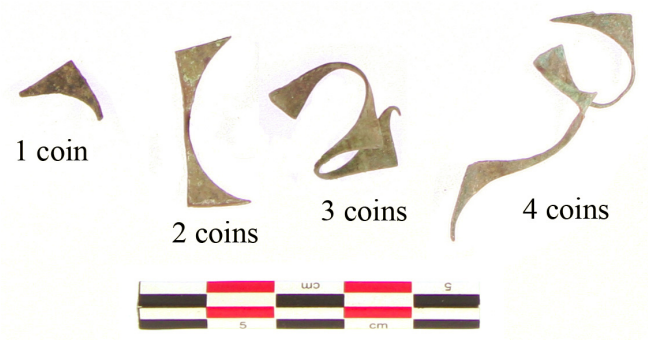


Figure 223 - Différentes découpes progressives.

Ce découpage est en outre, plus ou moins séquencé puisqu'il a dans certains cas été fait en une seule opération élimant les quatre extrémités du carré en une seule fois, alors qu'il aura été plus progressif dans d'autres, n'enlevant qu'un à trois coins d'un coup (Figure 223).

[967] cf. La chaîne opératoire du monnayage au marteau, p. 387.

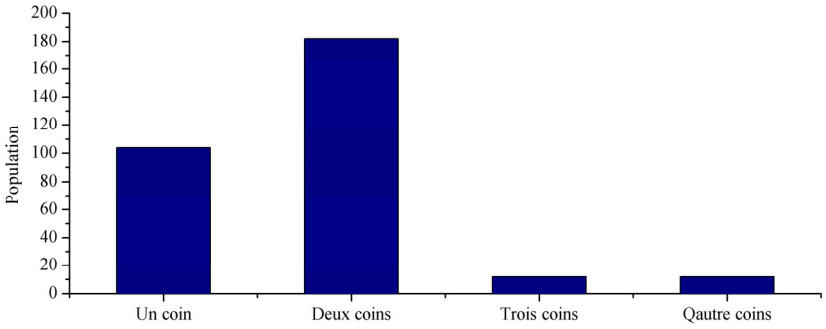


Figure 224 - Répartition des différents types de déchets de coupes selon le nombre de coins coupés.

Le classement des déchets correspondant à ces différentes découpes semble suggérer certaines préférences pour les techniques de cisaillement (Figure 224). Même si compte tenu de leur fragilité, certains des déchets peuvent avoir été fractionnés consécutivement à leurs découpes, il apparaît qu'un façonnage par élimination progressive des coins soit privilégié. Il semble toutefois que le recours à une coupe des coins par paires soit par ailleurs préféré à celle qui n'élimine qu'une seule extrémité. Ces deux méthodes conduisent à une perte moins importante de matière, dès lors que la découpe continue des extrémités d'un carreau nécessite de rogner un peu plus sur la surface du flan afin qu'il y ait un lien de métal persistant entre les différents coins. Cependant, l'économie de matière ne semble pas être l'une des caractéristiques principales de cette activité. Par ailleurs le métal économisé sur la découpe d'un flan de façon progressive apparaît très limité par rapport à la taille de ces derniers et représente finalement un gain négligeable. C'est pour ces raisons, qu'il faut certainement voir dans cette répartition inégale des typologies des déchets, le résultat d'un choix pratique qui veut qu'un découpage progressif permette de rectifier plus facilement la forme circulaire d'un flan. Le faussaire a cependant eu besoin de rectifier à plusieurs reprises ses flans comme en témoignent les 41 rognures retrouvées, en relation avec les 310 autres déchets mis au jour.

Au cours de ces opérations de découpe, il est également possible que la forme ébauchée soit déformée sous l'action des cisailles et doive être redressée par un léger martelage de sa surface. Toutefois, les déchets produits présentant des morphologies beaucoup moins régulières, il est envisageable qu'ils soient les seuls à subir des déformations, comme le suggèrent leurs formes en enroulement circulaire. Par ailleurs, la mesure des épaisseurs de tout le *corpus* a mis en évidence une homogénéité globale sans distinction de position dans la chaîne opératoire. Si les flans doivent subir des martelages pour être redressés après leur

découpe, celui-ci est assez limité pour ne pas les amincir. Les observations métallographiques de la coupe du flan[968] trahissant des tailles de grains plus importantes au cœur de l'alliage qu'à la surface de l'ébauche confirment semble-t-il cette hypothèse. Lors d'une recristallisation de l'alliage, les défauts périphériques auront impliqué la formation de nouveaux petits grains. D'un autre côté, leur absence au centre de la matrice aura permis le grossissement des grains préalablement restaurés et n'ayant pas été de nouveau contraints.

Dans les ateliers officiels, les flans sont également rechaussés pour être progressivement arrondis et globalement uniformisés[969]. Lors de l'étude métallographique, l'observation des tranches des déchets du *corpus*[970] qui, par définition, ne peuvent avoir subi de rechaussage, révèle des morphologies similaires à celles que l'on peut mettre en évidence à partir du flan. Ce dernier n'a donc pas eu besoin d'être rechaussé. Compte tenu de la relative finesse des tôles utilisées, de l'alliage qui les compose, ainsi que de l'outil employé pour leur découpe, le cisaillement est assez net pour ne pas justifier d'être rectifié par un martelage.

Enfin, dans les ateliers officiels, une fois que les flans ont été mis en forme, ils sont une dernière fois recuits avant d'être blanchis afin de ne pas se fracturer lors de leur frappe finale. Dans ce monnayage, cette opération de libération des contraintes internes ne semble pas indispensable compte tenu des efforts mécaniques restreints subis par les flans au cours de leur mise en forme. D'autant que les lames utilisées ont préalablement subi un tel traitement, comme le prouve l'examen métallographique d'un fragment de lame[971] montrant qu'aucune macle mécanique n'est observable au cœur de l'alliage. Les seules présentes se trouvent au niveau des bords de coupe. Les mêmes observations menées sur un flan suggèrent que ces ébauches ont, en définitive, pu également subir un traitement identique. Cependant, il sera démontré par la suite qu'il ne correspond pas *a priori* à un traitement de recuit qui n'est pas indispensable.

L'étape de préparation des flans à partir des carreaux est, dans ce faux-monnayage, beaucoup plus limitée que dans un atelier monétaire officiel. Elle se réduit à une simple découpe de ronds dans des carrés métalliques. Si leur découpe vient à les déformer, ces derniers peuvent être éventuellement redressés.

[968] cf. Annexe U.
[969] cf. *supra*, p. 442.
[970] cf. Annexe U.
[971] cf. Annexe U.

L'argenture des flans

Les précédentes observations de la fausse monnaie retrouvée dans la grotte de Lauradieu ont déjà établi qu'il s'agissait d'une contrefaçon composée d'un laiton recouvert d'une couche argentée (Figure 225).

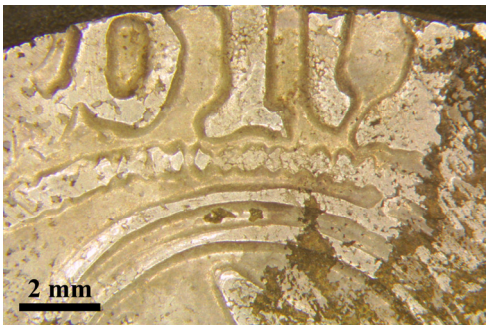


Figure 225 - Argenture partielle à la surface du blanc à la couronne.

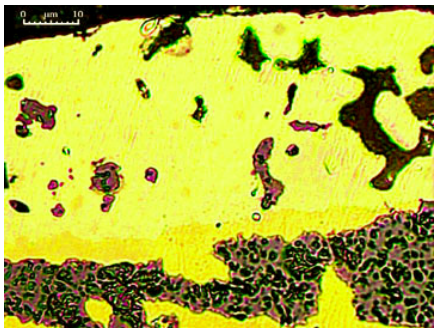


Figure 226 - Couche argentée sur le cœur de laiton partiellement oxydé d'un flan (échelle : 10 µm).

La présence de mercure associé à l'argent mise en évidence lors des analyses de la couche superficielle (Figure 226) a permis d'attester l'utilisation d'une technique d'argenture à l'amalgame. C'est pour ces raisons qu'il a été décidé de caractériser plus particulièrement ce procédé d'argenture dans une étude archéométrique et de métallurgie expérimentale dont les résultats ont été exposés en annexe V. Elle a notamment permis de montrer que ce procédé pouvait être pratiqué selon différentes méthodes.

Dans cette partie, seul est présenté le procédé supposé en usage dans la grotte de Lauradieu, en rappelant seulement ici le principe général de l'argenture par amalgame. Il consiste à appliquer une couche d'amalgame mercure-argent malléable sur la surface devant être couverte au final d'une pellicule argentée. Une partie du mercure contenu dans le mélange déposé est ensuite éliminée laissant une surface enrichie en argent. Finalement, l'aspect argenté est obtenu après un brunissage du dépôt superficiel.

En premier lieu, il s'agit de démontrer que cette opération d'argenture est l'étape qui, ici, succède à celle de préparation des flans et précède celle de la frappe. Cette preuve est donnée par l'analyse et l'observation des différents types d'objets du *corpus*. En effet, la caractérisation de la totalité des déchets de coupe des carreaux et des flans, n'a révélé ni la présence de mercure ni celle d'argent sur leur surface. En revanche, certains flans retrouvés non frappés au sein de la grotte,

présentent une couche d'argenture. Ils indiquent que la frappe des fausses monnaies est effectuée sur des flans préalablement argentés et brunis. Même si elle présente le risque d'altérer la fine pellicule d'argent formée, le choix de cette technique est finalement le plus pertinent.

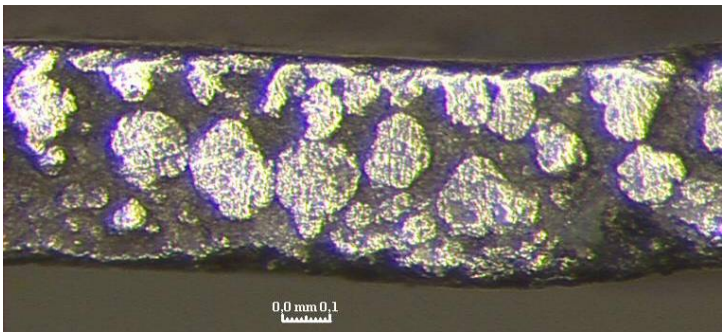


Figure 227 - Détail de la tranche argentée du blanc à la couronne (échelle : 0,1 mm)

Dans une découpe de flans à partir d'une plaque préalablement argentée, les bords de coupe laisseront apparaître l'alliage recouvert, trahissant la fraude. Il est donc important que ce plaquage d'argent soit effectué *a posteriori* des différentes coupes (Figure 227). Il est par ailleurs nécessaire qu'il soit fait également en préalable à la frappe des flans. En effet, une fois les motifs monétaires marqués à leurs surfaces, l'application de l'amalgame ne peut être régulière car gênée par le relief.

Pour ces mêmes raisons, le brunissage de la couche d'argenture devant lui donner un aspect brillant, doit intervenir sur les flans avant leur monnayage. Même si les expérimentations ont montré que la percussion par les coins monétaires lors de la frappe, permet d'obtenir un aspect macroscopiquement similaire à celui d'une surface brunie, elles ont également révélé la limite de cette méthode. En cas de frappe imparfaite, l'étape de brunissage qui devait être évitée, sera tout de même nécessaire et de surcroît, plus complexe compte tenu de la rugosité de la surface empêchant une action efficace du brunissoir.

L'observation de la figure 225 rend parfaitement compte de la difficulté de devoir brunir entre les motifs frappés. Compte tenu de la qualité du polissage même dans les espaces les plus profonds, cette opération est ici obligatoirement intervenue préalablement à l'impression des figures monétaires.

Les expérimentations ont attesté également de la difficulté d'application d'un amalgame mercure-argent à la surface d'un alliage cuivreux (Figure 229). Ce mélange, tout comme le mercure qui le compose en partie, semble attester d'une

tension superficielle élevée qui limite ses contacts avec les supports qui ont été expérimentés.

Il existe différents traitements dont la finalité est d'améliorer l'adhésion lors du dépôt. Leur but principal est d'éliminer les corps gras et les oxydes métalliques qui ont pu se déposer ou se former à la surface des échantillons lors de leur manipulation et mise en forme. Outre le fait que ces composés gênent par leur présence l'application de la couche d'argenture, ils en affaiblissent également l'adhérence une fois déposée.

Les traitements possibles se résument dans la plupart des cas à des opérations mécaniques, thermiques et chimiques. Elles laissent théoriquement peu de traces sur les surfaces ainsi traitées. Il est donc *a priori* difficile de supposer des techniques qui ont été mises en place dans cette activité.

Toutefois, l'étude métallographique présentée en Annexe U, permet semble-t-il de rendre compte d'un traitement subi par les flans en préalable à leur argenture. Il s'agit d'un traitement thermique au cours duquel les objets qui doivent être argentés sont portés à haute température. Il vise à éliminer les différents résidus organiques et en particulier les corps gras qui ont pu se déposer lors des différentes manipulations. En effet, l'examen métallographique d'un flan a montré des différences structurales avec les autres types d'objets considérés, notamment un fragment de lame. Il a été admis que ces variations avaient pour origine un traitement thermique subi par le flan. Bien que ce dernier ait toutes les caractéristiques d'un recuit, il a été vu précédemment qu'il n'était pas indispensable dans la chaîne opératoire supposée. Il est donc envisageable d'y voir ici les conséquences de la première préparation des flans en vue de leur argenture ultérieure.

D'autre part, l'analyse de plusieurs flans, dont un de cuivre et deux de laiton, a permis de mettre en évidence une particularité qui constitue le second indice d'une opération préparatoire. La figure 228 permet de rendre compte de cette observation sur le flan de cuivre. La surface de ce dernier a révélé la présence de mercure sans qu'il soit allié à de l'argent.

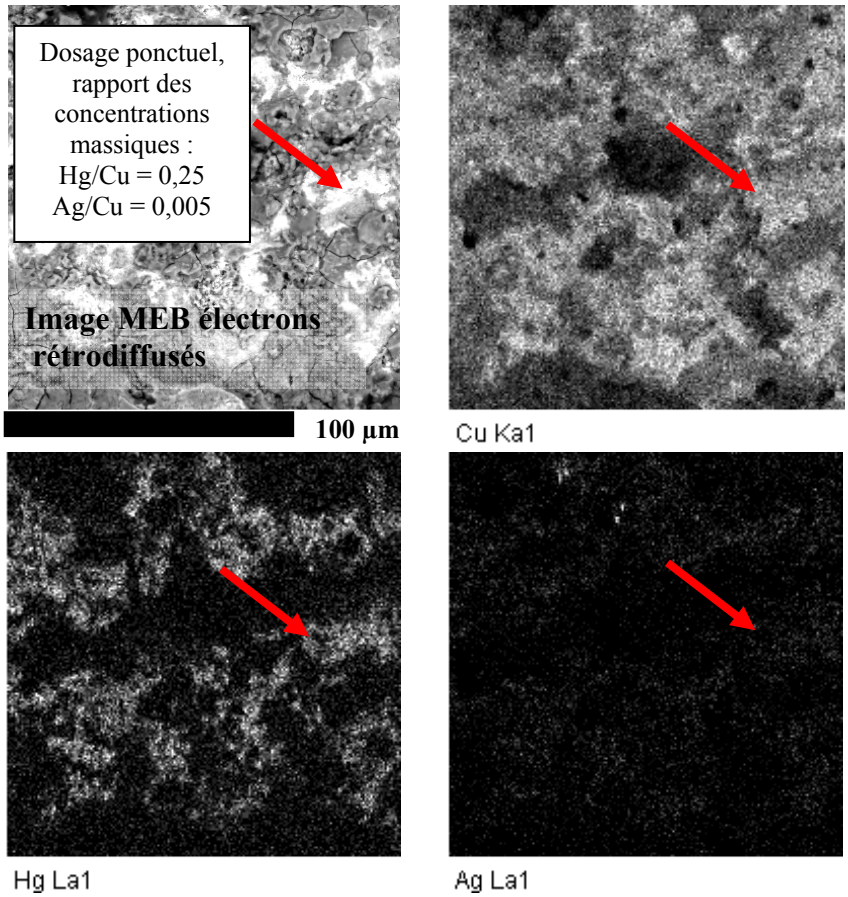


Figure 228 - Cartographies X de la surface d'un flan présentant du mercure sans argent[972].

La première image obtenue au microscope électronique en mode électrons rétrodiffusés met en évidence un contraste chimique. Il traduit une hétérogénéité de composition sur la surface considérée. Les zones les plus brillantes correspondent à la présence en concentration plus importante d'éléments de numéro atomique élevé. Plusieurs dosages ponctuels ont ensuite été effectués par spectrométrie en dispersion d'énergie. Ils ont révélé des taux élevés de mercure, rapportés en référence au cuivre qui constitue l'âme du flan. A l'inverse, ceux calculés à partir de l'argent sont négligeables.

Ces constatations préliminaires ont été, par la suite, confirmées par la réalisation d'une cartographie X. Elle a permis de localiser le mercure réparti à la surface du flan. Il forme des amas présentant une brillance plus importante sur la carte associée. L'argent, quant à lui, n'y est jamais défini dans des proportions significatives. Les zones où il semble ponctuellement être présent dans des concentrations plus importantes correspondent à un dépôt superficiel et localisé de petites particules d'amalgame. Elles apparaissent agglomérées à la surface et

[972] Plus l'image est brillante, plus le composé considéré est en concentration importante.

trahissent certainement une contamination intervenue lors de l'enfouissement ou après la fouille, lors du stockage. A l'inverse, les structures révélant la présence seule de mercure paraissent beaucoup plus cohérentes avec le support de cuivre. Il ne s'agit pas d'un dépôt superficiel. Quant au fait qu'il ne forme pas une couverture uniforme, il faut admettre que cette dernière a certainement été perturbée par les différents phénomènes de corrosion dont on observe les produits à la surface de l'objet. La présence de mercure sur ce flan n'est pas le résultat d'une contamination, à l'inverse de ce qui a été supposé pour les particules d'amalgame d'argent.

L'absence manifeste à la surface de ces trois ébauches de monnaies, de ce métal précieux dans des proportions non négligeables, atteste qu'elles n'ont pas été argentées par le faussaire. Elles ne pouvaient donc pas être frappées et doivent être placées à une étape antérieure de la chaîne opératoire. L'application sur un alliage cuivreux, du mercure ou d'un amalgame qu'il aura formé avec de l'argent, a préalablement été décrite comme une opération difficile. Le fait qu'il ait été détecté seul à la surface de plusieurs flans doit être envisagé comme le résultat d'un traitement préparatoire intentionnel de ces derniers.

On peut supposer que le procédé utilisé est d'un type semblable à celui décrit dans *de diversis artibus*[973]. L'efficacité de ce traitement a par ailleurs été attestée au cours de reconstitution expérimentale présentée en annexe U. Il consiste à réaliser une solution contenant de la « pierre de vin » et du sel[974] à laquelle aura également été ajoutée une petite quantité de mercure. Ce mélange acide est ensuite chauffé et appliqué sur l'échantillon qui doit être argenté, jusqu'à ce qu'il soit recouvert de mercure. Le dépôt d'une couche d'amalgame sur cette couche préliminaire est ensuite très facile (Figure 230) étant donné qu'il met en jeu une interface mercure-amalgame qui traduit une beaucoup plus grande affinité que celle où se rencontre l'amalgame avec un alliage cuivreux (Figure 229).

Le fait que certains flans du *corpus* de Lauradieu présentent à leurs surfaces un dépôt volontaire de mercure, sans qu'il soit allié à de l'argent, doit donc être considéré comme un témoignage unique de la mise en place, dans ce monnayage, d'un procédé préparatoire similaire à celui décrit dans ce fameux traité des arts. Il ne peut s'agir que d'une analogie. Il est impossible d'attester d'une préparation totalement identique, notamment concernant la solution acide utilisée. En effet, si le moine Théophile décrit l'emploi de « pierre de vin » et de sel, il est possible, et les expérimentations l'ont montré avec le recours à du vinaigre, qu'un mélange acide différent a pu être utilisé. Or, de ces composés organiques, il ne reste aucune

[973] Théophile *et al.*, *Essais sur divers arts..., op. cit* p. 168.
[974] Mélange similaire à celui utilisé dans le blanchiment de flans du monnayage officiel.

trace à la surface des flans analysés. Le faussaire a pu disposer d'un mélange acide, vinaigre ou autres, auquel il a préalablement ajouté du mercure pour préparer la surface de ses échantillons.

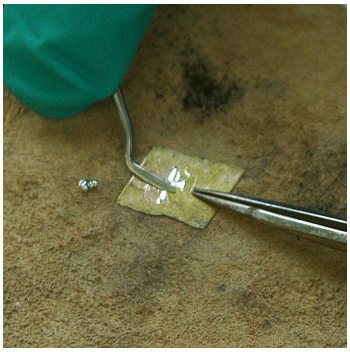


Figure 229 - Application difficile de l'amalgame à la surface d'un échantillon de laiton (n° 06-10).

Figure 230 - Application facile de l'amalgame à la surface d'un échantillon de laiton préalablement recouvert de mercure (n° 06-11).

Soulignons ici l'intérêt d'avoir disposé dans cette étude d'une collection d'objets se plaçant à des stades différents de la chaîne opératoire. Il aurait en effet été impossible de rendre compte d'une telle opération préparatoire à partir de l'étude d'échantillons ayant été argentés. Dans ce cas, le mercure qui aurait été mis en évidence aurait dû en premier lieu être assimilé à celui provenant de l'amalgame utilisé. L'existence d'une étape préparatoire tout comme les modalités de son application, bien qu'indispensable, n'aurait pu qu'être supposée. La présente étude a donc permis de révéler, d'une manière concrète, une des opérations du procédé d'argenture qui n'est, par ailleurs, jamais prise en compte dans les études archéométriques.

Un dernier point à aborder traite de l'élaboration de l'amalgame employé dans cette contrefaçon. Cette question a également été traitée lors des expérimentations, révélant une opération complexe et particulièrement longue.

La fouille de la grotte ne semble pas avoir mis en évidence d'objets liés à cette fabrication. Ces derniers ne sont cependant pas particulièrement caractéristiques. Les deux seuls exemples archéologiques qui ont pu être reliés jusqu'à présent à ce type de préparation en témoignent. Ce n'est qu'à partir d'analyses par spectrométrie de fluorescence X que J. Bailey et V. Fell ont pu relier une pierre

ainsi qu'un fragment d'amphore à une production d'amalgame d'or[975]. Dans le cas du faux-monnayage de la grotte de Lauradieu, l'activité supposée modeste qui a été mise en place n'a peut-être pas permis de laisser de tels indices.

Il a par ailleurs été démontré que l'amalgame utilisé dans ce faux-monnayage avait été préparé à partir d'argent purifié. L'hypothèse qui proposait l'utilisation de monnaies comme source de métal précieux a donc été exclue. En outre, les expérimentations ont montré la difficulté d'amalgamer du mercure avec un alliage cuivre-argent de type monétaire. Pour s'épargner un travail d'élaboration plus long, le faussaire a pu renoncer à utiliser cette matière première potentielle.

En dépit des informations restreintes qu'il a été possible de mettre en évidence à partir de l'étude du *corpus* de la grotte de Lauradieu, elles témoignent tout de même d'un réel savoir-faire du faux-monnayeur dans la réalisation de l'argenture de ses monnaies. Bien que le faux blanc à la couronne retrouvé ne présente qu'une couche partielle de métal précieux, celle-ci apparaît d'une très grande qualité (Figure 225). En présentant une pellicule argentée homogène, il faut supposer que les autres faux dont il ne subsiste dans la cavité que les déchets de coupe, présentaient un aspect argenté permettant leur mise en circulation.

La frappe des faux

La chaîne opératoire mise en évidence jusqu'à présent ainsi que la découverte d'une fausse monnaie frappée parmi une collection de flans, attestent d'une technique de frappe et non de moulage. La question est alors de savoir si le faussaire s'est procuré les coins nécessaires à sa production ou s'il les a lui-même gravés. Les données extraites de la fouille de la grotte de Lauradieu ainsi que l'étude du matériel archéologique découvert fournissent peu d'informations sur ce point. M. Nogué a conclu dans son étude numismatique du faux blanc à la couronne, au recours, par le faussaire, à une paire de coins originale relativement usée[976]. L'aspect émoussé des motifs de cette fausse monnaie (Figure 225) explique certainement le caractère usé qu'attribue M. Nogué aux outils de frappes utilisés, à partir de son expérience de numismate. Compte tenu de l'importance, semble-t-il, restreinte de l'activité dont il est ici question, cette usure est peut-être

[975] Bayley J. *et al.*, Making gold-mercury amalgam: the evidence from Southampton, England, dans *2nd International Conference Archaeometallurgy In Europe 2007*, Aquileia, Italie, 17 - 21 juin 2007, AIM, 2007, CdRom.
[976] Rancoule G. *et al.*, La grotte nord de Lauradieu..., *op. cit.*, p. 176.

l'indice d'un remploi d'instruments originaux ayant été préalablement dégradés dans une frappe officielle.

Par ailleurs, si la fabrication de coins monétaires par des faux-monnayeurs est attestée par d'autres exemples, dans le cas de Lauradieu, la quantité des déchets retrouvés fait état d'une activité limitée[977]. Dans les ateliers monétaires, la gravure des matrices était confiée à des orfèvres, car il s'agit d'un travail complexe, qui demande un certain savoir-faire. Si le faussaire de Lauradieu avait lui-même fabriqué ses instruments de frappe, il aurait certainement cherché à tirer un plus grand bénéfice de son ouvrage. Il aurait alors produit un nombre plus important de fausses monnaies que celui qui sera supposé à partir des déchets mis au jour[978]. En définitive, il est raisonnable de supposer l'emploi d'une paire de coins authentiques dans cette fabrication. D'autant qu'en dépit des contrôles nombreux au sein des ateliers monétaires, le vol de ce type d'outils, que l'on imagine particulièrement surveillés, était, semble-t-il, possible[979].

La chaîne opératoire proposée pour le faux-monnayage de la grotte de Lauradieu se définit donc en trois étapes principales que sont la découpe de flans dans une tôle métallique, l'argenture de ces derniers et leur frappe en monnaies. La simplicité de cette chaîne opératoire est tout à fait compatible avec le lieu où elle a été mise en place et permet une production rapide. Par ailleurs, elle demande le recours à un matériel peu conséquent. Les découpes ne nécessitent qu'une paire de cisailles dont les bras de levier n'ont pas besoin d'être très long compte tenu de l'épaisseur des plaques travaillées[980]. Pour ce qui est de l'argenture, les expérimentations ont montré qu'elle pouvait se faire avec des ustensiles se résumant essentiellement à des contenants pour préparer l'amalgame et les surfaces à traiter, des pinces ou tisonniers, pour pouvoir manipuler dans un foyer, ainsi qu'un brunissoir. Les coins nécessaires à la frappe des monnaies avec un marteau représentent en définitive l'outillage le plus spécialisé de cette fabrication.

Bien que le monnayage de la grotte de Lauradieu se décrive en un nombre limité d'opérations, les techniques qui y sont associées attestent, en revanche, des savoir-faire importants du faussaire qui les a mises en place. Il semble qu'il avait une bonne maîtrise des matériaux et des procédés qu'il a employés. L'artisan

[977] Dhenin M. *et al.*, Un coin de faux-monnayeur..., *op. cit.*, p. 81-82.
Un exemple de fabrication de coins au sein d'une grotte sera également présenté dans la suite de cette étude.
cf. Les faux-monnayages de la grotte de La Catette, p. 553.
[978] cf. L'estimation de la production du faux-monnayage de la grotte de Lauradieu, p. 544.
[979] Bompaire M., *L'atelier monétaire royal..., op. cit.*, p. 56.
[980] Moins d'un millimètre d'épaisseur.

responsable de cette activité possédait *a priori* toutes les qualifications d'un orfèvre. Il est difficile d'attester cette hypothèse, mais l'étude de L. Feller portant sur les lettres de rémission de faux-monnayeurs montre l'aptitude de cette classe d'artisans, et plus généralement ceux travaillant le métal, à disposer des connaissances et du matériel pour plus facilement céder à l'illégalité[981]. Parmi les douze fabricants et complices présentés par L. Feller et dont il a pu relever les professions, trois d'entre eux sont orfèvres, un est étameur et un dernier coutelier alors que deux seulement sont monnayeurs[982]. Si ces derniers peuvent disposer plus facilement des coins monétaires nécessaires à la fraude, leurs connaissances des techniques officielles de fabrication sont *a priori* moins profitables que les procédés d'argenture propres à l'orfèvrerie.

IV. L'estimation de la production du faux-monnayage de la grotte de Lauradieu

D'après l'étude du matériel issu de la fouille de la grotte de Lauradieu, il a été maintenant possible de proposer une définition de la chaîne opératoire mise en œuvre. Elle diffère en de nombreux points des techniques qualifiées d'officielles en usage dans les ateliers royaux. L'opération de découpe des flans, telle qu'elle a été mise en place, offre l'opportunité rare d'estimer une quantité de monnaies ayant pu être produite dans cette activité. Il ne peut s'agir toutefois que d'une estimation *a minima* puisqu'elle repose sur la quantité de chutes de métal effectivement laissées par le monnayeur et, par la suite, retrouvées lors des fouilles de la cavité.

Le principe de cette évaluation est en définitive assez simple. Il suffit de rappeler que la préparation d'un flan aura également engendré un lot de déchets caractéristiques correspondant aux quatre coins du carreau ayant été découpé. Le dénombrement de ces chutes permet de proposer le nombre de monnaies potentiellement produites. Une telle démarche n'est cependant pertinente que s'il peut être attesté qu'un unique type monétaire a été produit. Or la fouille a révélé en parallèle d'un *corpus* de dix flans compatibles avec une frappe de faux blancs à la couronne, un ensemble de six ébauches plus petites, dont les diamètres se situent entre 15 et 20 mm et suggère qu'un second type monétaire a pu être également produit. Cette possibilité doit donc être intégrée dans l'évaluation proposée.

Conjointement à l'inventaire des différentes chutes de découpes circulaires, il est nécessaire de supposer de la taille des flans associés. Or, étant donné qu'elles

[981] Feller L., *Faux-monnayeurs..., op. cit.*, p. 43, 152.
[982] *Ibidem*, p. 148.

ont été pour la plupart déformées lors de leurs cisaillements, la détermination des modules correspondants, ne peut se résumer à un problème de géométrie. Afin de s'affranchir au mieux de cette contrainte, il faut admettre le postulat qu'un flan est par définition le cercle inscrit dans le carreau dans lequel il est découpé. Les longueurs des côtés sont, dans ce cas, équivalentes aux diamètres recherchés. Les chutes auxquelles s'applique le mieux cette hypothèse sont celles des coins ayant été éliminés des carreaux un par un. Une estimation plus précise aurait dû tenir compte du métal supplémentaire éliminé autour du flan pour permettre une découpe de plusieurs coins en une seule fois. Il n'était cependant pas envisageable de faire autrement à cause des morphologies particulières en enroulements circulaires de la plupart des fragments considérés. Elles empêchent par ailleurs de proposer une mesure précise de leurs mensurations. C'est pourquoi il a été décidé d'établir un classement de répartition des différents modules de flans, gradué tous les deux millimètres. Les estimations des valeurs caractéristiques ont ensuite été faites avec un mètre ruban gradué en fonction des classes préalablement définies. La précision de l'estimation diminue cependant avec l'augmentation du nombre de coins éliminés en un seul coup de cisaille. Il existe un décalage vers les valeurs hautes pour les déchets les plus complexes compte tenu de la matière supplémentaire qu'ils éliminent.

Pour chacun des types de déchets que compte le *corpus*, les diamètres des flans correspondants ont été estimés :

Types de déchets et diamètres correspondants	Ø18 mm	Ø 22 mm	Ø 24 mm	Ø 26 mm	Ø 28 mm
1 coin	32	0	0	71	0
2 coins	2	17	39	82	42
3 coins	0	0	1	3	8
4 coins	0	0	1	4	7
Nombre total de coins	36	34	85	260	136
Nombre de flans	9	8,5	21,25	65	34

Tableau 9 - Correspondance entre chutes de coupes et flans produits (Ø : Diamètres).

La statistique la plus représentative est celle associée aux chutes d'un seul coin. C'est notamment celle qui met en évidence moins de groupes morphologiques rassemblant des modules de 18 mm et ceux de 26 mm (Tableau 9). Compte tenu de la précision de la découpe des flans ainsi que de celle des mesures effectuées, ces deux morphologies sont à rapprocher de celles mises en évidence pour les autres déchets. Elles correspondent vraisemblablement aux modules finalement recherchés par le faux-monnayeur. D'autant qu'ils coïncident

par ailleurs aux deux types de flans retrouvés lors de la fouille ainsi qu'à celle de la seule fausse monnaie retrouvée.

A partir des fragments de tôles retrouvés, il est possible de supposer une production de 138 flans dont 9 présentent un diamètre voisin de 18 mm s'opposant à une très grande majorité des 129 flans dont les modules plus élevés se situent autours de 26 mm. Pour évaluer le nombre de monnaies potentiellement associées à ces déchets de coupe, il est nécessaire de retrancher à ces premières estimations la monnaie ainsi que le nombre de flans correspondants retrouvés lors de la fouille. En définitive, 118 pièces dont les modules sont comparables au faux blanc retrouvé et trois monnaies seulement d'un diamètre voisin de 18 mm sont probablement sorties de cet atelier. La représentativité de ces dernières reste à discuter.

De par leurs dimensions similaires à celle du véritable denier de François Phébus découvert dans la cavité, les plus petites ébauches avaient dans un premier temps suggéré une volonté potentielle de la part du faussaire de contrefaire ce type monétaire en parallèle de celui du blanc à la couronne. Cette hypothèse doit être à présent reconsidérée compte tenu de la très faible représentativité de cet ensemble par rapport au reste du *corpus*. D'autre part, le fait que ces petits flans soient composés de laiton interdit d'autant plus leur utilisation dans la frappe de deniers de bas billon qui présente un aspect cuivré et non celui doré du laiton.

En revanche, le cas des 118 flans est plus simple. D'après les morphologies relevées compatibles avec la contrefaçon de blancs à la couronne[983] attestée au sein de la grotte, il faut admettre qu'ils ont été utilisés dans cette frappe. Cette dernière constitue dans ce cas l'essentiel de la production associée aux déchets retrouvés. Il est alors possible d'estimer un ordre de grandeur de la somme qu'a pu espérer toucher le faussaire en délivrant ses fausses monnaies.

La datation de l'activité n'ayant pas pu être définie précisément, il en résulte une incertitude sur la valeur libératoire des fausses monnaies fabriquées. Equivalant à dix deniers avant l'émission du règne de Charles VIII, les blancs à la couronne copiés en valaient deux de plus après le 24 avril 1488. En supposant que le nombre de flans dont la fabrication est attestée mais qui n'ont pas été retrouvés lors de la fouille de la cavité, ont tous été transformés en contrefaçon, le faux-monnayeur possédait donc potentiellement entre 1180 et 1416 deniers tournois.

[983] La consultation de catalogues de ventes de monnaies comme ceux de la Compagnie Générale de Bourse témoigne de l'existence chez des monnaies authentiques du même type, de variations de modules comparables à celles mises en évidence par les flans.

Ce bénéfice potentiel doit cependant être pondéré par deux paramètres. Le premier impose de retrancher le coût difficilement évaluable des matériaux utilisés dans cette fabrication. Le second est tout aussi indéterminé. Le faussaire a pu décider d'écouler plus facilement sa production en renonçant à la libérer pour la valeur qu'elle représentait virtuellement. La démarche la plus simple aurait pu se résumer par exemple à l'achat d'une marchandise à un prix *a priori* trop élevé.

La somme en définitive touchée devait cependant être encore assez importante pour justifier le risque encouru. D'autant que compte tenu du nombre de monnaies fabriquées, cette production ne représente pas plus de quelques jours au total. Il s'agit alors d'une installation opportuniste qui n'a duré que le temps de l'opération la plus longue, c'est-à-dire la préparation de l'amalgame.

A titre de comparaison, il est possible de ramener les bénéfices potentiels dont il est ici question aux sommes que devaient percevoir les ouvriers et les monnayeurs des ateliers officiels. D'après un règlement des généraux maîtres des monnaies de 1427, les salaires des différents travailleurs monétaires étaient fonction de leur production[984]. Pour des monnaies d'argent, un ouvrier devait toucher douze deniers tournois par tranche de vingt marcs mis en forme, ce qui correspond à la fabrication de près de 1720 flans. Quant aux monnayeurs, ils reçoivent quinze deniers tournois tous les 240 blancs frappés. Ces différentes données mettent en évidence un rapport de gains complètement déséquilibré en faveur de ce faux-monnayage, d'abord parce que le faussaire est seul responsable de sa production mais surtout grâce à la fraude réalisée sur l'alliage monnayé. La logique économique est bien respectée…

D'un autre côté, le dénombrement précis de tous les déchets ainsi que l'estimation de la production qui y est associée offrent également un aperçu de la quantité de matières premières utilisée dans cette production. Cette évaluation ne peut rendre compte cependant que du volume de laiton utilisé pour former le cœur des fausses monnaies. Du point de vue de la pellicule d'argenture, le type de procédé utilisé dans cette contrefaçon permet difficilement de proposer une telle quantification de l'argent et du mercure qu'il a nécessité. La couche de métal précieux est trop peu homogène pour permettre une définition précise de la quantité présente sur chaque pièce. Quant au mercure, à cette même contrainte s'ajoute celle qu'il a été partiellement éliminé dans un rapport inconnu lors de la préparation de l'argenture.

A partir des 118 fausses monnaies qui semblent avoir été frappées dans cette grotte, il est envisageable d'estimer la masse que représente cette production. Pour

[984] Bompaire M. *et al.*, *Numismatique médiévale..., op. cit.*, t. 7, p. 465.

en proposer une valeur moyenne, il est nécessaire de la ramener à celle des espèces fabriquées. Or, si dans un monnayage officiel la pesée des pièces libérées doit respecter des critères stricts afin de garantir une certaine constance générale, qu'en est-il dans cette activité clandestine ?

L'étude du *corpus* a permis de mettre en évidence une homogénéité de l'ensemble des matières premières utilisées, notamment d'un point de vue des épaisseurs travaillées et de l'alliage qui les compose. En admettant alors que le faussaire ait produit des monnaies de morphologies similaires à celles du blanc à la couronne qu'il cherchait à copier, cela implique une variation également limitée de la masse des espèces fabriquées. Cette dernière devait être équivalente à celle du faux blanc retrouvé lors de la fouille, c'est-à-dire autours de 2,6 g. De plus, cette valeur se retrouve pour trois flans de laiton dont les diamètres correspondent à celui de la monnaie imitée. La présence de traces de mercure et d'argent sur leur surface est, par ailleurs, le signe qu'ils se plaçaient dans la chaîne opératoire au niveau de l'étape d'argenture, ce qui interdisait leurs rognages ultérieurs. Ils présentent ici leurs masses définitives. La valeur référence de 2,6 g semble être assez représentative pour estimer la production globale de ce monnayage.

Finalement les 118 monnaies dont le faux-monnayeur a potentiellement tiré un bénéfice représentent une masse moyenne de 307 grammes de laiton préalablement mis en forme. Elle se doit d'être comparée à celle correspondant aux déchets qui y sont associés et qui ont été retrouvés lors de la fouille de la cavité. Cela permet de rendre compte d'une chaîne opératoire très peu économique : ce *corpus*[985] pèse 241 g qui, ramené au total des 548 g de métal alors utilisés dans ce monnayage, en constitue près de 44 %.

La technique de mise en forme retenue pour cette fabrication a précédemment montré ses différences avec celles en vigueur dans les ateliers de production officiels. Elle s'en démarque également de par la quantité de déchets qui en résulte. Les 44 % de métal non monnayés dépassent largement le quota des 12,5 % imposés aux ouvriers monétaires[986].

L'examen détaillé des chutes de découpe de flans vient de rendre compte d'une estimation du nombre de flans et donc de carreaux associés aux chutes de métal retrouvées au cours de la fouille. En considérant par ailleurs le *corpus* de bouts de lames également mis au jour, il est proposé de déterminer la longueur moyenne de ces dernières avant leurs cisaillements. La chaîne opératoire de mise en forme

[985] Les flans ainsi que le faux blanc sont comptés parmi les déchets étant donné que le faussaire n'en a tiré aucun bénéfice.
[986] cf. *supra*, p. 93.

suppose qu'il faille compter une lame pour chacun des fragments rectangulaires de laiton. Par ailleurs, compte tenu de l'homogénéité globale observée sur l'ensemble des objets retrouvés, il est admis qu'il correspond à l'intégralité d'une phase de mise en forme. Ainsi, à chaque extrémité de lame doivent correspondre les déchets de mise en forme des carreaux qui y étaient rattachés. Le faux-monnayeur a semble-t-il disposé de près de 65 lames de laiton. D'autre part, la quantité de chutes qu'il a laissées permet d'estimer sa production à 138 carreaux auxquels il faut ajouter les deux exemplaires du *corpus* n'ayant pas été transformés, soit un total de 140 exemplaires. Il apparaît que le faussaire a disposé de tôles métalliques de tailles relativement petites étant donné qu'à partir des données relevées, il pouvait espérer découper une moyenne de 2,15 carreaux dans chaque bande de métal.

Cette configuration témoigne d'un nouvel indice attestant que le contrefacteur n'avait pas une maîtrise intégrale de ses matières premières. Si tel avait été le cas, ce dernier aurait *a priori* choisi les morphologies de ses ébauches de manière à perdre le minimum de matière transformable. Le moyen le plus simple se résume à découper les carreaux dans des lames les plus longues possible. La conséquence de ce choix diminuerait d'autant le nombre de fragments métalliques inexploitables correspondant à chacune des extrémités restantes. Il vient d'être démontré d'après le nombre de tôles métalliques retrouvées que le faussaire ne semble pas avoir eu une telle opportunité, corroborant l'hypothèse qu'il n'a sans doute pas lui-même mis en forme ses tôles de laiton.

V. Le profil du faux-monnayeur de la grotte de Lauradieu

Les discussions précédentes ont permis de mieux comprendre les modalités de ce faux-monnayage qui a pris place à partir de la fin du XV^{e} siècle au sein de la grotte de Lauradieu. Grâce au *corpus* de déchets ainsi qu'à la fausse monnaie mis au jour, il a été possible de mettre en évidence une production minimale pour cette activité associée à un bénéfice qu'a pu espérer toucher le faussaire. Ces informations sont généralement difficiles à déterminer car pour supposer du gain possible d'une telle fabrication, il est nécessaire d'admettre qu'elles ont été réellement émises. Une fois libérées, les informations concernant les quantités de monnaies produites ne sont plus accessibles.

Pour traiter de cette question, l'étude de documents judiciaires, comme celle qu'a réalisée L. Feller à partir des lettres de rémission de faux-monnayeurs, peut

fournir des indications sur des quantités de monnaies fabriquées, achetées, écoulées ou possédées par des faussaires ou leurs complices[987].

Dans la présente recherche, le recours à la quantification des déchets a permis de s'affranchir de ce risque de déformation lié à la nature de la source. S'il faut bien sûr reconnaître qu'il s'agit d'une estimation *a minima* de la production de l'atelier de la grotte de Lauradieu étant donné qu'elle repose sur les déchets laissés sur place et par la suite découverts lors des fouilles, cette dernière n'en est pas moins juste et détachée des contingences sociales.

Par ailleurs, la définition de la chaîne opératoire de fabrication mise en place au sein de ce lieu isolé ainsi que le type monétaire contrefait représentent autant d'informations sur l'envergure de cette activité dont il est question ici. En faisant de nouveau référence à l'étude de L. Feller, cette dernière met en évidence plusieurs niveaux de faux-monnayage[988]. Le plus rudimentaire est la fabrication de fausses monnaies par moulage dont la qualité des résultats obtenus ne trompe finalement personne et témoigne de l'amateurisme de son auteur[989]. A l'inverse, à l'image des ateliers de production de Maastricht ou de sa région qui produisaient une véritable gamme variée de faux exportés par la suite vers la France, le faux-monnayage pouvait avoir également des aspects d'industrie maîtrisée[990].

Le faussaire de Lauradieu se situe entre ces deux extrêmes. Dans un premier lieu, la qualité de son travail ainsi que les opérations qu'il a choisies pour répondre à sa fabrication, trahissent un véritable savoir-faire dont l'origine est peut-être liée à la profession exercée par le contrefacteur. Il est *a priori* familier des techniques liées à la mise en forme des métaux, en particulier pour ce qui est du procédé complexe d'argenture à l'amalgame qui pourrait trahir des compétences d'orfèvre. D'autre part, les indices retrouvés suggèrent qu'il s'agit ici d'une fabrication relativement limitée, à la fois dans la durée mais aussi dans les quantités produites. En mettant ces constatations en parallèle des formes de matières premières utilisées qui semblent avoir été détournées d'un autre usage au profit de celui de contrefaire de la monnaie, il faut peut-être envisager qu'il s'agit ici d'une production d'opportunité. Cette dernière pourrait être justifiée par l'obtention d'une authentique paire de coins.

Qu'en est-il du risque engendré par ce monnayage de faux blancs à la couronne ? Parmi les crimes assimilés au faux-monnayage qui comptent en plus de

[987] Feller L., *Faux-monnayeurs..., op. cit.*192 p.
[988] *Ibidem*, 192 p.
[989] *Ibid.*, p. 49-53.
[990] *Ibid.*, p. 61-62.

la production, le rognage, le trébuchage ainsi que la distribution, c'est de loin la première qui était la plus réprimée[991]. Toutefois, deux cas particuliers permettent d'espérer une plus grande tolérance de la part du pouvoir judiciaire en cas d'arrestation. Le premier est celui de la contrefaçon de monnaies étrangères qui ne copiant pas les monnaies du roi devait soustraire le faux-monnayeur au crime de lèse majesté[992]. Le second correspond à l'imitation de petites monnaies dont la production dans les ateliers officiels était souvent dénigrée au profit d'espèces plus fortes. Pour un travail équivalent, les bénéfices escomptés pour la délivrance de pièces de billon étaient beaucoup plus faibles que pour celles d'or ou d'argent. Les petites monnaies venant à manquer alors qu'elles étaient indispensables aux transactions de la vie courante voyaient donc leurs imitations beaucoup plus tolérées, d'autant que d'un point de vue de leur composition ainsi que de leur aspect elles différaient peu des productions légales[993].

De plus, l'augmentation du risque va ici de pair avec la valeur libératoire des monnaies contrefaites. Plus elles sont fortes plus elles sont susceptibles de faire l'objet d'un contrôle de la part de la personne qui les reçoit risquant alors de révéler la fraude[994].

Le fait que le faussaire de la grotte de Lauradieu ait copié, par choix ou par opportunité, le type monétaire du blanc à la couronne ne lui permettait donc pas d'espérer une quelconque indulgence de la part des autorités judiciaires. Toutefois, le lieu qu'il a choisi pour dissimuler son activité, la qualité de son travail, la petite échelle de sa production supposée, couplée à une contrefaçon de monnaies d'argent et non d'or, lui ont peut-être évité d'être confronté à ses juges. Il est cependant impossible de se prononcer sur cette question. Il serait dans ce cas intéressant de consulter les textes judicaires se rapportant au sud de la France à l'époque considérée pour chercher de possibles témoignages associés à ce faux-monnayage.

---

[991] Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 161.
Coativy Y., De la fraude..., *op. cit.*, p. 238.
[992] Feller L., *Faux-monnayeurs..., op. cit.*, p. 45 et p. 59.
Dhenin M., La fausse monnaie..., *op. cit.*, p. 78.
[993] Feller L., *Faux-monnayeurs..., op. cit.*, p. 21.
Bompaire M. *et al.*, *Numismatique médiévale..., op. cit.*, t. 7, p. 120.
Miquel J. *et al.*, Un atelier de faux-monnayeur..., *op. cit.*, p. 194.
[994] Feller L., *Faux-monnayeurs..., op. cit.*, p. 141.

Partie 2. Les faux-monnayages de la grotte de La Catette

Dans cette seconde partie consacrée aux faux-monnayage et après avoir préalablement discuté des techniques monétaires dans un cadre officiel, il est opportun de présenter un autre exemple de contrefaçon de monnaie qui a également pris place au sein d'une grotte. Cette activité clandestine s'est organisée dans la cavité de La Catette qui se situe comme celle de Lauradieu, dans l'actuel département de l'Aude. L'intérêt de l'étude de cette fabrication illégale de monnaie réside à la fois dans les analogies qu'elle met en évidence avec celle précédemment évoquée, mais aussi dans les différences qui pour ce cas ont tendance à assimiler certaines techniques mises en œuvre à celles d'une production officielle... C'est pourquoi, à ce stade de l'étude, il est intéressant de l'envisager dans un rapport de comparaison. Une telle approche dispense du développement de problématiques déjà abordées.

L'avantage du *corpus* métallurgique[995] considéré dans la discussion qui va suivre, est que sa mise au jour au sein de la grotte de La Catette est principalement intervenue dans le cadre de cette étude[996]. Cette approche archéologique est très efficace, puisqu'elle a permis de répondre à des questions suggérées par la considération du *corpus* avec un regard technique. Elle conforte dans une plus grande mesure les hypothèses formulées à partir des données extraites de la seule caractérisation des vestiges.

Avant d'aborder les questions des matières premières de cette contrefaçon monétaire et des différentes techniques utilisées, il est nécessaire de définir plus précisément la période durant laquelle s'est établie cette activité. Le croisement de ces trois points de vue permettra ensuite de proposer le profil du faux-monnayage de la grotte de La Catette, à la fois du point de vue de son niveau de qualification et de celui de l'ampleur de la fraude.

I. Datation du faux-monnayage de la grotte de La Catette

Au terme des travaux archéologiques, l'ensemble de l'emprise de l'activité a été caractérisé. Excepté la grande quantité de matériel métallique, les témoignages de la présence du faussaire sont restreints. Hormis deux foyers domestiques associés à un peu de céramique, aucun aménagement conséquent ne trahit une

[995] cf. Faux monnayage : la grotte de La Catette (Aude) : La fouille, p. 250.
[996] Elle est venue compléter de manière plus exhaustive raisonnée, la première découverte fortuite d'un prospecteur amateur.

organisation de cet espace de travail. Les conclusions de cette étude de terrain supposent un développement de l'activité au sein de la cavité limité dans le temps[997].

Parallèlement à ces observations archéologiques, les fausses monnaies mises au jour offrent également la possibilité de dater cette fabrication caractérisée par une importante variété de types monétaires qui pour certains, se sont succédé. Chacun constitue des jalons qu'il faut considérer d'un point de vue chronologique afin de définir la période probable de fonctionnement de ce faux-monnayage. Tous les artefacts retrouvés présentant des motifs monétaires on été reproduits sur les figures ci-dessous car les produits de corrosion agglomérés à la surface des échantillons gênent la lecture des inscriptions.

Réal espagnol

Le type monétaire le plus ancien du *corpus* fait partie du système monétaire espagnol du réal au nom des Rois Catholiques Ferdinand II d'Aragon et Isabelle de Castille. C'est à partir de 1492, à l'occasion de la chute de Grenade, dernier état maure d'Espagne qu'a commencé la frappe des réaux ordonnés en multiples et sous-multiples du réal unitaire : ½ réal, réal, 2 réaux, 4 réaux et 8 réaux. Ils ont ensuite circulé en Espagne jusqu'en 1566, date à partir de laquelle Philippe II d'Espagne fit frapper des monnaies à son nom[998].

Dans le *corpus*, cette monnaie est illustrée par deux exemplaires différents. Le premier (Figure 232 K) a un diamètre de 23 mm qui ne laisse pas assez de place pour l'impression de toutes les légendes. Par ailleurs, la lettre d'atelier qui devrait se trouver à droite du blason figurant sur le droit de cette monnaie est manifestement absente. Les produits de corrosion vert foncé qui recouvrent la surface du faux laissent apparaître des zones d'argenture. Le second exemplaire de réal est particulier (Figure 232 L), dans la mesure où il présente un défaut important. C'est une monnaie *incuse* qui n'a qu'une seule face frappée[999]. Il s'agit en l'occurrence du revers. Il est d'ailleurs visible en creux sur le droit ce qui indique que la frappe a été mise en œuvre sur un surface relativement élastique.

[997] cf. Faux monnayage : la grotte de La Catette (Aude) : La fouille, p. 250.
[998] Duplessy J., La circulation des monnaies espagnoles en France (XVI^{e}-XVII^{e} siècles), dans *II Symposi Numismàtic de Barcelona*, Barcelone, Espagne, Societat catalana d'estudis numismàtics, 1980, p. 79-82.
[999] Selon une communication personnelle de l'historien M. Bompaire, un tel défaut n'empêchait pas la circulation d'une telle monnaie sans perte de valeur.

Cette pièce a été, en outre, volontairement fragmentée en trois morceaux. Avec un diamètre de 26 mm, sa morphologie est plus proche du type officiel qui se situe autour de 27 mm. La surface plus importante définie a notamment permis une meilleure impression des légendes.

Les dimensions différentes de ces deux monnaies pourraient suggérer qu'elles correspondent à deux types monétaires différents, la plus grande ayant une valeur supérieure. Cependant, les légendes manquantes du petit exemplaire indiquent que le coin utilisé nécessitait un flan de plus grand diamètre. D'autant que ce n'est pas cette dernière caractéristique métrologique qui différencie le réal, des doubles ou quadruples réaux. Ils ont tous un module similaire, seule la masse d'alliages constitue un paramètre discriminant[1000]. Théoriquement, ils pèsent respectivement 3,25 g, 6,8 g et 13,7 g[1001]. Dans ce cas, avec des masses de 2,16 et 1,96 g, les deux faux retrouvés à La Catette doivent être tous les deux assimilés à une production du réal.

Douzain à la croisette

En suivant la chronologie, le second type monétaire retrouvé au sein de la grotte de La Catette correspond à un faux douzain à la croisette (Figure 232 I). Les premières frappes de cette espèce ont commencé sous François 1er, après l'ordonnance du 19 mars 1541[1002]. Elles ont ensuite été poursuivies jusqu'en 1549, au début du règne de son successeur, Henri II, avec comme seul changement, le remplacement dans la légende du droit de « FRANCISCUS » par « HENRICUS »[1003].

Le diamètre un peu court du faux douzain découvert dans la cavité n'a pas permis l'impression de l'ensemble des légendes. C'est pourquoi, il n'est pas possible de savoir si le modèle imité est associé à une frappe de la période de François 1er, entre 1541 et 1547 ou d'Henri II, entre 1547 et 1549. Cependant, du point de vue du nombre de monnaies émises correspondant à chacun des règnes, il est plus probable que la contrefaçon ait copié le premier type produit pendant beaucoup plus longtemps.

[1000] Calico F. *et al.*, *Las monedas españolas desde Fernando e Isabel a Juan Carlos I : años 474 a 1994*, Barcelone, Espagne, Gabinete numismático Calico, 1994, p. 46-50.
[1001] Castan C. *et al.*, *Las monedas hispano musulmanas y cristianas 711-1981*, Madrid, Espagne, Artegraf, 1981, p. 335-339.
[1002] Blanchet J.-A. *et al.*, *Manuel de numismatique française*, *op. cit.*, t. 2, p. 320-321.
Duplessy J., *Les monnaies françaises..., op. cit.*, t. 2, p. 6, 58.
[1003] *Ibidem*, p. 71, 83.

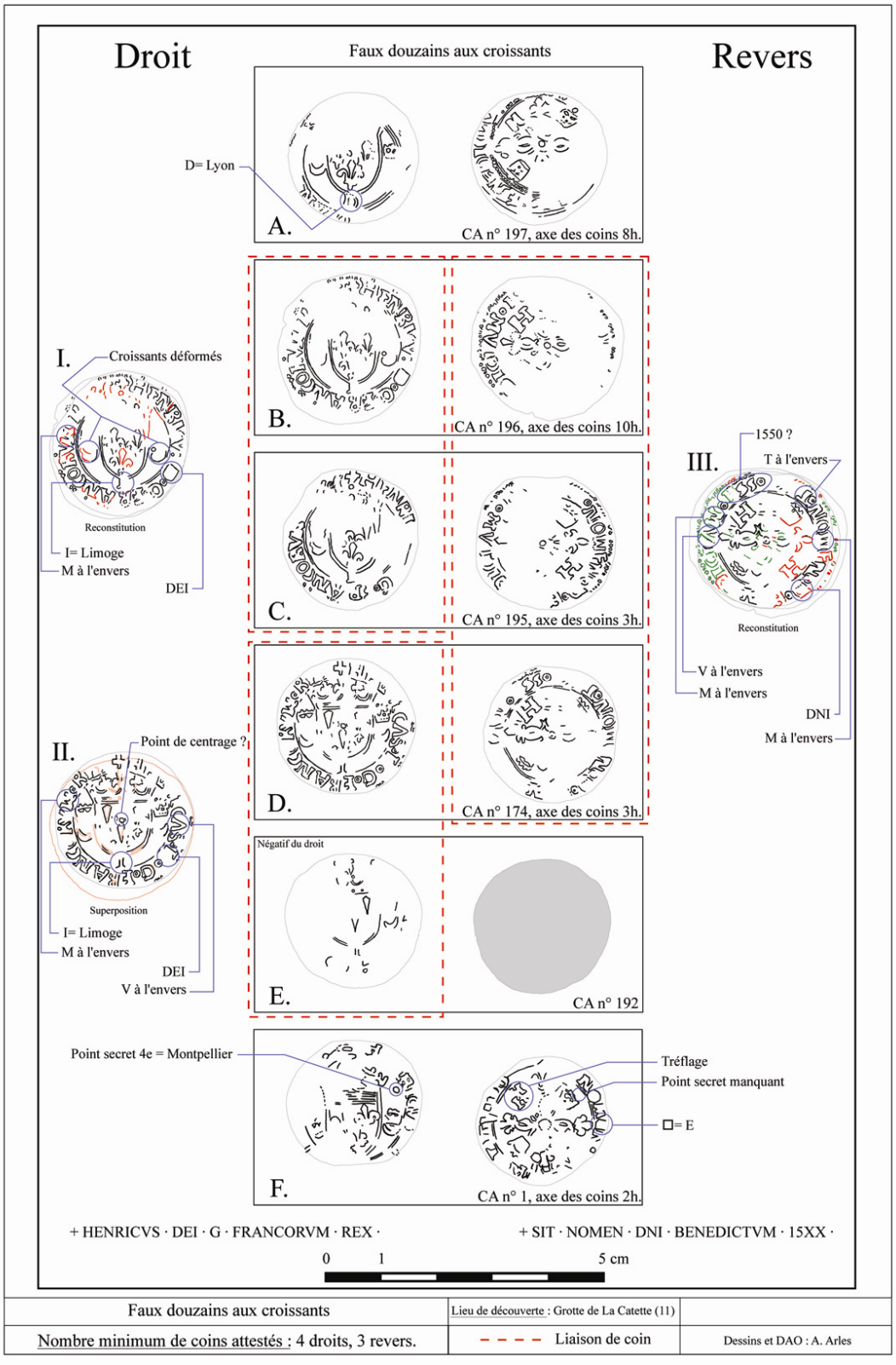


Figure 231 - Les faux douzains aux croissants de la grotte de La Catette.

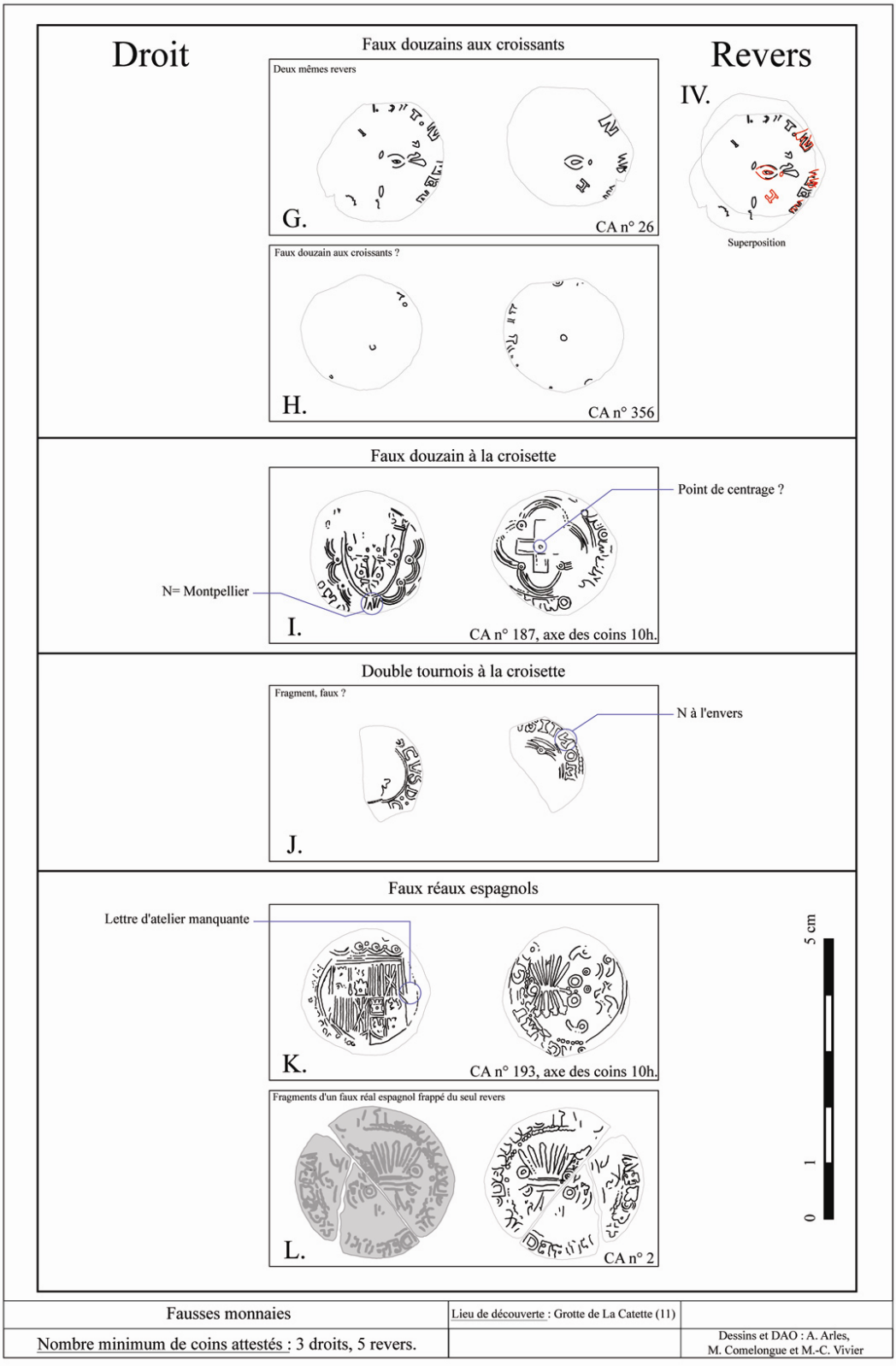


Figure 232 - Fausses monnaies et essais de frappe de la grotte de La Catette.

Double tournois à la croisette

Egalement au type à la croisette, un fragment de double tournois a aussi été mis au jour dans la grotte (Figure 232 J). Néanmoins, le seul témoignage de son existence est un dessin de l'archéologue M. Comelongue qui réalisa le premier inventaire du *corpus* à la suite de la découverte fortuite. De même, cet objet n'est que présumé comme faux puisqu'aucune analyse ne l'a caractérisé. Cependant, le « n » à l'envers au début de la légende du revers conforte l'hypothèse de l'irrégularité de cette monnaie.

D'un point de vue de la datation, la frappe de cette espèce de bas billon est calquée sur celle des douzains à la croisette. Elle a également commencé après l'ordonnance de 1541 et s'est poursuivie jusque sous Henri II. Toutefois, bien qu'incomplète, la légende lisible sur le droit de ce fragment suggère de placer la production du modèle original sous le règne de François 1er. La portion de lettre qui précède la dernière syllabe « CUS » du nom du monarque évoque davantage le « S » de « FRANCISCUS » que le « I » d'« HENRICUS » (Figure 232 J).

Douzain aux croissants

Le dernier type monétaire du *corpus* est celui qui est le plus représenté. Il est illustré par cinq exemplaires de faux douzains aux croissants (Figure 232 A, B, C, D et F). C'est notamment cette espèce qui, sous le règne d'Henri II, remplace à partir de l'ordonnance du 31 janvier 1549, le monnayage à la croisette hérité de François 1er [1004]. Ces pièces ont ensuite été frappées jusqu'au début du règne de Charles IX, entre 1560 et 1562, sans que leurs légendes n'aient été modifiées.

Henri II est reconnu comme un grand réformateur du système monétaire. C'est notamment lui qui va, à partir de 1550, encourager le développement des techniques modernes qui finiront par remplacer celles du monnayage au marteau, une centaine d'années plus tard[1005]. Il va, en outre, imposer l'inscription des millésimes de fabrication sur chaque nouvelle espèce[1006]. C'est pourquoi, la datation de trois des fausses monnaies découvertes pourrait être plus précise s'il ne subsistait pas un doute quant à l'année indiquée. Le zéro qui pourrait indiquer que l'année inscrite est 1550, est en fait un annelet également utilisé à plusieurs

[1004] Hourlier M., Le trésor de Noroy-sur-Ourcq (Aisne) : monnaies françaises et étrangéres des XV^{e} et XVI^{e} siécles, *Trésors monétaires 11,* Paris, Bibliothèque nationale, 1889, p. 129.
Blanchet A. *et al.*, *Manuel de numismatique française*, *op. cit.*, t. 2, p. 326.
Duplessy J., *Les monnaies françaises..., op. cit.*, t. 2, p. 83-84.
[1005] cf. *supra*, p. 58.
[1006] Duplessy J., *Les monnaies françaises..., op. cit.*, t. 2, p. 71.

reprises en ponctuation dans le reste de la légende (Figure 232 III). Et bien que sans ce chiffre, le millésime de cette monnaie soit lacunaire et marque dans ce sens une faute, un tel argument ne permet pas de privilégier l'hypothèse de la date complète. Ce faux-monnayage n'est pas caractérisé par la qualité de ses légendes puisque le seul revers considéré ici présente quatre inversions de lettres (Figure 232 III). Néanmoins, compte tenu de la période de frappe de ce type monétaire qui s'étend de 1549 à 1562, la période de frappe du modèle original se voit tout de même restreinte aux années 1550, inscrites dans le règne d'Henri II.

Un faux-monnayage du milieu du XVI^{e} siècle

L'ensemble des quatre types monétaires relevés fournissent plusieurs *terminus post quem* fixant l'activité clandestine au milieu du XVI^{e} siècle. L'une des particularités des monnaies considérées est qu'elles n'ont pas été décriées durant cette période. Les douzains à la croisette qui ont pourtant été remplacés par le type aux croissants, ont tout de même continué à circuler pour la même valeur que celle de leurs successeurs, c'est-à-dire douze deniers tournois.

En définitive, l'activité peut avoir débuté dès 1541, sous le règne de François 1er par une frappe de faux douzains et doubles tournois à la croisette. Dans ce cas, elle aura dû se poursuivre jusque dans les années 1550 avec la contrefaçon des douzains aux croissants millésimés. Néanmoins, les travaux archéologiques ont mis en évidence le faible impact de cette occupation au sein de la cavité qui l'a accueillie. Dans ce cas, il faut certainement envisager une concentration de cette production sur une plus courte période, s'étendant à partir de la seconde moitié du XVI^{e} siècle. Les réaux espagnols s'inscrivent également dans cette période puisqu'ils ont été frappés dès la fin du XV^{e} siècle avant d'être remplacés en Espagne en 1566.

Les monnaies étrangères en France au XVI^{e} siècle

L'exposition des monnaies étrangères était effectivement autorisée en France au milieu du XVI^{e} siècle comme le prouvent les différentes ordonnances de François 1er et Henri II qui en réglementent la circulation, en fixant notamment

leur taux de change[1007]. La circulation de ces espèces était en outre favorisée dans les zones frontalières compte tenu des échanges commerciaux.

Il a donc été possible pour le faussaire de La Catette d'écouler ses faux réaux sur le territoire français. Il faut d'ailleurs rappeler les deux principaux intérêts d'un tel choix. Le premier mise sur la plus grande méconnaissance des monnaies étrangères par les usagers. Celle-ci pouvait être évoquée par le faussaire pour justifier les imperfections de ses monnaies. D'un autre côté, en cas d'arrestation, il pouvait espérer plus d'indulgence de la part des autorités dans la mesure où une telle contrefaçon n'était pas associée au crime de lèse majesté.

Le faux-monnayeur était conscient des risques qu'il prenait. Il suffit pour les évaluer de considérer la valeur des monnaies qu'il a imitées. Ce sont, en définitive, les réaux espagnols qui correspondent aux espèces de plus grande valeur de cette fabrication. Ces pièces qui en Espagne valaient 34 maravédis, ont vu leur cours évoluer de 3 sous 9 deniers tournois jusqu'à 4 sous 2 deniers, selon les ordonnances du 19 mars 1541 sous François 1er et des 29 juillet 1549 et 17 août 1561 sous Henri II[1008]. Les monnaies françaises parallèlement contrefaites dans cette activité illégale valent, pour les plus fortes, seulement 12 deniers, soit l'équivalent d'une somme quatre fois moins importante[1009].

La considération des caractéristiques métrologiques des différentes fausses monnaies retrouvées met en évidence que les flans utilisés pour les faux douzains sont identiques à ceux des copies de réaux. Dans ce cas, pourquoi le faussaire n'a-t-il pas seulement contrefait ce dernier type de pièces ? Pour justifier ce choix, il faut considérer que si la circulation de monnaies étrangère était autorisée, il était *a priori* tout de même difficile de diffuser exclusivement de telles espèces. Le faux-monnayeur a donc certainement choisi de varier sa production avec des types français relativement courants que sont les douzains.

La frappe des petites monnaies sous le règne d'Henri II

Les différentes réformes de la fabrication de monnaie proposées par Henri II durant son règne devaient lutter contre les fraudes. C'est notamment pour cela qu'il a souhaité qu'une nouvelle méthode de monnayage soit développée pouvant garantir une mise en forme parfaitement ronde des espèces. Une telle mesure doit prévenir leur rognage.

[1007] Leddet P., Le journal du Sire de Gouberville, noms de monnaies et évaluations, *Revue Numismatique*, vol. 4, n° 31, 1928, p. 180.
[1008] *Ibidem*, p. 208.
[1009] Un sou représente 12 deniers.

C'est également dans une volonté d'assainir le système monétaire français qu'il renouvelle le 3 septembre 1548 l'interdiction de la frappe de liards, doubles et deniers tournois formulée par l'ordonnance du 6 juillet 1546 par son prédécesseur[1010]. Ce n'est qu'en 1557 que ces monnaies sont de nouveau émises en premier lieu par l'atelier de Paris.

Si la délivrance de monnaies de bas billon était interrompue au début du règne d'Henri II, elles n'ont toutefois pas été décriées. Comme le rappelle une ordonnance du 27 janvier 1553 à la suite d'un décri de doubles et de deniers frappés frauduleusement par les ateliers de Villeneuve-lès-Avignon et Villefranche-de-Rouergue[1011].

D'un autre côté, il faut admettre qu'en interdisant la production des petites espèces, Henri II a certainement favorisé leur faux-monnayage. L'arrêt de leur émission par les ateliers monétaires aura entraîné une diminution du nombre de ces pièces indispensables aux échanges de la vie courante. Dans une telle configuration, les faussaires ont pu occuper une niche laissée libre par l'autorité émettrice. La contrefaçon de ces monnaies de bas titre ne permet pas d'espérer un gain important compte tenu de l'économie limitée de métal précieux réalisée. Cependant, cet inconvénient se trouve dans un sens compensé par la facilité de diffuser une telle production. La valeur limitée de ces espèces n'encourage pas les contrôles rigoureux ; d'autant que le besoin de ce type de numéraire devait rendre les usagers encore moins regardants[1012].

Un contexte de crise

Comme dans la majorité des cas, cette activité de faux-monnayage est ancrée dans une période de crise : alors que la région était déjà le terrain de nombreux

---

[1010] *Lettres patentes portant deffenses de fabriquer doresnavant dans les Monoyes des doubles et petits deniers*, Monnaie de Paris, ms. 4° 28, f° 221r°-222v°, 6 juillet 1546, n. p.
Lettres patentes pour deffendre le cours et la fabrication des liards et petits deniers tournois, Monnaie de Paris, ms. 4° 29, f° 63r°-64v°, 3 septembre 1548, n. p.
« Combien que par noftre ordonnance donnée a Lyo au moys d'Octobre mil cens quarante huict, enfuivant autre ordonnace de l'an mil cinq cens quarante fix ou moys de Juillet, faicte par le feu Roy noftre treshonoré feigneur et pere que Dieu abfolue. La fabrication de tous les menuz ouuraiges de liars doubles & deniers tournoys, ayt efté interdicte & défendue, en toutes noz monnoyes, a caufe des grandz abuz, frauldes, & larcins… ».
Ordonnances du roy contenant le descry des doubles et petitz deniers tournois neufz à la petite croix, portans en légende Henricus, Paris, Dallier, 1352 [sic pour 1552], p. 2-3.

[1011] *Arrest de la Cour des monoyes qui excepte du décry des doubles et petits deniers ceux à la petite croix qui ont pour légende Franciscus*, Monnaie de Paris, ms. 4° 140, 27 janvier 1553, n. p.

[1012] Feller L., *Faux-monnayeurs..., op. cit.*, p. 21.

affrontements entre les rois de France et d'Espagne, les Guerres de Religion ravagent tout le royaume de France durant la seconde moitié du XVI^{e} siècle.

Une région longtemps disputée

Comme toutes les régions frontalières, la partie orientale des Pyrénées fut longtemps un terrain disputé entre les deux pays voisins, la France et l'Espagne.

En 1493, par le traité de Barcelone, le Roi de France Charles VIII restitue à Ferdinand II d'Aragon, la Catalogne qu'avait conquise Louis XI en 1461. En 1496, il attaque de nouveau le Roussillon et met à sac la région. Le 3 avril 1559, Henri II signe avec Philippe II d'Espagne la paix de Cateau-Cambrésis, mettant fin à soixante-cinq années de conflit entre les deux pays pour le contrôle de l'Italie. Mais en 1640 le peuple catalan se soulève et fait appel à Louis XIII : la France soutient leur *Guerra dels Segadors*, et en 1659 le Roussillon et la Cerdagne passent définitivement aux mains de Louis XIV. Le traité des Pyrénées précise alors une nouvelle frontière entre les deux pays.

Très proche voisine de l'ancienne Catalogne, la grotte de La Catette s'inscrit dans une région toujours restée en terre française : au XVI^{e} siècle, elle appartenait encore aux descendants de Pons de Bruyères le Châtel, lieutenant de Simon Montfort, qui l'avait reçue de ce dernier en 1210, en récompense de ses hauts faits lors de la croisade contre les Albigeois[1013]. Ce territoire a néanmoins été le témoin privilégié de tous ces événements, qui certainement ont dû l'affecter dans une moindre mesure.

Les Guerres de Religion

Les premières persécutions des protestants par les catholiques ont commencé au cours du règne de François I^{er} à partir de l'« affaire des Placards ». Les tensions et la répression religieuse s'accentuèrent considérablement pendant le règne d'Henri II qui a multiplié les condamnations tandis que le protestantisme connaît un essor considérable. A sa mort en 1559, les deux partis religieux commencèrent à s'organiser pour mettre au point leur réseau militaire ; lorsque la reine Catherine de Médicis promulgua l'« Edit de Janvier » en 1562 pour instaurer une liberté religieuse, c'est l'effet contraire qui se produisit.

Les affrontements ont été particulièrement violents en région Languedoc, de par l'intervention du Roi d'Espagne Philippe II, apportant un soutien financier et militaire au clan des catholiques.

[1013] Lagarde A., *Rivel (Aude)..., op. cit.*, p. 90.

Jusqu'à la mise en place de l'Edit de Nantes par Henri IV en 1599, huit périodes de conflits meurtriers et destructifs se succédèrent ruinant physiquement et économiquement le pays.

En définitive, le contexte géographique et temporel de cette activité de faux-monnayage est particulièrement favorable à sa réussite. Sa proximité avec l'Espagne offre la possibilité de contrefaire des monnaies moins connues des usagers français, facilitant ainsi leur diffusion. En outre, la politique monétaire d'Henri II a laissé une place que pouvaient occuper les faussaires. Ils avaient l'opportunité d'imiter et d'écouler sans difficulté des petites monnaies dont les usagers avaient grandement besoin pour leurs transactions courantes.

Notre faussaire était en outre conscient de ces avantages. La diversité de sa production en est la preuve. La valeur de ses monnaies contrefaites est inversement proportionnelle aux risques encourus puisque les espèces avec lesquelles il pouvait espérer obtenir les plus grands bénéfices sont étrangères. Cependant, dans la mesure où il était *a priori* difficile de diffuser exclusivement un type espagnol, le faux-monnayeur a également frappé des pièces françaises. Il s'est toutefois limité à la monnaie courante, tels que les douzains et les espèces de bas billon, comme le suggère le lot de très petits carreaux et flans découverts dans la cavité.

II. Les matières premières de faux-monnayage de la grotte de La Catette

Afin de caractériser les matériaux utilisés dans cette contrefaçon monétaire, la totalité des carreaux, flans et fausses monnaies ainsi qu'une partie des déchets de coupe mis au jour au sein de la cavité ont été analysés qualitativement par spectrométrie de fluorescence X au Centre Ernest-Babelon. Les caractérisations ont permis de définir un classement du *corpus* afin de proposer un échantillonnage pertinent pour mettre en place des analyses quantitatives par ANRC.

Les métaux de ce faux-monnayage

La caractérisation des 293 échantillons par spectrométrie de fluorescence X[1014] rend compte d'une très grande homogénéité des matériaux associés à ce faux-monnayage. Excepté neufs objets, l'ensemble des artefacts se répartit selon deux

[1014] cf. Annexe P

principaux groupes de composition. Ce sont les composés associés au procédé d'argenture à l'amalgame mis en œuvre dans cette production qui marquent les différences entre ces deux ensembles.

Le premier groupe de composition rassemble des artefacts constitués principalement de cuivre. Le faible signal mesuré pour le plomb dans ces échantillons suggère une teneur très limitée que les analyses par ANRC ont permis de quantifier. Le second ensemble trahit la présence des mêmes composés auxquels s'ajoutent de l'argent et du mercure.

Parallèlement à cette uniformité générale, les neufs échantillons qui s'en démarquent, se révèlent plus surprenants. Parmi ce groupe restreint, il est possible de définir quatre sous-ensembles dont certains correspondent à des isolats. Le premier est un fragment d'alliage cuivre-argent[1015], le second est constitué du réal incus[1016], le troisième de deux flans en laiton[1017]. Quant au dernier il regroupe cinq coulures à base de plomb et d'étain[1018].

La mise au jour des coulures métalliques étant intervenue lors de la première découverte fortuite du matériel, leur localisation au sein de la grotte et dans la stratigraphie n'est pas connue. De plus, aucun échantillon de ce type n'a été dégagé lors de l'opération archéologique complémentaire. Dans la mesure où ces vestiges ne présentent pas d'autre lien avec le matériel métallique du faux-monnayage, il a été décidé jusqu'à preuve du contraire, de les considérer comme intrusifs dans le *corpus* général.

Si la fouille n'avait pas vu la découverte d'un second exemplaire, le premier flan de laiton mis en évidence au sein du matériel fourni par l'inventeur du site aurait également pu être supposé comme étranger. Ici, il faut considérer cette très faible représentativité comme potentiellement associée à une précédente production au sein de la grotte.

Compte tenu de ces résultats de spectrométrie de fluorescence X, huit échantillons ont été sélectionnés pour être analysés par ANRC[1019]. Trois d'entre eux appartiennent au groupe des cuivres[1020], trois autres à celui des cuivres

[1015] Référence CA 148.
[1016] Référence CA 2.
[1017] Références CA : 3 et 194.
[1018] Références CA : 56, 57, 58, 59 et 60.
[1019] Le fragment d'alliage cuivre-argent a également été analysé par ANRC. Cependant, les résultats ont plus d'intérêt à être présentés plus loin.
cf. *infra*, p. 569.
[1020] Références CA : 25, 38 et 73.

argentés à l'amalgame[1021]. La sélection a également tenu compte des différences morphologiques observées au sein du premier ensemble puisqu'elle a retenu un petit carreau[1022] et deux flans de diamètres différents. Les derniers artefacts qui ont été également analysés par ANRC sont l'un des deux flans de laiton[1023] ainsi que l'un des fragments du réal[1024].

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau ci-dessous :

	Ni	Sn	Zn	Sb	Pb	Au	Ag	As	Fe	Cu
CA25	0,069	0,083	n.d.	0,20	0,57	0,0004	0,064	0,073	0,10	98,8
CA38	0,094	0,046	n.d.	0,21	0,32	n.d.	0,076	0,067	0,10	99,1
CA 73	0,102	0,052	n.d.	0,27	0,41	0,017	0,082	0,098	0,10	98,9
CA 29	0,064	0,067	n.d.	0,19	0,57	0,001	0,86	0,070	0,07	98,1
CA 18	0,066	0,071	n.d.	0,19	1,72	0,069	0,93	0,070	0,11	96,8
CA 11	0,095	0,11	n.d.	0,19	0,44	0,001	0,97	0,062	0,14	98,0
CA 03	0,13	0,078	16,86	0,037	0,77	0,090	0,11	0,045	0,32	81,6
CA 02	0,18	0,028	n.d.	0,095	0,33	0,002	0,60	0,030	0,14	98,6

Tableau 10 - Analyses par ANRC d'un échantillonnage du *corpus* de La Catette (% massiques).

L'analyse de l'échantillon CA n° 3 confirme qu'il s'agit d'un laiton puisqu'il est composé en majorité de cuivre et de zinc. Le plomb constitue une impureté dans la mesure où il ne dépasse pas le pourcent massique.

La caractérisation des six échantillons appartenant aux deux principaux groupes de compositions permet de discuter de la possibilité que le cuivre utilisé dans la fabrication des flans argentés est identique à celui des ébauches qui ne le sont pas. Ce sont notamment les taux d'antimoine et d'arsenic mesurés dans chacun des échantillons qui permettent de l'envisager. La figure ci-dessous met en évidence une relation entre ces deux éléments.

[1021] Références CA : 11, 18 et 29.
[1022] Référence CA 73.
[1023] Référence CA 3.
[1024] Référence CA 2.

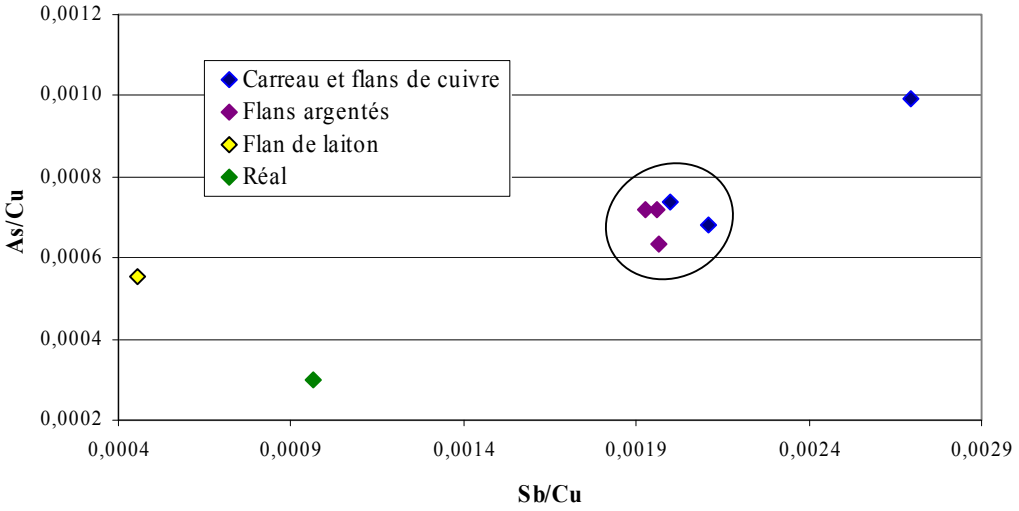


Figure 233 - Relation entre l'antimoine et l'arsenic dans le cuivre utilisé pour le faux-monnayage de La Catette.

Le regroupement observé suggère l'utilisation dans la fabrication monétaire d'une même source de cuivre relativement pur qui contient en moyenne moins d'un pourcent de plomb.

L'analyse par activation du fragment de réal[1025] est relativement surprenante. Avec seulement 0,6 % massique d'argent, celui-ci est *a priori* associé à un traitement d'argenture. Cependant, le procédé qui caractérise ce faux-monnayage utilise le mercure qui n'a par ailleurs pas été mis en évidence lors des analyses de spectrométrie de fluorescence X. Afin de vérifier si le métal précieux est effectivement localisé à la surface de cet échantillon, il a été décidé de réaliser une observation en profondeur. Cependant, compte tenu de l'unicité de cet échantillon, il n'était pas envisageable de préparer une coupe métallographique.

Trois profils de concentration ont finalement été réalisés par G. Sarah selon le protocole d'analyse par ICP-MS avec ablation laser qu'il a développé dans le cadre de sa thèse[1026]. Le mode de prélèvement particulier de la méthode de caractérisation par ICP-MS couplée à l'ablation laser permet une pénétration progressive de la surface vers l'intérieur de l'échantillon. A partir d'une acquisition du signal en temps réel, il est possible d'obtenir des profils d'évolution de la concentration des éléments majeurs en fonction de la durée d'ablation. C'est

[1025] Référence CA 2.
[1026] Cette méthode d'analyse a également été mise en œuvre lors de l'étude des fragments de creusets de Montreuil-Bonnin
cf. *supra*, p. 308.
Sarah G. *et al.*, Application of laser ablation..., *op. cit.*, p. 1163-1167.
Sarah G., *Caractérisation de la composition..., op. cit.*, 516 et 226 p.

cette représentation graphique qui est proposée sur la figure ci-dessous, sur laquelle sont superposés les profils de l'argent et du cuivre correspondant aux trois analyses effectuées sur différents points du fragment de réal.

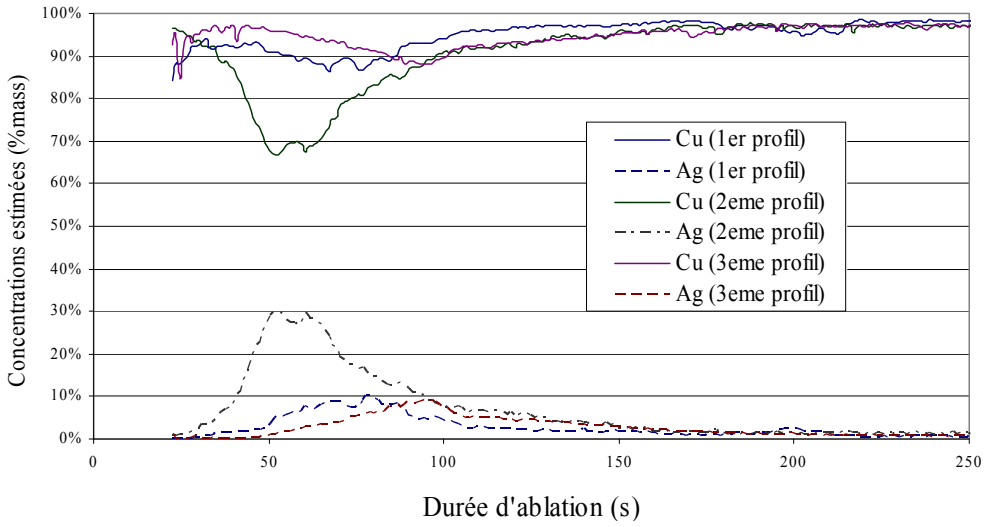


Figure 234 - Profils ICP-MS avec ablation laser obtenus pour le fragment de réal (CA n° 2).

Les teneurs sont données à titre indicatif dans la mesure où elles sont en dehors de la gamme d'étalonnage de la méthode. Cependant, elles permettent tout de même de rendre compte des variations de la réparation spatiale de l'argent au niveau des points d'analyse. Le métal précieux est localisé à la proche surface de l'échantillon sous une couche enrichie en cuivre. Celle-ci correspond certainement, d'après son aspect, à une pellicule de produits de corrosion. Les analyses ont par ailleurs confirmé l'absence de mercure associé à l'argent. Compte tenu de ces observations, le réal a bien été argenté. En revanche, la technique utilisée n'est pas la même que celle employée pour le reste du *corpus*. Sans la mise en œuvre d'une étude métallographique, il est difficile de supposer la technique associée. D'autant que la seule observation de surface est impossible compte tenu de la surface oxydée.

L'unicité du réal traité par cette technique, sa frappe incuse qui n'en fait pas complètement une monnaie achevée ainsi que sa découpe volontaire en trois morceaux, laissent à penser que sa fabrication n'a pas été satisfaisante. La technique d'argenture expérimentée par le faussaire n'aura pas été retenue pour être appliquée au reste de la production.

Après avoir discuté du cuivre qui constitue la base de cette fabrication de fausses monnaies, il est maintenant envisageable de considérer l'origine de l'argent également utilisé dans cette production. Lors de la fouille de la cavité, il a été possible de mettre au jour dix rognures métalliques d'aspect argenté[1027]. On notera que l'une d'elles présente des inscriptions qui correspondent à un fragment de légende monétaire (Figure 235).

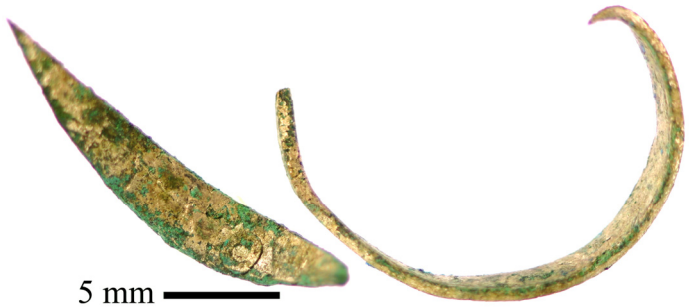


Figure 235 - Exemples de rognures d'aspect argenté, la première présente des inscriptions[1028].

Une telle configuration peut être mise en relation avec une source probable de métal précieux pour ce faux-monnayage. L'argent contenu dans les pièces authentiques constitue un stock très facilement accessible. Les fragments retrouvés pouvaient être, dans ce cas, les fragments de vraies monnaies rognées dans une volonté d'utiliser leur métal blanc dans un procédé d'argenture. Cependant, les analyses de ces échantillons ont rapidement exclu cette hypothèse. La comparaison de deux dosages qualitatifs de spectrométrie de fluorescence des rayons X au niveau de leur surface ainsi que sur le bord de rognage (Figure 236), a révélé que l'aspect argenté constaté n'est pas représentatif de leur composition globale. Le métal précieux n'est localisé qu'en surface et est allié à du mercure, ce qui trahit le procédé d'argenture. Il ne s'agit pas d'un lot de rognures prélevées sur des pièces authentiques, mais plutôt de fragments résultant de la rectification de fausses monnaies...

[1027] Références CA : 181, 235, 241, 259, 269, 331, 341, 342, 343, 354 et 357.
[1028] Références CA : 331, 343.

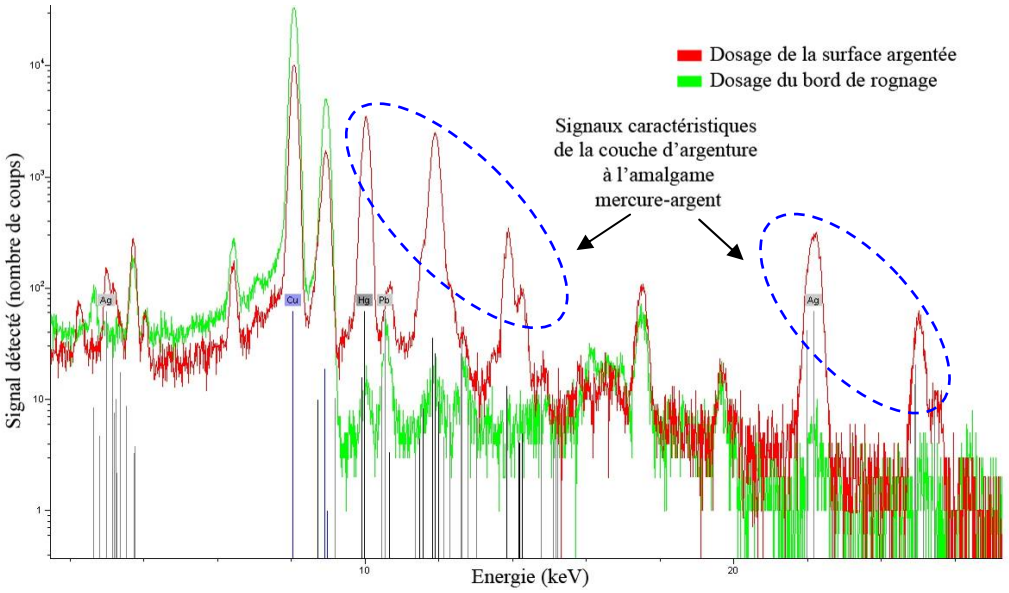


Figure 236 - Spectres de fluorescence X de l'échantillon CA 331[1029].

C'est l'analyse de l'ensemble des vestiges découverts au sein de la cavité qui a mis en évidence un échantillon particulier. Sa caractérisation par spectrométrie de fluorescence X a révélé qu'il s'agissait d'un morceau d'alliage cuivre-argent. Aucune trace significative de mercure n'y a été décelée. Ce fragment métallique de 0,83 g, n'a pas une forme particulièrement spécifique (Figure 237). C'est pourquoi, il intervient certainement dans la chaîne opératoire de fabrication.

Figure 237 - Fragment d'alliage cuivre-argent (CA 148).

Son analyse quantitative par ANRC confirme l'importante quantité de métal précieux que contient cet alliage puisqu'elle est presque équivalente à celle du cuivre (Tableau 11). Il s'agit en définitive d'un mélange binaire puisque le taux de plomb qui est le troisième élément le plus important, ne dépasse pas un pourcent de la masse totale. Cette composition n'est pas sans rappeler les caractéristiques des alliages monétaires. Cependant, dans la mesure où il a été admis que l'activité

[1029] Analyses réalisées au Centre Ernest-Babelon. La source de rayonnement X est le tube à l'anode de molybdène avec une tension d'excitation de 45 kV et une intensité de 600 µA. Les dosages ont duré 60 s avec un faisceau incident collimaté à 650 µm pour restreindre l'analyse au seul bord de coupe.

considérée prend place au milieu du XVI^{e} siècle, aucune monnaie de cette période ne présente une telle composition. Il ne s'agit donc pas de métal provenant de la fonte d'espèces authentiques.

	Ni	Sn	Zn	Sb	Pb	Au	Ag	As	Fe	Cu
CA 148	0,074	0,58	n.d.	0,28	1,002	0,35	43,3	0,79	n.d.	53,7

Tableau 11 - Analyse par ANRC d'un fragment d'alliage cuivre-argent découvert à La Catette (CA 148, % massiques).

Compte tenu de sa forme et de sa composition, cet échantillon unique doit être mis en relation avec le procédé d'argenture de ce faux-monnayage. Il illustre la qualité de l'argent utilisé dans cette activité. Mélangé à du mercure il pouvait ensuite être appliqué à la surface des ébauches de fausses monnaies. Il faut néanmoins rappeler que la forte proportion de cuivre allié ne favorise pas la réaction d'amalgamation augmentant d'autant la difficulté et la durée de préparation[1030].

Forme initiale des matières premières

Après avoir mis en évidence que le matériau principal de ce faux-monnayage est un cuivre relativement pur, il est possible de s'interroger sur la forme à partir de laquelle le faussaire disposait de ce métal au début de sa fabrication. De même, dans la mesure où il a utilisé un procédé d'argenture, la question de la source d'argent doit être abordée.

La problématique liée au cuivre utilisé dans ce faux-monnayage consiste à évaluer dans un premier temps, si le faux-monnayeur a réalisé des fontes au sein de la grotte pour produire ses lames. Si ce n'est pas le cas, il faudra s'interroger dans un second temps sur la forme sous laquelle se présentait le métal employé.

Comme pour la grotte de Lauradieu, l'intérêt de mettre en œuvre des opérations de fonderie dans cette contrefaçon monétaire doit être évoqué. D'un point de vue pratique notamment, une telle démarche ne se justifie pas. Elle impose beaucoup de contraintes de mise en œuvre compensées par aucun avantage. Plusieurs données archéologiques laissent aussi à penser que si le faussaire a lui-même fondu ses matières premières, il ne l'a pas fait au sein de la grotte. Les indices limités d'occupation relevés lors des travaux archéologiques ne

[1030] C'est notamment ce dont rendent compte les expérimentations d'argenture à l'amalgame présentées en Annexe V.

correspondent pas à des structures métallurgiques permettant de fondre du cuivre, dont la température de fusion atteint 1085 °C[1031]. Les seuls foyers découverts dans l'emprise de l'activité correspondent à des structures domestiques.

Par ailleurs, contrairement à ce qui a été observé pour le faux-monnayage de Lauradieu, la quantité de déchets associés à la fabrication est ici très restreinte par rapport à la totalité du *corpus*. Cette particularité est d'autant plus avérée qu'elle a été prise en compte dès l'organisation de la fouille de la cavité. La faible proportion de chutes de coupe rassemblées définit un réel particularisme de cette activité. Dans ce cas, il faut admettre que les résidus métalliques de cette contrefaçon monétaire, ont été consciencieusement collectés. Ils constituent un stock de métal qui, une fois fondu, peut être de nouveau utilisé. En supposant à présent que le faussaire ait décidé d'opérations de fonderie au sein de la grotte ou dans une proximité directe, il n'aurait pas emporté son lot de métal à refondre alors que d'un autre côté, il laissait sur place sa production en cours de mise en forme. Finalement, il est très peu probable que le faux-monnayeur ait choisi de préparer ses lingots de cuivre dans des conditions aussi précaires que celles de la cavité naturelle.

La récupération systématique des déchets métalliques résultant de cette fabrication ne doit pas cependant être négligée. Elle témoigne d'une volonté de réutiliser cette matière. Dans la mesure où la morphologie de ses résidus est très caractéristique d'une pratique illégale, ne faut-il pas supposer que le faussaire devait lui-même mettre en œuvre ses refontes en ayant accès à un atelier métallurgique ?

Seule l'organisation d'opérations de fonderie au sein de la cavité aurait justifié que le faussaire y ait également mis en forme les lames ayant été moulées. Une telle préparation a pourtant été réalisée puisque les épaisseurs mesurées à partir du *corpus* métallique sont très majoritairement inférieures à 1,4 mm et ne dépassent jamais 2,5 mm (Figure 238)[1032].

En considérant les vestiges découverts au sein de la grotte, aucun d'entre eux ne permet de placer avec certitude le travail des lames dans la grotte. Cette préparation est toutefois envisageable à cet endroit puisque l'outillage nécessaire était présent dans ce lieu isolé comme en témoignent certaines ébauches de flans retrouvées dont les morphologies indiquent qu'elles ont subi des martelages[1033].

[1031] Gale W. F. *et al.*, eds., *Smithells metals reference book*, *op. cit.*, p. **14**-10.
[1032] cf. *supra*, p. 388.
[1033] cf. *infra*, p. 577.

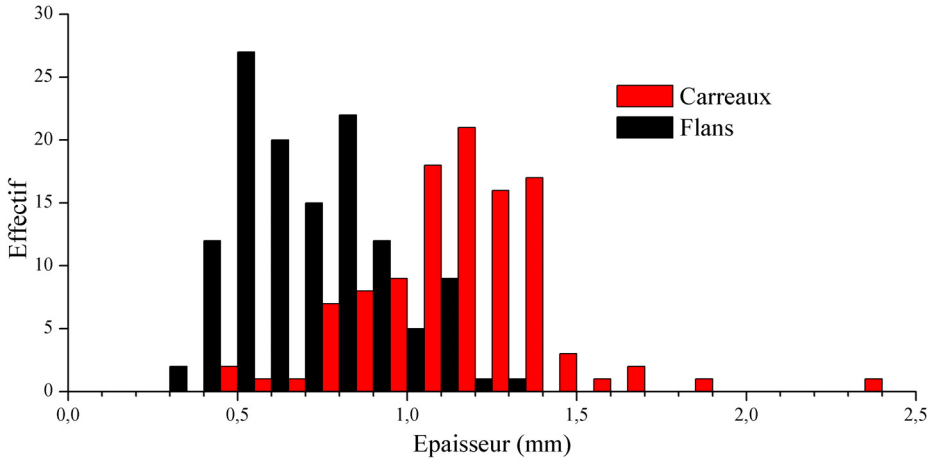


Figure 238 - Répartitions des épaisseurs mesurées sur l'ensemble des carreaux et flans découverts dans la grotte de La Catette.

Parallèlement, les matières premières utilisées dans ce monnayage exposent certaines caractéristiques de standardisation, particulièrement visibles sur la figure 238. Les épaisseurs des carreaux sont celles qui se rapprochent le plus des mensurations initiales du matériau utilisé. Or, près des deux tiers des dimensions mesurées dans ce *corpus* particulier, sont répartis dans un intervalle de seulement 0,4 mm, entre 1 et 1,4 mm. En outre, l'histogramme présente une asymétrie. La borne supérieure de 1,4 mm est relativement stricte, compte tenu de la rareté des échantillons d'une épaisseur supérieure. En revanche, la population des carreaux épais de moins d'un millimètre est plus conséquente et s'appauvrit à mesure que l'épaisseur diminue. Cette configuration traduit le début de mise en forme de ces ébauches qui subissent des martelages[1034]. A un stade préliminaire, la matière première de ce faux-monnayage se présentait en définitive, sous forme de lames relativement uniformes, d'1 à 1,4 mm d'épaisseur.

En définitive, le métal qui constitue la base de cette activité de faux-monnayage met en évidence une homogénéité globale. Il s'agit de cuivre relativement pur dans lequel le plomb, qui constitue la principale impureté, ne dépasse pas 2 % de la masse totale de l'alliage. La très faible représentativité du laiton suggère une phase antérieure de fabrication dont les indices sont très limités.

De plus, s'il est possible d'exclure l'organisation d'opération de fonderie à proximité directe ou au sein de la grotte de La Catette, la mise en forme indispensable des lames a pu en revanche y prendre place. Néanmoins si tel est le

[1034] cf. *infra*, p. 577.

cas, elle n'aura pas empêché la standardisation des plaques de cuivre utilisées puisque leurs épaisseurs font état d'une grande uniformité.

Quant à l'échantillon d'alliage présentant un taux relativement élevé d'argent, il doit être associé au procédé d'argenture. Il faut cependant souligner que sa composition globale ne facilite pas la mise en œuvre de la technique retenue.

III. Les chaînes opératoires du faux-monnayage de la grotte de La Catette

L'une des principales caractéristiques de cette contrefaçon monétaire, est la découverte d'un grand nombre d'ébauches en cours de fabrication. Ces dernières constituent 234 des 363 échantillons du *corpus* et en représentent près de 80 % de la masse. En considérant la totalité des vestiges d'un point de vue morphologique, ils semblent se répartir selon deux familles distinctes. Le contraste entre ces ensembles est relativement bien marqué dans la mesure où il se constate à plusieurs niveaux. Le premier est celui du diamètre et de la longueur des côtés des carreaux qui varient de manière très significative suivant les artefacts. Sur un second plan, il apparaît que les différences de modules sont également corrélées avec des stades de mise en forme plus ou moins avancés, comme le suggère notamment la prise en compte du *corpus* de carreaux. Enfin, une dernière caractéristique se dessine à partir de l'observation des profils de déformation. Cette constatation est particulièrement remarquable puisqu'elle permet d'envisager une adaptation de la chaîne opératoire aux modules des monnaies produites.

Dans un premier temps, il est indispensable de confirmer les irrégularités relevées lors de l'examen préliminaire global, à partir d'une approche métrologique. En la complétant dans un second temps par une discussion technique, il sera possible de démontrer le changement technologique pressenti. Enfin, lorsqu'elle où elle pourra être attestée, il faudra s'interroger sur les raisons qui ont favorisé la modification des procédés de fabrications propres à ce faux-monnayage.

A. Différents faux-monnayages

Après avoir relevé pour chaque échantillon, les paramètres métrologiques que sont leur masse, épaisseur, diamètre et longueur des côtés, lorsqu'il ne s'agit pas d'ébauches rondes, le traitement de ces données est particulièrement révélateur[1035].

[1035] Les données métrologiques sont présentées en Annexe P. Pour les échantillons qui ne sont pas circulaires, il est nécessaire de relever un couple de valeurs : la longueur et la largueur correspondant respectivement au côté le plus long et au côté le plus court.

Afin de mettre en parallèle ces données avec la chaîne opératoire de fabrication, les objets considérés ont également été classés suivant deux catégories : les carreaux, relativement polyédriques et les flans déterminés par des profils circulaires.

Deux paramètres métrologiques mettent en évidence des hétérogénéités au sein du *corpus*. Il s'agit d'une part, du diamètre des flans et de la longueur des carreaux, et de leur masse d'autre part. Cependant, les représentations associées à chacune de ces données sont similaires puisqu'elles sont reliées par le volume de matière des ébauches. Cette discussion peut dans ce cas se limiter à la prise en compte des seules caractéristiques dimensionnelles. Le choix de ne pas considérer ici la masse des échantillons est justifié. S'il faut proposer le classement des paramètres définissant une monnaie authentique selon la facilité pour l'usager de les contrôler, c'est la morphologie des pièces qui est la première à prendre en compte. La pesée qui demande le recours à une balance, n'intervient que dans un second temps. Quant au titre en métal précieux, il doit être considéré comme inaccessible à la très grande majorité des utilisateurs, légitimant d'ailleurs l'office des essayeurs.

La figure ci-dessous représente l'histogramme des répartitions des dimensions relevées sur les flans et carreaux du *corpus*. Il résume finalement à lui seul deux des observations effectuées dans l'introduction de cette discussion.

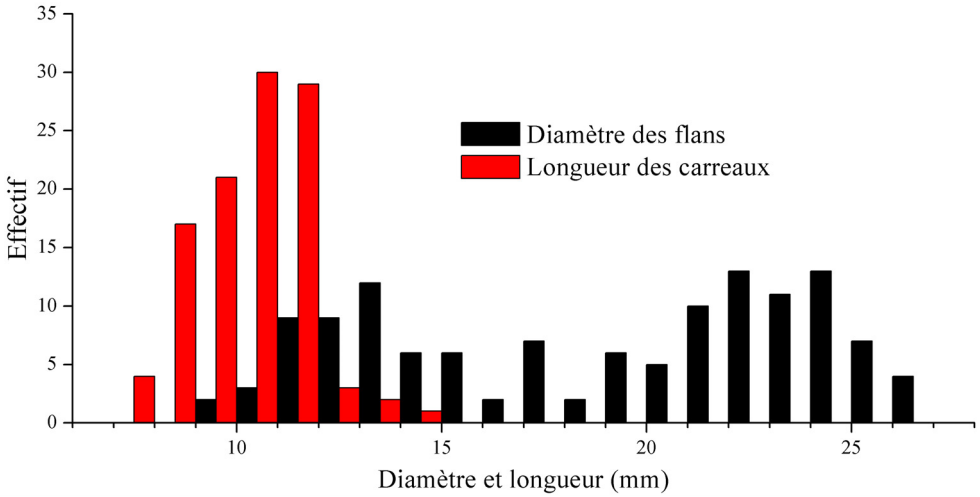


Figure 239 - Répartition des diamètres des flans et des longueurs des carreaux de La Catette.

En considérant dans un premier temps le diamètre des flans, il est possible de définir deux familles distinctes. La première rassemble les plus grands modules centrés entre 21 et 25 mm. La seconde est décalée vers les mensurations moins

importantes puisqu'elle s'établit principalement entre 11 et 15 mm. En outre, un troisième ensemble vient s'intercaler entre les précédents, avec des diamètres de 16 à 19 mm. Il était difficilement identifiable lors des observations préliminaires car il ne compte que dix individus seulement dans une population totale de 126 ébauches circulaires.

En définitive, les flans du *corpus* se classent selon trois groupes morphologiques qu'il faut considérer séparément. Leurs caractéristiques sont présentées dans le tableau ci-dessous.

	Groupe A	Groupe B	Groupe C
Intervalle	9 à 16 mm	16 à 19 mm	19 à 27 mm
Nombre de flans	47	10	69
Diamètre moyen	13 mm	17,6 mm	23 mm
Ecart-type	1,6	0,7	2
Type contrefait	?	Double tournois	Douzain ou réal

Tableau 12 - Groupes morphologiques des flans de La Catette.

La distinction des différents ensembles permet notamment de calculer les diamètres moyens associés et de les relier aux types monétaires contrefaits.

Le groupe B bien que relativement limité, est en revanche très précisément défini (Figure 240) puisqu'il présente le plus faible des écarts-types calculés. Une telle constatation doit être reliée au stade avancé de ces ébauches exposant *a priori* leurs mensurations finales. Le diamètre moyen évalué correspond en outre à celui du double tournois à la croisette contrefait dont un fragment a été retrouvé dans la cavité[1036].

Les écarts-types des deux autres ensembles sont en revanche un peu plus importants. Ils doivent être rapprochés d'une mise en forme incomplète de certains flans. Cette hypothèse est justifiée par la figure 240 qui met en évidence la diminution de l'épaisseur des ébauches, conjuguée avec une augmentation de leurs diamètres. Pour le groupe C, cette tendance est confirmée par la plus faible épaisseur et le plus grand diamètre des flans argentés se situant à un stade de préparation très avancé (Figure 240 : Flans argentés à l'amalgame).

[1036] Le double tournois présenté dans le catalogue de J. Duplessy mesure 17 mm de diamètre. Duplessy J., *Les monnaies françaises..., op. cit.*, t. 2, p. 60.

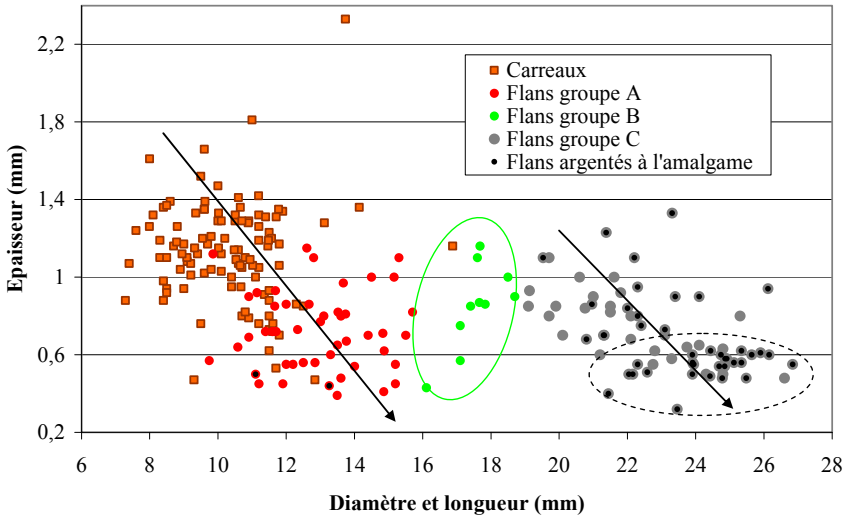


Figure 240 - Evolution des mensurations suivant les mises en forme.

Cette famille est finalement à mettre en relation avec les contrefaçons de douzains et de réaux découvertes dans la cavité dont les modules se situent dans un intervalle de 21,2 à 26,3 mm. Cette variation est précisément semblable à celle observée pour les ébauches du groupe C (Tableau 12).

Les flans de l'ensemble A illustrent également différents stades de leur chaîne opératoire de fabrication. D'autant qu'ils sont à mettre en relation avec le *corpus* des carreaux (Figure 239). Ces derniers présentent des longueurs de côté légèrement décalées vers les petites dimensions par rapport aux diamètres des flans du groupe A qui sont en revanche plus fins (Figure 240). Pour ce monnayage particulier, le processus d'élaboration apparaît moins avancé que pour les autres fabrications. D'ailleurs, aucune des fausses monnaies retrouvées ne peut être associée à ces petits flans, même s'il est toutefois possible de supposer qu'ils étaient destinés à contrefaire un monnayage de bas billon de faible valeur.

La répartition des longueurs mesurées sur les carreaux est particulièrement caractéristique de leur procédé de mise en forme. Les dimensions relevées sont particulièrement standardisées, 90 % d'entre elles se situent dans un intervalle compris entre 8 et 12 mm (Figure 239). Comparée aux distributions des flans qui font état de mensurations décroissantes autour de valeurs moyennes, celle des carreaux est beaucoup plus regroupée. Cette configuration est justifiée par les procédés de préparations respectives des ces ébauches. L'uniformité des carreaux résulte de leur découpe dans une plaque de métal alors que la plus grande fluctuation du diamètre des flans dépend des martelages plus ou moins importants qu'ils subissent durant leur préparation.

En définitive, l'étude métrologique des ébauches du *corpus* révèle les différentes morphologies de flans associées à l'activité de faux-monnayage qui a pris place au sein de la grotte. Deux populations sont particulièrement bien représentées. La première correspond à la contrefaçon d'un monnayage de faible valeur, certainement de bas billon alors que la seconde caractérise une contrefaçon de douzains et de réaux qui nécessite la mise en œuvre d'un procédé d'argenture pour imiter l'aspect du billon des monnaies copiées.

Ces deux productions rendent compte également d'avancements différents dans leurs chaînes opératoires respectives. Parmi la collection de carreaux, aucun ne peut être associé à la mise en forme des espèces de la famille C. Ils correspondent tous à un stade de transformation préliminaire de la contrefaçon de petites pièces dont les flans définissent le groupe A.

Ces constatations ainsi que le classement proposé, permettent à présent de discuter des techniques de fabrication propres à cette activité illégale. D'autant qu'il faut rappeler qu'elles ont été adaptées selon les types monétaires copiés.

B. Deux chaînes opératoires de faux-monnayage

Parmi les deux principales productions différentes relevées dans le *corpus* rassemblé, seuls les flans associés à la fabrication de fausses monnaies de billon doivent subir une opération d'argenture. La chaîne opératoire associée définit donc en ce sens un particularisme. Cependant, la prise en compte des morphologies en relation avec ces deux contrefaçons, les flans du groupe C d'une part et, les carreaux et flans du groupe A d'autre part, témoigne finalement de procédés radicalement différents. L'adaptation des méthodes d'élaboration à ces monnayages n'est pas seulement caractérisée par l'opération d'argenture finale.

1 - La production de fausses monnaies de bas billon

La discussion technique est ici réservée à la présentation de la chaîne opératoire de fabrication associée aux carreaux ainsi qu'aux flans du groupe A. La fouille de la grotte de La Catette n'a malheureusement pas livré de fausses monnaies frappées résultant de cette production. Cependant, le profil général de ces petites ébauches impose de les associer à un faux-monnayage de bas billon.

D'un point de vue morphologique, ce *corpus* particulier met en évidence des caractéristiques fortes en relation avec les méthodes de mise en forme. En prenant comme référence l'exemple du faux-monnayage de la grotte de Lauradieu[1037], la

[1037] cf. Un faux-monnayage d'opportunité : La grotte de Lauradieu, p. 512.

technique retenue ici est très différente. Les flans ne sont pas produits par une simple découpe circulaire des carreaux. C'est en définitive avec la chaîne opératoire de monnayage au marteau en vigueur dans les ateliers monétaires que les carreaux de La Catette présentent le plus de points communs.

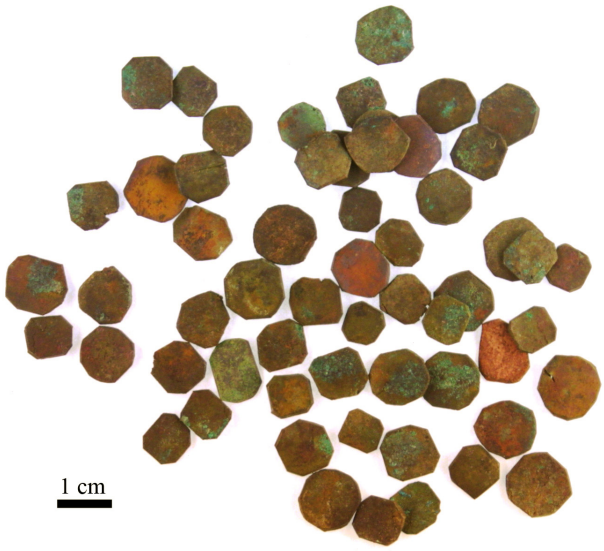


Figure 241 - Exemple de morphologies associées au faux-monnayage de bas billon de La Catette.

La figure ci-dessus illustre les différentes formes propres à ce *corpus*, définissant une évolution des profils carrés vers d'autres plus arrondis. L'ensemble des carreaux est particulièrement intéressant. La grande majorité d'entre eux sont à un stade très précoce de mise en forme. Ils présentent encore des bords de coupe droits témoignant qu'ils n'ont pas subi de martelages ultérieurs. Toutefois, de par sa forme carrée[1038], un seul de ces fragments de métal se place effectivement juste après l'étape de découpe des lames. Les autres en revanche pourraient être considérés comme ayant été ajustés puisque leurs coins ont été cisaillés. La finalité de cette opération n'est pas double comme c'est le cas dans le monnayage officiel. La découpe des coins des carreaux intervient principalement pour ébaucher une forme arrondie. Elle n'a pas pour but de garantir l'uniformité de la masse des faux. Il suffit pour s'en rendre compte de considérer que les masses de ces objets se placent globalement dans un intervalle de 0,3 à 1,2 g. Certaines ébauches sont près de trois fois plus lourdes que les plus légères.

En se référant à la chaîne opératoire officielle, le *corpus* de La Catette marque toutefois une première différence. Bien qu'ayant été ajustés, les carreaux ne

[1038] Référence CA 285.

présentent pas les formes résultant d'une frappe préliminaire. Ils n'ont pas subi une telle opération. Cette constatation est particulièrement intéressante puisqu'elle va permettre de proposer une évaluation de la production de déchets de coupe associée à cette fabrication précise. De même, il est possible de reconstituer les formes initiales des ébauches utilisées dans ce faux-monnayage. Le principe de cette démarche est illustré par la figure ci-dessous.

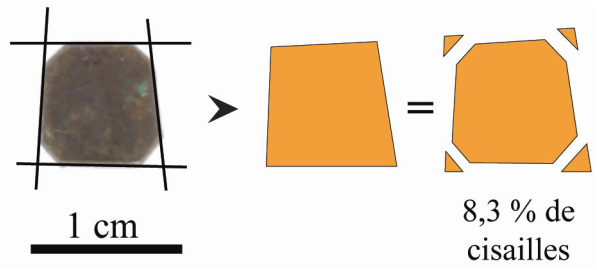


Figure 242 - Reconstitution de la morphologie initiale des carreaux de ce monnayage et estimation de la quantité de déchets associée (CA 73).

Comme les fragments de métal résultant de la découpe des lames n'ont pas été frappés avant d'être ajustés, il suffit de prolonger les axes définis par les côtés les plus longs pour retrouver leur morphologie avant découpe. Quant à la quantité de déchets de coupe associée, elle se calcule à partir de la différence de surface du carreau avant et après son ajustage, si l'on considère parallèlement que ces ébauches présentent des épaisseurs uniformes.

Cette reconstitution effectuée à partir de l'échantillon CA 73 (Figure 242) a pu être mise en œuvre pour 57 autres carreaux découverts au sein de la grotte dont l'état de déformation autorise une telle approche[1039].

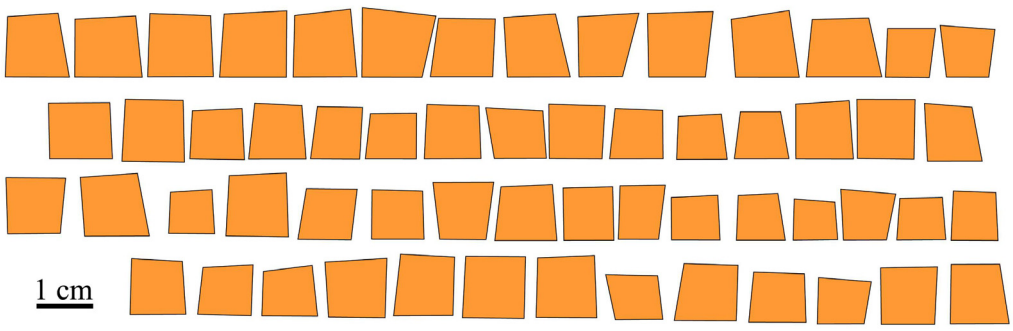


Figure 243 - Reconstitutions de la morphologie avant ajustage de 58 carreaux du *corpus* de La Catette.

[1039] Les échantillons correspondants sont présentés en Annexe W.

L'ensemble des profils obtenus sont représentés sur la figure ci-dessus. Ils témoignent d'une certaine particularité. Les formes mises en évidence ne correspondent pas à des carrés, propres à la forme habituelle des carreaux. Il s'agit de trapèzes puisque globalement seuls deux des bords de coupe opposés définissent des axes parallèles. Une telle configuration se justifie par la séquence de découpe de ces fragments de métal (Figure 244). Des lames sont préalablement cisaillées dans une plaque de cuivre. Il est important dans cette opération préliminaire de veiller à effectuer des coupes relativement parallèles. Si tel n'est pas le cas et suivant la longueur des lames, la largeur de ces dernières peut varier rapidement. Dans ce cas, elle entraîne une production importante de fragments métalliques par la suite inutilisables car trop ou pas assez larges. Ce n'est que dans un second temps que les bandes de métal sont fractionnées en carreaux. Le faussaire en revanche n'a pas jugé nécessaire de rechercher des formes particulièrement régulières dans cette dernière opération.

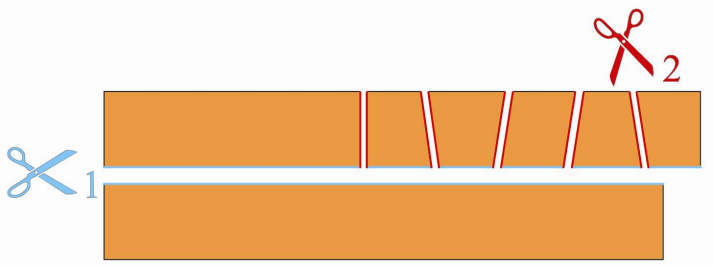


Figure 244 - Séquence de découpe des carreaux.

L'irrégularité des formes obtenues (Figure 243) est corrigée par la suite lors de la découpe des coins en définissant des profils octogonaux, plus arrondis. Ce choix n'est pas particulièrement pénalisant d'un point de vue de la quantité des déchets de coupes. Même si bien entendu, le faussaire n'était pas soumis aux mêmes contraintes réglementaires que les ouvriers monnayeurs concernant son volume de chutes métalliques. Les fouilles ont tout de même montré que cette question n'a pas été négligée dans cette activité de faux-monnayage puisque la faible représentation des résidus de coupe dans le *corpus* global atteste de leur récupération systématique. Dans ce cas, l'étude des carreaux ayant leurs coins découpés est particulièrement intéressante car elle permet d'estimer le taux de déchets produits sans disposer des fragments recyclés par le faux-monnayeur (Figure 245).

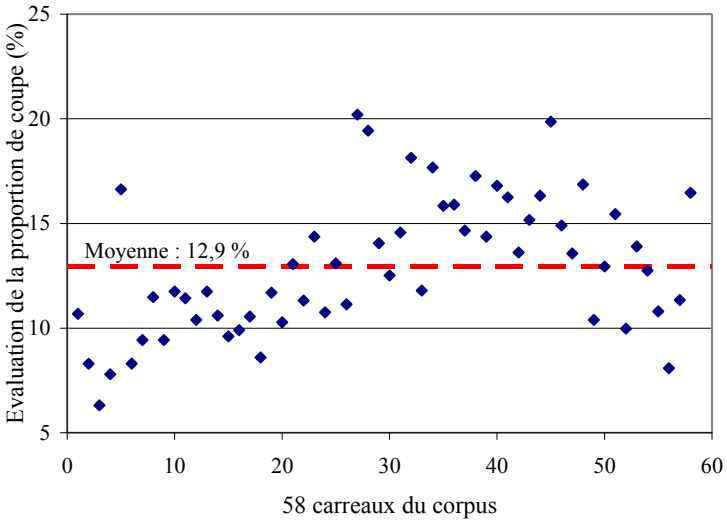


Figure 245 - Evaluation des proportions de coupe à partir de 58 carreaux ajustés du corpus de La Catette[1040].

Cette chaîne opératoire est relativement économe en chutes de découpe puisqu'elle produit en moyenne 12,9 % de chutes métalliques. Cependant, il faut également constater que la dispersion autour de cette valeur est assez importante comme en témoigne l'écart-type de 3,2 % ainsi que l'intervalle global de variation qui s'étend entre un minimum de 6,3 % et un maximum de 20,2 %. Ces données archéologiques caractérisent ce faux-monnayage. C'est pourquoi, elles ont pu être considérées dans une démarche expérimentale visant à définir la chaîne opératoire associée.

La reconstitution mise en œuvre pour comprendre le procédé de fabrication des petits flans découverts au sein de la grotte de La Catette a pu être validée sur deux plans. Le premier concerne la morphologie des ébauches obtenues, conforté dans un second temps par la quantité de déchets produits.

Le processus de mise en forme expérimenté a été proposé à partir de l'étude des nombreuses ébauches en cours de transformation découvertes dans la grotte. La figure ci-dessous illustre précisément l'évolution des profils entre les carreaux et les flans prêts à être frappés.

[1040] Les données et les échantillons correspondants sont présentés en Annexe W.

Figure 246 - Evolution morphologique au sein du *corpus* de carreaux et de flans du groupe A[1041].

La prise en compte de la tendance générale préalablement évoquée qui veut que l'épaisseur des carreaux et flans du groupe A tende à diminuer à mesure que leur diamètre augmente (Figure 240), a également constitué une donnée importante dans la compréhension des déformations intervenant dans cette chaîne opératoire.

Le protocole retenu a consisté à mettre en forme deux séries de douze carreaux de 5 et 6 mm de côté, découpés à la cisaille dans une plaque de cuivre pur d'1 mm d'épaisseur[1042]. Après avoir été pesés individuellement, leurs coins ont été cisaillés sans particulièrement chercher à couper selon la tangente du cercle inscrit. Les octogones obtenus ne sont pas réguliers et contrairement à ce qu'il faudrait mettre en œuvre dans le cadre d'un monnayage officiel, il n'y a pas de contrôle de la masse durant cet ajustage. Après avoir été découpées, les ébauches sont une nouvelle fois pesées dans le seul but d'évaluer la quantité de déchets associée à cette fabrication. Elles sont ensuite mises en forme par un simple martelage à plat sur l'enclume. La diminution de l'épaisseur engendrée tend à augmenter le diamètre global des flans qui approchent petit à petit leur forme arrondie finale. Cependant, si au cours de ces déformations, la géométrie du flan dérive vers un profil ovale, il est possible de corriger cette évolution en élargissant la partie la moins large. Il faut pour cela chercher à déformer le flan en le pinçant sur l'enclume avec une des arêtes du marteau, orientée selon le rayon le plus long de l'ovale. Les échantillons obtenus présentent tous une forme globalement arrondie avec un diamètre de 10 mm et des épaisseurs comprises entre 0,3 et 0,4 mm. Il faut noter que plus la forme initiale du carreau est proche du carré, plus il est facile d'obtenir une forme circulaire sans martelage complexe.

La recherche de l'arrondi parfait n'est pas nécessaire compte tenu du type de monnayage contrefait (Figure 246) puisque ce critère n'est par ailleurs pas respecté par les ateliers officiels[1043].

[1041] Références CA : 285, 68, 78, 103, 120 et 133.
[1042] Expérimentation n° 07-01 à 48.
[1043] Cette question de la qualité des monnayages officiels de faible valeur à déjà été évoquée et illustrée précédemment.
cf. *supra*, p. 454.

Finalement, la technique de mise en forme associée à ce monnayage se résume principalement à un martelage des carreaux préalablement transformés en octogones. C'est notamment ce que confirme, la prise en compte des déchets résultant de ces essais[1044].

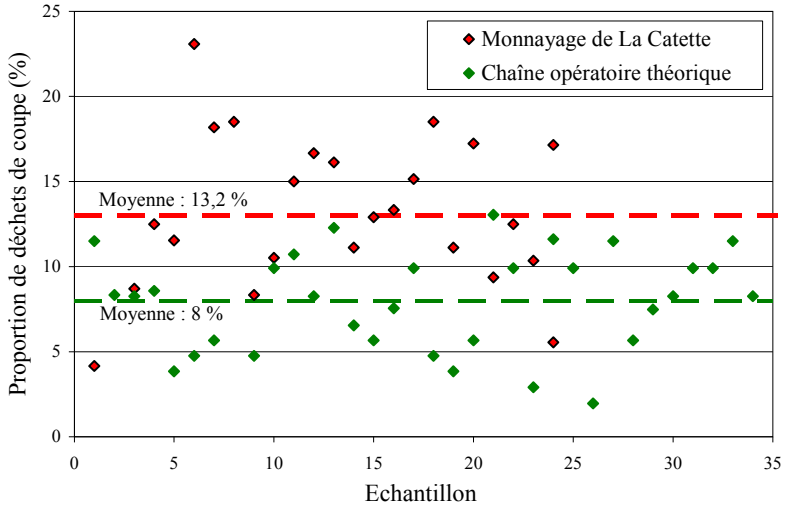


Figure 247 - Proportion expérimentale de déchets de coupe associée à la chaîne opératoire de La Catette (n° 07-01 à 24). Comparaison avec la reconstitution du monnayage officiel (n° 08-20 à 52).

Les quantités de découpes obtenues lors de cette reconstitution mettent en évidence une distribution très similaire à celles qui ont été préalablement évaluées à partir du *corpus* archéologique. D'un point de vue global, la moyenne de 13,2 % de résidus produits est très proche de celle déterminée à partir des carreaux de La Catette qui se situe à 12,9 % (Figure 245). Le domaine de variation est toutefois légèrement plus étendu à la fois vers des valeurs plus faibles et plus élevées puisqu'il s'étend entre 4,2 et 23,1 %, définissant un écart-type de 4,5 %.

A titre de comparaison, les données obtenues lors de la reconstitution de la chaîne opératoire réglementaire ont été reportées sur la même figure[1045]. La répartition de ces quantités de déchets marque une grande différence avec celle qui vient d'être présentée et, par conséquent, avec celle produite par le faux-monnayeur. Le taux moyen de résidus de coupe est beaucoup moins élevé dans la fabrication officielle puisqu'il se situe atour de 8 %, d'après les expériences réalisées dans le cadre de cette étude. Compte tenu des analogies entre ces deux procédés, notamment concernant la découpe des carreaux et leur ajustage, il faut

[1044] Les données recueillies sont présentées en Annexe R.
[1045] Les résultats de cette expérience n° 08-20 à 52 ont été discutés dans la partie de cette étude qui traite de la chaîne opératoire officielle.
cf. *supra*, p. 422.
Les données expérimentales sont par ailleurs présentées en Annexe R.

s'interroger sur l'origine de l'écart constaté. Celui-ci rappelle en définitive l'intérêt d'une étape que le faussaire n'a pas mise en œuvre. Le profil très angulaire de ses carreaux rectifiés (Figure 246) indique qu'après avoir été découpées dans les lames, ces ébauches n'ont pas subi de martelage, comme c'est le cas dans le monnayage officiel[1046]. Or, cette opération que H. Poullain considère comme indispensable à la réussite d'une fabrication de monnaie, donne un premier arrondi aux futures pièces[1047]. Dans ce cas, l'ajustage améliore cette forme préliminaire sans éliminer beaucoup de métal. Comme notre faux-monnayeur n'a pas préparé ses carreaux avant de couper leurs coins, il a du cisailler plus de matière pour obtenir une morphologie lui permettant d'obtenir des flans suffisamment ronds à la fin de sa mise en forme.

C'est finalement au niveau d'une des dernières étapes de fabrication que la chaîne opératoire du faussaire rejoint de nouveau celle en vigueur dans les fabriques du Roi. Plusieurs flans du *corpus* ont été boués puisqu'ils en présentent les défauts caractéristiques (Figure 248)[1048]. Comme devaient le faire les ouvriers monétaires, le métallurgiste audois a frappé ses ébauches après les avoir disposées en pile.

Figure 248 - Flans du groupe A présentant des défauts après avoir été boués[1049].

Cette opération, qui dans le monnayage officiel permet d'obtenir des pièces qui se touchent d'assiette tout en facilitant leur frappe, est certainement intentionnellement mise en œuvre ici pour ce second avantage principalement. La nécessité de rendre les monnaies coulantes est un détail que ne prennent en compte *a priori* que les personnes particulièrement averties des questions monétaires.

[1046] cf. *supra*, p. 88.
[1047] Poullain H., Relation de Me Henry Poullain..., *op. cit.*, p. 329.
[1048] La formation de ces défauts a été explicitée précédemment.
cf. *supra*, p. 448.
[1049] Référence CA : 52, 40.

Cette discussion basée principalement sur des données morphologiques et expérimentales, doit être complétée par une approche métallographique pour aborder la question des recuits. De tels traitements sont indispensables dans le cadre de cette fabrication puisqu'elle est basée sur des déformations mécaniques d'objets métalliques. C'est pourquoi, un carreau et deux flans ont été échantillonnés et préparés selon le protocole développé en Annexe F[1050].

Dans un premier temps, il apparaît que seul l'un des deux flans présente des macles mécaniques sur l'ensemble de sa coupe[1051]. Les deux autres ébauches[1052] ne trahissent pas, en revanche, l'existence de tels défauts et ce, même au niveau des bords de coupe du carreau. Ils ont donc été éliminés par des recuits durant la chaîne opératoire, comme en témoignent par ailleurs les nombreuses mâcles thermiques qui caractérisent leurs sections métallographiques. De plus, les différentes tailles de grains relevées indiquent la recristallisation partielle des matériaux, intervenue lors de ces traitements thermiques. Compte tenu de ces observations et des déformations restreintes associées à cette mise en forme, les recuits nécessaires sont peu nombreux. Il est finalement possible de supposer qu'ils interviennent après l'ajustage des carreaux ainsi qu'à la fin de la préparation des flans. Cette dernière opération facilite la frappe des monnaies et prévient l'apparition de fissures lors de cette ultime contrainte mécanique.

Dans la mesure où ce faux-monnayage vise à imiter des espèces de bas billon, il ne nécessite pas la mise en œuvre d'un procédé d'argenture visant à dissimuler sa composition réelle. La très faible proportion d'argent que contiennent ces alliages monétaires particuliers ne permet pas l'obtention d'un enrichissement superficiel en argent au cours de la fabrication des monnaies authentiques[1053]. C'est pourquoi, ces dernières présentent une couleur assimilable à celle du cuivre. Une fois boués, le faussaire doit pouvoir frapper ses faux sans autre mise en forme.

Finalement, cette première chaîne opératoire de contrefaçon monétaire a montré de nombreuses analogies avec les pratiques du monnayage officiel puisque les carreaux sont découpés dans des lames avant d'être en quelque sorte ajustés et même flatis. De même, les flans se trouvent boués avant d'être frappés. Ce faux-

[1050] Cette étude métallographique a été réalisée par M.-C. Vivier dans le cadre de son stage de master 2-Pro.
Elle est présentée en Annexe X.
[1051] Référence CA 43.
[1052] Références CA : 114 (carreau) et 54 (flan).
[1053] cf. *supra*, p. 490.

monnayage de bas billon est d'ailleurs plus proche d'une production réglementaire que le monnayage de monnaies noires mis en évidence au sein de l'atelier royal de La Rochelle[1054]. Dans cette fabrication pourtant sous le contrôle de l'autorité émettrice, les ébauches n'ont par exemple pas été ajustées.

2 - La production de fausses monnaies de billon

Après avoir rendu compte d'une première chaîne opératoire particulière associée à l'un des ensembles morphologiques définis lors de l'étude métrologique, qu'en est-il de celle dont résultent les flans du groupe C ? Bien que ces derniers soient globalement à un stade plus avancé de production puisqu'aucun carreau n'a pu être associé à cette fabrication, certains échantillons présentent des caractéristiques héritées des différentes étapes de mise en forme.

C'est notamment en considérant quelques-uns des déchets de coupe qui n'ont pas été récupérés par le faussaire, qu'il est possible de révéler l'une des principales différences entre cette élaboration et celle qui vient d'être évoquée. Alors que cette dernière se rapproche des techniques officielles, les chutes métalliques résultant de la préparation des flans du groupe C, les relient davantage aux procédés du faux-monnayage. Ils exposent des morphologies assimilables à celles précédemment observées dans le *corpus* de la grotte de Lauradieu[1055]. Il s'agit notamment de résidus témoignant de découpes circulaires (Figure 249).

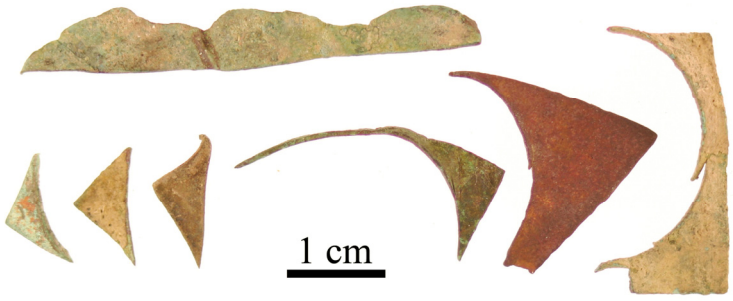


Figure 249 - Déchets de coupe résultant de la préparation des flans du groupe C[1056].

Cependant, bien que relativement simple, cette fabrication de fausses monnaies ne se limite pas à une frappe de flans préalablement découpés dans des carreaux de cuivre. Elle témoigne de certaines différences avec celle de Lauradieu.

[1054] cf. *supra*, p. 454.
[1055] cf. *supra*, p. 533.
[1056] Références CA : 171, 232, 364, 158, 147, 216, 157 (bord de lame).

Sur la question des matières premières, malgré l'absence de carreaux associés à cette production, l'observation des déchets de coupe résultant des étapes initiales de mise en forme doit permettre de pallier à ce manque d'information. C'est notamment l'épaisseur de ces résidus métalliques qui est particulièrement caractéristique. Leur répartition peut être confrontée à celle des mensurations relevées sur les flans du groupe C (Figure 250).

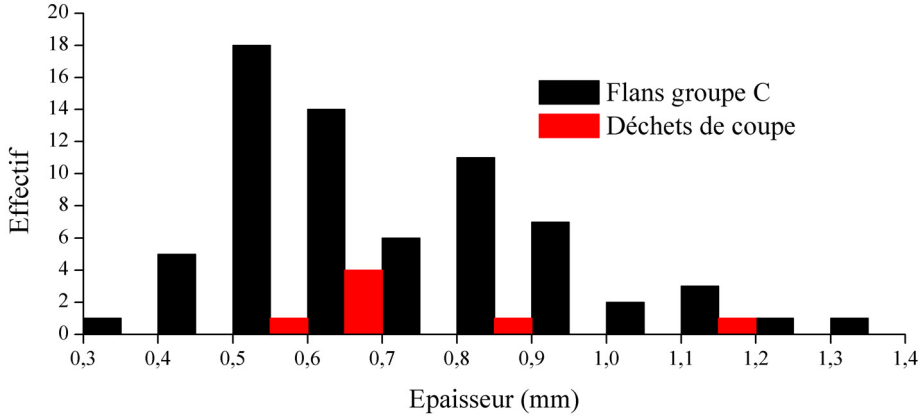


Figure 250 - Répartition des épaisseurs des flans du groupe C confrontée à celle associée à des déchets de coupe[1057].

Le nombre restreint des résidus retrouvés demande d'être prudent. Toutefois, leur lien avec les flans beaucoup plus nombreux permet de définir une tendance globale : les épaisseurs de cet ensemble sont majoritairement inférieures à 1 mm. Celles mesurées sur les carreaux associés au groupe A, appartiennent à un intervalle situé entre 1 à 1,4 mm[1058]. Il apparaît que le faussaire a découpé les carreaux de son faux-monnayage de billon dans des lames qu'il a amincies de manière plus importante. Le bord de plaque de la figure 249 témoigne de ce travail du métal.

Après avoir rectifié sa matière première pour approcher l'épaisseur des monnaies qu'il cherchait à contrefaire, le faux-monnayeur a dans un premier temps découpé ses carreaux dans lesquels il a ensuite cisaillé ses flans. L'observation des chutes qui ont été retrouvées indique que la méthode retenue est similaire à celle de la grotte de Lauradieu. Il s'agit d'une découpe arrondie. Cependant, certains fragments métalliques appartenant au *corpus* ont une morphologie caractéristique.

[1057] Les déchets de coupe considérés sont ceux présentés sur la figure 249. La majorité des résidus de coupe découverts dans la cavité sont associés à une opération ultérieure de la fabrication et n'ont pas lieu d'être comptés dans cette répartition.
[1058] cf. figure 238.

Ils doivent être rapprochés de cette étape préliminaire de la chaîne opératoire et témoignent d'une technique parallèle de mise en forme. Dans un premier temps, ces chutes de métal particulières avaient été assimilées au résultat d'une rectification des plaques dans lesquelles avaient été découpés les carreaux, afin d'avoir des côtés parfaitement rectilignes. Il s'agit en effet, de très fines et longues rognures présentant un côté coupé droit et plusieurs bords de coupe arrondis sur le côté opposé (Figure 251).

Figure 251 - Type particulier de rognure découverte au sein de La Catette (CA 159).

C'est finalement par une approche expérimentale qu'il a été possible de comprendre l'origine de tels déchets. Il s'avère que ces chutes sont à mettre en relation avec l'étape de préparation des flans. Elles résultent de la mise en forme illustrée ci-dessous.

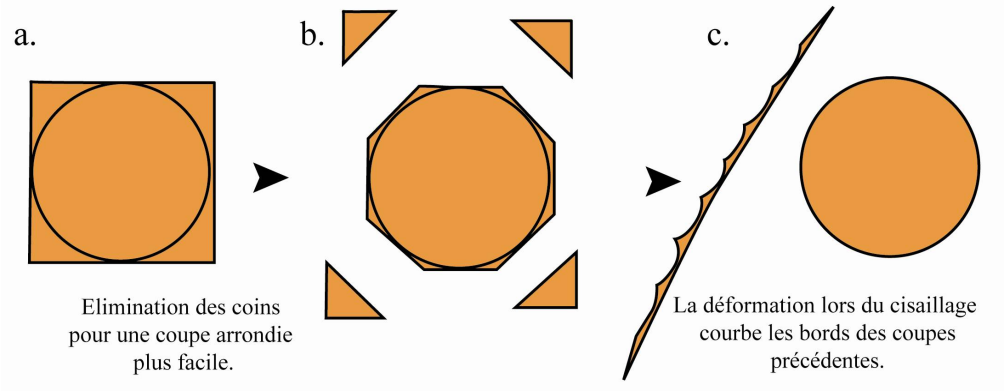


Figure 252 - Séquence de découpe arrondie d'un flan dans un carreau.

Il s'agit d'une coupe arrondie qui succède à l'élimination préalable des coins du carreau. L'ablation préliminaire des extrémités diminue la rigidité du fragment de métal qui doit être découpé dans un second temps. Il en résulte une augmentation de la précision de l'opération. Il est dans ce cas plus facile d'obtenir des formes rondes. D'autant que la régularité des profils est également améliorée car il dérive de la morphologie déjà globalement circulaire de l'ébauche transitoire octogonale (Figure 252 b). C'est notamment ce dont ont rendu compte les essais

expérimentaux des différents types de préparation des flans (Figure 253). L'obtention de cercles parfaits est relativement difficile suite à une seule découpe continue.

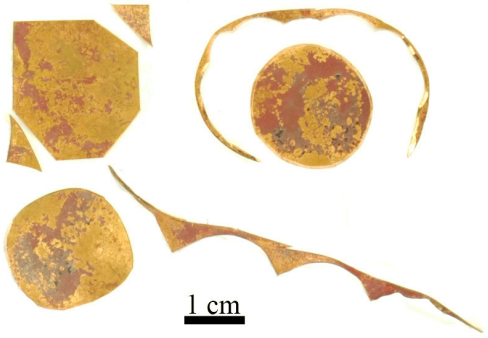


Figure 253 - Essais expérimentaux de découpe arrondie de flans (n° 07-B).

En définitive, la technique alternative qui vient d'être mise en évidence peut correspondre à une évolution du processus de coupe puisqu'elle traduit une amélioration. D'ailleurs, la somme importante de rognures retrouvées lors des fouilles, témoigne que la rondeur imparfaite des flans est un des problèmes auxquels le faussaire a dû faire face.

Une fois découpées, il n'est *a priori* pas nécessaire de marteler les ébauches puisque la méthode retenue permet normalement de produire les morphologies définitives. Cependant, l'étude métrologique du *corpus* remet en cause cette hypothèse. Il a été précédemment constaté que les flans du groupe C voient globalement une augmentation de leur diamètre, compensée par la diminution de leur épaisseur (Figure 240). Ces ébauches ont donc été frappées à plat sur une enclume. Toutefois, la finalité de cette opération ne peut être similaire à ce qui a été vu pour les échantillons du groupe A. Dans la mesure où elle est ici logiquement facultative, elle doit être rapprochée d'une démarche exceptionnelle. Elle est certainement limitée aux flans jugés trop petits, voire pas assez ronds. Le martelage intervient dans ce cas pour corriger des défauts morphologiques.

Une partie des flans ont d'ailleurs des diamètres différents alors qu'ils ont des épaisseurs similaires (Figure 240 : flans du groupe C dont l'épaisseur se situe entre 0,4 et 0,6 mm). Les écarts constatés résultent de variations de découpe.

Une fois découpés et rectifiés, les flans étaient boués, comme l'attestent les défauts que présentent certaines des ébauches mises au jour (Figure 254). Cette étape est en définitive la seule qui est commune aux deux chaînes opératoires de fabrication du faux-monnayage de la grotte de La Catette.

Figure 254 - Flans du groupe C présentant des défauts après avoir été boués[1059].

Bien que cette opération suppose un martelage des ébauches, elle ne justifie cependant pas les écarts de diamètre et d'épaisseur précédemment évoqués. La seule finalité de ce procédé est de redresser les pièces avant leur frappe. Les déformations qui en résultent sont relativement limitées.

Contrairement aux petits flans, ceux du groupe C utilisés dans une contrefaçon de monnaies de billon devaient être argentés. Nombre d'entre eux font état d'un tel traitement. Leur caractérisation a d'ailleurs révélé le procédé employé. Le faussaire a utilisé la technique de l'argenture à l'amalgame mercure-argent. C'est notamment celle qui a également été observée dans la production de Lauradieu[1060].

Le choix de cette méthode témoigne des qualifications de celui qui l'a mise en œuvre[1061]. L'étude des échantillons du *corpus* apporte toutefois peu d'informations sur le développement exact du procédé retenu. Il est en revanche possible d'attester une chronologie des opérations. La découverte de flans argentés n'ayant pas été frappés prouve, dans un premier temps, que la procédure d'argenture n'est pas la dernière étape de fabrication.

Après avoir été préparées les ébauches ont certainement été traitées afin de pouvoir les recouvrir d'amalgame[1062]. Après que ce mélange ait été appliqué sur les échantillons, ces derniers devaient être chauffés pour éliminer une grande part du mercure de la couche déposée à la surface. Ce n'est qu'une fois brunie que

[1059] Référence CA : 4, 7.
[1060] cf. *supra*, p. 521.
[1061] cf. Annexe V.
[1062] Les essais expérimentaux ont montré la difficulté d'appliquer une pellicule d'amalgame sur une surface métallique non apprêtée.
cf. cf. Annexe V.

celle-ci présente un aspect argenté. Dans le cadre de ce faux-monnayage, cette ultime opération intervenait avant la frappe. S'il était envisageable d'avoir des doutes concernant l'aspect brillant des flans du *corpus* ayant été découverts par le prospecteur amateur[1063], la découverte d'échantillons identiques lors de nos fouilles a éliminé cette incertitude.

Ce n'est finalement qu'une fois argentées et brunies, que le faussaire frappait ses ébauches pour obtenir ses fausses monnaies, en l'occurrence des faux douzains à la croisette et aux croissants ainsi que des faux réaux.

Avant de conclure, il est nécessaire de prendre en compte l'observation de certains échantillons du *corpus*. Ils ont déjà été évoqués dans la discussion sur les matières premières de ce faux-monnayage. Il s'agit de résidus de coupe dont la caractérisation a révélé qu'ils résultaient du rognage de flans et de fausses monnaies argentés. La finalité d'une telle opération est de rectifier la rondeur des pièces. Cependant, sa mise en œuvre à un stade aussi avancé de la chaîne opératoire est difficilement compréhensible. Ce type de coupe dégrade la couche d'argenture en révélant l'âme frauduleuse des fausses monnaies. Il est dans ce cas obligatoire de rectifier ce défaut par une nouvelle opération d'argenture. Or, celle-ci pourrait être évitée si ces rectifications étaient réalisées au préalable, lors de la découpe des flans par exemple.

L'hypothèse la plus probable justifiant une telle démarche pourrait être une ultime correction du faussaire jugeant tout compte fait sa production imparfaite.

L'étude des flans du groupe C a donc permis de proposer une seconde chaîne opératoire associée à une contrefaçon de monnaies de billon, totalement différente de celle développée en relation avec le faux-monnayage de bas billon. Quels sont dans ce cas les paramètres qui ont imposé ou favorisé la mise en œuvre parallèle de procédés de fabrication distincts ?

3 - Une adaptation avantageuse

Dans une discussion préliminaire, il est nécessaire de revenir sur l'un des ensembles morphologiques défini lors de l'étude métrologique mais dont la chaîne opératoire de fabrication n'a pas encore été évoquée. Il s'agit du groupe B. La raison pour laquelle cette famille n'a pas fait l'objet d'une discussion particulière, se comprend par le faible nombre d'échantillons disponibles se plaçant tous, par ailleurs à un stade ultime de mise en forme (Figure 240).

[1063] Celui-ci aurait pu indirectement brunir les flans en cherchant à éliminer les produits de corrosion superficiels.

C’est en confrontant les morphologies de ces ébauches avec celles des flans du groupe A qu’il est possible de supposer leur élaboration selon la même chaîne opératoire. Les flans présentent des bords anguleux arrondis à la suite d’un martelage à plat sur l’enclume et ont également été boués (Figure 255).

Figure 255 - Flans du groupe B[1064].

Il faut rappeler que ces échantillons ont été associés à une fabrication de faux doubles tournois à la croisette, c'est-à-dire un monnayage de bas billon. Dans ce cas, il n’est pas illogique que leur production soit identique à celle qui caractérise un ensemble imitant le même type d’alliage.

Les différentes chaînes opératoires précédemment relevées ne sont pas liées à une adaptation chronologique ayant entraîné la disparition d’une technique au profit d’une seconde plus efficace. Plusieurs observations confortent cette affirmation. En premier lieu, si une telle transition avait eu lieu, elle n’aurait pas empêché de terminer les fabrications associées au procédé abandonné. Or, bien que les deux méthodes distinctes permettent de produire des fausses monnaies d’une qualité convenable, aucune n’a pourtant été menée totalement à terme. De plus, un second point réfute l’hypothèse d’une adaptation technologique, dans la mesure où les deux processus d’élaboration sont dédiés à la contrefaçon de types de monnayages distincts. Un premier correspond à l’imitation d’espèces de bas billon, alors qu’un second est dédié à la contrefaçon de pièces de billon. Et, bien que la mise en œuvre d’un procédé d’argenture ne soit indispensable que pour le dernier de ces faux-monnayages, cette ultime opération ne justifie pas la complète modification des techniques de production.

De telles constatations obligent à prendre en compte les bénéfices potentiels associés aux types monétaires contrefaits. L’écart entre la valeur des espèces de bas billon et celles qui contiennent plus d’argent est très important. Si les premières ne dépassent jamais trois deniers, les secondes en revanche valent au

[1064] Références CA : 33, 32, 39.

moins quatre à douze fois plus[1065]. Dans ce cas, en faisant pour l'instant abstraction des différents risques encourus, le faux-monnayeur de La Catette ne pouvait espérer percevoir une somme importante de ces fausses monnaies de bas billon. C'est pourquoi, il a peut-être cherché à exploiter au mieux ses matières premières. La discussion de cette hypothèse oblige à considérer les volumes de déchets résultant des différentes fabrications car ils représentent autant de matière qui n'est pas réutilisable sans refonte et mises en forme supplémentaires. Il faut ici rappeler que la faible proportion des déchets retrouvés lors des fouilles atteste que cette question a notamment été une préoccupation importante du faussaire.

Afin de traiter ce problème, l'expérimentation réalisée dans le cadre de l'étude de la chaîne opératoire du faux-monnayage de bas billon, a été complétée par une nouvelle reconstitution[1066]. Elle a permis d'évaluer la proportion de chutes de métal résultant d'une production de flans à partir d'une découpe arrondie associée à la fabrication de fausses monnaies de billon.

Le protocole a été défini à partir des morphologies de flans obtenues lors des premiers essais afin de disposer d'une référence commune. Des flans de 10 mm de diamètre ont été cisaillés dans des carreaux de 0,4 mm d'épaisseur. La diversité des types de découpe observés dans la grotte a été prise en compte. C'est pourquoi, deux cas extrêmes ont été considérés. Le premier se décrit par un rognage plus ou moins progressif des coins des ébauches préliminaires (Figure 256 a et b). Le second consiste à former un flan en une seule « coupe arrondie ». Cette dernière méthode engendre plus de déchets car elle demande un rognage supérieur de matière pour relier les coins entre eux (Figure 256 c).

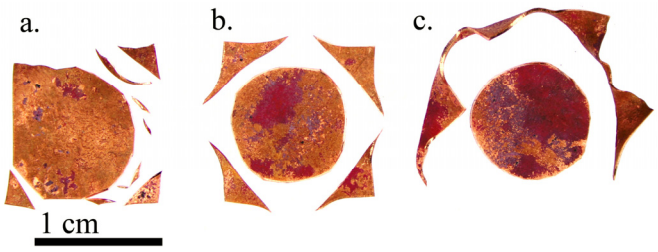


Figure 256 - Différentes découpes circulaires (n° 07-A).

[1065] Les deniers, doubles tournois et liards de bas billon valent respectivement un, deux et trois deniers tournois, alors que les douzains correspondant aux monnaies les plus faibles de billon en valent douze.
Duplessy J., *Les monnaies françaises..., op. cit.*, t. 2, p. 55-62, 83-87.

[1066] Ce sont les résultats de cette expérimentation qui ont également servi de référence dans la discussion portant sur les techniques de monnayage officielles.
cf. *supra*, p. 422.

Au total 24 flans ont été produits : 15 par une découpe arrondie et 9 par une succession de rognages. Leur pesée avant et après cisaillage permet d'évaluer les différentes quantités de résidus associées[1067].

Les résultats expérimentaux sont présentés sur la figure ci-dessous. Ils attestent des forts particularismes de chacune des chaînes opératoires. Les proportions de chutes de coupe varient du simple au double. Compte tenu de la remarque précédente, il n'est pas surprenant que la « coupe arrondie » engendre la plus grande quantité de déchets. Le rognage progressif est en revanche plus économe puisqu'il en résulte en moyenne 18 % seulement de cisailles. Ce volume de métal qui ne peut être transformé sans être refondu, est néanmoins supérieur à celui résultant de la copie des monnaies de bas billon. Cet écart est-il suffisamment intéressant pour que le faussaire décide de choisir cette dernière méthode alors qu'elle est finalement plus longue à mettre en œuvre ? Elle suppose en effet que chaque ébauche soit systématiquement martelée individuellement[1068].

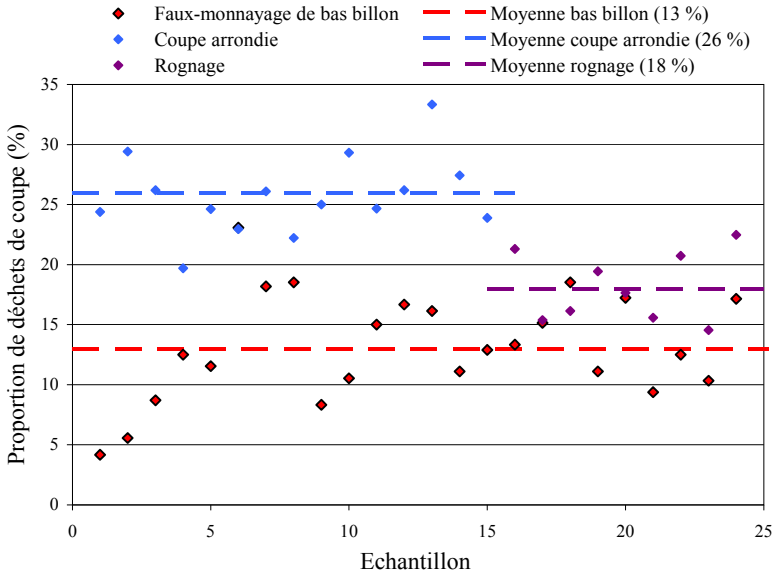


Figure 257 - Proportions expérimentales de déchets de coupe associées au faux-monnayage de bas billon et de billon.

En définitive, la mise en œuvre d'une chaîne opératoire économique permet d'augmenter le nombre de pièces fabriquées. Dans ce cas, plus les espèces sont petites plus le nombre d'exemplaires produits en premier lieu est important. A titre

[1067] Les résultats sont présentés en Annexe R.
[1068] Le procédé d'argenture n'est pas inclus dans cette estimation car il s'agit d'un traitement supplémentaire propre au faux-monnayage de billon uniquement.

d'exemple les flans du groupe C sont en moyenne un peu plus de trois fois plus lourds que ceux de la famille A[1069]. Par conséquent, une même diminution de la quantité de déchets générés doit conduire à l'obtention de trois fois plus de faux de bas billon que de billon. La longueur de la chaîne opératoire spécifique aux petits monnayages se voit, dans une certaine mesure, compensée par l'augmentation plus importante du nombre de flans qui en résultent. En mettant en parallèle cette observation avec le faible bénéfice que permet d'espérer la contrefaçon de monnaies de faible valeur libératoire, il devient particulièrement intéressant d'exploiter au mieux le métal, minimisant ainsi les refontes coûteuses afin d'optimiser le profit lors de l'imitation de petites espèces.

Finalement, les différentes chaînes opératoires de fabrication de fausses monnaies qui caractérisent le faux-monnayage de La Catette témoignent d'une gestion rigoureuse des matières premières. Cependant, cette conclusion est également révélatrice des qualifications de l'artisan. Seule la connaissance et la maîtrise des différents procédés retenus, justifient que plusieurs techniques alternatives aient été retenues.

IV. Le profil du faux-monnayeur de la grotte de La Catette

Avant de dresser l'inventaire des nombreuses compétences du faussaire de La Catette révélées par l'étude de sa production, il est nécessaire d'aborder un dernier point encore très peu évoqué. L'une des caractéristiques importantes de ce faux-monnayage est le nombre important des différents types monétaires contrefaits. Cependant, en préambule aux discussions sur les raisons d'une telle diversité, il est dans en premier lieu indispensable de définir ce qui l'a rendue possible.

Dans le cadre de son faux-monnayage, c'est la technique de la frappe qui a été retenue par le faussaire. Elle est particulièrement indiquée pour produire les faux de meilleure qualité dans la mesure où il s'agit de la même technologie qui est en vigueur pour l'élaboration des monnaies authentiques. Sa mise en œuvre est en revanche difficile puisqu'elle suppose la possession de coins. Les deux alternatives envisageables permettant de disposer de tels instruments, sont d'une part leur vol au sein d'un atelier officiel et d'autre part leur fabrication par le faussaire. Si la première constitue une entreprise risquée compte tenu des contrôles propres à

[1069] La masse moyenne de flans du groupe A est de 0,66 g alors qu'elle est de 2,14 g pour ceux du groupe C.

l'administration monétaire, la seconde l'est moins mais demande des savoir-faire particuliers. Dans une telle configuration où chacun des choix présente des inconvénients, la détermination de celui retenu par notre faux-monnayeur peut témoigner d'informations révélatrices de son profil.

Une première approche qui permet rapidement d'exclure l'utilisation de coins authentiques s'appuie sur l'évaluation du nombre de matrices ayant été effectivement employées. Le matériel découvert au sein de la cavité a révélé la production de quatre types monétaires différents : le double et le douzain à la croisette, le douzain aux croissants ainsi que le réal espagnol. En outre, les flans du groupe A témoignent d'un cinquième type non identifié. Un tel inventaire trahit l'emploi d'au moins cinq paires de coins. Ce chiffre déjà très élevé se voit, de surcroît, réévalué après l'étude numismatique de chacune des neuf fausses monnaies mises au jour. Le douzain aux croissants et le réal espagnol sont représentés par plusieurs exemplaires qui ne définissent pas tous des liaisons de coins. Si deux douzains ont été frappés du même droit (Figure 231 B et C) et trois autres du même revers (Figure 231 B, C et D), les cinq faux qui illustrent ce type attestent de l'utilisation d'au minimum quatre coins de droit et trois coins de revers différents. De même, les deux réaux collectés indiquent l'usage d'au moins trois matrices supplémentaires. Au total, le *corpus* archéologique atteste de la présence dans la grotte de sept droits et huit revers distincts, soit quinze outils de frappe auxquels s'ajoutent certainement au moins deux autres instruments pour battre les flans du groupe A. Le vol d'un si grand nombre de coins dans un atelier monétaire est illusoire. De plus, les monnaies imitées proviennent de plusieurs fabriques différentes. En comptant au moins une officine espagnole illustrée par les deux faux réaux, le monnayage français est représenté par trois ateliers : Limoges, Lyon et Montpellier. Ces trois derniers sont trahis par leurs lettres d'ateliers respectives, « I », « D » et « N » sur cinq des faux douzains (Figure 231 A, B, C, D et Figure 232 I) ainsi que par celle d'un point secret sur le sixième (Figure 231 F). En définitive, il est impossible que le faussaire de La Catette ait pu se procurer des matrices officielles en si grand nombre et d'au moins quatre origines différentes. D'autant que d'autres observations attestent de la fabrication de tels outils au sein de la cavité.

La preuve la plus explicite de la technique employée par notre faux-monnayeur pour produire ses coins est la découverte, lors des fouilles, de deux instruments de gravure[1070]. Leur état de conservation ne permet toutefois pas de savoir s'il s'agit simplement de burins ou de poinçons utilisés pour imprimer des motifs entiers tels

[1070] cf. Faux monnayage : la grotte de La Catette (Aude) : *Les outils*, p. 261.

que les lettres des légendes notamment[1071]. Dans le cadre de cette activité illégale, le recours à l'outillage le moins spécialisé, en l'occurrence les burins, apparaît le plus probable. Elle est d'ailleurs attestée par la diversité des formes constatées pour certaines lettres et motifs monétaires présents sur plusieurs faux. Il suffit par exemple de prendre en compte les « H » au revers des douzains aux croissants (Figure 231 A, B et F) dont les tailles variables suggèrent des gravures individuelles.

D'un autre côté, il faut tout de même envisager parallèlement l'emploi ponctuel de poinçons. Cette hypothèse permet de justifier la présence de nombreuses lettres à l'envers dans les légendes de certains faux (Figure 231 I, II, III et Figure 232 J)[1072]. Or, bien que les monnaies sortant des ateliers officiels aient été porteuses de tels défauts[1073], il est très peu probable que quatre des coins imités par le faussaire témoignent des mêmes erreurs. Le renversement des lettres caractérise particulièrement les « M » (Figure 231 I, II et III) et les « V » (Figure 231 II et III). En outre, chacun de ces deux derniers motifs est relativement similaire d'un douzain à l'autre. Ils pourraient donc indiquer l'utilisation exceptionnelle de poinçons.

Un témoignage supplémentaire de la préparation des coins au sein de la grotte, se résume par la découverte de plusieurs échantillons qui ont été rapidement assimilés à des essais de frappe (Figure 231 E, Figure 232 G et H)[1074]. L'un d'eux est particulièrement significatif puisqu'il s'agit d'un flan de cuivre non argenté qui présente sur ses deux faces, un même revers lacunaire de douzain aux croissants comme l'illustre la superposition sur la figure 232 IV. Au cours de la gravure d'un de ses coins, le faussaire a vérifié la qualité de son travail, en utilisant plusieurs fois sa matrice en cours d'élaboration sur l'un de ses flans. La qualité des frappes et la surface corrodée ne permettent pas de vérifier si chaque tentative correspond à un stade différent de gravure.

[1071] La restauration envisagée de ces outils devrait permettre de répondre à cette question.
[1072] Grierson P., *Monnaies et monnayage..., op. cit.*, p. 137.
[1073] C'est notamment suite à cette constatation qu'Henri II crée, en 1557, l'office de Tailleurs Général, chargé de produire tous les coins monétaires des ateliers français.
Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 30.
Blanchet J.-A. *et al.*, *Manuel de numismatique française*, *op. cit.*, t. 2, p. 65.
Grierson P., *Monnaies et monnayage..., op. cit.*, p. 210-211.
Bompaire M. *et al.*, *Numismatique médiévale..., op. cit.*, t. 7, p. 123, 503.
[1074] cf. Faux monnayage : la grotte de La Catette (Aude) : *Le matériel monétaire*, p. 258.

Il est maintenant certain que l'artisan a lui-même fabriqué les coins de son faux-monnayage. Cette constatation ne constitue pas seulement un nouvel élément dans la définition du profil de cet homme, elle témoigne aussi d'une certaine liberté qu'il a su exploiter à son profit de manière très raisonnée.

Selon une logique basée sur la production officielle de monnaies, le nombre important de droits et de revers ayant été effectivement employés dans cette activité devrait être assimilé à une frappe très importante de fausses pièces : le remplacement d'une matrice étant décidé par son usure engendrée par une utilisation massive. Cependant, dans un cadre de contrefaçon monétaire, les paramètres ne sont pas les mêmes. L'illégalité de l'entreprise doit être prise en compte. Elle impose de prendre des précautions pour prévenir les risques d'arrestation. C'est notamment ce que suggère la découverte des fausses monnaies et des flans du groupe A. Ces vestiges illustrent une grande variété et témoignent d'une stratégie très bien pensée, déjà évoquée. Le réal espagnol permet d'espérer un bénéfice important tout en profitant de la plus grande méconnaissance de cette monnaie étrangère par les usagers français. La contrefaçon de douzains diversifie cette production de pièces argentées en se cantonnant à un type très commun donc moins contrôlé. L'imitation de petites espèces est quant à elle, particulièrement intéressante car elle se place dans une niche laissée vide à l'époque par l'autorité émettrice. Même fausses, ces espèces de faible valeur, indispensables aux échanges courants, sont dans un contexte de pénurie très facilement acceptées par la population[1075].

La prudence du faussaire a, de surcroît, été poussée à un niveau supérieur. Il suffit de considérer les faux douzains aux croissants. Ils témoignent à eux seuls de la fabrication d'au moins 4 droits et 3 revers différents qui imitent, en outre, des espèces frappées dans trois ateliers éloignés les uns des autres : Limoges, Lyon et Montpellier (Figure 231).

Le savoir-faire du faux-monnayeur concernant la gravure des matrices, lui a permis de fabriquer un très grand nombre de tels outils puisqu'ils sont évalués avec certitude à un minimum de quinze exemplaires. Une telle collection pourrait signifier une production importante de fausses monnaies. Il est cependant difficile d'en être certain compte tenu notamment du faible impact de cette activité au sein de la cavité. D'autant que la récupération systématique des déchets de coupe, n'offre pas comme à Lauradieu, un négatif de la fabrication, interdisant l'évaluation d'un volume de pièces écoulées... Au-delà de garantir une très grande

[1075] Feller L., *Faux-monnayeurs..., op. cit.*, p. 21.
Bompaire M. *et al.*, *Numismatique médiévale..., op. cit.*, t. 7, p. 120.
Miquel J. *et al.*, Un atelier de faux-monnayeur..., *op. cit.*, p. 194.

productivité, c'est dans la définition d'une stratégie rationnelle que l'intérêt de disposer d'une multiplicité de matrices doit être particulièrement souligné dans cette activité.

A partir des informations rassemblées dans cette étude, il est maintenant possible de proposer un profil général de l'artisan qui est à l'origine du faux-monnayage de La Catette.

Le responsable apparaît particulièrement expert des procédés métallurgiques. Une maîtrise des méthodes de mise en forme des métaux a permis la mise en place en parallèle de deux chaînes opératoires distinctes pour la préparation des flans. L'une d'elles est d'ailleurs relativement proche de ce qui pouvait être observé dans les ateliers monétaires officiels. La technique de l'argenture à l'amalgame est également maîtrisée. C'est notamment à partir de ce traitement dont les reconstitutions ont montré la complexité de sa réalisation[1076], que le faussaire a pu élaborer des faux de plus grande valeur. Enfin, cette activité rend compte de l'utilisation d'un dernier savoir-faire exploité pour graver au sein même de la cavité isolée un très grand nombre de coins monétaires.

Cependant, au-delà de disposer de compétences techniques très spécialisées, le faux-monnayeur les a employées en faisant preuve d'une grande rationalité appliquée à son activité illégale. Il a décidé d'une politique de gestion de ses matières premières en adaptant ses méthodes de mise en forme aux catégories de monnaies contrefaites. De même, il semble avoir fait le choix de diversifier sa production selon les risques en relation avec les types imités. Cette stratégie basée notamment sur la contrefaçon de monnaies étrangères ainsi que sur celle d'espèces françaises de faible valeur, trahit la maîtrise de problématiques monétaires par l'artisan.

A partir de tous ces éléments, le faussaire de la grotte de La Catette présente un profil correspondant parfaitement à celui d'un orfèvre. En outre, ses connaissances à la fois techniques, mais également administratives de questions propres à la fabrication monétaire, permettent de supposer une relation avec cette industrie d'Etat. Ce sont d'ailleurs les orfèvres qui étaient chargés, avant 1557, de réaliser les coins utilisés dans les ateliers officiels[1077].

[1076] cf. Annexe V.
[1077] Boizard J., *Le traité des monoyes..., op. cit.*, p. 30.
Roy C., *La Rochelle, son atelier monétaire..., op. cit.*, p. 35.
Bompaire M. *et al.*, *Numismatique médiévale..., op. cit.*, t. 7, p. 502, 509.

Avant de conclure, il est envisageable d'estimer la somme qu'aurait pu espérer gagner le faussaire. Cependant, contrairement à l'évaluation proposée pour l'atelier de Lauradieu, définie à partir de l'étude des déchets engendrés lors de cette production[1078], pour celui de La Catette, elle n'est possible qu'en prenant en compte les ébauches dont la fabrication n'a pas été menée à terme...

A chacun des groupes morphologiques préalablement déterminés, peut théoriquement être associé un type contrefait. Le premier rassemble les 156 carreaux et flans de très petites dimensions (Figure 240 : Carreaux et Flans du groupe A). Bien qu'il ne soit pas illustré par la découverte de fausses monnaies ayant été frappées, ce *corpus* peut tout de même être associé à la contrefaçon d'espèces de faible valeur ne pouvant dépasser un denier. Ce sont les 10 flans du groupe B qui étaient réservés à l'imitation des doubles tournois représentée par la découverte d'un fragment au sein de la grotte (Figure 232 J). La somme cumulée de ces deux faux-monnayages de bas billon équivaut à 176 deniers.

La valeur associée à la dernière famille qui compte 69 flans (Tableau 12 : groupe C), est en revanche plus difficile à estimer. Ces ébauches pouvaient être destinées à la fois à la frappe des douzains à la croisette ou aux croissants s'échangeant contre douze deniers, mais également à celle des faux réaux espagnols, d'une valeur près de quatre fois plus élevée[1079]. C'est pourquoi, il a été décidé de considérer la proportion de chacun des types dans le *corpus*[1080], soit 75 % de douzains pour 25 % de réaux. Ce compromis suit d'ailleurs la logique de ce faux-monnayage puisqu'il ménage en quelque sorte les risques, en ne donnant pas un poids trop important au monnayage de plus grande valeur. En fin de compte, ce *corpus* équivaut à 1440 deniers potentiels[1081].

En ajoutant au total, la valeur des fausses monnaies retrouvées sur le site représentant 170 deniers, le faussaire aurait pu espérer bénéficier de 1786 derniers tournois de cette production finalisée.

Il est en définitive surprenant compte de tenu de se valeur potentielle, que la production au sein de la grotte n'ait pas été finalisée. Aucune des deux chaînes opératoires mises en œuvre n'a été terminée. Certains flans argentés ne demandaient que d'être frappés pour devenir des fausses monnaies d'une grande qualité. De même, les quelques défauts de frappe des neuf pièces retrouvées dans la cavité, justifient-ils qu'elles aient été laissées sur place ? Elles représentent tout de même une somme de 170 deniers. L'hypothèse la plus probable permettant

[1078] cf. *supra*, p. 544.
[1079] cf. L'exposition des monnaies étrangères au XVI^{e} siècle, p. 559.
[1080] Six douzains (Figure 231 A, B, C, F et Figure 232 I) et deux réaux (Figure 232 K et L).
[1081] Pour le choix de l'arrondi de l'estimation des quantités de flans respectives, les douzains ont été favorisés. Le calcul a donc pris en compte 52 douzains pour 17 réaux.

d'expliquer de telles constatations est certainement un arrêt brusque de cette activité. Bien qu'exposant toutes les caractéristiques d'un faux-monnayage de qualité, par ailleurs organisé selon une stratégie à la fois ambitieuse et raisonnée, il faut croire que l'artisan qui en est à l'origine n'a pas eu la possibilité, le besoin ou seulement la volonté de revenir au sein de la grotte pour achever sa fabrication.

Cette étude du faux-monnayage de la grotte de La Catette donne une illustration particulièrement intéressante d'une entreprise de contrefaçon monétaire au début de la période moderne. Bien que prenant place dans un lieu particulièrement isolé du sud de la France, les nombreux vestiges mis au jour ont permis de définir le profil d'un faussaire particulièrement qualifié, maîtrisant à la fois les techniques métallurgiques, mais également les données monétaires. Les premières devaient lui garantir une production de contrefaçons d'une très grande qualité alors qu'il profitait des secondes pour développer une stratégie afin d'écouler ses fausses monnaies avec des risques modérés. De telles observations sont suffisantes pour voir dans une telle polyvalence les traits d'un orfèvre expert.

Le caractère globalement inabouti de cette fabrication est finalement paradoxal. C'est pourquoi, il a été associé à un arrêt brusque de cette activité tout de même illégale. Cependant, bien que probables, les causes de cette interruption ne sont peut-être pas forcément judiciaires compte tenu des remarquables précautions mises en œuvre par cet habile faussaire.

Conclusion

Dans les ouvrages de numismatiques qui évoquent la fabrication de la monnaie au marteau, cette question est souvent résumée à quatre opérations principales[1082]. Elle débute avec la découpe des lames en carreaux, se poursuit avec leur transformation en flan après le cisaillage et le martelage de leurs coins, et se termine par la frappe précédée du bain de blanchiment. Ces descriptions, généralement fondées sur l'interprétation de traités monétaires ou de scènes iconographiques, soulignent finalement assez peu le niveau de technicité des différents procédés mis en œuvre. Le point de vue retenu dans cette thèse permet de donner un éclairage supplémentaire des gestes et savoir-faire qui interviennent dans le monnayage au marteau. Ils définissent la compétence des ouvriers monétaires à soutenir une production artisanale de monnaies, objets produits en très grand nombre et répondant à de fortes contraintes esthétiques, métrologiques ainsi que de composition.

Avant de proposer un bilan des principales problématiques rencontrées au cours de cette étude sur les techniques de monnayage dans un cadre officiel et clandestin, il est important de revenir sur les méthodes qui ont permis de les traiter.

Dans le champ de réflexion offert par une thèse, il est apparu évident que les discussions techniques développées, devaient reposer sur une approche multidisciplinaire des problèmes rencontrés. Les résultats obtenus au terme de cette étude attestent de l'intérêt d'une telle démarche, fondée sur des données historiques, archéométriques et expérimentales. Dans les démonstrations proposées la caractérisation d'objets archéologiques occupe la place centrale. Elle constitue la référence à laquelle ont systématiquement été confrontées les hypothèses formulées.

Le rôle fondamental des artefacts analysés dans le cadre de cette recherche devait encourager à rassembler à leur sujet, une très grande diversité d'informations. En premier lieu, il importe de bien connaître le contexte de découverte. Il peut être révélateur de renseignements sur les méthodes de fabrication mises en jeu. C'est dans ce sens que les échanges avec les archéologues ainsi que la consultation de leurs rapports et documents de travail

[1082] Au colloque international qui s'est tenu le 11 et 12 avril 2008 à Bordeaux sous le titre *La fabrique du faux monétaire, objet historique et usages sociaux du Moyen Age à nos jours*, la monnaie n'est jamais apparue comme un objet technique mais uniquement économique.

sont importants. Ils ont permis de regrouper de nombreuses données concernant notamment deux des *corpus* de cette thèse (La Rochelle et dans la grotte de Lauradieu). D'un autre côté, l'approche a pu être différente pour les sites de Montreuil-Bonnin et de La Catette puisque les travaux archéologiques dont ils ont fait l'objet, sont intervenus dans le cadre de cette recherche. Une telle opportunité permet de rendre compte d'observations qui peuvent, dès la collecte des échantillons, orienter les discussions techniques : le cas de la récupération des déchets par le faussaire de la grotte de La Catette en est une bonne illustration. De même, c'est en étudiant les contextes dans lesquels ont été découverts du mobilier de Montreuil-Bonnin qu'a pu être étayée l'hypothèse de la mise en œuvre d'opérations de retraitement des creusets usagés ; alors même que cette pratique identifiée dans les textes entraîne la destruction du matériel potentiellement étudiable...

La pertinence des démonstrations développées dans cette thèse repose également sur la représentativité des *corpus* rassemblés. La possibilité de disposer d'artefacts en cours de mise en forme, en particulier pour les sites de La Rochelle, de Lauradieu et de La Catette, constitue évidemment le principal atout des collections associées. En plus d'illustrer les différentes étapes des chaînes opératoires correspondantes, ces échantillons inachevés qui attestent d'opérations précises, permettent d'amener les discussions à un niveau supérieur. Ces dernières n'ont plus à porter sur la définition des étapes de fabrication et peuvent être focalisées sur la détermination de l'origine et des causes de leur mise en œuvre. C'est notamment avec la prise en compte des procédés d'ajustage que cette réflexion prend tout son sens. En effet, cette opération ayant pu être reconnue dans les fabrications de La Rochelle et de La Catette à partir de la simple observation des vestiges associés, il a été possible de s'interroger sur sa finalité dans chacun des deux cas. Ce questionnement apparaissait indispensable dans la mesure où les *corpus* considérés sont associés pour l'un à une production officielle et pour l'autre à un faux-monnayage. En complétant les données archéométriques avec des informations historiques et expérimentales, il a finalement été possible de révéler les différents buts de cette étape caractérisant habituellement la fabrication de monnaies au sein des ateliers royaux. Si dans une fabrication officielle, elle intervient pour garantir la légalité et l'uniformité des masses des pièces produites, ce n'est pas le cas dans le faux-monnayage de La Catette. Dans cette fabrication clandestine, l'existence d'une seconde chaîne opératoire a révélé une gestion stricte des matières premières afin d'optimiser leur utilisation dans les monnayages de moins grande valeur. Cette recherche d'économie passe par des opérations d'ajustages.

La statistique importante des différents ensembles de vestiges considérés constitue ici un avantage supplémentaire. Elle oblige toutefois à définir des protocoles spécifiques permettant de collecter et de traiter les nombreuses informations associées. Sur le plan analytique par exemple, c'est à partir des analyses qualitatives obtenues par spectrométrie de fluorescence X qu'a par la suite été établi un protocole d'analyse par ANRC. Ce dernier limité appliqué à un échantillonnage restreint, a permis de caractériser efficacement les compositions globales des différents *corpus* métalliques. Le caractère seulement qualitatif de la première méthode est compensé par sa rapidité ainsi que par les informations obtenue grâce à la seconde, au contraire plus lourde à mettre en œuvre.

Les hypothèses formulées ont, d'une part, plus de poids lorsqu'elles se fondent sur des observations associées à un *corpus* important. D'autre part, la prise en compte d'ensembles conséquents permet de dégager des tendances et des familles qui ne pouvaient être révélées à partir de *corpus* plus réduits. Les informations recueillies lors de l'expertise des très nombreux fragments de creusets monétaires découverts à Montreuil-Bonnin sont sur ce point les plus significatives. Elles sont presque entièrement fondées sur cette approche statistique qui a finalement permis de définir le profil général des céramiques métallurgique utilisées dans cet atelier monétaire.

L'interprétation des nombreuses données relatives à la morphologie des ébauches de monnaies a également révélé certains processus précis de fabrication grâce aux évolutions globales observées au sein des *corpus*. C'est notamment le cas d'une opération du monnayage officiel au cours de laquelle les carreaux sont flatis. Cette technique qui a pour finalité de les arrondir progressivement s'est vue trahie par la tendance moyenne de ces dernières à devenir plus fines à mesure que leurs diamètres augmentent. Cette configuration est justifiée par le martelage à plat sur une enclume qui a lieu durant cette élaboration.

Pour conclure sur l'avantage d'avoir mis en œuvre une approche multidisciplinaire, il suffit de revenir sur une problématique rencontrée à plusieurs reprises lors des discussions tant sur le monnayage officiel que clandestin. Il s'agit de la question des déchets de coupe métalliques résultants des opérations de fabrication. D'un point de vue méthodologique, c'est la démonstration développée dans le chapitre traitant de la chaîne opératoire officielle, par la suite transposée au faux-monnayage de bas billon de La Catette, qui présente un grand intérêt à être rappelée.

C'est dans un premier temps à partir de données bibliographiques, mettant en évidence les quotas de déchets réglementaire imposés au sein des fabriques

monétaires que cette question annexe du monnayage est apparue comme potentiellement révélatrice de procédés d'élaboration particuliers. Afin de vérifier cette hypothèse, les discussions préliminaires ont été poursuivies en considérant dans un second temps un autre type de source. Il s'agissait en l'occurrence de comptes de productions des ateliers de Bayonne et de Crémieu. Révélant des tendances différentes propres à chacune de ces fabriques, L'inventaire des taux de déchets associés a permis d'évoquer l'influence de la chaîne opératoire de fabrication. A ce stade des réflexions, c'est l'approche expérimentale qui a ensuite confirmée cette proposition. Le croisement des multiples points de vue a justifié l'imposition de quotas de chutes métalliques par l'autorité émettrice. Il s'agit finalement d'un moyen implicite pour cette dernière d'encourager les ouvriers monétaires à mettre en œuvre un processus de fabrication précis garantissant la qualité finale du monnayage.

En ce qui concerne le faux-monnayage de bas billon de la grotte de La Catette l'aspect réglementaire n'avait évidemment pas lieu d'être pris en compte. C'est à partir d'une reconstitution des morphologies initiales de nombreux échantillons archéologiques, que la production de déchets propre à cette production a pu être confrontée à une nouvelle approche expérimentale. Cette démarche a alors constitué un paramètre supplémentaire pour étayer notre définition des procédés de fabrication retenue dans un cadre clandestin.

Finalement, c'est en grande partie grâce aux *corpus* assemblés pour cette étude mais également à partir de la démarche retenue pour leur caractérisation qu'il a été possible de réaliser étude exhaustive du monnayage au marteau en vigueur dans les ateliers monétaires français. Il est maintenant envisageable de proposer un bilan des différentes informations rassemblées qui participent à la définition d'une chaîne opératoire globale de la production des monnaies telle qu'elle était mise en œuvre dans fabriques monétaires jusqu'au milieu du XVII^{e} siècle. De même, les deux exemples de faux-monnayages considérés dans un second temps selon les mêmes points de vue, ont élargi les discussions vers les pratiques illégales qui pour certaines ont pu toutefois rappeler des techniques plus conventionnelles.

Le monnayage au marteau, en tant que fabrication métallurgique de masse, fait appel à différents savoir-faire qui supposent les maîtrises de techniques de fonderie, de mise en forme mécanique des métaux ainsi que de procédés chimiques. Le plan retenu dans cette thèse pour discuter de cette chaîne opératoire, suit évidemment un développement parallèle. Les questions liées à la composition

et à la métallurgie des matières premières monnayées devaient donc être considérées en premier lieu.

Dans une mise en parallèle des chaînes opératoires de fabrication monétaire tant dans un cadre légal que clandestin, la prise en compte des problématiques liées aux opérations de fonderie marque une première différence. Lors des étapes préliminaires du monnayage officiel, la fonte des matières premières est indispensable. Elle permet notamment de garantir le titre en métal précieux des alliages frappés. En revanche, dans la mesure où cette contrainte n'a pas à être respectée dans le cadre d'un faux-monnayage, il est logique que de tels procédés n'aient pas été mis en œuvre dans les contrefaçons de Lauradieu et de La Catette. Elles auraient été particulièrement lourdes à organiser dans les contextes où se sont développées ces activités interlopes. C'est donc uniquement à partir des mobiliers et données archéologiques des sites officiels, qu'ont pu être traitées les questions portant sur la préparation des alliages monétaires.

Les discussions ont été principalement développées à partir d'approches expérimentales et statistiques. Les fouilles de l'atelier de La Rochelle ayant révélé de nombreux vestiges de fourneaux métallurgiques, il est apparu pertinent de reconstituer l'un d'entre eux afin, notamment, d'appréhender son fonctionnement.

Malgré une taille près de deux fois inférieure à celle du modèle archéologique, le four expérimenté a nécessité l'organisation d'une campagne d'expérimentation à grande échelle. Au cours de 18 jours de chauffe, ayant vu la fonte de plus de 300 kg d'argent, il a été possible de relever un grand nombre de paramètres et de faire l'inventaire des prérequis qui participent à l'efficacité d'un tel fourneau en ventilation naturelle. Après avoir mis en évidence l'importance de la maîtrise des écoulements d'air au sein de la structure, il est apparu que le facteur humain intervenait de façon non négligeable dans le rendement d'un tel four. C'est pourquoi il a été pris en compte au même titre que les considérations économiques pour proposer un modèle d'organisation des opérations de fonderie au sein des fabriques de monnaies. En définitive, il apparaît plus avantageux d'un point de vue de la consommation de charbon, comme de la gestion des opérations annexes de la fonte des alliages monétaires, de proposer un séquençage des périodes de chauffe du fourneau, adapté évidement aux rythmes de fabrication. La validité de cette proposition a ensuite pu être vérifiée à partir de son application à l'atelier de Montreuil-Bonnin pour lequel le croisement des données historiques disponibles avec l'étude du mobilier céramique découvert, a permis de proposer une discussion s'appuyant sur les données expérimentales.

La seconde conclusion qui doit être soulignée dans cette partie, porte sur la morphologie des creusets dans lesquels sont préparés les alliages monnayés. A Montreuil-Bonnin, comme dans les niveaux les plus anciens de l'atelier de La Rochelle, les vestiges découverts révèlent l'utilisation de céramiques qui traduisent une certaine standardisation. Ces poches de fontes présentent globalement une importante épaisseur de pâte fortement dégraissée, un bec de coulée déformé dans des bords massifs ainsi qu'un fond hémisphérique. Ces principales caractéristiques découlent de la fonction de ces récipients dans un cadre technique spécifique. Leurs fonds globulaires pouvaient paraître peu appropriés pour recueillir des métaux fondus. Toutefois, la mise en évidence de liens stratigraphiques entre de tels creusets et la structure métallurgique de La Rochelle préalablement évoquée, a permis d'attester du lien technologique. Les expériences réalisées ont en effet rendu compte de l'intérêt de disposer de morphologies globulaires dans ce type de four. Dans la structure découverte à La Rochelle, le foyer accueille les creusets au sein d'une masse de charbon. Or, ces derniers lorsqu'ils présentent un fond hémisphérique peuvent être placés et maintenus plus facilement au milieu du combustible. C'est à partir de cette hypothèse et de la forme préalablement attestée des creusets ayant servi à Montreuil-Bonnin, que le type de fourneau utilisé dans cette fabrique a pu être supposé.

Dans une confrontation des opérations de fonderie monétaire avec celles associées aux industries métallurgiques plus communes, les principaux écarts se justifient par le travail de métaux précieux. Il en résulte différentes consignes propres à la fabrication de monnaies, et plusieurs observations de cette étude ont permis d'en rendre compte. Elles ont en effet permis de supposer, principalement à La Rochelle, la séparation des métallurgies de l'or et de l'argent dont font état les sources monétaires. De même, les différentes tailles des creusets standardisés ont permis d'envisager l'adaptation des volumes fondus à la valeur des alliages, afin qu'en cas d'accident lors d'une fonte, les pertes soient limitées. Enfin, c'est également le coût des matières premières monnayées qui encourage les ateliers à mettre en œuvre une politique de retraitement des déchets métallurgiques évoquée plus haut à partir du mobilier de Montreuil-Bonnin.

Avant d'aborder les questions de mises en forme mécaniques, il est important de qualifier plus avant les matières premières des différents monnayages rencontrés. Dans un premier temps, ce sont les métaux employés dans les deux

activités de faux-monnayage étudiées qui sont, en définitive, les moins surprenants. Ils n'en sont, en revanche, pas moins révélateurs de la technicité de ces fabrications puisque l'utilisation de laiton, principalement à Lauradieu, et de cuivre à La Catette demande la mise en œuvre de procédés d'élaboration relativement complexes. Ils sous-entendent par exemple la mise en œuvre d'opérations de préparation mécanique des flans qui sont argentés avant d'être frappés. Il ne s'agit pas ici, et l'excellente qualité des contrefaçons l'atteste, de simples moulages à base d'alliages de plomb et d'étain, réalisés parfois, avec peu de succès, par certains faux-monnayeurs. Mais nous sommes bien dans des exemples de frappe de fausses monnaies dans ce sens assimilables aux techniques officielles. Pourtant, l'utilisation de laiton par le faussaire de Lauradieu mise en parallèle des observations morphologiques des vestiges associés, a, par ailleurs, constitué un argument supplémentaire pour juger cette fabrication comme étant un monnayage d'opportunité. Ce contexte supposé de production a alors participé à la définition du profil de l'artisan à l'origine de cette activité clandestine dont les connaissances des procédés métallurgiques sont assimilables aux qualifications attendues d'un orfèvre.

L'analyse des vestiges monétaires en cours de mise en forme découverts à La Rochelle a, dans un sens, révélé des compositions plus surprenantes dans le cadre monétaire de la fin du Moyen Age. Il faut en effet, rappeler que pour ces époques, les métaux monnayés se limitent normalement aux alliages à base d'or, d'argent et de cuivre. Fort de ce constat, la mise en évidence d'autres éléments selon des taux non négligeables devait être discutée. Or, certains carreaux et flans de l'atelier rochelais ont révélé la présence d'étain et de zinc. Si le premier peut signifier tout autant un ajout de bronze comme d'étain à la fonte, le second doit, en revanche, pour la période considérée, être obligatoirement associé à l'utilisation de laiton. La question était alors de déterminer ce qui a permis de tels ajouts non réglementaires dans plusieurs monnayages rochelais. L'une des hypothèses formulées se fonde, dans un premier temps, sur une limite des moyens de contrôles qui doivent garantir, au sein des ateliers, la qualité des monnaies produites. En effet, les essais effectués afin de vérifier la composition des alliages constitutifs des pièces ont pour unique but de déterminer leur titre en métal précieux. De plus, si l'essayeur peut supposer la présence d'éléments irréguliers dans les alliages qu'il analyse, il n'a pas la possibilité d'évaluer leur quantité.

Cependant, il ne faut pas non plus négliger une certaine tolérance de l'autorité émettrice, ou de ses représentants au sein des fabriques. C'est en particulier les flans de laitons de La Rochelle qui permettent d'envisager cette proposition. En effet, la couleur jaune de ces derniers trahit d'emblée leur composition légalement

frauduleuse. Toutefois la prise en compte du type monétaire auquel sont associées les ébauches à bases de laiton justifie l'autorisation d'une telle pratique au sein d'un atelier monétaire royal. Il s'agit en effet d'un monnayage de faible valeur correspondant à une frappe de deniers tournois.

Avant de conclure sur cette question des métaux non réglementaires du monnayage rochelais, il est intéressant de souligner que le plomb n'a, en revanche, pas marqué de taux particulièrement significatifs révélant un potentiel ajout volontaire. Or, au même titre que l'étain ou le laiton, il pouvait constituer un élément faisant poids ajouté aux alliages monnayés. Bien que cette constatation doive, en partie, être portée au crédit de l'honnêteté des monnayeurs, la raison est peut-être en réalité plus pragmatique. De par la structure interne particulière des alliages cuivreux contenant des taux de plomb supérieurs à quelques pourcents, il est très difficile, voire impossible de les mettre en forme selon les techniques du monnayage au marteau.

En définitive, la composition des ébauches en cours de mise en forme de La Rochelle a permis de mettre en évidence certaines irrégularités concernant des métaux monnayés. D'un autre côté, même si elles étaient pour certaines difficiles à mettre en évidence lors des contrôles au sein des ateliers, il apparaît qu'elles ont pu également être tolérées car limitées à des monnayages de faible valeur. Une considération statistique élargie à l'ensemble du *corpus* monétaire rochelais révèle, en outre, que l'utilisation de zinc par l'intermédiaire de laiton et d'étain suite à l'utilisation de bronze, ne représente pas une habitude particulière de cet atelier. D'autant que parallèlement la qualité d'autres monnayages d'argent ainsi que de cuivre a pu être constatée à partir d'une étude métrologique et analytique qui a permis d'associer la totalité des ébauches en cours de mise en forme aux espèces devant être respectivement produites.

Le développement des opérations de fonderie a été essentiellement mis en évidence dans le cadre de fabrications monétaires officielles. La suite des chaînes d'élaboration concerne cette fois aussi bien le vrai que le faux monnayage. Dans cette discussion conclusive, elle sera considérée sur un même plan, celui des méthodes de production de l'objet monétaire. Les exemples du faux-monnayage présentent évidemment de forts particularismes, notamment en ce qui concerne les traitements d'argenture, cependant, il suffit de considérer la figure ci-dessous pour constater également plusieurs analogies avec les techniques officielles. La question est alors d'en comprendre les raisons.

Figure 258 - Les chaînes opératoires des monnayages de La Rochelle ainsi que des grottes de Lauradieu et de La Catette.

Avant d'aborder les problèmes d'élaboration proprement dits, il est nécessaire d'évoquer les observations relevées à propos de la morphologie des matières premières utilisées à La Rochelle, Lauradieu et La Catette. Dans la mesure où les faussaires qui ont occupé ces deux derniers sites n'ont pas choisi de mettre en œuvre des opérations de fonderie, leur choix concernant la forme de leurs matériaux de base a forcément été plus limité. C'est certainement l'une des raisons qui justifie qu'ils aient utilisé des plaques de laiton et de cuivre alors que le moulage organisé au sein des fabriques officielles permet de produire des lames. Cependant, l'étude du mobilier métallique de La Rochelle a également démontré l'emploi de cuivre sous forme de plaques dans cet atelier royal. C'est pourquoi, l'intérêt d'utiliser de telles ébauches, en particulier lorsqu'il s'agit de matériaux qui se découpent et se mettent en forme sans difficulté, doit être également pris en compte. Aussi bien à La Rochelle qu'à Lauradieu ou à La Catette, l'utilisation de plaques suppose finalement leur découpe ultérieure en lames.

De la même manière, dans l'ensemble des monnayages rencontrés au cours de cette étude, la production des flans passe systématiquement par une production préliminaire de carreaux. C'est leur mise en forme ultérieure qui traduit différents niveaux de technicité. Ces derniers sont, par ailleurs, associés à des attentes différentes de la part de ceux qui les mettent en œuvre. C'est à partir de ce critère de simplicité que peuvent maintenant être abordées ces questions de mise en forme des flans.

Dans le cadre des activités de faux-monnayage, on pouvait s'attendre à observer les procédés de fabrication les moins complexes, dans la mesure où les contraintes de fabrication ne peuvent *a priori* être plus lourdes que dans une fabrication officielle. La découpe arrondie des rondelles de métal dans les carreaux paraissait, à première vue, être la méthode la plus simple pour obtenir rapidement des flans. Or, c'est l'étude du mobilier métallique de l'atelier royal de La Rochelle, et, en particulier, de celui qui a pu être associé à des monnayages de bas billon, qui a révélé la chaîne opératoire la plus rudimentaire. Elle ne demande qu'un martelage des carreaux à plat sur l'enclume afin de les arrondir globalement. Une fois mis en forme, ils ne peuvent toutefois présenter qu'un faciès à peu près circulaire. Il s'agit, cependant, d'une caractéristique connue des monnaies à faible pouvoir libératoire comme le confirme la prise en compte des exemplaires présentés dans les catalogues numismatiques. Il existe donc une tolérance de l'autorité émettrice vis-à-vis de la fabrication de ces espèces de faibles valeurs, certainement afin d'encourager les maîtres d'ateliers à les produire. Ces derniers étaient peu disposés à délivrer ces pièces qui leur rapportaient peu, par rapport au

travail fourni. Cette configuration a d'ailleurs parfois entraîné des manques de petites monnaies dont les faux-monnayeurs ont pu profiter.

Sur l'échelle de la technicité des chaînes opératoires de préparation des flans rencontrées dans cette étude, c'est une méthode propre au faux-monnayage qui occupe la seconde place. Il s'agit ici de la simple découpe arrondie des flans dans les carreaux. Elle a été mise en évidence tant à Lauradieu qu'à La Catette. Les discussions développées dans cette thèse ont, par ailleurs, mis en évidence l'impossibilité de décider d'une telle technique dans un monnayage officiel au marteau. Elle ne peut garantir les précisions requises quant à la masse des espèces délivrées par les ateliers monétaires. Dans la mesure où cette contrainte n'est pas prise en compte dans les contrefaçons monétaires rencontrées ici, ce procédé pouvait s'appliquer.

C'est finalement le paramètre économique qui peut encourager un faussaire à choisir un autre processus de préparation. Car il faut rappeler que la découpe arrondie des ébauches est également la plus productrice de déchets de coupes. Ces déchets constituent autant de métal qui n'est pas transformé en monnaie sans refontes supplémentaires. L'exemple du faux-monnayage de la grotte de La Catette rend particulièrement compte d'une volonté légitime d'économie de matière. Son étude atteste de la mise en œuvre de deux chaînes opératoires de fabrication très différentes dont une seule se fonde sur la découpe arrondie des flans (Figure 258). A partir des types monétaires contrefaits, le facteur économique apparaît primordial dans les définitions des procédés retenus. Dans la mesure où le faussaire qui a officié dans cette cavité a également choisi de contrefaire des espèces de très faible valeur, il s'est alors imposé une gestion plus rationnelle de ses matières premières. Elle sous-entend le développement de techniques plus complexes de mise en forme des flans, qui marquent une transition des procédés faisant intervenir une simple découpe vers ceux qui demandent des déformations plastiques des matériaux (Figure 258). Dans ce sens, elle se rapproche des opérations du monnayage au marteau en vigueur dans les ateliers monétaires officiels. Elle témoigne, en effet, de carreaux ayant été ajustés et par la suite flatis. Cependant, le rapport d'analogie se limite principalement à ces deux caractéristiques. En définitive, les discussions ont montré que malgré ces ressemblances, la finalité des traitements retenus n'était pas la même. La volonté de gérer efficacement les métaux de ce monnayage de faible valeur a pu être exclue dans le cadre des fabrications officielles.

L'étude du mobilier métallique de La Rochelle a permis de définir en parallèle de la chaîne opératoire évoquée plus haut pour la frappe des monnaies de bas billon, une seconde beaucoup plus proche de celle décrite par les sources

monétaires (Figure 258). Elle représente le processus de production le plus complexe de cette étude. Les discussions qui traitent des étapes de battage, d'ajustage et de rechaussage des carreaux parallèlement flatis ont, de plus, permis de comprendre la finalité de telles opérations. Si elles interviennent à première vue pour obtenir des flans de forme arrondie, il ne s'agit pas de la motivation première du monnayeur. Les coupes d'ajustage et les rechaussages interviennent principalement pour garantir la qualité métrologique et l'uniformité morphologique des futures monnaies. C'est notamment grâce à la prise en compte des quotas de déchets auxquels sont soumis les ouvriers monétaires qu'il a été possible de vérifier cette hypothèse.

Cette étude du monnayage au marteau a donc mis en évidence cinq chaînes opératoires différentes associées à trois ateliers monétaires. Celles-ci révèlent la mise en œuvre de processus plus ou moins longs et complexes. Le choix de retenir une technique par rapport à une autre dépend finalement des attentes des artisans responsables de ces fabrications. Cette affirmation souligne leur maîtrise des opérations d'élaboration. Suivant les monnayages, elles leur permettent de favoriser certains paramètres comme la rapidité et la facilité d'exécution, ou la gestion des matières première et le respect de contraintes morphologiques.

En ce qui concerne les traitements qui peuvent être qualifiés de mécaniques lorsque les flans sont arrondis en partie grâce à un martelage à plat sur l'enclume, l'épaisseur initiale des carreaux constitue un paramètre de réglage critique. Lors de son épreuve, N. Briot s'est appliqué à rechercher la morphologie optimale de ses matières premières. A l'image de ce dernier, il faut supposer que les ouvriers monétaires devaient avoir les mêmes reflexes lorsqu'ils étaient confrontés à un nouveau monnayage. Cette mise au point préliminaire est particulièrement nécessaire dans une production de masse dans la mesure où elle optimise la répartition du travail.

Avant d'aborder la question des procédés chimiques également rencontrés dans cette étude, il est indispensable de revenir sur une des dernières étapes des fabrications monétaires. Il s'agit du martelage en pile qui permet de bouer les flans. L'importance de ce dernier justifie qu'il ait été attesté dans au moins quatre des cinq chaînes opératoires de cette étude, grâce à l'observation de défauts caractéristiques (Figure 258). Cette technique qui apparaît dans les sources monétaires comme un moyen de garantir que les monnaies soient coulantes, a une finalité parallèle. C'est pourquoi elle se retrouve dans les faux-monnayage de la grotte de La Catette : rendre les pièces touchantes entre elles, n'est *a priori* pas le but recherché. En effet, le bouage des flans intervient pour une grande part dans la

qualité de l'impression des motifs lors de la frappe des monnaies, en garantissant la planéité des flans.

En suivant le système de production de la monnaie, les opérations qui interviennent après la mise en forme des flans peuvent être qualifiées de traitements chimiques dans la mesure où elles font appel à des réactions, notamment d'oxydation, d'attaque acide et d'amalgamation. Dans les exemples de faux-monnayage, elles se retrouvent dans les traitements d'argenture à l'amalgame, alors que dans le contexte officiel, elles se rencontrent lors du blanchiment. Cette dernière question a pu faire l'objet d'un développement particulier.

Avant d'être frappés, les flans produits grâce à une série de martelages et de recuits par les ouvriers des ateliers royaux, sont portés au blanchiment. Si la finalité de ce procédé est en premier lieu d'éliminer les oxydes qui se forment à la surface des ébauches au cours de leur mise en forme, les réactions en jeu ont également la particularité de mettre en évidence, lorsqu'il est présent, l'argent contenu dans les alliages travaillés. C'est notamment sur cette propriété remarquable qu'ont porté les discussions développées dans cette étude. A partir de la reconstitution, en laboratoire, de l'ensemble du processus de fabrication, les mécanismes réactionnels intervenant dans l'obtention d'un aspect argenté à la surface des échantillons ont pu être identifiés. Si l'hypothèse d'un enrichissement superficiel ne demandait qu'à être confirmée, le mécanisme proposé permet d'attester sa formation pour des alliages dans lesquels l'argent peut ne représenter que 20 % de la masse totale.

Les observations métallographiques à partir des analogues expérimentaux ont, de plus, révélé que le processus d'enrichissement recherché ne résulte pas seulement du bain de blanchiment. Il débute au stade initial de la chaîne opératoire, c'est-à-dire dès les premières mises en forme mécaniques des lames. De même, il peut être considéré comme terminé lors de la frappe des monnaies. Puisque c'est à cette occasion, que l'aspect argenté mat des alliages blanchis devient brillant grâce au compactage de la couche superficielle qui présente initialement une structure très aérée. L'épaisseur définitive de l'enrichissement en argent n'a pour seule origine que l'importance et le nombre des séquences de martelages et de recuits nécessaires à la production des flans. Ces observations rendent compte de la maîtrise du procédé par les ouvriers monétaires. Ils sont conscients de l'importance des traitements thermiques sur la qualité de leur blanchiment. Preuve en est l'ultime recuit que doivent subir les flans une fois mis en forme. Alors que celui-ci intervient notamment pour relâcher leurs contraintes

internes afin qu'ils ne se fracturent pas lors de la frappe, ce traitement thermique n'est pas réalisé dans le contexte de leur mise en forme. Il est en effet, explicitement réalisé dans le cadre du blanchiment. Cette configuration, à première vue surprenante, trahit la connaissance par les monétaires de l'intérêt de cette opération pour l'aspect final des monnaies.

De même, la composition du bain de décapage est une preuve supplémentaire des qualifications des artisans au sein des ateliers. Dans un premier temps, ils ont abandonné l'utilisation des acides forts qui dissolvent une partie de l'argent contenu dans les alliages monétaires, au profit de la gravelle moins réactive. Ils ont ensuite ajouté délibérément du chlorure de sodium à leur solution de blanchiment dans le seul but d'accélérer les réactions de dissolution des oxydes de cuivre. Le coût supplémentaire associé à l'achat de ce sel, se voit compensé car il intervient dans le cadre d'une fabrication industrielle. La durée du traitement devient un paramètre important lorsqu'il s'agit de traiter un grand nombre d'objets.

C'est également grâce à la mise en évidence du mécanisme réactionnel du blanchiment qu'il a été possible de révéler sur la coupe métallographique d'un flan de l'atelier de La Rochelle, les structures liées au processus de blanchiment. Car se superposent à ces dernières celles qui résultent des phénomènes de corrosion intervenant lors des périodes d'enfouissement. L'évaluation, à partir d'analyse d'image, du taux de compactage du matériau considéré, constitue un paramètre fiable pour différencier les enrichissements d'origines distinctes. L'épaisseur de celui résultant uniquement de la mise en forme du flan archéologique a alors pu être évaluée à environ 60 µm dans un alliage contenant environs 30 % massiques d'argent.

Finalement, le succès du blanchiment des alliages monétaires à base d'argent et de cuivre tient à deux caractéristiques principales de ces mélanges. Ils sont particulièrement favorables au processus de blanchiment puisqu'ils permettent d'obtenir un aspect argenté pour une gamme très étendue de composition en métal précieux, comprise entre 20 et 100 % en masse. Les propriétés impliquées sont, dans un premier temps, la résistance de l'argent aux réactions d'oxydation à haute température mais également la tendance qu'a ce métal à former, avec le cuivre, un alliage relativement hétérogène à l'échelle microscopique.

En ce qui concerne les procédés d'argenture à l'amalgame mercure-argent, mis en évidence dans le cadre des deux activités de faux-monnayage parallèlement étudiées, les principaux résultats se résument à des observations originales proposées à partir de plusieurs essais expérimentaux. Ces derniers ont notamment souligné un paramètre qui n'est presque jamais pris en compte dans les recherches

qui traitent de telles techniques. Dans la mesure où elles impliquent ici l'application d'un composé à base de mercure à la surface d'alliages cuivreux, ces derniers doivent obligatoirement être préalablement préparés pour que cette opération soit réalisable. L'analyse d'objets en cours de mise en forme retrouvés dans la grotte de Lauradieu a d'ailleurs offert l'opportunité de mettre en évidence un tel traitement préliminaire, ce qui ne peut être envisagé à partir d'un artefact archéologique dont la fabrication aura été menée à terme.

Globalement, les reconstitutions proposées ont rendu compte des nombreux savoir-faire techniques que suppose la maîtrise de ce procédé. Conjugués à d'autres données extraites de l'étude des faux-monnayages de Lauradieu et de La Catette, ils ont permis de proposer un profil de leur responsables respectifs, qui fait état de hautes qualifications dans le travail des métaux, tout à fait compatibles avec celles que doit posséder un orfèvre.

L'ultime opération qui caractérise l'ensemble des monnayages rencontrés dans le cadre de cette thèse, est la frappe des monnaies. Si elle est évidente dans un contexte de fabrication monétaire légale, elle l'est moins dans le cadre du faux-monnayage. C'est d'ailleurs parce qu'elle n'est pas simple à mettre en œuvre qu'elle a été retenue dans les ateliers royaux afin justement de décourager les faussaires. Ceux qui ont officié à Lauradieu comme à La Catette ont pourtant su s'affranchir de cette difficulté, ce qui ajoute à la qualité de leur production.

En définitive, cette thèse a permis de proposer plusieurs chaînes opératoires de fabrication de monnaies par la technologie du marteau en France, à la fin du Moyen Age et au début de la Période Moderne. Les discussions n'ont cependant pas été limitées à la détermination des procédés mis en œuvre. Elles ont pu également porter sur la finalité et l'origine de leur définition dans les processus de productions rencontrés. Cette conclusion a, par ailleurs, donné l'opportunité de confronter des fabrications légales et clandestines. Les rapports d'analogie qui s'en sont dégagés, ont souligné une nouvelle fois la maîtrise des artisans qui leur permet d'adapter leurs méthodes de fabrication aussi bien à leurs attentes, qu'aux contraintes auxquelles ils sont soumis.

En préalable à la présentation des perspectives envisageables pour ce premier travail de recherche, il faut rappeler certaines données mises en évidence lors des discussions développées autour des exemples de faux-monnayage. C'est par deux

approches différentes, qu'il a été possible d'évaluer les bénéfices minimum associés à chacune des activités. Dans la grotte, c'est le *corpus* de déchets de coupe qui en tant que négatif de la production organisée, a permis d'estimer le gain qu'a pu espère toucher le faussaire. Il se situe entre 1180 et 1416 deniers tournois. Pour la cavité de La Catette, il s'agit en revanche d'une somme potentielle, puisqu'elle a été calculée à partir des flans inachevés laissés sur place par le faux-monnayeur. Elle représente environ 1440 deniers. Bien que mettant en œuvre des chaînes opératoires différentes, il apparaît que les deux faussaires pouvaient compter sur des profits relativement comparables.

Les données jusqu'alors disponibles quant aux volumes de fausses monnaies fabriquées par des faussaires, provenaient de témoignages extraits de lettres de rémissions ou de compte rendus de procès. Les informations proposées dans ce travail présentent elles aussi leurs limites, puisqu'il s'agit d'estimations *a minima*. Elles sont, en revanche, affranchies du risque de déformation lié à la nature des sources jusqu'à présent considérées. Elles constituent en quelque sorte une observation matérialiste de la production des faux-monnayeurs.

Les perspectives principales de cette étude sont bien sûr d'élargir le panorama qui vient d'être ébauché, des techniques de fabrications monétaires par la technologie du marteau. Dans le cadre légal, en particulier, il serait intéressant de mettre en place une réflexion diachronique, afin de vérifier l'origine des techniques qui ont, par ailleurs, potentiellement évolué durant le Moyen Age, à l'image notamment de la composition du bain de blanchiment. De même, une approche géographique pourrait révéler de possibles particularismes locaux, parallèlement aux attentes centralisées de l'autorité émettrice. La chaîne opératoire du monnayage de bas billon de l'atelier de La Rochelle constitue-t-elle, par exemple, un procédé propre à cette fabrique ? Enfin, il faut rappeler que la problématique du monnayage de l'or n'a pu être développée, simplement par manque de matériel. Aujourd'hui notre connaissance de cette fabrication passe uniquement par les sources monétaires qui avancent une analogie avec la production des monnaies d'argent.

Toutefois, aussi attractifs que puissent paraître ces axes de recherches, l'atelier de La Rochelle qui vient d'être étudié, reste toujours le seul site français ayant fait l'objet de fouilles.

Ce travail de recherche a montré la nécessité de fonder de telles réflexions techniques sur l'étude d'objets en cours de mise en forme. Avant de pouvoir poursuivre une telle recherche, il est donc indispensable d'avoir une démarche

archéologique afin de caractériser de nouveaux sites monétaires, à l'exemple de ce qui a été fait dans le cadre de cette thèse pour l'atelier de Montreuil-Bonnin. Il est cependant aujourd'hui difficile de proposer l'organisation de sondages supplémentaires autour de ce lieu, pour des raisons notamment pratiques, liées à l'occupation du château. C'est pourquoi, il faut proposer un autre candidat.

Les futures prospections pourront profiter de la méthode de prospection géochimique inédite exposée dans le cadre de cette thèse. Les recherches ultérieures s'appuieront sur les observations relevées lors de son application durant les travaux archéologiques de Montreuil-Bonnin et de La Catette. Les mesures effectuées lors des fouilles ont souligné l'intérêt de considérer le paramètre stratigraphique jusqu'alors négligé. A l'avenir, sa prise en compte devra permettre de compléter la réflexion géochimique à partir d'une estimation de la puissance d'une pollution potentiellement paléométallurgique préalablement mise en évidence. Bien qu'elle nécessite l'organisation d'une seconde phase d'échantillonnage, celle-ci est tout à fait compatible avec le protocole d'analyse proposé. La limite principale devient alors la méthode de prélèvement à la tarière qui, suivant les sols rencontrés, peut se révéler inefficace pour la caractérisation de profondeurs importantes.

En considérant maintenant plus spécifiquement les développements qui concernent les problèmes de faux-monnayage, le nombre des sites connus ne représente pas ici une limite forte. En revanche, contrairement à ce qui vient d'être envisagé pour la question du monnayage royal, notamment sur un élargissement des discussions à une plus grande échelle géographique, c'est une démarche inverse qui peut, ici, être en premier lieu la plus profitable. Dans ce cas, le territoire audois qui s'illustre par de nombreuses activités monétaires illégales, dont font partie les deux exemples caractérisés dans cette étude, représente un cadre idéal. Une réflexion globale doit notamment révéler les paramètres qui ont favorisé la multiplication de telles pratiques dans cet espace du Sud de la France. Par ailleurs, c'est par une telle approche qu'il est envisageable de constater l'existence de réseaux potentiels trahis par exemple, par des spécificités techniques. Dans ce sens, il est peut-être nécessaire de proposer un développement archéologique fondé sur une prospection systématique des cavités naturelles audoises que l'on sait, aujourd'hui, propices à l'organisation de faux-monnayages. Toutefois, cette étude gagnerait, dans un premier temps, à considérer les comptes rendus de prospections des préhistoriens. Ces derniers, plus particulièrement amenés à rechercher des indices d'occupation humaine au sein des cavités, sont des témoins privilégiés de la présence de vestiges liés aux opérations clandestines

qui ont pu également s'organiser dans ces espaces. C'est d'ailleurs à l'occasion de l'une des expertises de l'archéologue J. Guilaine, que le faux-monnayage de la grotte de Lauradieu a été mis en évidence. Enfin, la donnée géochimique pourra, comme lors des fouilles de La Catette, constituer un outil qui ne doit pas être négligé.

Pour conclure, le matériel archéologique issu des fouilles de La Rochelle, a offert la possibilité de proposer la première étude globale des techniques mises en œuvre dans la chaîne opératoire du monnayage au marteau, en vigueur dans les ateliers monétaires français jusqu'au milieu du XVII^{e} siècle. Bien que cette recherche gagne à être élargie à d'autres *corpus* pour l'instant trop rares, cette thèse fondée sur une approche multidisciplinaire, constitue une première référence à laquelle devront être confrontées les futures discussions portant sur les techniques monétaires médiévales.

Glossaire

Ajuster carreau : découper des morceaux d'un carreau afin de lui faire approcher la masse de la monnaie qu'il doit permettre de produire.
Approcher carreau : enlever très peu de métal à un carreau lorsque ce dernier est un peu plus lourd que la monnaie qu'il doit permettre de produire.
Battre la chaude : martelage d'une lame pour l'amincir et approcher l'épaisseur de la monnaie qu'elle doit permettre de produire.
Blanchir : procédé chimique qui consiste à nettoyer les flans et mettre en valeur l'argent qu'ils contiennent par enrichissement de surface.
Bouer : frappe des flans en pile afin de les rendre parfaitement plans, se touchant d'assiette.
Bouilloir : récipient de cuivre dans lequel est réalisé le blanchiment des flans.
Brassage : mélange homogénéisant lors de la préparation d'un alliage.
Brassoire : ustensile utilisé dans le brassage des alliages.
Carreau : morceau de métal carré découpé dans une lame et qui sera mis en forme pour devenir un flan puis une monnaie.
Ceppeau : souche de bois qui accueille la pile. Il est scellé dans le sol à l'extrémité d'un banc de monnayeur.
Cisaille : déchet de coupe.
Cisoires : cisailles utilisées pour la découpe des lames et des carreaux.
Coins monétaires : matrice de fer permettant d'imprimer les motifs monétaire sur une monnaie.
Cornue : Récipient formé d'une partie arrondie et d'un col étroit, long et courbé, se terminant en pointe, dont on se sert pour la distillation.
Couper carreau : découpe une lame en carreaux.
Crasse : déchet résultant d'une coupellation, il s'agit de la coupelle de cendre ayant absorbée un partie des oxydes formés lors de l'opération.
Creuset : récipient qui peut être porté à haute température notamment utilisé pour fondre des métaux ou réaliser des alliages.
Degré de confiance : appliqué à un résultat analytique, il s'agit de la probabilité que la valeur mesurée concorde avec la valeur réelle recherchée.
Dénéral : poids étalon des monnaies. Il est parfois fort de l'espèce, c'est-à-dire légèrement plus lourd que la monnaie fabriquée.
Différent : symbole apposé sur les monnaies frappées au sein d'un atelier. Il représente le graveur et le maître de l'atelier qui en ont chacun un et qui leur est propre. Cela permet une « traçabilité » en cas de litige après émission d'une monnaie.
Donner le bouillitoire : parfaire blanchiment en plaçant les flans dans un second bain de traitement.

Eau forte : solution d'acide nitrique et sulfurique utilisée dans le premier procédé de blanchiment.
Ebarber : découper les défauts de coulée des lames moulées en sable.
Ecrouissage : durcissement d'un métal lors de sa déformation plastique suite à la formation de défauts interne.
Eslaizer : martelage des flans afin de les redresser après qu'ils aient été déformés lors d'un rechaussage.
Esserper : voir **ébarber**
Estanque : pince pour tenir les flans et les carreaux en pile pour les rechausser.
Flan : rondelle de métal destinée à être frappée pour devenir une monnaie.
Flatir : martelage au flatoir, des carreaux et des flans visant à leur donner le volume et la circonférence des espèces fabriquées.
Flatoir : marteau utilisé pour flatir les carreaux et les flans. Il a une forme équivalente à celle du rechaussoir en étant cependant plus massif. Il pèse jusqu'à quatre kilogrammes.
Fournaise : équipe de travail au sein des ateliers monétaires généralement composée d'un monnayeur et de quatre ouvriers monétaires.
Géochimie : étude de la composition des sols.
Glette : oxydes de plomb ou de cuivre formés lors des opérations d'affinage par coupellation.
Gravelle : sous produit de la fermentation alcoolique. Il s'agit d'un solide cristallisé, composé en majorité de bitartrate de potassium ou de sodium.
Gravimétrie : procédé minéralurgique qui consiste à séparer un minerai de roches stériles en profitant de leur différence de masse volumique.
Grènetis : cordon de petits grains en relief qui entourent parfois la légende d'une monnaie.
Halde : tas constitué des roches stériles, déchets de l'exploitation minière.
Incuse : caractérise une monnaie qui n'a été frappée que sur une face.
Isotope : deux éléments sont isotopes l'un de l'autre lorsqu'ils ont le même nombre de proton mais un nombre de neutrons différent. Un radio-isotope est instable et aura dans ce cas tendance à se transformer en un isotope stable par une réaction nucléaire.
Lame : lingot dans lequel sont découpés les carreaux. Il a une épaisseur et une largeur voisines de celles de la monnaie frappée.
Métallurgie extractive : métallurgie qui permet d'obtenir un métal de son minerai.
Minéralurgie : différentes opérations de traitement d'un minerai pour le séparer des roches stériles.
Pile : coin monétaire fixe dans le ceppeau.
Point secret : point apposé à un endroit précis sur les monnaies émissent par un atelier afin de reconnaître les productions de ce dernier. Sa position est différente selon les fabriques.
Poussier : poudre de charbon de bois.
Rabaisser carreau : enlever peu de métal au carreau lorsqu'on ajuste ou approche carreau.
Rechausser : frapper sur leur tranche les carreaux ou les flans en pile afin de les arrondir.
Rechaussoir : marteau en forme de doloire de tonnelier d'environ un

kilogramme utilisé dans pour rechausser les carreaux et les flans.

Recuchon ou **ricochon** : apprenti ouvrier monétaire.

Recuit : chauffage qu'il est nécessaire de mettre en œuvre au cours de la mise en forme mécanique d'un métal afin d'éviter qu'il ne se fissure à cause de son écrouissage.

Remède de poids, de loi : marge supérieur ou inférieure qui définit un intervalle dans lequel doivent se trouver les caractéristiques des monnaies. Elle concerne la masse des espèces, pour le remède de poids et le titre de leur alliage, pour le remède de loi.

Rendre la brève : opération au cours de laquelle les ouvriers chargés de la mise en forme de flans doivent rendre leur production ainsi que les déchets qu'ils ont produits. Il s'agit d'un contrôle qui doit notamment prévenir les vols de métaux.

Rengrenner : action de refrapper un flan dont le motif monétaire n'a pas été bien marqué. Il est parfois possible d'observer un trefflage sur les flans qui ont été rengrennés.

Roche stérile : roche qui ne présente pas un intérêt économique, dans laquelle est inclus un minerai.

Rognage : pratique assimilé au faux-monnayage qui consiste à récupérer une partie du métal précieux des monnaies en les rognant ou en grattant leur tranche.

Tailleur : ouvrier chargé de graver les coins monétaires ou les poinçons utilisés dans la fabrication de ces derniers.

Terres de lavures : différents éléments qui se trouvent avoir été en contact avec des métaux précieux lors des opérations de fabrication monétaire. Ces matériaux sont collectés pour être retraités afin d'en extraire la matière précieuse dans la mesure où elles peuvent s'être déposées à leur surface.

Trébuchage : opération illégale qui consiste à peser les espèces pour faire circuler les plus légères et thésauriser ou refondre les plus lourdes.

Trefflage : défauts possibles lors d'un rengrennage. Si le flan est mal replacé dans les motifs du coin, il arrive que lors de la seconde frappe il y ait un décalage qui conduit à l'obtention d'un double motif sur la monnaie.

Trousseau : coin monétaire mobile que le monnayeur pose sur le flan qu'il aura placé sur une pile.

Type monétaire : ensemble des caractéristiques d'une monnaie (légendes et figures) qui la différencie des autres.

Vieille terre : voir **terres de lavures**.

Table des figures et des tableaux

FIGURES :

Figure 1 - Ateliers monétaires français au XVI[e] siècle. 20

Figure 2 - Représentation d'un atelier monétaire. 68

Figure 3 - Pince à creusets, cisoires, estanque, pelle à bouillir, marteau. Laissez-passer des monnayeurs de l'atelier de Châlons-en-Champagne, 1591. 91

Figure 4 - Double tournois de La Rochelle, 1593. 104

Figure 5 - La chaîne opératoire réglementaire de monnayage au marteau selon les sources monétaires. 110

Figure 6 - La Rochelle en Poitou-Charentes. 130

Figure 7 - La Rochelle et sa place du château en 1575. 133

Figure 8 - Relevé des deux campagnes de fouilles de l'atelier monétaire (dessin E. Bayen). 134

Figure 9 - Photo d'ensemble du four en trou de serrure, atelier monétaire royal de La Rochelle (cliché P. Ernaux, AFAN, n° 35-13). 137

Figure 10 - Coupe de l'entrée de fosse de décendrage. 137

Figure 11 - Coupe de l'entrée de la salle de chauffe du four. 137

Figure 12 - Plan de détail du four en trou de serrure, atelier monétaire royal de La Rochelle. 138

Figure 13 - Typologies des creusets de La Rochelle selon les contextes de découverte. 142

Figure 14 - Exemples de lame, carreaux, flans et déchets de coupe mis au jour lors des fouilles de l'atelier monétaire de La Rochelle. 145

Figure 15 - Répartition en nombre du *corpus* métallique. 146

Figure 16 - Répartition en masse du *corpus* métallique. 146

Figure 17 - Carreau non restauré. 147

Figure 18 - Stigmates de restauration. 147

Figure 19 - Flan restauré, reprise de corrosion. 147

Figure 20 - Répartition stratigraphique du *corpus* numismatique métallique. 148

Figure 21 - Carreau présentant des découpes nettes de ses coins. 148

Figure 22 - Flans présentant après leur restauration, un aspect argenté et cuivreux. 149

Figure 23 - Répartition en nombre du *corpus* métallique. 150

Figure 24 - Répartition en masse du *corpus* métallique. 150

Figure 25 - Exemples de résidus métalliques (US 3009). 151

Figure 26 - Grotte de Lauradieu dans l'Aude (11). 153

Figure 27 - Répartition du mobilier métallique de faux-monnayage au sein de la grotte de Lauradieu (Aude). 155

Figure 28 - Monnaies découvertes dans la grotte de Lauradieu (Aude). 158
Figure 29 - Flans mis au jour dans la grotte de Lauradieu (Aude). 158
Figure 30 - Tôles métalliques découvertes dans la grotte de Lauradieu (Aude). 159
Figure 31 - Chutes correspondant à la découpe d'un seul coin des carreaux. 159
Figure 32 - Chutes correspondant à la découpe simultanée de deux coins. 159
Figure 33 - Chutes correspondant à la découpe simultanée de trois coins. 160
Figure 34 - Chutes correspondant à la découpe simultanée de quatre coins. 160
Figure 35 - Rognures de rectification. 160
Figure 36 - Répartition en nombre du *corpus*. 160
Figure 37 - Répartition en masse du *corpus*. 160
Figure 38 : Prospection archéologique géochimique. 180
Figure 39 - Comparaison d'un échantillon pollué avec un blanc. 183
Figure 40 - Exemple de cartographie (simulation). 195
Figure 41 - Courbes de calibration du plomb (ANRC-Niton). 204
Figure 42 - Courbes de calibration du zinc (ANRC-Niton). 206
Figure 43 - Courbes de calibration du cuivre (SARM-Niton). 209
Figure 44 - Courbes de calibration du zinc (SARM-Niton) 209
Figure 45 Courbes de calibration du plomb (SARM-Niton). 210
Figure 46 - Courbes de calibration de l'arsenic (SARM-Niton). 210
Figure 47 - Courbes de corrélation de l'arsenic avec le plomb (Niton). 211
Figure 48 - Courbes de calibration du fer (SARM-Niton). 211
Figure 49 - Courbes de calibration du manganèse (SARM-Niton) 212
Figure 50 - Courbes de calibration du nickel (SARM-Niton). 212
Figure 51 - Montreuil-Bonnin en Poitou-Charentes. 217
Figure 52 - Plan du château de Montreuil-Bonnin 218
Figure 53 - Représentation potentielle d'une cisaille de monnayeur dans l'église de Montreuil-Bonnin. 221
Figure 54 - Carte générale du site et des différentes prospections mises en œuvre. 223
Figure 55 - Prospection géophysique électrique au pied du donjon dans l'enceinte du château de Montreuil-Bonnin (G. Bonnamour, Arkémine). 226
Figure 56 - Sondages électriques à l'extérieur du château pour un écartement a = 1 m. 227
Figure 57 - Carte géochimique du plomb et localisation des différents prélèvements. 231
Figure 58 - Carte géochimique du cuivre. 231
Figure 59 - Pièce d'un moule à méreau. 235
Figure 60 - Illustration de la frappe monétaire. 236
Figure 61 - Parois de four et scories du sondage 3. 238
Figure 62 - Répartition entre céramiques communes et métallurgiques du sondage 3. 239

Figure 63 - 414 fragments de creusets trouvés en position secondaire lors des fouilles de 2006 et 2007.....240
Figure 64 - Morphologie observable à partir de fragments de creusets de Montreuil-Bonnin. 241
Figure 65 - Grotte de La Catette sur la commune de Rivel dans le département de l'Aude. 243
Figure 66 - Topographie de la grotte de La Catette et localisation de la fouille archéologique. 245
Figure 67 - Répartition du mercure sur l'espace de travail dégagé par la fouille.....249
Figure 68 - Répartition spatiale du *corpus* métallique. 252
Figure 69 - Les quatre types monétaires contrefaits dans la grotte de La Catette. 257
Figure 70 - Faux douzain présentant un droit négatif.....258
Figure 71 - Moulage d'un flan du *corpus* présentant des fragments de légende monétaire. 258
Figure 72 - Echantillons extraits du corpus global présentant les principales morphologies. 259
Figure 73 - Répartition en nombre du *corpus* métallique.....261
Figure 74 - Répartition en masse du *corpus* métallique. 261
Figure 75 - Poinçons en alliage ferreux de la grotte de La Catette.....262
Figure 76 - Fosse initiale du four. 273
Figure 77 - Le four en trou de serrure. 273
Figure 78 - Le cendrier.....273
Figure 79 - Pose de la sole sur le cendrier.....273
Figure 80 - Détail de la construction du foyer.....275
Figure 81 - Chappe d'argile. 275
Figure 82 - Reconstitution expérimentale. 276
Figure 83 - Sole après nettoyage. 278
Figure 84 - Chauffage de la sole. 278
Figure 85 - Disposition des creusets.....278
Figure 86 - Couvercle sur les creusets.....279
Figure 87 - Four en chauffe.....279
Figure 88 - Relevés de la première journée de fonte (20-07-07).....281
Figure 89 - Relevés de la seconde journée de fonte (21-07-07). 282
Figure 90 - Consommation de charbon lors des deux premières journées. 285
Figure 91 - Masse d'argent fondue quotidiennement. 286
Figure 92 - Vitesse quotidienne moyenne de fonte. 287
Figure 93 - Détail des 18 journées de fonctionnement du four. 288
Figure 94 - Argent destiné à la fonte retrouvé dans le cendrier lors des expérimentations. 293
Figure 95 - Coulée à la pince avec un masque pour le visage, des gants et un tablier de cuir. 295
Figure 96 - Répartition en nombre du *corpus*. 298
Figure 97 - Répartition en masse du *corpus*. 298
Figure 98 - 15 profils types de bords observés.....300

Figure 99 - Répartition des bords selon la typologie établie.....301

Figure 100 - Répartition des épaisseurs.....301

Figure 101 - Répartition des diamètres internes. 302

Figure 102 - Diamètres mesurés en fonction des épaisseurs moyennes de pâte pour chacun des fragments de creuset étudiés.....303

Figure 103 - Chaîne opératoire de mise en forme des creusets. 304

Figure 104 - Coulée avec une pince. 306

Figure 105 - Analyses par fluorescence X de la surface des fragments de creusets de Montreuil-Bonnin avec mise en évidence des dosages de dépôts métalliques. 307

Figure 106 - Trois profils réalisés sur un dépôt métallique par LA-ICP-MS, montrant une répartition très hétérogène du cuivre et de l'argent. 310

Figure 107 - Trois profils réalisés sur un dépôt métallique par LA-ICP-MS, montrant une répartition très hétérogène du cuivre et du plomb. 311

Figure 108 - Scories accumulées dans le creuset et métal à la base interne du bec de coulée (exp.). 315

Figure 109 - Projections d'argent sur la surface interne des creusets (exp.). 315

Figure 110 - Creusets de Montreuil-Bonnin conservés au musée Sainte-Croix de Poitiers. 317

Figure 111 - Estimation des variations de masse de métal contenues dans un creuset de Montreuil-Bonnin pour 1,3 litre de métal. 320

Figure 112 - Comparaisons entre les résultats obtenus par fluorescence X et ANRC. 329

Figure 113 - Analyse en composantes principales des données analytiques du *corpus* métallique de l'atelier monétaire de La Rochelle. 332

Figure 114 - Quantification des traces d'or dans le monnayage d'argent et de billon. 336

Figure 115 - Comparaison du corpus de La Rochelle avec les analyses de monnaies de D. Richet *et al.* et B. Collin *et al.*. 340

Figure 116 - Le laiton dans le monnayage de La Rochelle.....343

Figure 117 - Le laiton dans le monnayage de La Rochelle.....344

Figure 118 - Le plomb dans le monnayage de La Rochelle.....351

Figure 119 - Inclusions de plomb dans un échantillon du groupe D. 352

Figure 120 - Rejet du plomb aux joints de grains d'alliage d'un échantillon du groupe E.....352

Figure 121 - Fissures et rupture d'un alliage cuivreux expérimental contenant 10 %mass de plomb. 352

Figure 122 - Répartition en nombre des échantillons métalliques selon les types d'alliages. 354

Figure 123 - Répartition en masse des échantillons métalliques selon les types d'alliages.....354

Figure 124 - *Corpus* de flans et de carreaux de La Rochelle confronté aux données collectées par J. Duplessy et F. C. Spooner.....359

Figure 125 - Monnayage d'argent de La Rochelle. 360

Figure 126 - Monnayage de billon de La Rochelle.....362

Figure 127 - Répartition stratigraphique des 81 échantillons du groupe C.....363

Figure 128 - Monnayage de bas billon de La Rochelle. 364

Figure 129 - Carreaux partiellement corrodés (US 1067). 365

Figure 130 - Le monnayage de cuivre de La Rochelle. 366

Figure 131 - Valeur des différents monnayages par rapport au nombre d'échantillons rassemblés. 368

Figure 132 - Comparaison des données collectées sur les creusets monétaires de Montreuil-Bonnin et de La Rochelle. 370

Figure 133 - Creusets triangulaire dans le four d'un atelier monétaire du XVI^{e} siècle. 374

Figure 134 - Inclusions dans un alliage cuivra-argent expérimental contenant 70 %mass de cuivre et 30 %mass d'argent (n° 05-30). 377

Figure 135 - Evaluation du nombre de fontes mensuelles nécessaires en fonction des estimations de productions de l'atelier de Montreuil-Bonnin. 382

Figure 136 - Lames découvertes dans l'atelier monétaire de La Rochelle 388

Figure 137 - Coulée en lingotière. 389

Figure 138 - Les deux parties du moule en sable avant d'être plaquées l'une contre l'autre. 389

Figure 139 - Lames expérimentales (XP n° 05-01 et n° 04-01). 390

Figure 140 - Oxydes de cuivre à l'interface métal-air d'une lame lingotée (XP n° 04-01). 392

Figure 141 - Centre d'un réseau de dendrites de solution solide proeutectique de cuivre (3078-11, attaque à l'hydroxyde ammoniacal). 393

Figure 142 - Solution solide proeutectique de cuivre déformée d'un flan de billon (1020-01, sans attaque). 393

Figure 143 - Absence d'oxydes à la surface d'un carreau de La Rochelle présentant une structure très proche d'un brut de coulée (3078-11, sans attaque). 394

Figure 144 - Moulage mettant en évidence les marques de martelage sur une des lames découvertes dans l'atelier de La Rochelle (1067-07). 399

Figure 145 - Martelage sur l'arête de l'enclume. 401

Figure 146 - Elargissement d'une lame avec l'arête d'un marteau. 401

Figure 147 - Lame courbée par des martelages non homogènes (n° 05-02). 403

Figure 148 - Déchets de coupe retrouvés à La Rochelle et présentant des fissurations avec grossissement d'un détail (3009-16). 404

Figure 149 - Carreaux de La Rochelle présentant quatre bords de découpe, monnayages de billon et de cuivre 407

Figure 150 - Carreaux de La Rochelle présentant encore des bords de lame, monnayages de billon de cuivre 407

Figure 151 - Carreau du monnayage d'argent présentant deux bords de lame opposés (1021-12). 408

Figure 152 - Carreau du monnayage de cuivre présentant deux bords de lame opposés (1021-19). 408

Figure 153 - Différentes découpes. 408

Figure 154 - Carreaux de bas billon bruts de découpe. 409

Figure 155 - Séquence de découpe d'une lame de bas billon. 410

Figure 156 - Répartition de l'épaisseur des carreaux et mise en évidence de celles des lames. 412

Figure 157 - Chaîne opératoire de découpe arrondie. 414

Figure 158 - Proportions de déchets de coupe dans la fabrication de l'atelier de Crémieu pour la période du 14 décembre 1419 au 17 avril 1420. 417

Figure 159 - Répartition de l'estimation des masses de déchets de coupe résultant de la préparation d'un flan. 418

Figure 160 - Proportions de déchets de coupe dans la fabrication de l'atelier de Bayonne pour la période du 2 janvier 1555 au 11 août 1556. 420

Figure 161 - Chaîne opératoire globale mise en œuvre lors de l'expérimentation (carreau, carreau battu, carreau ajusté avec 7,4 % de déchets, flan rechaussé, trois flans). 423

Figure 162 - Différentes découpes circulaires. 425

Figure 163 - Pourcentages expérimentaux de déchets de coupe. 425

Figure 164 - Variation de la masse de différents flans suivant leur épaisseur. 430

Figure 165 - Carreau d'argent épais. Bord de coupe droit en cassure et en double biseau (3009-14). 435

Figure 166 - Carreau de cuivre. Bord de coupe droit et en double biseau (3009-13-03). 435

Figure 167 - Bord de coupe avec fracture (n° 06-01). 436

Figure 168 - Bord de coupe avec arrachement (n° 06-03). 436

Figure 169- Carreau de bas billon découpé au ciseau à métal (n° 06-02). 436

Figure 170 - Carreau découpé au ciseau à métal (1021-19). 437

Figure 171 - Séquence de coupe. 438

Figure 172 - Carreaux brut de découpe. 440

Figure 173 - Carreaux battus. 440

Figure 174 - Carreau d'argent battu et ajusté (1021-12). 441

Figure 175 - Carreau de billon battu et ajusté (1672-02-07). 441

Figure 176 - Estimation des déchets de coupe résultant de l'ajustage des carreaux de deniers tournois de l'unité stratigraphique 3009. 441

Figure 177 - Rechaussages expérimentaux (n° 08-A). 443

Figure 178 - Monnayage de quarts d'écu de La Rochelle à différents stades de mise en forme. 444

Figure 179 - Carreau présentant les stigmates de l'utilisation d'estanques (3009-14b). 445

Figure 180 - Carreau expérimental placé à l'extrémité de la pile lors d'un rechaussage (n° 08-14). 445

Figure 181 - Evolution de l'épaisseur des ébauches en cours de mise en forme en fonction de leur longueur selon les différents monnayages de La Rochelle. 446

Figure 182 - Martelage en bordure d'un flan de quart d'écu (2010-03). 447

Figure 183 - Pile de flans avant et après avoir été bouée (n° 08-A). 449

Figure 184 - Flans boués expérimentalement mettant en évidence un défaut potentiel de cette opération (n° 08-15). 450

Figure 185 - Flan de billon présentant un défaut après avoir été boué (3068-05). 450

Figure 186 - Flan de bas billon présentant un défaut après avoir été boué (1071-02-01). 450

Figure 187 - Coupe métallographique, macles thermiques et grains de recristallisation (3009-13bi). 452

Figure 188 - Carreau du monnayage de cuivre fissuré (1058-01). 453

Figure 189 - Flan du monnayage de bas billon (1018-02). 453

Figure 190 - Evolution de la morphologie des carreaux de bas billon au cours de leur mise en forme. 454

Figure 191 - Coupe métallographique mettant en évidence une structure fibreuse associée au monnayage de bas billon (1061-02). 455

Figure 192 - Flan de billon découvert à La Rochelle (1029-01). 461

Figure 193 - Coupe métallographique d'un flan de billon découvert à La Rochelle (1029-01). 461

Figure 194 - Observation de la coupe du flan : structure d'alliage modifiée à la surface (Echantillon 1029-01, sans attaque métallographique). 462

Figure 195 - Cartographie X mettant en évidence l'appauvrissement en cuivre dans la couche transformée ainsi que la présence de chlore (1029-01). 463

Figure 196 - Lame coulée en lingotière (n° 05-30). 469

Figure 197 - Lame après le troisième recuit (a. n° 05-36), lame après le dernier martelage (b. n° 05-37). 470

Figure 198 - Montage expérimental de blanchiment. 471

Figure 199 - Echantillons avant et après avoir été blanchis (la monnaie en argent permet de comparer la couleur et la brillance). 475

Figure 200 - Processus d'enrichissement superficiel résultant de la mise en forme et du blanchiment de l'alliage expérimental. 476

Figure 201 - Couche superficielle très dense d'enrichissement expérimental (n° 05-55). 478

Figure 202 - Diagramme d'Ellingham du système avec mise en évidence des domaines de stabilité des composés en fonction de la température. 481

Figure 203 - Evolution de la couleur d'un monnayage de cuivre : a - Flan avant blanchiment (n° 08-10), b - Flan après blanchiment (n° 08-11), c - Monnaie frappée (n° 08-12), d - Monnaie oxydée (n° 08-13). 488

Figure 204 - Flan de bas billon dont la surface oxydée présente une couleur sombre (1072-01). 489

Figure 205 - Alliage cuivre-argent titré à 10 % de métal précieux (n° 04-10). La phase riche en argent (blanche) est trop dispersée dans la solution de cuivre pour permettre un enrichissement. 489

Figure 206 - Domaine d'enrichissement des alliages monétaires. 490

Figure 207 - Flan de billon recuit pendant une semaine et dont la surface s'écaille (n° 05-10). 492

Figure 208 - Echantillon expérimental blanchi à l'eau forte (n° 08-60). 495

Figure 209 - Le sel de la solution de blanchiment n'est pas indispensable (n° 05-20). 497

Figure 210 - Corrosion galvanique dans le bain de blanchiment. 499

Figure 211 - Variation du taux de compactage de la couche d'enrichissement (1029-01). 501

Figure 212 - Paire de coins monétaires utilisée lors des expérimentations. 505

Figure 213 - Evolution de la brillance, un flan blanchi mat ne devient brillant qu'après sa frappe (n° 04-59 et 60). 506

Figure 214 - Frappe expérimentale en binôme avec un coin emmanché. 507

Figure 215 - Blanc à la couronne.....513
Figure 216 - Denier de François-Phébus. 516
Figure 217 - Concentrations de cuivre et de mercure rapportées à celle de l'argent dans la couche d'argenture d'un flan de la grotte de Lauradieu.....522
Figure 218 - Répartitions des longueurs de lame.....524
Figure 219 - Exemples de perforations des fragments de tôles. 525
Figure 220 - Répartitions des épaisseurs des objets de la grotte de Lauradieu.....527
Figure 221 - Morphologies de bords de lames. 528
Figure 222 - Amorces de découpes. 532
Figure 223 - Différentes découpes progressives.....533
Figure 224 - Répartition des différents types de déchets de coupes selon le nombre de coins coupés. 534
Figure 225 - Argenture partielle à la surface du blanc à la couronne. 536
Figure 226 - Couche argentée sur le cœur de laiton partiellement oxydé d'un flan (échelle : 10 µm). 536
Figure 227 - Détail de la tranche argentée du blanc à la couronne (échelle : 0,1 mm).....537
Figure 228 - Cartographies X de la surface d'un flan présentant du mercure sans argent. 539
Figure 229 - Application difficile de l'amalgame à la surface d'un échantillon de laiton (n° 06-10). 541
Figure 230 - Application facile de l'amalgame à la surface d'un échantillon de laiton préalablement recouvert de mercure (n° 06-11).....541
Figure 231 - Les faux douzains aux croissants de la grotte de La Catette. 556
Figure 232 - Fausses monnaies et essais de frappe de la grotte de La Catette.....557
Figure 233 - Relation entre l'antimoine et l'arsenic dans le cuivre utilisé pour le faux-monnayage de La Catette. 566
Figure 234 - Profils ICP-MS avec ablation laser obtenus pour le fragment de réal (CA n° 2).....567
Figure 235 - Exemples de rognures d'aspect argenté, la première présente des inscriptions.....568
Figure 236 - Spectres de fluorescence X de l'échantillon CA 331.....569
Figure 237 - Fragment d'alliage cuivre-argent (CA 148).....569
Figure 238 - Répartitions des épaisseurs mesurées sur l'ensemble des carreaux et flans découverts dans la grotte de La Catette. 572
Figure 239 - Répartition des diamètres des flans et des longueurs des carreaux de La Catette.....574
Figure 240 - Evolution des mensurations suivant les mises en forme. 576
Figure 241 - Exemple de morphologies associées au faux-monnayage de bas billon de La Catette. 578
Figure 242 - Reconstitution de la morphologie initiale des carreaux de ce monnayage et estimation de la quantité de déchets associée (CA 73).....579
Figure 243 - Reconstitutions de la morphologie avant ajustage de 58 carreaux du *corpus* de La Catette. 579
Figure 244 - Séquence de découpe des carreaux. 580

Figure 245 - Evaluation des proportions de coupe à partir de 58 carreaux ajustés du corpus de La Catette. 581

Figure 246 - Evolution morphologique au sein du *corpus* de carreaux et de flans du groupe A.... 582

Figure 247 - Proportion expérimentale de déchets de coupe associée à la chaîne opératoire de La Catette (n° 07-01 à 24). Comparaison avec la reconstitution du monnayage officiel (n° 08-20 à 52). 583

Figure 248 - Flans du groupe A présentant des défauts après avoir été boués. 584

Figure 249 - Déchets de coupe résultant de la préparation des flans du groupe C. 586

Figure 250 - Répartition des épaisseurs des flans du groupe C confrontée à celle associée à des déchets de coupe. 587

Figure 251 - Type particulier de rognure découverte au sein de La Catette (CA 159). 588

Figure 252 - Séquence de découpe arrondie d'un flan dans un carreau. 588

Figure 253 - Essais expérimentaux de découpe arrondie de flans (n° 07-B). 589

Figure 254 - Flans du groupe C présentant des défauts après avoir été boués. 590

Figure 255 - Flans du groupe B. 592

Figure 256 - Différentes découpes circulaires (n° 07-A). 593

Figure 257 - Proportions expérimentales de déchets de coupe associées au faux-monnayage de bas billon et de billon. 594

Figure 258 - Les chaînes opératoires des monnayages de La Rochelle ainsi que des grottes de Lauradieu et de La Catette. 611

TABLEAUX :

Tableau 1 - Compilation des différentes données relevées. 84

Tableau 2 - Inventaire des différentes proportions de sel et de gravelle, extrait du *Mémoire sur la fabrication des sols de billon...*. 98

Tableau 3 - Limites de détection dans deux sols de références, 60 s d'analyse, 99,7 % de degré de confiance (données Niton). 193

Tableau 4 - Masse moyenne des individus des différents *corpus*. 255

Tableau 5 - Analyse par LA-ICP-MS d'un dépôt métallique à la surface d'un fragment de creuset. 309

Tableau 6 - Analyse par ICP-MS de la solution de blanchiment. 474

Tableau 7 - Analyses par ANRC de l'échantillon de cuivre (% massiques). 520

Tableau 8 - Analyses par ANRC des échantillons de laiton (% massiques). 520

Tableau 9 - Correspondance entre chutes de coupes et flans produits (Ø : Diamètres). 545

Tableau 10 - Analyses par ANRC d'un échantillonnage du *corpus* de La Catette (% massiques). 565

Tableau 11 - Analyse par ANRC d'un fragment d'alliage cuivre-argent découvert à La Catette (CA 148, % massiques). 570

Tableau 12 - Groupes morphologiques des flans de La Catette. 575

Adrien Arles

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.

Suite aux fouilles du second atelier monétaire royal de La Rochelle (17), une grande quantité de matériel a pu être mis au jour. Cette découverte est exceptionnelle par deux aspects puisqu'il s'agit à ce jour de l'unique atelier officiel fouillé en France et que les structures et objets découverts permettent en une première lecture, d'ébaucher une chaîne de production de la monnaie. Ce matériel précurseur complété de céramiques provenant de l'atelier médiéval de Montreuil-Bonnin (86) constitue la base de cette étude archéométrique inédite des techniques monétaires officielles. Cette recherche, par définition multidisciplinaire, s'appuie sur la caractérisation physico-chimique de corpus archéologiques mais également sur une étude des sources historiques : traités monétaires, procès-verbaux, comptes d'atelier... Enfin, les reconstitutions paléométallurgiques participent pour une part importante aux discussions engagées. Elles renseignent sur la complexité des opérations tout en produisant des analogues librement étudiables, comparés aux échantillons anciens. La compilation de toutes les données collectées permet non seulement de proposer une description des techniques du monnayage au marteau telles qu'elles étaient mises en œuvre dans les fabriques monétaires jusqu'au milieu du XVII^{e} siècle et de révéler les matières premières utilisées mais également de comprendre le fondement des opérations pratiquées.

En tant que fabrication monétaire particulière, les techniques propres au faux-monnayage ont parallèlement été considérées par le biais de l'étude de deux exemples localisés au début de la Période Moderne dans le département de l'Aude (11). En suivant la même démarche expérimentale, il a été possible de mettre en évidence les particularismes de ces activités et de révéler plusieurs analogies avec les techniques officielles.

Mots-clés : monnayage au marteau, monnaie, atelier monétaire, faux-monnayage, prospection archéologique.

Coining and counterfeiting. The hammered coin production in France (XIIIth - XVIIth centuries). A physicochemical, experimental and historical approach.

In the Nineties excavations made in La Rochelle (France) have produced objects of archaeometallurgical evidence with regards to the second royal mint. For the time being, this workshop is still the only one that has been discovered in France. Moreover, the observations of the artefacts seem to allow the reading of the whole money making process. These archaeological samples, complemented with ceramics from the medieval mint of Montreuil-Bonnin (France), have been studied by an archaeometric approach to propose an original research on the official French hammer striking process. This multidisciplinary study is based on the analysis of historical samples but also on a bibliographic compilation: monetary treaties, official reports, mint accounts… The experimental work takes an important part in the study too. Providing more than experimental samples easily studied and compared with the archaeological ones, this pragmatic method allows to point out the complexity of a technique. Finally, the gathering of all data defines the raw materials and the processes used in the French hammer coining until the mid XVIIth century, but also their respective purposes. As a particular coinage, counterfeiting has also been studied through two post-medieval examples that took place in Southern France caves. The experimental study reveals the originalities of these illegal activities besides some links with the official processes.

Keywords: hammered coinage, coin, mint, counterfeiting, archaeological prospection.

INSTITUT DE RECHERCHE SUR LES ARCHÉOMATÉRIAUX
Centre Ernest-Babelon
CNRS – Université d'Orléans
3D rue de la Férollerie
45071 Orléans Cedex 2 - FRANCE

UNIVERSITÉ D'ORLÉANS

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES DE L'HOMME ET DE LA SOCIÉTÉ

CENTRE ERNEST-BABELON

INSTITUT DE RECHERCHE SUR LES ARCHÉOMATÉRIAUX

THÈSE présentée par :

Adrien ARLES

soutenue le : **13 février 2009**

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'université d'Orléans**

Discipline/ Spécialité : Histoire

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

Volume 2 : Annexes

THÈSE dirigée par :

M. Bernard GRATUZE	Directeur de Recherche - CNRS
M. Florian TÉREYGEOL	Chargé de Recherche - CNRS

RAPPORTEURS :

M. Pierre FLUCK	Professeur - Université de Haute Alsace
M. Ivan GUILLOT	Professeur - Université de Paris 12

JURY :

M. Alain DAVESNE	Professeur - Université d'Orléans, Président du jury
M. Pierre FLUCK	Professeur - Université de Haute Alsace
M. Bernard GRATUZE	Directeur de Recherche - CNRS
M. Ivan GUILLOT	Professeur - Université de Paris 12
M. Jacques POIRIER	Professeur - Université d'Orléans
M. Florian TÉREYGEOL	Chargé de Recherche - CNRS

Table des annexes

Les annexes présentées ici sont classées en trois parties principales. La première rassemble les présentations des différentes méthodes expérimentales utilisées dans cette thèse. La seconde regroupe l'inventaire des *corpus* archéologiques et historiques étudiés. Quant à la troisième, elle est constituée de plusieurs études métallographiques et compte rendus d'expérimentations paléométallurgiques.

Annexe A : Unités et symboles p. 5

Annexe B : Analyse par activation aux neutrons rapides de cyclotron p. 6

Annexe C : Analyses sous rayonnement X p. 11

Annexe D : Microscopie électronique à balayage et microanalyse X p. 19

Annexe E : Analyse en composantes principales (ACP) p. 23

Annexe F : Etude métallographique p. 25

Annexe G : Diagrammes de phases p. 31

Annexe H : Analyses de calibration du spectromètre de fluorescence X portable Niton Xlt 700 p. 33

Annexe I : *Corpus* de fragments de creusets de Montreuil-Bonnin p. 37

Annexe J : *Corpus* des fragments de creusets en relation avec la fonderie de l'atelier monétaire de La Rochelle p. 51

Annexe K : *Corpus* des vestiges métalliques de l'atelier monétaire de La Rochelle p. 57

Annexe L : Analyse des résidus métallurgiques de l'atelier monétaire de La Rochelle p. 68

Annexe M : Compte de fabrication de l'atelier de Crémieu pour la période du 14 décembre 1419 au 17 avril 1420 p. 73

Annexe N : Compte de fabrication de l'atelier de Bayonne pour la période du 2 janvier 1555 au 11 août 1556 p. 78

Annexe O : *Corpus* de la grotte de Lauradieu p. 81

Annexe P : *Corpus* de la grotte de La Catette p. 86

Annexe Q : Références des reconstitutions expérimentales p. 95

Annexe R : Productions expérimentales de déchets de coupe
p. 100

Annexe S : Etude du blanchiment, analyses par diffraction des rayons X p. 102

Annexe T : Analyses d'image de l'échantillon 1029-01 p. 103

Annexe U : Etude métallographique du faux-monnayage de la grotte de Lauradieu p. 104

Annexe V : Expérimentations d'argenture à l'amalgame mercure-argent dans une fabrication médiéval de fausse monnaie p. 114

Annexe W : Evaluation du taux de cisaille du faux-monnayage de bas billon de la grotte de La Catette p. 129

Annexe X : Etude métallographique du faux-monnayage de bas billon de la grotte de La Catette p. 131

Bibliographie des Annexes : p. 137

Table des figures et tableaux : p. 140

Annexe A :
Unités et symboles

Présentation de différentes unités monétaires, de masse, de titre rencontrés dans cette étude.

Unités de masse[1] :

Unité	Abréviation	Masse (g)	Ratio (livre)	Ratio (denier)
1 grain	g.	0,0531	1/9216	1/24
1 denier	d.	1,27	1/384	1
1 gros	-	3,82	1/128	3
1 once	o.	30,6	1/16	24
1 marc*	m.	244,75	1/2	192
1 livre	l.	489,5	1	384

* marc de Paris ou marc de Troyes

Unités de titre[2] :

Le titre qui représente la quantité de métal précieux contenue dans les alliages monétaires est évalué en carats pour l'or et en deniers pour l'argent.

L'or pur est à 24 carats, ces derniers se divisant en 32 trente-deuxièmes. Un alliage qui contient 50 % en masse de ce métal précieux est à 12 carats.

L'argent pur est à 12 deniers, ces derniers se divisant en 24 grains. Un alliage qui contient 50 % en masse de ce métal précieux est à 6 deniers.

Unités monétaire[3] :

1 livre (l.) = 20 sous (s.).
1 sou = 12 deniers (d.).
1 liard = 3 deniers.

Unité de longueur :

1 pouce = 2,7 cm.

[1] Bompaire M. *et al.*, *Numismatique médiévale, monnaies et documents d'origine française*, Turnhout, Belgique, Brepols, coll. « L'atelier du médiéviste », t. 7, 2000, p. 290-300.
[2] *Ibidem*, p. 300-301.
[3] *Ibid.*, p. 290-291.

Annexe B :
Analyse par activation aux neutrons rapides de cyclotron

L'analyse par Activation aux Neutrons Rapides de Cyclotron (ANRC) est une méthode de caractérisation élémentaire non-destructive. De plus, compte tenu des dimensions des échantillons analysés dans cette étude, elle peut être considérée comme une méthode globale. Deux étapes distinctes forment le processus d'analyse par ANRC : dans un premier temps, l'échantillon est irradié par un flux de neutrons rapides ; dans un deuxième temps, les rayonnements γ émis par les radioisotopes formés lors l'irradiation sont mesurés, et le signal correspondant aux raies caractéristiques de chacun des radioisotopes permet de déterminer la composition élémentaire de l'objet.

La première application de l'analyse de monnaies anciennes à l'aide de neutrons rapides date de la fin des années 1960[4]. L'énergie des particules chargées incidentes utilisée par P. Meyers (26 MeV) ne permettait toutefois pas de doser les éléments-traces contenus dans les alliages[5]. C'est une énergie des particules incidentes plus faible, de 17,5 MeV, qu'il a été décidé d'employer au Centre Ernest-Babelon pour l'analyse des monnaies anciennes par ANRC[6]. Cette énergie caractéristique permet d'analyser les constituants majeurs comme les éléments mineurs et traces[7]. Les irradiations sont effectuées au cyclotron du CEMHTI (Conditions Extrêmes et Matériaux : Haute Température et Irradiation – CNRS, Orléans).

La première étape de l'analyse par ANRC est l'irradiation de l'échantillon dans un flux de neutrons rapides. Les neutrons rapides sont caractérisés par leur énergie : celle-ci est supérieure à celle qui caractérise les neutrons thermiques et les neutrons épithermiques. L'énergie des neutrons rapides est supérieure à 1 MeV environ.

Dans l'analyse par ANRC, les neutrons rapides qui irradient l'échantillon sont créés par la réaction d'un faisceau de particules chargées (des deutons) sur une cible métallique de numéro atomique faible. Cette cible est dans notre cas constituée par un disque en béryllium très pur de 60 mm de diamètre et de 8 mm d'épaisseur (Figure 1). Le béryllium permet une bonne conduction thermique, un rendement en neutrons élevé et offre une durée de vie importante. La réaction qui se produit est : ${}^{9}_{4}\mathrm{Be} + {}^{2}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{1}_{0}\mathrm{n} + {}^{10}_{5}\mathrm{B}$. Les neutrons émis lors de l'irradiation de la cible en béryllium ont une énergie comprise entre quelques dizaines d'eV et plusieurs MeV. L'énergie moyenne est de 7,5 MeV[8]. Cette valeur permet un dosage de la plupart des constituants des alliages monétaires à base d'argent et de cuivre : argent, cuivre, plomb, or, zinc, étain, arsenic et antimoine.

---

[4] Meyers p., Non-destructive activation analysis of ancient coins using charged particles and fast neutrons, *Archaeometry*, vol. 11, 1969, p. 67-84.

[5] Guerra M. F. *et al.*, Ion beam activation analysis with a cyclotron, dans Oddy W. A. *et al.*, eds., *Metallurgy in numismatics,* Londres, Angleterre, Royal numismatic society, 1998, t. 4, p. 15.

[6] Beauchesne F., *Analyse non destructive du cuivre et de ses alliages par activation à l'aide de neutrons rapides de cyclotron*, Thèse de doctorat de Sciences Physiques de l'Université d'Orléans, Orléans, 1986, 282 p.

[7] Guerra M. F. *et al.*, Ion beam activation analysis..., *op. cit.*, p. 17.

[8] Beauchesne F., *Analyse non destructive..., op. cit.*, p. 38.

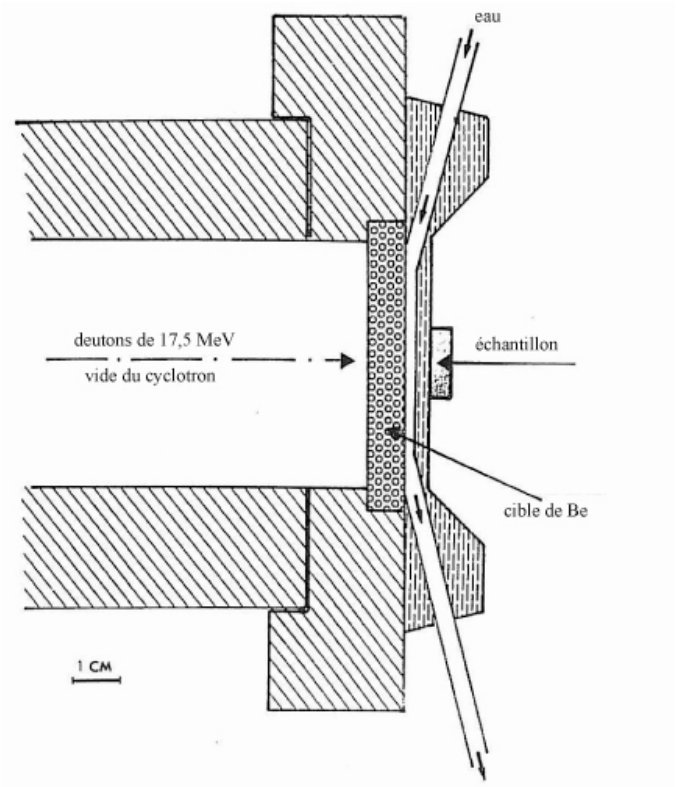


Figure 1 - Schéma de la cible de production de neutrons rapides.

Les conditions d'irradiation utilisées pour l'analyse des alliages monétaires par ANRC sont les suivantes : les particules incidentes sont des deutons d'une énergie de 17,5 MeV ; l'intensité du faisceau est de 30 µA. La durée d'irradiation est en revanche variable suivant les types d'échantillons analysés. Ils sont différenciés principalement selon le taux d'argent qu'ils contiennent. Lorsque le taux de métal précieux dépasse environs 20 % de la masse des échantillons[9], il est indispensable de minimiser la durée d'irradiation afin d'éviter la formation d'une quantité trop importante des différents radioisotopes de cet éléments. Le temps d'irradiation t, nécessaire pour un échantillon, de masse m, constitué majoritairement d'argent peut être obtenu d'après la formule[10] $t = 50/m$, établie empiriquement grâce à l'expérience acquise au Centre Ernest-Babelon. Il sera vu plus loin qu'une telle configuration a des conséquences importantes sur la mesure des échantillons irradiés. Lorsque le taux d'argent dans les alliages analysés ne dépasse pas 20 %, il est possible de les irradier pendant une durée plus longue, selon la formule $t = 3000/m$.

Le choix de l'énergie des particules incidentes a été défini afin de minimiser les interférences qui peuvent être de deux types : nucléaires et spectrométriques. Dans le cas des interférences nucléaires, deux éléments stables vont produire le même radio-élément. Les interférences spectrométriques sont dues à des raies d'énergie identique, ou à la résolution en énergie du détecteur, qui peut être insuffisante pour séparer deux raies d'énergies voisines.

La seconde étape de l'analyse par ANRC consiste en la mesure des rayonnements γ émis par l'échantillon soumis préalablement au flux de neutrons rapides. L'irradiation de la matière constituant l'échantillon est à l'origine de réactions nucléaires qui entraînent l'émission de

[9] Une estimation de la quantité d'argent contenue dans un échantillon peut être rapidement obtenue par une mesure de spectrométrie de fluorescence X. La précision de cette méthode pour les types d'échantillons analysés est ici suffisante pour fournir une estimation du titre en métal précieux des alliages.
[10] Le temps est exprimé en secondes et la masse en grammes.

rayonnements γ. Ces réactions sont du type (n,n'), (n,2n), (n,p), (n,α), (n,γ) et (n,3n). L'énergie des rayonnements produits par l'échantillon est caractéristique des radioisotopes qui en sont à l'origine ; la mesure de l'intensité du signal de chacune des raies correspondant aux radioisotopes des éléments que l'on souhaite analyser permet de déterminer la composition de l'échantillon.

Les mesures de spectrométrie γ sont effectuées à l'aide d'un détecteur semi-conducteur de germanium. Le détecteur est relié à un préamplificateur, un amplificateur, un convertisseur analogique-numérique, et à un analyseur multi-canal. Un photon est détecté s'il transfère une partie ou la totalité de son énergie à un électron. Le semi-conducteur convertit le rayonnement γ en courant, proportionnellement à l'énergie des photons γ reçus. L'analyseur multi-canal convertit le signal et affiche un spectre d'énergie sous la forme d'un histogramme à 4096 canaux dont la largeur est une bande d'énergie ΔE, et dont la hauteur est proportionnelle au nombre de photons mesurés à cette énergie.

Un radioisotope créé par le bombardement neutronique peut être identifié grâce à l'énergie des rayons γ qu'il émet et à sa période de décroissance. L'identification de chaque rayonnement γ émis par les différents radioisotopes permet de connaître l'élément qui leur a donné naissance. La mesure de l'activité, c'est-à-dire l'aire du pic photoélectrique, est proportionnelle à la quantité de radio-isotopes correspondants.

Pour la mesure de spectrométrie γ, l'échantillon radioactif est placé sur le détecteur. L'ensemble est entouré d'un château de plomb afin de protéger le détecteur des rayonnements ambiants. Le cristal du détecteur doit être maintenu à très basse température afin de limiter le bruit de fond intrinsèque du dispositif de mesure. Il est donc continuellement refroidi à l'azote liquide.

Les conditions dans lesquelles nos mesures de spectrométrie γ diffèrent les temps d'irradiation mis en œuvre. Pour les alliages d'argent, les mesures évaluent principalement l'activité des radioisotopes de périodes courtes[11]. La mesure de l'activité des échantillons analysés doit dans ce cas intervenir rapidement après leur irradiation. En pratique, elle intervient environ deux heures après l'irradiation. Cette durée d'attente est nécessaire pour que le temps mort[12] du détecteur, qui est proportionnel à l'activité, décroisse suffisamment pour que la mesure des radio-isotopes de courte période soit juste. Une première mesure courte d'environ une heure est donc effectuée, principalement pour le dosage des éléments majeurs constituant les échantillons, soit l'argent et le cuivre dans notre cas. La période de désintégration du radio-isotope ^{65}Ni généré par le cuivre lors de l'irradiation est de 2,5 h ; il convient donc d'en mesurer le signal quelques heures seulement après l'irradiation au plus tard. Les radio-isotopes caractéristiques des éléments mineurs les plus abondants sont détectés lors d'une seconde mesure de spectrométrie γ d'une durée de quelques heures. Une troisième mesure plus longue permet enfin de doser les éléments mineurs et traces peu abondants, et permet de corriger certaines interférences comme celle entre les radio-isotopes de l'argent et du plomb d'énergie caractéristique identique (279,1 keV). Une quatrième mesure de plusieurs jours peut être effectuée plusieurs semaines après l'irradiation : cette durée permet la décroissance des radio-isotopes de courte période ; on s'affranchit ainsi des interférences de ceux-ci avec d'autres radio-isotopes d'éléments très peu abondants et de période plus longue. La diminution du bruit de fond permet de plus une meilleure sensibilité. Les contraintes d'utilisation du dispositif de mesure de spectrométrie γ utilisé n'ont pas permis d'effectuer une quatrième mesure de manière systématique.

[11] Compte tenu du temps d'irradiation limité, la quantité des radio-éléments de longues périodes est peu importante.

[12] Le temps mort correspond à la durée pendant laquelle le détecteur ne peut acquérir de signal entre la mesure de deux évènements. Un temps mort trop important peut être à l'origine d'une mesure de signal inexacte, et donc entraîner des erreurs dans la composition qui sera déterminée.

Les irradiations plus longues mises en œuvre pour l'analyse des alliages à base de cuivre permettent la formation de plus grandes quantité d'isotopes de longue période de décroissance. La gestion du programme d'analyse est dans ce cas moins contraignante dans la mesure où il est possible d'irradier plus d'échantillon lors de chaque séance hebdomadaire sans que l'activité des échantillons ne devienne trop faible pour permettre une analyse fiable. Après avoir été irradiés, l'activité des échantillons ne peut cependant pas être mesurée rapidement, compte tenu de la durée importante d'irradiation, la quantité de radio-éléments de courte période est très importante. Il en résulte un grand nombre d'interférences. C'est pourquoi, il est nécessaire d'attendre deux jours, le temps pour laisser décroitre l'activité des radioisotpes gênants.

Le cuivre qui dans le cadre d'irradiation de courtes durées est quantifié à partir du radioisotope de courte période ^{65}Ni, est alors mesuré à partir du ^{60}Co, radio-élément également généré à partir du cuivre mais de période de décroissance plus longue (Tableau 1).

Le ci-dessous présente les différents radioisotopes mesurés pour l'analyse des alliages monétaires. Le bismuth ne peut pas être caractérisé par ANRC : les périodes des radioisotopes créés par les réactions (n, p) et (n, α) sont trop longues pour en permettre la mesure dans les conditions d'irradiation et de mesure retenues.

Elément	Radioisotope	Réaction nucléaire	Période du radio-isotope	Energie du rayonnement γ (keV)
Ag	^{106m}Ag ^{105}Ag	^{107}Ag(n,2n)^{106m}Ag ^{107}Ag(n,3n)^{105}Ag	8,4 jours 41 jours	450,9 ; 717,3 280,3 ; 344,2
Cu	^{60}Co ^{65}Ni	^{63}Cu(n,α)^{60}Co ^{65}Cu(n,p)^{65}Ni	5,27 ans 2,5 heures	1332,5 1115,5 ; 1481,8
Sn	^{117m}Sn	^{118}Sn(n,2n)^{117m}Sn ^{117}Sn(n,n')^{117m}Sn ^{116}Sn(n,γ)^{117m}Sn	14 jours	159,0
Sb	^{122}Sb	^{123}Sb(n,2n)^{122}Sb	2,7 jours	564,0
Pb	^{203}Pb	^{204}Pb(n,2n)^{203}Pb	2,2 jours	279,2
Au	^{196}Au	^{197}Au(n,2n)^{196}Au	6,2 jours	333,0 ; 355,7
As	^{74}As	^{75}As(n,2n)^{74}As	17,8 jours	595,7
Zn	^{65}Zn	^{67}Zn(n,p)^{67}Cu ^{66}Zn(n,2n)^{65}Zn	61,9 heures 243,8 jours	184,5 1115,5

Tableau 1 - Radioisotopes caractéristiques mesurés par spectrométrie γ lors de l'analyse par ANRC.

Le calcul des concentrations en ANRC peut être effectué selon une procédure faisant intervenir des étalons métalliques sous forme de feuilles minces, ou un étalonnage interne[13]. Dans les deux cas, on considère que le rapport entre l'activité spécifique d'un élément donné et celle de l'étalon interne est constant, pour des conditions expérimentales identiques. Cela permet de calculer des coefficients d'activité spécifique relative qui sont employés pour déterminer la concentration de chaque élément à partir du signal mesuré pour chaque radioisotope.

Selon la première procédure, une feuille métallique mince de chacun des éléments que l'on souhaite doser doit être placée sur chaque face de l'échantillon lors de l'irradiation. La

[13] Beauchesne F., *Analyse non destructive..., op. cit.*, p. 69-87.

teneur de chaque élément est déterminée à partir des rapports de signaux et de masses entre l'échantillon et les feuilles minces constituées de métaux purs. La méthode de l'étalon mince est certes simple en théorie, mais contraignante en pratique : le nombre de mesures de spectrométrie γ est plus important en suivant cette approche, et chacun des éléments dosés doit être disponible sous forme de feuille métallique. Afin de limiter le nombre d'étalons, il est possible d'utiliser un moniteur de flux. Il permet de normaliser les conditions d'irradiation en donnant une mesure de la valeur du flux de neutrons. Le principe consiste à irradier dans un premier temps une masse connue d'un composé qui constitue le moniteur de flux avec la collection d'étalons nécessaires à l'analyse des sédiments. Les activités des étalons ainsi que celle d'un radioisotope du moniteur de flux sont évaluées et normalisées par leurs masses respectives. L'échantillon est par la suite également irradié avec une masse connue de moniteur de flux. Après mesures des activités résultantes de cette irradiation des différents radioisotopes formés, celle du moniteur de flux permet de les corriger pour qu'elles correspondent aux valeurs qui auraient été obtenues si l'échantillon avait été irradié en même temps que les étalons.

Pour la procédure d'étalonnage qui fait intervenir un étalon interne, le postulat de départ est que la somme des teneurs de tous les éléments caractérisés est égale à 100 %. L'incertitude liée à cette approximation peut être considérée comme négligeable dans les alliages monétaires, à l'intérieur desquelles l'élément le plus abondant parmi ceux qui ne peuvent être analysés est le bismuth, dont la teneur n'excède que très rarement 0,2 %. L'étalon interne doit être un radioisotope d'un élément relativement abondant dans les échantillons afin que l'incertitude sur la mesure de son signal soit négligeable. Il s'agit de l'argent dans le cadre d'irradiations courtes et du cuivre pour les longues.

Le calcul des concentrations pour l'analyse des alliages par ANRC est effectué à l'aide d'un programme de calcul développé spécifiquement au Centre Ernest-Babelon.

La précision des quantifications a été évaluée à environs 5 % relatifs[14]. Les limites de détection caractéristiques de l'ANRC ont été calculées dans différents types d'alliages (cuivre, argent, laiton, bronze) pour nos conditions d'irradiation et de mesures de spectrométrie γ. Les limites de détection ont été déterminées à partir d'un signal correspondant à trois fois la racine carrée du bruit de fond mesuré à l'énergie caractéristique du radio-isotope. Les valeurs de ces limites de détection apparaissent ci-dessous :

Eléments majeurs en %	Cuivre	Argent	Laiton	Bronze
Argent (Ag)	-	90	-	-
Cuivre (Cu)	100	10	83,6	87,8
Etain (Sn)	-	-	-	12
Zinc (Zn)	-	-	15	-
Limites de détection en ppm				
Antimoine (Sb)	0,1	25	3,5	20
Argent (Ag)	8	-	64	86
Arsenic (As)	0,5	120	6,1	5,9
Etain (Sn)	0,4	150	7,1	-
Or (Au)	0,2	100	3,1	20
Plomb (Pb)	25	1200	170	5
Zinc (Zn)	0,4	4500	-	300

Tableau 2 - Limites de détection calculées pour l'ANRC dans nos conditions d'irradiation et de mesures de spectrométrie γ.

[14] *Ibidem*, p. 87-91.

Annexe C :
Analyses sous rayonnement X

Dans cette étude, deux méthodes d'analyse des matériaux utilisant des rayonnements X ont été utilisées : la spectrométrie de fluorescence X qui renseigne sur leur composition élémentaire et la diffraction des rayons X qui donne des informations structurales.

I. Analyse par spectrométrie de fluorescence X

A. Spécificité de l'analyse

Ses caractéristiques d'utilisation font de l'analyse par spectrométrie de fluorescence X est une méthode très utilisée dans le domaine de l'archéométrie. Les objets analysés ne nécessitent pas de préparation particulière, et peuvent être de taille importante. Pour l'analyse, ils doivent seulement être placés dans le faisceau de rayons X. Cette technique est non destructive et non irradiante, caractéristiques essentielles pour la caractérisation d'objets du patrimoine.

Le principe de l'analyse par spectrométrie fluorescence X est de soumettre le matériau analysé à un rayonnement X. Du fait de leur énergie importante, les photons X vont arracher des électrons situés au cœur des atomes, près du noyau ; l'atome se retrouve ionisé. C'est l'effet photoélectrique. Un électron d'une couche périphérique va redescendre pour combler la place laissée vide par l'électron qui a été éjecté. Ce faisant, l'électron va céder de l'énergie, qui va être émise sous la forme d'un photon. L'énergie de ce photon, qui est aussi dans le domaine X, est égale à la différence d'énergie entre la couche périphérique et la couche au cœur, donc chaque atome va émettre des photons d'une énergie propre. C'est le phénomène de fluorescence. Il existe plusieurs transitions électroniques permises, ainsi un type d'atome, c'est-à-dire un élément chimique donné, peut émettre plusieurs types de photons. Pour nommer ces différents types de photons, on utilise la notation proposée par Karl Siegbahn en 1927. Ainsi, on parle de photon Kα1, Kα2, Kβ1, Kβ2, Lα1... Les lettres K, L, M… correspondants à la couche électronique d'origine de l'électron de cœur éjecté et les informations complémentaires désignent la couche d'où provient l'électron qui prend sa place en émettant un photon X. Il faut ensuite compter les photons réémis et mesurer leur énergie pour obtenir un spectre. Ce spectre est composé de plusieurs raies que l'on peut attribuer aux éléments qui composent un échantillon.

Dans cette étude, trois spectromètres de fluorescence X ont été utilisés. Ils se différencient par leurs sources de rayonnement X excitateur ainsi que par leurs détecteurs de photons X de fluorescence. En outre, suivant les logiciels de traitement du signal associés, certains appareillages permettent d'obtenir des informations quantitatives. Car si l'obtention par cette technique d'analyse de données qualitatives est très simple puisqu'elle consiste à indexer les raies caractéristiques des composés analysés, leur quantification nécessite un traitement préliminaire des spectres ainsi qu'un étalonnage. Les corrections logicielles doivent notamment permettre de s'affranchir des limites de cette méthode présentées plus loin.

1 - Source de rayonnement X excitateur

La production de rayons X est obtenue par bombardement d'une anode (anticathode) par un faisceau d'électrons extraits d'un filament puis accélérés par une différence de potentiel. Suite à cette excitation, l'anode émet des rayons X qui constituent ensuite la source excitatrice pour les analyses par spectrométrie de fluorescence X. C'est la composition chimique de l'anode qui fixe l'énergie de ce faisceau incident.

2 - Détecteur de rayonnement X

Il existe deux technologies principales pour la détection des rayonnements de fluorescence X. Les appareils dispersifs en longueur d'onde et ceux dispersifs en énergie. Les différents appareillages employés dans cette étude appartiennent toutes à la seconde catégorie.

Cette technologie permet de détecter les photons X de fluorescence selon une large gamme d'énergie. L'instrument de détection est un semi-conducteur dopé et polarisé. Il permet de compter les photons incidents selon leur énergie. Lorsque ces derniers pénètrent dans le semi-conducteur, ils provoquent une ionisation. Les électrons ainsi produits migrent sous l'effet du champ électrique de polarisation dont résulte une impulsion électrique proportionnelle à l'énergie du photon incident. L'inventaire des photons incidents suivant leur énergie permet d'obtenir le spectre de fluorescence.

Dans le cadre de cette étude trois appareillages différents ont été utilisés :

	Laboratoire Pierre Süe	**Centre Ernest-Babelon**	**Spectromètre portable**
Fabricant	Rigaku	Brüker AXS	Thermo Scientific
Modèle	Anode tournante	Artax	Niton Xlt 700
Source	Anode tournante	Tube de rayons X	Tube de rayons X
Anode	Molybdène	Molybdène	Argent
Détecteur de rayonnement X	Semi conducteur Si(Li)	Silicon Drift	Silicon PIN
Refroidissement du détecteur	Azote liquide	Effet Pelletier	Effet Peltier
Résolution du détecteur	180 eV	160 eV	200 eV
Analyse élémentaire	Qualitative et quantitative	Qualitative	Qualitative et quantitative
Logiciel de quantification	Winaxil	-	Fabricant

L'appareillage d'analyse par spectrométrie de fluorescence X du Laboratoire Pierre Süe du CEA de Saclay, est le montage présentant les limites de détection et les temps d'acquisition des plus bas. En contrepartie, il est aussi le plus volumineux : d'abord par la technologie du détecteur de photons X de fluorescence retenue, mais en particulier à cause de la source rayon X à anode tournante utilisée. Cette dernière permet de disposer d'un faisceau incident plus puissant que celui fournit par un tube de rayons X (Figure 2). Le rendement de la production de photons X lors du bombardement d'une anode avec des électrons n'est que de 1 %, le reste de l'énergie fournie est dissipée par effet Joule sous forme de chaleur. Le recours à une anode tournante permet de présenter à chaque instant une nouvelle surface

refroidie et d'augmenter ainsi la puissance du faisceau d'électrons. Avec un faisceau d'excitation de 1,2 kW pour les générateurs communs, on peut monter à 12 kW avec l'utilisation de l'anode tournante. Une telle augmentation de la puissance permet d'obtenir un flux plus important de photons X. On gagne ainsi en limite de détection et en temps d'analyse.

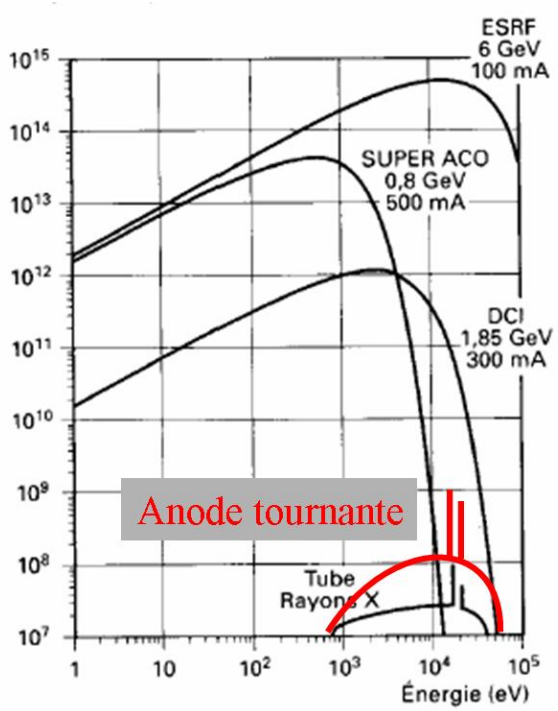


Figure 2 - Flux de rayons X selon les sources.

L'appareillage du Centre Ernest-Babelon a été utilisé pour réaliser des analyses qualitatives en vue de proposer un classement préliminaire de plusieurs *corpus* métallurgique.

Le spectromètre portable Niton a quant à lui été utilisé dans le cadre de prospection archéologiques mettant en œuvre des analyses géochimiques.

B. Limites de la méthode

L'utilisation du phénomène de fluorescence X en analyse, paraît facile à mettre en œuvre, en particulier si l'on recherche des informations qualitatives ; il est cependant nécessaire de présenter les phénomènes pouvant conduire à de fausses interprétations. Ils sont en grande partie dus à l'excitation du milieu autre que l'échantillon analysé par le rayonnement diffusé ou réfléchi.

Il est par ailleurs possible d'observer sur un spectre d'analyse des raies correspondant à des éléments qui n'appartiennent pas à l'échantillon analysé. Ils sont appelés pic de fuite ou pic d'empilement et n'ont pas la même origine. Le pic de fuite est intrinsèque au type de détecteur utilisé. Les photons X émis par la matière sont comptés grâce à un semi-conducteur, notamment au Laboratoire Pierre Süe, en silicium dopé au lithium Si(Li). Les photons qui arrivent pour être comptés peuvent avoir une partie de leur énergie absorbée par celui-ci. On peut donc observer pour les éléments dont les pics d'excitation sont importants, un pic de fuite à une énergie dont la valeur est celle du pic censé être mesuré, retranchée de l'énergie d'excitation du silicium (1,74 keV).

Le pic d'empilement a pour origine la possibilité pour le détecteur d'ajouter les énergies de plusieurs photons et de n'en compter qu'un seul alors associé à cette énergie. Ce problème n'est observable que pour les éléments majeurs dont l'intensité des raies est importante.

Ces deux phénoménes ne peuvent pas être évitées, cependant les connaissant, il est facile de ne pas faire de fausses interprétations. Il est possible de les prendre en compte via un logiciel de quantification qui redistribue les surfaces déplacées.

L'air est un milieu absorbant et peut stopper une partie des rayonnements. C'est le cas pour les éléments légers qui ont des raies d'excitation Kα de faible énergie, à l'inverse, c'est aussi le cas des éléments très lourds que le rayonnement incident ne peut pas exciter à leurs niveaux Kα. Ils doivent donc être observés grâce à leurs raies Lα de plus faible énergie qui risquent alors d'être absorbées. Sans compter que l'air peut aussi être source d'un rayonnement parasite, du fait qu'il est traversé par les photons émis par l'échantillon. Il est alors possible d'observer un pic d'argon qui peut être gênant lorsqu'il cache celui d'un élément qui appartient à l'échantillon, dans notre cas, l'argent. Le balayage d'hélium est un moyen d'éviter ces sources de pollution. Ne possédant qu'un seul doublet d'électrons, il ne peut pas être source de photons X, ceux-ci étant produits lors d'une transition d'une couche électronique à l'autre. Au Laboratoire Pierre Süe, il a été constaté qu'il suffisait de placer le détecteur près de l'échantillon, pour minimiser les effets parasites introduits par l'air et évitant l'emploi du flux d'hélium.

Un autre problème auquel nous sommes confrontés en fluorescence et qui peut fausser les résultats des analyses, est dû à la saturation du détecteur. Elle se produit lorsqu'il est soumis à un flux de photon X trop intense. Elle constitue une perte d'informations qui peut être estimée et nous est présentée sous la valeur du temps mort. Lorsque le temps mort est important, une partie du flux n'est pas comptabilisée. Ceci va avoir pour conséquence un sous dosage des éléments en faible quantité car ils ont plus de chance de ne pas être détectés. On cherchera donc à minimiser le temps mort grâce à l'utilisation de collimateurs ou en jouant sur la distance échantillon détecteur (plus le détecteur est éloigné, moins le temps mort est important). Au Laboratoire Pierre Süe, il est admis que le temps mort doit rester inférieur à 15% sauf dans quelques cas spécifiques liés à l'information recherchée (notamment l'analyse qualitative de traces). Au Centre Ernest-Babelon, le temps mort ne doit pas dépasser 5 %.

Parallèlement, il faut présenter les limites inhérentes à l'analyse en fluorescence X. Comme il a été vu dans la partie précédente, la profondeur de pénétration de faisceau et surtout la distance que peuvent parcourir les photons X réémis dans la matière, est limitée. Cette distance dépend de la puissance de la source mais avant tout de la capacité du matériau étudié à absorber le rayonnement. Il est évident que ce paramètre ne peut pas être changé. Il est donc difficile de gagner en profondeur d'analyse.

Une autre limite à laquelle on peut faire face est la quantité minimale d'un composé qu'il est possible de détecter. Elle dépend de plusieurs paramètres indépendants sur lesquels il est parfois possible d'agir. Pour qu'un élément soit caractérisé lors d'une analyse, il doit réussir à émettre des photons hors de la matière, que ces photons ne soient pas absorbés par la couche d'air entre le détecteur et l'échantillon, et que la raie apparaisse hors du bruit de fond dans le spectre. Afin d'améliorer la limite de détection, l'analyste ne peut jouer que sur les deux derniers paramètres. Le premier nous l'avons vu est minimisé en rapprochant le plus possible le détecteur de l'échantillon tout en gardant un temps mort acceptable (<15%). Le second dépend de la source de rayon X. Le bruit de fond d'un spectre est en grande partie dû à la non monochromaticité de la source. Pour avoir une source de rayons X, on bombarde un métal avec un faisceau d'électrons. En réaction, il y a émission de rayons X selon un spectre

intensité-énergie caractéristique. Il se décompose en un fond continu duquel émergent deux raies caractéristiques Kα et Kβ, le faisceau qui va alors servir de source est polychromatique car poly-énergétique. La présence de photons d'énergies différentes dans la source est responsable du bruit de fond du spectre, chacun excitant l'échantillon différemment. On va donc chercher à ne garder que les photons les plus nombreux, d'énergie Kα et éliminer ceux d'énergie Kβ. Puis si l'analyse nécessite une précision supérieure, on éliminera le fond continu. Pour absorber les photons Kβ de la source, il faut utiliser un filtre dont l'énergie Kβ est comprise entre les énergies Kα et Kβ de cette même source. Pour une anode au molybdène il faut utiliser du zirconium ou du niobium. L'élimination du fond continu se fait avec un système diffractant qui permet de sélectionner les photons d'une énergie définie. Un tel filtre diminue fortement l'intensité du rayonnement et ne sera utilisé que dans le cas d'analyses demandant une très faible limite de détection. L'anode du Laboratoire Pierre Süe est équipée d'un filtre de zirconium.

Enfin, l'analyse d'un *corpus* important qui suppose une comparaison entre les différents résultats, doit obéir à un protocole reproductible. C'est-à-dire que les conditions d'analyses doivent être identiques tout au long de la série de dosage. Un même échantillon analysé à des instants différents devra fournir le même signal. C'est dans cette optique que lors de l'étude d'un *corpus*, la durée d'analyse ne doit pas varier et il est important que la surface analysée soit toujours placée à la même distance de la source et du détecteur et sous le même angle. Au Laboratoire Pierre Süe ainsi qu'avec le spectromètre portable Niton, cette reproductibilité spatiale est garantie par le porte échantillon utilisé. Au Centre Ernest-Babelon, c'est un dispositif optique utilisant un laser qui permet de positionner correctement les échantillons.

C. Du qualitatif au quantitatif : Etalonnage de la chaîne de mesure de l'anode tournante du Laboratoire Pierre Süe

Il a été décidé de proposer un protocole d'étalonnage de la chaîne de mesure de l'anode tournante du Laboratoire Pierre Süe afin de réaliser des analyses quantitative du *corpus* métallique de l'atelier monétaire de La Rochelle. Cette démarche est basée sur l'utilisation d'un logiciel de traitement de spectres qui tient compte des effets de matrice lorsque les échantillons sont massifs.

Pour qu'un photon soit compté, il doit arriver jusqu'au détecteur, donc sortir de la matière. Or celle-ci va réabsorber une partie des photons émis, en particulier à cause du phénomène de fluorescence secondaire. Les rayons X produits par la matière excitée vont être la source d'excitations d'autres atomes et ainsi être absorbés. Si l'on considère une même quantité d'un élément et qu'on la place dans un milieu absorbant et dans un milieu non absorbant, soumise à un même rayonnement, on n'obtiendra pas le même signal après excitation. La surface de la raie de l'élément situé dans le milieu absorbant sera moins importante étant donné que moins de photons auront réussi à sortir de la matière pour être détectés. Si l'on se base sur la surface de la raie obtenue pour quantifier l'élément, l'élément dans le milieu absorbant sera sous dosé.

Il existe donc des logiciels de quantifications, qui, à l'aide d'algorithmes, permettent d'obtenir des concentrations. Celui du laboratoire (Winaxil) utilise la méthode des paramètres fondamentaux, c'est-à-dire que les corrections du signal proposées par le modèle prennent en compte les phénomènes physiques responsables de l'absorption des rayons X. La modélisation a cependant besoin de données de références déterminées à partir de mesures effectuées sur des étalons de composition connue. Ces derniers sont très difficiles à synthétiser car ils doivent représenter au mieux les échantillons étudiés : composition, épaisseur, surface, granulométrie, forme. Le grand nombre d'échantillons qui composent le *corpus* étudié peut à une certaine échelle être considéré comme homogène. Il présente

l'avantage de fournir une collection dans laquelle il est possible de sélectionner des alliages qui, une fois analysés par d'autres méthodes, pourront servir d'étalons de références. Utilisés pour calibrer les dosages quantitatifs proposés par Winaxil, ils seront des standards idéaux car ayant les mêmes caractéristiques de surface, morphologiques et chimiques que les objets analysés.

A partir de premiers dosages qualitatifs effectués en fluorescence, il a été possible d'obtenir un classement du *corpus* en cinq groupes. Dans chacun de ces groupes, des échantillons ont été prélevés et analysés en EDS au MEB, puis en fluorescence X à l'anode tournante. Une partie des dosages a alors été utilisée pour étalonner la quantification de Winaxil, la seconde moitié a permis de vérifier les résultats. Conscient de la différence de profondeur d'analyse entre l'EDS et la fluorescence X du laboratoire, des échantillons d'alliages cuivreux commerciaux ont été utilisés en complément. Particulièrement homogènes et ayant été dosés par le laboratoire qualité du fournisseur en spectroscopie optique à étincelle. Ainsi calibré il alors été possible de traiter les 212 spectres des objets de La Rochelle.

Enfin, il faut noter que l'on ne dispose pas d'une limite de détection précise pour les différents composants qui nous intéressent. Cependant, chaque spectre obtenu a été préalablement traité de manière à ne sélectionner pour le dosage, que les composés dont les pics étaient observables, afin que le logiciel ne calcule pas une quantité artificielle à partir d'une surface mesurée dans le bruit de fond. Il ressort du traitement des analyses du *corpus*, qu'il est possible d'avoir des dosages de composés dont la concentration peut descendre jusqu'à 1 %mass. En ce qui concerne l'argent, bien que n'ayant pas été dosé en concentrations inférieures à 2,5 %mass dans les alliages de La Rochelle, l'utilisation d'un étalon titrant à 1 %mass a montré qu'il était détectable jusqu'à cette valeur minimale.

II. Analyse par diffraction X

Outre la possibilité de réaliser des analyses de fluorescence X, le rayonnement X produit par l'anode tournante du laboratoire Pierre Süe permet de réaliser des spectres de diffraction. Les analyses se font en transmission sensibilisant une *image plate* (Kodak).

De plus, il a été aussi possible de réaliser un spectre de diffraction de poudre en macro faisceau au Laboratoire d'Etude de la Corrosion Aqueuse (LECA).

1 - Spécificité de l'analyse

Utilisant la même source d'excitation que l'analyse en fluorescence X, la diffraction des rayons X exploite une propriété de la matière cristallisée une réponse différente de la matière afin d'en tirer des informations structurales. Quand la fluorescence donnait un renseignement sur la composition élémentaire d'un matériau, la diffraction permet d'avoir une information structurale, dans le cas où le matériau est cristallisé.

En raisonnant sur un cristal parfait, composant unitaire d'un matériau cristallisé, il est composé d'un réseau tridimensionnel formé d'atomes. Ce réseau est invariant dans toutes les translations dont le vecteur est une combinaison des vecteurs de base du réseau. Ces vecteurs de base définissant les paramètres du réseau cristallin (a, b, c), on peut observer des phénomènes de diffraction, c'est-à-dire de diffusion intense dans certaines directions si la longueur d'onde d'excitation est inférieure aux paramètres a, b, c. C'est notamment ce que l'on peut obtenir avec un rayonnement X. Le phénomène de diffraction s'observe lorsque le rayonnement satisfait la condition de Bragg. Avec θ l'angle que forme le rayon incident avec

la surface du cristal, d_{hkl} équidistance des plans hkl[15], λ la longueur d'onde de la source X et n un entier (ordre de diffraction), il y a observation de diffraction si ces valeurs vérifient :

$$2d_{hkl}\sin\theta = n\lambda$$

Or au sein d'un cristal, il est possible de définir plusieurs distances interéticulaires d_{hkl} dont l'évaluation peut permettre une identification structurale grâce à l'utilisation d'une base de données (Fiches JCPDS). Si on se replace dans le cas réel du matériau constitué d'une multitude de cristaux, en fixant la longueur d'onde d'excitation et en admettant que statistiquement toutes les configurations d'angle seront exploitées, seul d_{hkl} sera le paramètre variant. Sur le montage en transmission du Laboratoire Pierre Süe, le micro faisceau arrive sur l'échantillon, diffracte en formant des cônes de diffraction dont le demi-angle au sommet est égal à 2θ. Ces cônes interceptent alors l'*image plate* (plaque photo) en formant des cercles d'intensité plus ou moins importante suivant le nombre de plans diffractants (Figure 3). A partir de ces cercles et d'un étalonnage avec une référence connue, ici du silicium, il est possible d'obtenir un spectre intensité en fonction de 2θ, par intégration. Leurs traitements et la comparaison avec les références étant faits avec le logiciel DIFFRAC^{plus}.

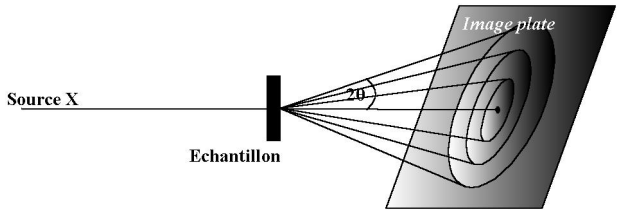


Figure 3 - Analyse de diffraction des rayons X en transmission.

2 - Limites de la méthode

Dans cette étude, la diffraction des rayons X n'a été utilisée que ponctuellement afin de déterminer des compositions de réactifs et produits de réaction. Les différentes compositions étaient supposées et ne demandaient qu'à être mises en évidence. De plus, les produits analysés se sont révélés comme regroupant peu de constituants différents. On se trouvait donc dans des cas favorables. En effet, la caractérisation d'un produit en diffraction des rayons X fait appel à la comparaison de spectre de raie avec des spectres de référence. Contrairement à un spectre de fluorescence dont les énergies des différentes raies peuvent assez facilement être associables à un élément précis (même individuellement), l'identification d'un produit en diffraction s'appuie sur l'association de plusieurs raies. Une raie seule peut avoir pour origine un grand nombre de constituants. Il apparaît donc que pour les produits constitués d'une grande quantité d'éléments, il y aura une grande quantité de pics qui, de plus, peuvent se chevaucher. L'identification peut alors être difficile. On pourra alors s'aider d'une analyse élémentaire (fluorescence X, EDS par exemple) afin de restreindre les choix que l'on doit faire dans la base de données.

De plus, dans le cas où la source de rayon X n'est pas parfaitement monochromatique (ce qui est le cas du rayonnement produit par l'anode du laboratoire), on notera la présence d'un bruit de fond pouvant être gênant sur les spectres et si une énergie définie n'est pas filtrée, il

[15] Les plans hkl représente une famille, ils sont parallèles entre eux et perpendiculaires à la direction [hkl] du réseau cristallin. Les paramètres h, k et l étant des multiples entiers paramètres de maille a, b et c.

est possible d'avoir des raies supplémentaires. C'est ce que l'on remarquera sur les spectres réalisés.

Annexe D :
Microscopie électronique à balayage et microanalyse X

Le Microscope Electronique à Balayage (MEB) est l'un des outils les plus utilisés en caractérisation des matériaux car il permet de réaliser aussi bien des observations de surface à des grossissements très importants que des analyses ponctuelles lorsqu'on lui adjoint un détecteur de rayons X.

Dans le cadre de cette étude, deux appareillages différents ont été utilisés :

	Laboratoire Pierre Süe	Centre Ernest-Babelon
Fabricant	Cambridge Instrument	Philips
Modèle de MEB	LEO120	ESEM XL40
Détecteur EDS	EDS Delta+	Oxford 7212
Logiciel de quantification	SAMx IDFix	INCA 2000
Tension accélératrice de travail	15 kV	20 kV

1 - Principe de fonctionnement :

Les électrons sont produits par un filament de tungstène et focalisés dans le wehnelt en un point source (« cross-over ») de 20 µm de diamètre, avant d'être accélérés par une anode, puis soumis à l'action de champs des lentilles électromagnétiques, avant d'être défléchis sur un point de la surface de l'échantillon par les bobines de balayage (Figure 4).

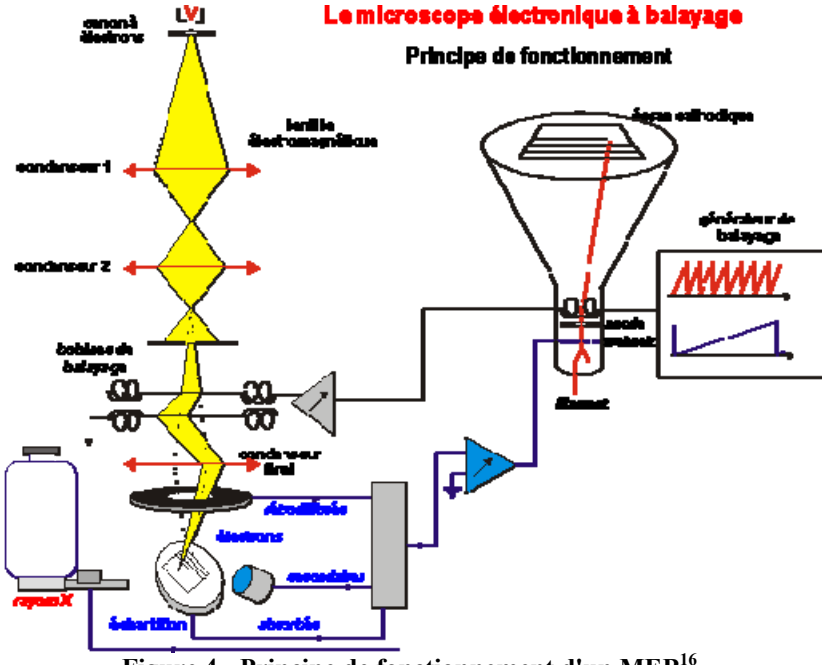


Figure 4 - Principe de fonctionnement d'un MEB[16].

[16] Brisset F. *et al.*, eds., *Microscopie électronique à balayage et microanalyses*, Les Ulis, EDP Sciences, 200, p. 5.

Le faisceau incident d'électrons interagit avec la matière notamment en rétrodiffusant une partie de ces électrons primaires (qui deviennent « rétrodiffusés » par cette interaction élastique) et en éjectant des électrons du cortège atomique de l'atome (électrons « secondaires » ; interaction inélastique). Les atomes ionisés retournent à l'état fondamental lorsqu'un électron d'une couche supérieure vient remplir le trou laissé vacant ; ce réarrangement électronique se fait en libérant un photon X ou γ d'énergie caractéristique de l'atome. C'est ce phénomène qui est utilisé pour la microanalyse élémentaire en dispersion d'énergie (EDS) lorsqu'on couple au MEB un détecteur de rayons X : en mesurant l'énergie des photons X émis, on peut déterminer l'élément source ; en comptant le nombre de photons qui parviennent au détecteur, on peut déterminer leur teneur dans le volume analysé.

2 - Résultats attendus :

a. Imagerie

Le MEB a été utilisé dans un premier temps pour observer sur les échantillons des détails de surface avec une meilleure résolution que la loupe binoculaire.

On utilise généralement le détecteur des électrons secondaires pour réaliser des topographies. En effet, celui-ci collecte les électrons secondaires émis dans toutes les directions, ce qui permet d'obtenir une image qui rende bien compte du relief de la surface sans créer d'effet d'ombres.

Les images obtenues avec les électrons rétrodiffusés sont moins bien résolues (6 à 10 nm au lieu de 3 à 5 nm, ce qui est cependant suffisant dans le cadre de cette utilisation), ceux-ci ressortant de plus profond dans la matière (en moyenne, les électrons rétrodiffusés traversent une épaisseur d' 1µm ; les électrons secondaires, 5 nm). Ce type d'imagerie permet d'obtenir des informations sur la composition chimique de l'objet. En effet, les électrons rétrodiffusés résultant de choc élastique avec la matière, la quantité de ces derniers rétrodiffusant dépend de la masse volumique des matériaux observés. Un élément lourd, comme le plomb, apparaîtra en clair dans la matrice de cuivre dans la mesure où ce dernier entraîne une rétrodiffusion des électrons plus importante que le cuivre moins dense.

Une image bien contrastée met ainsi en évidence les différences de compositions chimiques des éléments présents dans la matrice à l'état inclusionnaire, ce qui permet d'observer leur répartition dans l'échantillon.

b. Analyses

Soumise au bombardement électronique lors des observations, la matière émet des rayonnements X caractéristiques. Dans ce cas, il est possible d'analyser cette dernière en couplant au MEB un détecteur de rayons X.

En utilisant le grossissement adéquat, il est possible de choisir la taille de la fenêtre d'analyse, selon que l'on veuille réaliser soit une analyse « globale » de la surface de l'échantillon, soit une microanalyse pour définir, par exemple, la nature d'une inclusion.

c. Conditions de mesures

Il est nécessaire d'étalonner le détecteur avant chaque série d'analyses quantitatives. On utilise comme échantillon standard une pastille de cobalt pur que l'on place dans la chambre du MEB en même temps que les échantillons. En effet, notre logiciel de quantification fonctionne « sans témoin » : il utilise donc comme référence l'intensité de cet élément pur, calculée de façon théorique en tenant compte du rendement calculé du détecteur. On effectue les corrections nécessaires pour obtenir un signal de 100% cobalt. Les teneurs des éléments présents dans l'échantillon sont ensuite mesurées par comparaison avec cette concentration connue du standard.

Le *spotsize*, correspondant à la taille du faisceau, donc la quantité d'électrons arrivant sur la surface observée. Ce paramètre doit être réglé afin que le « temps mort » lors des analyses[17] n'excède pas 30 % sur la pastille de cobalt. Lorsqu'il est plus important les mesures sont faussées car une partie du flux de rayonnement X émis par le matériau analysés, n'est pas comptabilisée. Dans ce cas, les erreurs portent principalement sur la quantification des éléments en faible quantité car les photons qu'ils émettent ont moins de chance d'être comptés.

Pour que le détecteur perçoive le maximum de signal, la distance de travail est fixée à 10 mm. Enfin, le temps d'analyse a été fixé à 3 minutes pour obtenir une réponse fiable dans ces conditions de mesures.

d. Cartographie X

Si l'on recherche un élément marqueur sur une surface d'échantillon, ou si l'on souhaite observer individuellement la répartition de plusieurs éléments sur cette surface, il est possible de réaliser une cartographie X.

A chaque point de l'image correspond un spectre d'analyse. Le logiciel traite chaque spectre un par un et convertit le résultat sous la forme d'un pixel dont l'intensité de couleur est proportionnelle à la teneur de l'élément recherché. Plus ce pixel est clair, plus l'élément est abondant dans la zone d'analyse couverte par ce pixel.

3 - Limites de la méthode :

a. Phénomène de charges

A basse pression, si l'échantillon n'est pas conducteur, les électrons incidents restent sur leur surface. Cette accumulation de charges négatives dévie progressivement les électrons incidents, entraînant alors une dégradation de l'image. Pour éviter cet « effet de charges », les échantillons isolants où enrobés d'uns résine non conductrice doivent être métallisés C'est-à-dire qu'ils sont recouvert d'une fine pellicule conductrice, en l'occurrence du carbone, afin d'écouler les charges de la surface observée.

b. Profondeur d'analyse

La profondeur maximale analysable en EDS varie en fonction de l'énergie du faisceau d'électrons incidents et de la nature de l'échantillon. Elle est en moyenne de l'ordre du micron : l'EDS-MEB n'est donc qu'une méthode d'analyse de surface. Cette profondeur suffit pour caractériser des inclusions sur une coupe, mais pas pour déterminer la composition globale des objets archéologiques dont la surface corrodée n'aura pas été décapée, au moins au niveau de la zone d'analyse.

c. Limites de détection

Les éléments les plus légers ne peuvent être détectés car les rayons X qu'ils émettent sont de trop faible énergie. Ils sont absorbés par l'échantillon avant d'être détectés. Lorsque ces photons parviennent à ressortir de la matière, ils sont absorbés par la fenêtre qui protège le cristal de silicium du détecteur. Au Centre Ernest-Babelon, par exemple, cette fenêtre est en béryllium ; on estime que le béryllium est le premier élément détectable.

[17] Temps pendant lequel le système ne peut traiter l'information qui lui parvient parce qu'il finit de coder l'impulsion précédente.

Par ailleurs, si l'échantillon n'est pas parfaitement plan, les variations d'intensité du signal peuvent être dues à la topographie de la surface plutôt qu'à la composition chimique de l'objet.

d. Limites spectrométriques

Il est possible d'observer sur le spectre des pics qui ne correspondent pas à la réalité de l'échantillon. Lors de l'interprétation, il faut ainsi commencer par écarter ceux dus à l'élément utilisé pour la métallisation de l'échantillon. Ensuite, il est aussi possible d'observer un recouvrement des pics lorsque deux éléments de concentrations importantes émettent des rayons X d'énergies trop voisines pour que la résolution en énergie du détecteur ne permette de séparer les deux pics correspondants : ces pics peuvent se chevaucher ou se confondre. Dans ce cas, il faut se reporter aux pics associés aux autres raies caractéristiques des éléments qui interfèrent.

e. Les « faux » pics

Le « pic d'empilement » a pour origine la possibilité pour le détecteur d'ajouter les énergies de plusieurs photons et de n'en compter qu'un seul alors associé à cette énergie. Ce problème n'est observable que pour les éléments majeurs dont l'intensité des raies est importante.

Des « pics de fuite» peuvent également apparaître sur le spectre lorsqu'une partie de l'énergie des photons qui arrivent sur le semi-conducteur en silicium du détecteur est absorbée par celui-ci. Ces pics n'apparaissent donc que pour les éléments dont les pics d'excitation sont importants, et à une énergie dont la valeur est égale à celle du pic censé être mesuré, retranchée de l'énergie d'excitation du silicium, soit 1,74 keV.

Annexe E :
Analyse en composantes principales (ACP)

Dans le cadre d'un *corpus* mettant en évidence un grand nombre d'informations, il est intéressant de recourir à des méthodes statistiques basées sur des calculs mathématiques afin d'appréhender ces sommes de données. La démarche retenue ici utilise l'Analyse en Composantes Principales (ACP)[18]. Elle permet en effet de traiter une grande population d'échantillons décrits par un nombre important de paramètres qui peuvent ne pas avoir les mêmes dimensions. L'intérêt majeur de cette méthode est de fournir une représentation graphique permettant de :
- mettre en évidence des groupes homogènes vis-à-vis de l'ensemble des caractères.
- révéler des différences entre les groupes.
- repérer des individus aux comportements atypiques, pouvant révéler des données aberrantes.

Le principe de cette méthode est de calculer des axes principaux, c'est-à-dire des axes sur lesquels s'exprime la plus grande quantité d'informations. La quantité d'informations représentée est également estimée à partir du calcul de la variance de chaque axe de projection. Elles permettent d'estimer la qualité de la représentation. Après avoir déterminé les axes permettant d'exprimer le plus d'information, les échantillons étudiés définis par les n coordonnées correspondant aux données qui leur sont associées, sont ensuite projetés dans le nouveau repère à deux dimensions.

Il existe sur le marché, plusieurs logiciels qui permettent un tel traitement. Mais il est aussi possible d'effectuer le traitement des données à l'aide du logiciel Excel, cette méthode statistique consiste en un calcul matriciel simple.

La procédure se développe ainsi :

- Etant donné que les variables recueillies n'ont pas les mêmes ordres de grandeur, il est nécessaire de les centrer et de les réduire. Le centrage consiste à soustraire à chaque valeur la moyenne des valeurs auxquelles elle appartient. La réduction divise ces nouveaux paramètres par l'écart type de chaque classe de variables. L'ACP est dite normée.
- La liste des données recueillies pour chaque échantillon forme la matrices normée des variables, appelée D. Elle permet de calculer la matrice de corrélation C :

$$[C] = \frac{{}^{t}[D] \times [D]}{j}$$

Avec j, le nombre d'échantillons traités.
[C] est une matrice symétrique carrée de dimension i, égale au nombre de variables traitées, dont la diagonale est composée de 1.
- Il faut ensuite extraire les vecteurs propres de cette matrice. C'est ensuite sur ces vecteurs que sont projetés les échantillons représentés par des vecteurs colonnes composées des variables normées. Les valeurs propres donnent une information quant à la quantité d'informations que représentent ces nouveaux axes. Elles permettent de calculer les variances,

[18] Auray J. P. *et al.*, *Analyse des données multidimensionnelles : les méthodes de description*, 4 tomes, Lyon, Ed. Alexandre Lacassagne, t. 1, 1990, 192 p.
Morineau A. *et al.*, *Analyse en composantes principales*, Montreuil, CISIA-CERESTA, 1998, 142 p.

définies plus haut, de chaque axe. Il faut préférentiellement choisir comme axes de projection ceux dont les valeurs propres correspondantes sont les plus importantes.
- Pour chaque échantillon, est calculé un couple de coordonnées (x, y) permettant de les représenter dans un espace à deux dimensions. Chaque coordonnée est le résultat du produit scalaire des deux vecteurs propres retenus comme axes de projection, avec le vecteur échantillon. Numériquement, il s'exprime par la somme du produit des coordonnées :

$$\left\langle \{Vecteur_propre\}, \{Vecteur_échantillon\} \right\rangle = \left\langle \{y_i\}, \{x_i\} \right\rangle = \sum_i y_i \times x_i$$

- Chaque échantillon est ensuite reporté sur un graphique selon des coordonnées qui dépendent des données qui lui sont associées. Bien que ce traitement statistique entraîne une perte d'information, il est cependant intéressant de pouvoir obtenir une représentation dans un espace à deux dimensions alors qu'un traitement global aurait demandé la représentation d'un nombre beaucoup plus important de graphes (C_i^2) qui ne sont pas facilement comparables.

De plus, la représentation en ACP permet par ailleurs, de mettre en évidence des liens entre les différentes variables. En effet, les coefficients de corrélation entre les coordonnées des projections et les listes de variables, définissent les composantes des points représentatifs de chaque paramètre. Les segments reliant ces derniers à l'origine du graphique donnent une représentation explicite des relations entre chaque variable. Si deux de ces dernières ont leurs droites se rapprochant de l'orthogonalité, il faut en déduire qu'elles sont indépendantes, à l'inverse, si elles s'en éloignent, les paramètres sont considérées comme liés.

Cette représentation à l'aide des composantes principales apparaît très puissante et simple à mettre en œuvre, mais ce jugement doit être pondéré. Les limites de l'ACP reposent sur la méthode de projection et la perte d'informations qu'elle entraîne, conduisant à de possibles erreurs d'interprétations. Il existe des paramètres qui permettent d'évaluer la perte d'information induite par la représentation. Le plus simple consiste à considérer la variance portée par chaque axe. La variance totale du graphe est la somme de celles de chaque axe. Si une représentation en i dimensions était envisageable, cette valeur serait dans ce cas de 100%, car la totalité des informations seraient exposée. L'ACP optimale est celle qui aura une variance élevée.

Cependant, dans notre étude l'ACP n'était qu'une étape préliminaire à un traitement ultérieur des données. Il s'agit d'une représentation approximative et bien qu'il existe des moyens pour évaluer cette représentation, ils ne sont que relatifs. Il n'existe pas de valeur limite en dessous de laquelle une représentation ne doit pas être exploitée, du moins cette limite est à l'appréciation de celui qui traite l'information. De plus, bien qu'il soit possible de supposer les liens entre variables, elles ne sont pas quantifiables et la réflexion sur les causes de ces relations est difficile, dans la mesure où les axes de projection sont adimensionnels. Finalement, les groupes mis en évidence par une ACP doivent être repris individuellement en considérant les données réelles afin de comprendre les paramètres qui ont induit ces ensembles sur la représentation statistique.

Annexe F :
Etude métallographique

Parallèlement aux analyses chimiques réalisées, le microscope optique a été utilisé pour des observations de surface et de profil de découpe, avant et après attaques métallographiques. Une telle approche peut permettre de mettre en évidence dans la structure interne de prélèvements métalliques des indices microscopiques résultant de leur mise en forme macroscopique. Plusieurs protocoles rendent possible la mise en évidence de ces témoignages inscrits dans la matière : phases métalliques, précipités, inclusions, stigmates dus à des déformations, ou des recuits, produits de corrosion…

Au cours de cette étude, il a été mené à la fois des observations sur des échantillons archéologiques ainsi que sur des analogues expérimentaux. Une telle approche est particulièrement intéressante car les processus de mise en forme subis par échantillons expérimentaux sont par définition parfaitement connus. Ils permettent ainsi d'identifier par analogie l'origine des structures archéologiques.

Dans la mesure où l'échantillonnage nécessaire à cette étude est invasif, il est indispensable de mettre en place une démarche préliminaire de sélection des prélèvements afin qu'ils soient le plus représentatifs du *corpus* étudié.

I. Préparation des échantillons

Afin de pouvoir être observés facilement, les échantillons doivent être préparés. Les examens qui sont mis en place doivent permettre révéler les différentes phases et déformations internes des objets. Ils doivent donc être découpés. Cependant, ces découpes ne doivent pas créer de défauts structuraux qui seraient alors attribués au procédé de fabrication étudié. Il faut donc veiller à ne pas trop échauffer la matière lors de la découpe, et à avoir une vitesse d'avancement lente évitant ainsi la création de déformations dues aux contraintes. Pour les découpes, c'est une scie circulaire de type Struers Accutom-50 qui a été utilisée. Son avancement de coupe est contrôlé par des cerveaux électroniques. Etant donné que les objets sont en alliages cuivreux, une scie spécifique à ce type de métal a été utilisée (Struers : SiC Cut-off Wheel). Lors de la coupe, l'objet est refroidi par un fluide qui fait aussi office de lubrifiant (eau + Struers : Additive for Cooling Fluid ADDUN). Le protocole de découpe fixant les vitesses de rotation et d'avancement a été proposé par P. Piccardo[19]. La découpe des objets a été faite selon des axes préférentiels, afin de mettre en évidence des axes de déformation. L'axe principal est généralement défini selon un défaut ou une déformation. Il sera alors fait deux coupes : une selon cet axe, l'autre perpendiculairement. En outre, il est parfois possible de réaliser une observation préliminaire selon un plan parallèle à la surface de l'objet pour mettre en évidence les axes de déformations, s'ils ne sont pas évidents.

Après avoir été découpés, les échantillons doivent être indurés pour être manipulables et observables facilement. Ils sont enrobés d'un matériau qui sert de support. Il s'agit d'une résine La résine utilisée, est un polymère thermodurcissable dans lequel est dispersé du carbone sous forme de poudre (Struers : PloyFast). Elle permet par la suite d'observer les coupes microscope électronique sans nécessiter de métallisation de la surface. Le carbone sert

[19] Chercheur métallurgiste qui travaille avec ces types d'alliages. DCCI, Università di Genova, via Dodecaneso, 31, I-16146 Genoa (Italy)

de conducteur pour évacuer les charges qui s'accumuleraient à la surface de l'échantillon rendant son observation impossible. L'induration se fait à chaud et sous pression (Prestopress-2).

Ainsi découpés et enrobés, les échantillons n'offrent pas une surface observable. il faut préalablement obtenir un poli « miroir » résultant d'un pré-polissage, suivi d'un polissage de la coupe. La polisseuse utilisée est une Tegrapol-35, de marque Struers. Elle est équipée d'un porte échantillon Tegraforce-5, appliquant une pression de 15N par échantillon. La vitesse de rotation des disques est fixée à 150 tours par minute. Le protocole d'abrasion se développe ainsi (les désignations correspondent aux produits Struers), les solutions lubrifiantes étant dosées par la TegraDoser-5 :

- Pré-polissage, dressage : papier abrasif carbure de silicium (Sic 220) dont la taille de grain est d'environ 60 µm. La lubrification est faite avec de l'eau. Cette phase a pour but de mettre tous les échantillons au même niveau et d'éliminer la zone qui aurait pu être écrouie au cours de la découpe. La passe dure 1 minute.
- Polissage : cette phase se développe sur trois diamètres de grains abrasifs, de taille décroissante. Soit :
- Disque MD Largo lubrifié avec une solution diamantée dont la taille des grains est de 9 µm (Diapro AllegroLargo). La passe dure 2 minutes 30.
- Disque carbure de silicium (Sic 4000), 5µm de diamètre de grain, lubrifié à l'eau. La passe dure 5 minutes.
- Disque velours MD-Nap lubrifié avec une solution diamantée dont la taille des grains est de 1 µm (Nap R). La passe dure 6 minutes.
- Passe de nettoyage d'1 minute, disque précédant lubrifié à l'eau.

Il a été décidé qu'un polissage au 1 µm était suffisant. Il est cependant possible de polir jusqu'à une taille de rayure de 0,25 µm permettant ainsi une observation au microscope optique sans aucune rayure visible, étant donné que leur dimension est alors inférieure à la limite de résolution du microscope. Elles seront cependant toujours visibles au microscope électronique. Outre l'avantage esthétique, il est important d'avoir des tailles de rayures les plus petites possible. Car lors des traitements métallographiques, elles seront attaquées préférentiellement (effet de pointe).

Ainsi préparés, les échantillons sont observés dans un premier temps au microscope optique puis électronique. Par la suite, différentes attaques métallographiques permettront de compléter ces premiers examens.

II. Attaque métallographique

La mise en œuvre d'attaques métallographiques doit permettre de révéler certaines structures invisibles avant qu'elles n'aient été révélées préalablement par une réaction chimique. La surface métallique subit une légère dissolution différentielle dans des réactifs particuliers à la nuance et à la structure du métal. Ces réactifs contiennent des acides ou des bases ou des sels très dilués. La dissolution du métal se localise en des endroits où le potentiel de dissolution change entre deux éléments de structure différente. Ces différences de potentiel sont plus grandes en général entre deux phases qu'entre deux grains d'une même phase et que dans un joint de macle : en outre la vitesse de dissolution varie avec l'orientation cristallographique, avec les distorsions globales ou ponctuelles, avec les hétérogénéités chimiques, etc…

Ces effets peuvent être schématisés ainsi :

- la dissolution du métal commence dans les joints interphases, puis aux joints de grains d'une même phase, mais la largeur du sillon dépend de l'orientation cristalline des deux grains contigus (les joints de macle des métaux et alliages cubiques à faces centrées s'attaquent parfois très lentement).
- l'attaque chimique permet aussi de donner des produits de réaction adhérents à la surface, dont l'épaisseur est variable avec l'orientation des grains.

Il faut à ce stade remarquer que toutes les analyses de composition devront être faites avant attaque, étant donné qu'il y a dissolution partielle et préférentielle de certains éléments, s'ajoutant à cela, la possibilité de dépôts d'éléments étrangers.

Après attaque chimique, la surface doit être rincée à l'eau et séchée à l'air comprimé propre, ou bien rincée à l'alcool, puis séchée à l'air chaud. Les surfaces attaquées sont très sensibles au toucher et à l'abrasion.

Les échantillons étudiés étant composés en grande partie de cuivre, ont été recherchés des réactifs d'attaque utilisés dans l'étude des matériaux cuivreux. Etant donné l'hétérogénéité du *corpus* au niveau des compositions, deux types d'attaques ont été choisis, l'une acide, l'autre basique, censés permettre une différenciation des révélations. Le but est de tenter de mettre en évidence à la fois les structures de phases, et les structures de déformation et de recuit.

Composition des réactifs :

Réactif acide : perchlorure de fer
- 5 g de perchlorure de fer $FeCl_3$
- 2 ml d'acide chlorhydrique 1Mol
- 98 ml d'éthanol

Réactif basique : eau oxygénée ammoniacale
- 20 ml d'hydroxyde ammoniacal NH_4OH
- 14 ml d'eau oxygénée H_2O_2
- 10 ml d'eau distillée

Ce réactif se dégrade rapidement et doit être fait avant l'attaque.

La composition du réactif acide m'a été proposée par P. Piccardo. Pour le réactif basique, la littérature fournit plusieurs compositions possibles[20]. Les quantités ont été choisies pour permettre des changements suivant les résultats obtenus. Les temps d'attaque ne sont pas fixes, étant donné qu'ils dépendent du matériau observé. Il a été pratiqué des durées de traitement de 5 secondes avec un contrôle régulier au microscope optique. Après chaque attaque, l'échantillon est rincé à l'eau de manière à stopper la réaction. Puis rincé à l'éthanol, il est enfin séché. Entre chaque attaque de réactifs différents, les échantillons sont polis une nouvelle fois.

[20] Roos A., *Technique métallographique : Préparation des surfaces métalliques pour micrographie et macrographie*, Bayeux, Dunod, 1960, p. 99.

III. Résultats recherchés

Cette partie est réservée à la présentation des structures qu'il est intéressant de mettre en évidence, car porteuses de nombreuses informations. Une étude métallographique ayant pour objectif de comprendre les processus de mise en forme des différents objets, il faut rechercher les stigmates contenus dans la matière trahissant les déformations subies. Les principales structures qu'il est possible d'observer par attaque métallographique sont de deux types : structures de phases et de déformation.

Les structures de phases sont celles qui se développent lors des périodes de solidification. Un des outils nécessaire à la compréhension des processus en jeu, est le diagramme de phases. Celui-ci, donne, pour une composition précise d'un alliage, les différentes phases qui vont se former lors du refroidissement. Grâce à sa lecture, il est possible de mettre en évidence une chronologie de formation des phases et de comprendre ainsi l'origine des structures observées. Par exemple, si l'on observe des globules enrobés d'une autre phase, on pourra constater sur le diagramme de phases que la phase formant les globules se sera formée avant celle qui l'enrobe ; c'est-à-dire qu'elle se sera solidifiée à plus haute température[21]. De plus, dans certains cas, on peut constater une déformation des structures de déformation par rapport à une configuration initiale, de telles observations trahissant alors une mise en forme de l'objet.

Le second type de structure est celle due aux déformations ou aux recuits subis par le matériau. Ce sont les macles, modes de relâchement d'énergie qui se mettent en place lorsqu'un matériau est déformé ou recuit. Quand deux cristaux sont accolés de façon à ce que l'un soit le miroir de l'autre, l'ensemble est dit former une macle. Le plan miroir est appelé plan de macle. Le maclage peut être obtenu par déformation de cisaillement de la partie supérieure du cristal, l'amplitude du cisaillement étant proportionnelle à la distance au plan de macle. Dans un cristal cubique faces centrées, une macle sur plan de macle (111) se traduit par la séquence d'empilement ABCABCACBACBA..., A entre deux C étant le plan miroir. Finalement, une faute d'empilement peut être considérée comme la succession de 2 macles sur plans d'empilements voisins. L'énergie d'une faute d'empilement est donc grossièrement le double de l'énergie d'une macle.

Les macles sont produites fréquemment dans de nombreux métaux par déformation plastique à basses températures, lors de trempes, à cause des contraintes dues au gradient de température, ou, au contraire, lors de recuits à hautes températures. Il est intéressant de noter que de telles structures sont surtout observables lorsque l'énergie de défaut d'empilement est faible, ce qui est le cas dans les réseaux cristallins de type cubique faces centrées. Or le cuivre cristallise selon ce réseau ; il est donc possible d'observer de telles structures dans les alliages cuivreux.

Il faut distinguer plusieurs types de maclages qui ont des origines et des structures différentes. Le maclage mécanique donne une série de bandes minces en forme de fuseaux traversant les grains qui constituent la matière cristallisée ; elles peuvent être frangées par déviation locale des plans de macle. Elles ont pour origine une adaptation du matériau lors des déformations qu'il subit. L'énergie que suscitent les défauts d'empilement dus aux déformations, est supérieure à celle des défauts de macle, le matériau va donc favoriser le maclage pour minimiser son énergie.

Enfin, il existe un maclage thermique qui apparaît lors des phases de recuit. Ces macles sont en général plus larges que les macles mécaniques et n'ont pas la même origine. Lors d'un recuit la pièce est chauffée et va disposer d'une énergie qui va lui permettre de réorganiser sa structure interne pour minimiser son énergie en mettant en place une recristallisation. Il y a une température minimale pour que cette recristallisation ait lieu. Cette température dépend

[21] Lesoult G., *Solidification, cristillastion et microstructures*, n° M58, Techniques de l'Ingénieur, 1986, 28 p.

du type d'alliage et du taux d'écrouissage. En dessous de cette limite, on observe le phénomène de restauration du matériau, il permet de restaurer en partie tout au moins, les propriétés physiques et mécaniques sans modification apparente de la structure. Il n'y a pas formation de nouveaux grains et le processus se déroule régulièrement. Des processus microphysiques affectent les défauts :
- annihilation partielle des lacunes et des dislocations ;
- réarrangement en parois de certaines dislocations limitant des blocs cristallins faiblement désorientés et quasi parfaits : phénomène de polygonisation.

Cependant, ces phénomènes ne sont observables qu'en microscopie en transmission et par des mesures indirectes de résistivité.

Lorsqu'un matériau est porté au-dessus de sa température de recristallisation, il va remplacer sa structure écrouie par une nouvelle à grains reformés. A la température de recuit, il y a germination de nouveaux grains puis croissance jusqu'à contact mutuel. Les sites de germination sont les défauts qui se seront concentrés aux joints de grain. Dans ce cas, plus le taux d'écrouissage est important plus le nombre de sites de germination est grand, et donc la taille des grains recristallisés petite. En outre, un taux d'écrouissage élevé diminue la température de recristallisation, étant donné que le nombre de sites de germination est important.

Les recuits sont utilisés dans le procédé de mise en forme des monnaies et on pourra donc *a priori* en observer des traces au cours des observations métallographiques. En effet, il sera possible de constater les conséquences de ce traitement par l'intermédiaire des macles thermiques. Lors de la recristallisation, il peut arriver que certains grains voisins soient en relation d'orientation, ils vont alors se regrouper pour ne former qu'une seule entité, les faibles adaptations de leurs réseaux s'effectuant par l'intermédiaire de plans de macle. Ce maclage thermique synonyme de recristallisation est très caractéristique et se différencie facilement du maclage mécanique, car il se présente sous la forme de bandes beaucoup plus larges et ne forme pas de fuseaux.

Enfin, les attaques métallographiques permettent aussi de mettre en évidence les contours des grains qui composent un alliage. On peut donc espérer déterminer des tailles et des populations, ceci donnant une information sur le taux d'écrouissage, mais aussi sur la vitesse de refroidissement. Une vitesse de refroidissement élevée favorisant une structure composée de nombreux grains de petite taille.

IV. Limites de la méthode

Grâce aux attaques métallographiques, il est possible de mettre en évidence des structures caractéristiques du traitement mécanique et thermique subi par la matière. Or, si la préparation des échantillons en vue de leur manipulation n'est pas faite rigoureusement, elle peut avoir pour conséquence la formation de structures qui interfèrent avec celles qui cherche à être observée. Lors de la découpe et du polissage des échantillons, il est possible de créer des macles de déformations mécaniques si ces opérations sont faites sans précaution. Lors de la coupe, la vitesse d'avancement doit être assez lente pour permettre la découpe sans contraindre la matière. De plus, la coupe peut provoquer un échauffement local, conduisant à une recristallisation, c'est pourquoi il faut utiliser un liquide refroidissant et lubrifiant. Quant au polissage, il doit se faire sans trop appuyer sur le support de l'échantillon.

Par ailleurs, il faut veiller à laisser le moins de rayures possible sur les surfaces polies. Après attaques, celles-ci seront mises en valeur, amplifiées. Il y a alors possibilité d'erreur d'interprétation et de perte d'informations, les rayures pouvant interférer avec une structure intéressante située en dessous.

Les attaques métallographiques mettent en jeu des phénomènes de dissolutions préférentielles, il faut donc toujours garder présent à l'esprit qu'il y a une perte possible d'information. Les attaques métallographiques doivent être envisagées de manière séquentielle. Les coupes ne sont attaquées une première fois qu'après une observation préliminaire de la surface polie. Les informations retenues seront la synthèse des informations recueillies à chaque étape.

L'utilisation d'un microscope optique en métallographie est limitée par le grossissement qu'il est possible d'obtenir avec cet appareillage. Quels que soient les optiques utilisées, les microscopes optiques sont limités dans leur grossissement étant donné que les observations se font en spectre lumineux visible. Ce qui fixe le pouvoir séparateur d'un microscope car il dépend de la longueur d'onde du rayonnement utilisé. Le pouvoir séparateur étant la plus petite distance qui sépare deux points, en dessous de cette distance, on n'observera qu'un seul point au lieu de deux. On cherchera donc par la suite à augmenter le pouvoir séparateur, ceci est possible en augmentant la longueur d'onde d'observation. C'est pour cela que le microscope électronique à balayage est intéressant car la longueur d'onde du faisceau d'électron utilisé est alors plus importante.

Il a été vu précédemment que l'un des outils fondamentaux dans la compréhension des structures de phases en métallographie, est le diagramme de phases. Or ces diagrammes n'ont été établis que pour des systèmes simples, binaires, parfois ternaires. Les échantillons archéologiques sont loin d'être des cas simples. Il faut alors proposer les hypothèses par comparaison des observations avec des cas de référence.

Annexe G :
Diagrammes de phases

Diagrammes de phases extraits de la littérature utilisés dans cette étude[22].

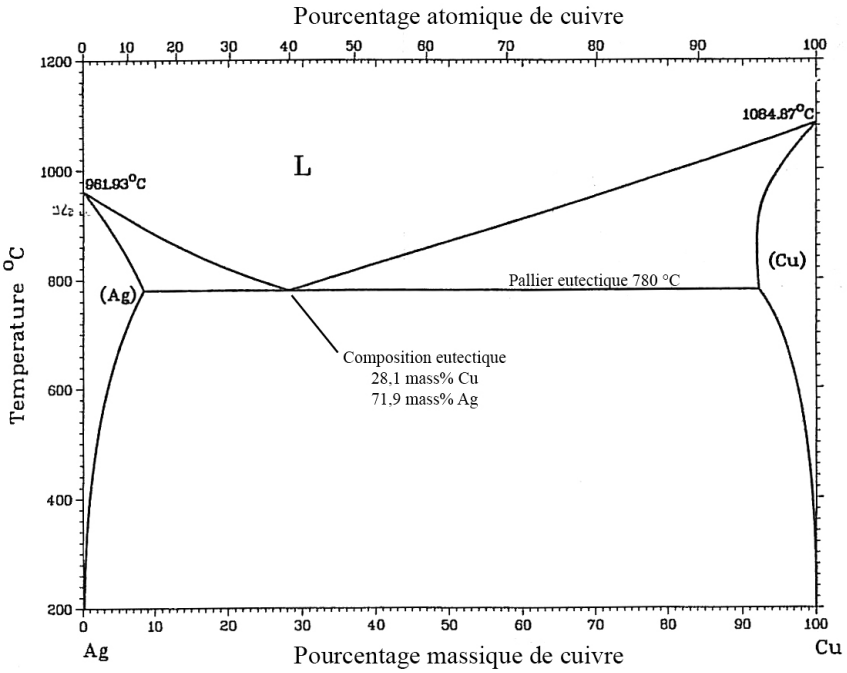


Diagramme de phase argent - cuivre[23].

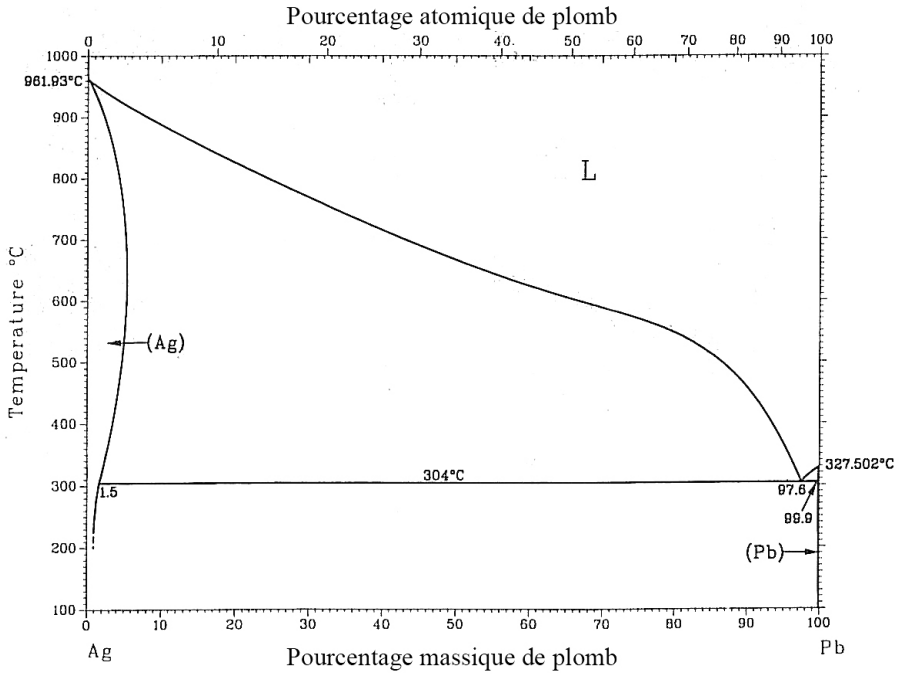


Diagramme de phase argent - plomb[24].

[22] Massalski T. B. *et al.*, eds., *Binary alloy phase diagrams*, Cleveland, Etats Unis, ASM International, 1990, p. 29, 73 et 1453.
[23] *Ibidem*, p. 29.

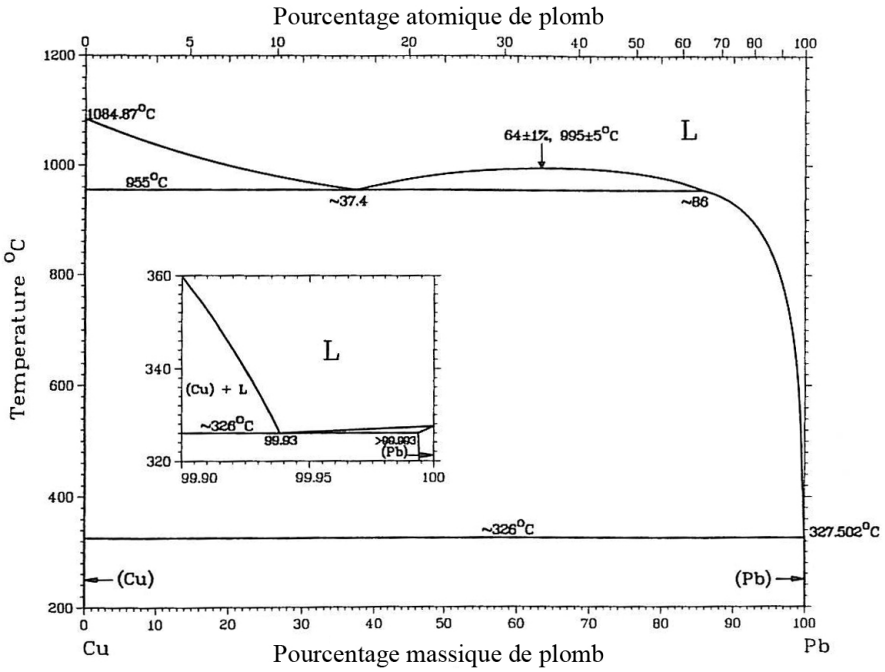


Diagramme de phase cuivre - plomb[25].

[24] *Ibid.*, p. 73.
[25] *Ibid.*, p. 1453.

Annexe H :
Analyses de calibration du spectromètre de fluorescence X portable Niton Xlt 700

Sont présentés dans cette annexe les résultats des analyses de composition de plusieurs échantillons de sol caractérisés dans un premier temps avec le spectromètre de fluorescence X portable Niton Xlt avec en mode *Standard Soil*. Ils ont ensuite été pour certains analysés par ANRC et pour d'autre par ICP-MS.

Les unités sont exprimées en ppm.

Résultats des analyses par spectrométrie de fluorescence X des échantillons analysés par la suite par ANRC :

N°	Mo	Err	Zr	Err	Sr	Err	Rb	Err	Pb	Err	Se	Err	As	Err	Hg	Err
CA05	-1,03	8	1,54	19,51	227,94	16,98	15,31	5,67	22,11	21,68	3,12	9,06	-16,11	14,27	23,48	11,75
CM 034	-5,27	7,35	122,11	21,05	100,35	11,48	88,82	10,78	4779	146	0,62	13,27	189,11	108,28	-2,7	9,86
CM 59	4,58	9,29	48,16	24,58	147,03	16,9	74,53	14,28	21934	359	16,06	29,1	763,88	264,92	11,24	19,83
CM 077	-3,71	8,24	98,4	23,67	131,07	14,77	57,13	11,82	16655	294	-2,37	23,19	643,42	217,21	-6,36	15,31
CM 085	8,28	8,54	54,04	21,58	117,87	13,8	59,44	11,26	12808	256	1,03	20,79	620,68	189,95	-8,33	13,58
CM 090	-4,05	9,06	-15,67	22,06	17,74	11,24	45,18	13,68	25941	399	-9,36	30,43	663,91	292,58	8,18	20,92
CM 092	0,18	8,76	75,7	21,94	53,62	9,95	58,01	9,74	1264	86	2,78	11,65	269,42	69,07	-5,54	10,02
CM 121	0,81	14,21	59,47	41,68	25,97	22,75	94,45	29,27	85816	941	60,66	73,55	2924,96	694,19	-1,35	42,29
CM 134	-2,69	14,81	-56,99	42,25	-9,54	24,78	54,53	32,53	115498	1143	19,18	86,61	4193,94	843,71	-58,16	47,18
CM 141	10,19	7,15	110,99	18,57	100,93	10,32	85,82	9,3	786	57	-3,93	7,41	71,49	42,98	0,02	7,46
MB15	0,01	7,76	370,89	26,33	55,15	8,57	56,97	8,13	167,38	31,09	-0,74	7,58	40,99	24,77	6,81	8,56
MB58	-4,78	8,01	186,95	23,84	80,61	10,66	70,16	9,54	60,2	24,88	-3,53	7,79	35,55	20,8	4,55	9,13
MB67	-3,8	7,43	274,1	23,88	43,21	7,85	47,63	7,56	348,69	41,55	3,49	8,4	24,86	31,13	2,45	7,97
MB69	-1,34	8,24	357,45	27,63	60,69	9,4	62,16	8,96	528,23	52,59	1,09	9,01	63,92	40,35	0,12	8,46
MB70	-2,9	8,07	336,96	26,99	72,01	9,95	53,02	8,34	558,7	53,57	5,03	9,47	15,58	39,33	-1,48	8,08

N°	Zn	Err	Cu	Err	Ni	Err	Co	Err	Fe	Err	Mn	Err	Cr	Err
CA05	275	61,57	126,88	68,12	15,56	70,96	-4,57	134,9	5240,3	391,2	672,5	205,9	125,31	236,02
CM 034	1009	88,45	52	57,04	110,97	78,99	-402	336,2	49309	1058	2349	332,5	-87,87	258,44
CM 59	4898	207,1	360,03	96,95	65,43	103,2	-40,3	363,6	39755	1099	2162	381,9	-154,83	308,38
CM 077	3502	165,6	235	80,17	29,43	88,23	-99,1	327,1	37176	996	1357	302,5	25,71	297,38
CM 085	2525	141,3	236,58	78,47	46,43	85,03	-182	287,6	29753	885,2	885,6	256,9	-33,43	269,61
CM 090	4514	204	231,74	92,4	-25,59	102,3	89,56	436,6	54676	1316	5967	588,3	-95,69	354,97
CM 092	1502	119,6	13,36	66,09	125,02	96,16	-1369	619,6	138948	1983	16557	893	-96,48	419,9
CM 121	2000	195,8	320,22	154,9	164,39	198,3	-170	699,3	83771	2113	5461	794,7	-40,38	607,13
CM 134	3068	244,7	756,57	195,6	14,1	209,7	-213	587,1	50870	1743	6092	868,9	-204,97	603,9
CM 141	506,6	61,91	-4,3	44,88	52,79	64,43	-85,1	261,8	33014	804,4	1129	228,7	99,82	232,66
MB15	58,51	41,7	52,73	53,48	-22,93	62,82	89,32	284,7	33990	857,9	942,8	227,3	-16,26	232,13
MB58	130,4	51,76	16,95	57,95	-3,92	71,44	171	293,3	30585	872,4	458,6	203,7	252,77	285,65
MB67	10,45	37,87	57,22	53,63	-12,36	63,47	144,3	270,8	30254	808,4	520,2	191,8	119,92	244,39
MB69	75,96	47,39	266,51	73,19	75,69	77,36	-16,9	321	40265	978,6	544,2	214,8	236,91	290,25
MB70	23,77	42,67	248,6	71,32	55,07	74,55	180,3	278,9	28922	827,4	858,5	230	143,84	261,41

Résultats des analyses par spectrométrie de fluorescence X des échantillons analysés par la suite par ICP-MS :

N°	Mo	Err	Zr	Err	Sr	Err	Rb	Err	Pb	Err	Se	Err	As	Err	Hg	Err
C 21	-1,98	5,98	149,57	17,26	164,64	10,55	72,61	7,1	26,89	15,94	-4,45	5,68	-2,29	11,56	17,19	7,94
CM 016	0,74	8,44	82,7	23,05	74,89	12,62	100,43	14,26	19688,63	320,91	9,99	25,85	978,23	238,65	-12,9	15,42
CM 070	7,9	9,57	151,01	27,17	83,69	14,06	79,92	14,43	21630,84	355,2	22,07	29,2	951,76	263,33	12,27	19,16
CM 085	8,28	8,54	54,04	21,58	117,87	13,8	59,44	11,26	12807,65	255,58	1,03	20,79	620,68	189,95	-8,33	13,58
CM 103	-5,81	6,66	55,37	18,01	115,99	11,75	83,59	10,41	8169,58	181,19	-2,13	14,91	282,47	133,66	-3,59	10,43
CM 107	6,34	6,57	101,39	17,15	88,93	9,35	66,95	8,02	1190,55	65,8	-0,32	7,93	94,39	49,65	0,49	7,28
CM 116	10,34	9,07	77,06	23,27	68,67	12,46	75,38	13,18	17605,51	309,93	33,27	26,64	862,86	230,36	9,27	17,1
CM 122	0,71	11,53	2,16	31,54	10,28	17,38	96,65	23,77	66406,29	732,74	-18,11	54,64	1915,87	538,85	19,88	34,27
CM 134	-2,69	14,81	-56,99	42,25	-9,54	24,78	54,53	32,53	115498,32	1142,69	19,18	86,61	4193,94	843,71	-58,16	47,18

N°	Zn	Err	Cu	Err	Ni	Err	Co	Err	Fe	Err	Mn	Err	Cr	Err
C 21	108,46	37,41	35,24	44,79	43,98	54,48	20,77	156,38	16019,23	467,43	607,75	149,33	0,18	168,43
CM 016	2140,27	133,6	197,6	78,31	60,88	91,83	-452,57	358,51	47210,34	1125,83	2284,57	367,58	-129,57	293,95
CM 070	1843,85	133,89	250,04	88,86	28,87	101,38	-317,39	501,54	80893,27	1550,25	3303,22	465,81	604,41	445,63
CM 085	2524,6	141,25	236,58	78,47	46,43	85,03	-182,18	287,6	29753,17	885,15	885,58	256,93	-33,43	269,61
CM 103	1697,9	103,6	98,11	55,87	51,5	70,53	-68,29	260,49	30628,09	794,98	1441,74	260,66	354,02	275,23
CM 107	657,04	64,5	63,43	46,14	17,07	58,64	-44,98	268,27	37815	821,37	1376,08	235,9	127,73	230,36
CM 116	1691,27	124,53	819,65	113,86	87,25	99,87	-70,44	457,35	70277,95	1396,43	1820,3	359,78	-2,22	346,72
CM 122	1277,19	142,54	505,64	136,63	250,47	163,82	-460,54	516,95	60516,41	1590,43	3246,1	567,49	413,91	528,55
CM 134	3067,86	244,67	756,57	195,61	14,1	209,7	-213,01	587,1	50870,14	1743,36	6092,32	868,88	-204,97	603,9

Résultats des analyses par ANRC :

N°	Ni	Sn	Zn	Sb	Pb	Ag	As	Ti
CA005	-	2455	550	-	22	-	-	1273
CM034	26	-	1262	-	3540	-	26	3516
CM059	17	-	4745	21912	21614	123	32	3300
CM077	24	-	3311	-	12766	76	24	3315
CM085	12	-	2090	-	9552	-	30	2475
CM090	6	-	3776	-	21563	118	78	36939
CM092	-	69	1732	-	979	-	127	2401
CM121	23	-	1867	52624	106216	342	56	3199
CM134	9	-	2044	-	94219	423	70	1405
CM141	17	-	697	-	592	-	29	2748
MB015	9	-	166	5881	106	-	13	3143
MB058	15	-	597	5557	74	-	32	3622
MB067	17	-	290	-	329	-	20	3998
MB069	19	-	322	8372	587	125	26	4345
MB070	10	-	318	8266	311	60	15	3143

Résultats des analyses par ICP-MS réalisées par le laboratoire du CRPG :

N°	As	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	Pb	Rb	Sr	Zn	Zr	Ag	Hg
C 21	10,53	7,329	57,8	51,11	20417	813	1,649	30,27	30	85,05	167,2	155,2	189,6	<2	6,4
CM 016	83,18	24,01	64,58	290,9	50388	2199	13,21	55,79	24194	147,2	100,3	2407	143,5	86	n.d.
CM 070	79,49	32,09	89,8	200,4	98712	3082	19,42	115	24659	121,2	124	2082	151,9	64	n.d.
CM 085	46,78	13,34	50,52	261,5	33664	1433	2,094	36,36	13426	99,13	156,8	2325	116,7	45	n.d.
CM 103	58,43	16,45	60,41	152,9	43652	2029	3,156	47,97	11285	116,8	165,9	2237	128,6	39	n.d.
CM 107	114	26,43	77,81	64,46	60145	2354	6,506	62,59	1993	132,7	155	1112	175,4	5	n.d.
CM 116	76,92	31,04	94,53	792,8	96229	2068	26,93	157,7	19485	106,7	94,62	1887	144,6	71	n.d.
CM 122	109,3	21,31	63,98	473	55473	4244	20	44,5	95890	105,4	68,35	1706	97,71	222	n.d.
CM 134	112,8	13,51	26,3	659,8	37469	4345	6,902	26,61	155694	53,55	43,44	2801	57,03	570	n.d.

Annexe I :
Corpus de fragments de creusets de Montreuil-Bonnin

Liste des abréviations :

Coul : couleur de la surface interne ou externe des fragments.
Fiss : fissure.
Tour : traces de tournage.
Liss : traces de lissage.
Diam : diamètre interne estimé du creuset.

int. : intérieur.
ext. : extérieur.
vit. : vitrification.
tr. : trace.
trans. : transparent.

Dégraissant :
- QBG : quartz blanc gris.
- QBR : quartz blanc rouge.
- part. N : petites particules noires.

Couleurs de pâte et des surfaces internes et externes :
- f. : foncé.
- c. : clair.
- B : bleu.
- Bdx : bordeaux.
- Be : beige.
- Bl : blanc.
- G : gris.
- J : jaune.
- M : marron.
- N : noir.
- R : rouge.
- Ro : rose.
- V : vert.

Numéro	Masse g	Pâte	Dégraissant	Coul. Int.	Vit. ext.	Coul. ext.	e max	e min	Fiss ext.	Fiss int.	Liss. ext.	Liss. int.	Tour ext.	Tour int.	Diam. int.	Métal	Bord	Type bord	Bec	Fond	Remarque
3004A01	92	Bl	QBR	B		Bl	15	14,2			X	X			18						
3004A02	26	Bl	QBR	B		Bl	15,6	13,5			X	X			ind.						
3004B01	54	Bl	QBR, mica	B		Bl, J	17,3	14			X	X			ind.					X	
3004B02	125	Bl	QB, mica	B		Bl, J	18,3	15,7			X	X			ind.					X	
3004B03	22	Bl	QBR, mica	B, part N		Bl	16,3	16,3				X			ind.						
3004B04	20	Bl	QB, mica	B		Bl	14,4	14,4				X			ind.						
3004B05	30	Bl	QBRG, mica.	M		Bl, J	11,6	11,6							ind.						
3004C01	33	Bl	QBR, mica	Bl		Bl	18,8	18,8		X	X	X			ind.						
3004C02	14	Bl	QBR, mica	Bl		Bl	17,2	17,2		X	X	X			ind.						
3004D02A	34	Bl	QBG	M		Gc	18,4	17,8				X			17		X	M			
3004D02B	58	Bl	QBG	M, R		Gc	17,8	14,5				X			17						
3004D03	5,9	G	QGN	Gf		J	18,2	18,2							ind.						
3004E01	76	Bl	QBG	Gf	X	vit B	16,5	11,8					X	X	15		X	K			
3004E02A	46	Bl	QBG, tr.fer	J	X	vit B	17,5	13						X	21		X	N			
3004E02B	5,9	Bl	QBG, tr.fer	J	X	vit B	13	13						X	21						
3004E03	48	Bl	QBG	Bdxf	X	B, G, vit J, vit R	14,5	12,4						X	15						
3004E04	43	Bl	QBG, tr.fer	M	X	GbB, vit J	19,2	16,3							ind.						
3004E05	25	Bl	QBG, tr.fer	Gf	X	Bc, vit B	14,3	13						X	ind.						
3004E06	51	Bl	QBG, tr.fer	M		G R	16,2	14,9							16		X	N	frag.		Empreinte
3004E07	42	Bl	QBG	N, Ro	X	Bc, vit J	18,7	15,9							ind.						
3004E08	16	Bl	QBG	Gc, Gf	X	Bc, vit J	12,2	12,2							16						
3004E09	36	Bl	QBG	Gc, Gf		pas lisse	13	11,3						X	16						
3004E10	38	Bl	QBG	Bdx, Gf	X	Bc, vit J	18,7	14,6							16		X	O			
3004E11	18	Bl	QBG, tr.fer	Bl	X	Bc, légère vit	10,5	10,5						X	12						
3004E12	12	Bl	QBG, tr.fer	Gc	X	B G, vit R trans	11,1	11,1							16						
3004E13	11	Bl	QBG	Gf		Gc B, vit B	14,5	14,5						X	ind.						
3004E14	58	Bl	QBG, tr.fer	Gf		Gc / Be	16	13,1						X	15						
3004F01	44	Bl	QBG	Bl, M, vit N	X	Bl, vit V	18	14,5				X			15		X	O			
3004F02	36	Bl	QBG	J	X	Jc, vit V	15	15						X	ind.						
3004F03	39	Bl	QBG, vit. N	Gf	X	Bl, vit V	18	18				X		X	16		X	P			
3004G01	40	Bl	QBR	Bl		Bl	17,6	14						X	21		X	D			
3004G02A	28	Bl	QBR	Bl		Bln N	13,5	13,5							16						
3004G02B	33	Bl	QBR	Bl		Bln N	13,5	13,5							16						
3004G03	41	Bl	QBR	Bl		Bl	20,2	17,2						X	ind.						
3004G04	21	Bl	QBR	Bl, N, V		Bl	14,5	14,5							22	int.					Bas de bec ?

Numéro	Masse g	Pâte	Dégraissant	Coul. Int.	Vit. ext.	Coul. ext.	e max	e min	Fiss ext.	Fiss int.	Liss. ext.	Liss. int.	Tour ext.	Tour int.	Diam. int.	Métal	Bord	Type bord	Bec	Fond	Remarque
3004G05	19	Bl	QBR	Bl		Bl	18,6	18,6				X			14		X	C			
3004G06	34	Bl	QBR	Bl		Bl	15,9	15,9							11		X	O	frag.		
3004G07	25	Bl	QBR	Bl		Bl	17,4	17,4				X			18		X	A			
3004G08	65	Bl	QBR	Bl		Bl	17,5	13,4						X	19						
3004G09	7,2	Bl	QBR	Bl		J	13,5	13,5							ind.						Prélevé
3004H01	28	Bl	QBG	Gf	X	Bl vit	14,9	11,3						X	17						
3004H02	36	Bl	QBG	Gf	X	Bl vit	16,7	12,7				X		X	ind.						
3004I01	63	Bl	QBR, mica	Ro		J	18,5	14,4			X	X			13		X	B			
3004I04		Bl	QBR, part. N	Jc, part N		Jc	18,5	14,6			X	X			16		X	I			
3004Inc01	43	Bl	QBG	Bl		Bl, Gf	19,8	19,8							ind.		X	F	frag.		Doigt interne
3004Inc02	98	Bl	QBG, mica	J		Bl	17,5	8,5						X	19		X	D	frag.		
3004Inc03	55	Bl	QBR, mica	Bl		Bl	18,3	18,3				X	X		11		X	O			Défaut bord
3004Inc04	67	Bl	QBR, mica	Ro		Ro	18,4	12,8						X	16		X	B			
3004Inc05	44	Bl	QBG, part. N	J, part N		J	16	14,6			X	X			ind.						
3004Inc06	17	Bl	QBR, mica	Bl		Bl	14,5	14,5					X		11		X	E			
3004Inc07	6,7	Bl	QBGR	Bl		Bl	12,2	12,2							ind.						
3004Inc08	104	Bl	QBG, mica	Ro, part N	X	Gf, M, vit N	20,9	14,1				X		X	13		X	C			
3004Inc09	50	Bl	QBG	M	X	R, vitRo	19	19							12	int.	X	C	frag.		
3004J01	41	Bl	QBG	Gf, J		B	13,2	13,2	X					X	11				frag.		Pas de bord
3004J02	47	Bl	QBG, vit. N	J	X	Gc, vit N	15,7	13,8		X		X			ind.						Prélevé
3004J03	24	Bl	QBG	Ro		Bl	13,5	13,5						X	14						
3004J04	23	Bl	QBG, part. N	Mf	X	Gc, vit	10,5	10,5	X					X	22						
3004J05	5,8	Bl	QBG, vit.N	Gf	X	Gc, vit N	11,8	11,8	X						ind.						Prélevé
3004J06A	25	Bl	QBG	N, Gf		Gc	15,7	11,2	X					X	16						
3004J06B	6,7	Bl	QBG	N, Gf		Gc	11,2	11,2	X					X	16						
3004L01	22	Bl	QBR	Bl		Bl	15,9	11,5						X	19						
3004L02	6,4	Bl	QBR	Bl		Bl	15,8	15,8						X	ind.						
3004L03	3,7	Bl	QBR	Bl		Bl	15,5	15,5						X	ind.						
3004M01A	35	Bl	QBG, tr.fer	Gf, Bdx	X	B, vit R	18,3	12,1							14		X	H			Grosse coulure
3004M01B	58	Bl	QBG, tr.fer	Gf, Bdx	X	B, vit R	18	12,8							14		X	H			
3004M02	55	Bl	QBG, ptt. part. N	M, J	X	Bdx vit	18	14,3				X		X	ind.						
3004M03	33	Bl	QBG,mica	M, V		Roc	19,5	11,2						X	21						
3004M04	34	Bl	QBG	G, M	X	Bl, vit R, J	13,8	13,8				X		X	18						
3004M05	32	Bl	QBG, part. N	Mf		Bl, Ro, B, vit V	15,9	14,6				X			ind.						

Numéro	Masse g	Pâte	Dégraissant	Coul. Int.	Vit. ext.	Coul. ext.	e max	e min	Fiss ext.	Fiss int.	Liss. ext.	Liss. int.	Tour ext.	Tour int.	Diam. int.	Métal	Bord	Type bord	Bec	Fond	Remarque
3004N01	25	Bl	QBRG	Bl	X	Bl, vit N	19,3	19,3							14		X	N			
3004N02	35	Bl	QBG	Gf		J	16,4	16,4						X	17					X	
3004O01	60	Bl	QBG, mica	Bl, M, N		Bl	12	11			X	X		X	13		X	J	frag.		Doigt interne
3004O02	42	Bl	QBG, part. N	Nc, vit N		J	14,7	10,7				X		X	12		X	B			
3004P01	69	Bl	QBG, mica	B, J		Bl	15,4	15,4	X					X	ind.						
3004P02	24	Bl	QBG, mica	B, G		Bl	12,2	12,2						X	16						
3100-001	165	Bl	QBG	Bdx, Bdxf, VJ		B, Mf	17,8	14,4		X		X			ind.	Int.				X	
3100-002	46	Gc	QBG	Bdx, VJ	X	Bc, vit Mf	13,6	11,8				X			18	int.					
3100-003	14	Bl	QBG	Bdxf	X	vit Bc, vit R	12,8	11,6				X		X	14						
3100-005	39	Bl	QBG fin	Bl		Gf	8,5	6,3				X	X	X	22						
3101-001	6	Bl	QBG	Mc		M	21,7	15,3			X	X			ind.					X	
3102-001	121	Bl, Ro	QBR	vit N		Bl, J	18,7	14,2				X			ind.					X	
3102-002	45	Bl	QBG	Bdxc	X	Gc, vit R	16	13,7			X	X			ind.						
3102-003	2,2	Gc	QBG, part N	G		B	11,2	11,2							17						
3102-004	74	Gc	QBG	Bl, J, vit N		Gc	19,7	14,6	X	X	X	X		X	22	Prélevé	X	B			
3102-005	72	Bl	QBG	G, Ro		Gc	19,3	14,5							14		X	C			
3102-006	59	Bl	QBG	G, M		Bl, J	19,3	12,4				X		X	14		X	C			
3102-007	23	Bl	QBG	Bl		Bl	14,3	14,3		X		X			ind.						
3102-008	39	Bl	QBG	Bl		Bl, J	19,2	17,7				X			19		X	C			
3102-009	29	Bl	QBG	Bdxf, G	X	Bl, vit VJ	16,5	14,4	X			X		X	21						
3102-010	13	Bl	QBG	G, M	X	vit J, vit N	13,8	13,8				X			ind.						
3102-011	57	Bl	QBG	Gf		Bc	16,4	13,6	X			X		X	17						
3102-012	45	Bl	QBG	Bl	X	Bl, vit N	15	13				X			ind.						
3102-013	19	Bl	QBG, mica	Bl		Bl	12,6	12,6				X		X	16						
3102-014	27	Gc	QBG	Gc		G	12,3	12,3	X			X		X	17						
3102-015	23	Bl	QBG	Bl		Mc	18,8	18,8							ind.						
3102-018	98	Bl	QBG	Jc		Bl	16,4	10,3			X	X			18	int.	X	L			
3102-019	29	Gc	QBG	G		Gc	17,9	13,1			X	X		X	16		X	L			
3102-020	41	Bl	QBG	Bl		Bl	17,4	9,8				X			18		X	I			
3102-021	31	Bl	QBG	Bl, M		G	13,2	9,1					X		ind.		X	L	entier		Bord pas trop représentatif du *corpus*
3105-001	35	Bl	QBG	Gf	X	vit Bc	12,7	9				X			19						
3105-002	33	G	QBG	Bdxf	X	vit Bc, vit R	9,9	9,7				X		X	17	int.					

Numéro	Masse g	Pâte	Dégraissant	Coul. Int.	Vit. ext.	Coul. ext.	e max	e min	Fiss ext.	Fiss int.	Liss. ext.	Liss. int.	Tour ext.	Tour int.	Diam. int.	Métal	Bord	Type bord	Bec	Fond	Remarque
3105-003	68	Bl	QBG, mica	Bl		J	19,2	16,8			X	X		X	15		X	D			Quartz de 1cm
3105-004	53	Bl, Ro	QBG	B, J		Bdx, Gc	16,3	11,3			X	X			ind.						
3105-005	79	Bl, Ro	QBG	Gf	X	vit Bc	14,4	13,2		X		X		X	ind.						
3105-006	35	G	QBG	Bdx	X	vit B	18,5	11,7							19						
3105-007	39	Bl	QBR	Gc		Gc	19,7	19,7						X	ind.		X	I			
3105-008	121	Bl	QBG	J	X	vit Gc, vit N	14,6	9,3				X		X	17						Marques int. très nettes
3105-009	16	G	QBG	Gf	X	vit Bc	12,5	10,1		X		X		X	ind.	int.					Recolle 3105-032
3105-010	76	Bl	QBG	Gf	X	vit Bc, vit V	13,6	12,5				X		X	17						
3105-011	34	Bl	QBG	M	X	vit Bc, Ro	19,2	14,2					X		18		X	E			
3105-012	51	Bl, Ro	QBR	Ro		Ro	20,6	12,8				X		X	13		X	C			Cœur de pâte Bl
3105-013	25	G	QBG	Gf	X	vit B, vit R	14,2	12,1							ind.						
3105-014	30	Bl	QBG	Bdx, G		B	11,8	8				X		X	17						
3105-015	116	Bl	QBR fin	Bl		Bl, J	21,3	18,2				X		X	ind.					X	Fond
3105-016	19	Bl	QBG, mica	Bl, J		Bl	15,6	15,6				X			ind.						
3105-017	109	G	QBG	G	X	Gc,vit N	18,9	12,3				X		X	17		X	D			
3105-018	17	Bl	QBG	M	X	vit B	14	13,2			X		X		ind.						
3105-019	39	Bl	QBGR	M		Ro	18,3	15,3							ind.	int.					
3105-020	59	Bl	QBR	Bl, J		Bl, J	16,3	14,2			X	X		X	13						
3105-021	46	Bl	QBG	M	X	vit Bc	19,3	11,1			X		X		15	bord	X	N			
3105-022	27	Bl	QBG	Bdxf	X	B vit	13,4	12,3				X		X	16						
3105-023	40	Bl	QBR, mica	Bl		Bl	14,5	12,6			X	X			ind.						
3105-024	35	Bl	QBR	Bl		Bl, J	16,4	14,9			X	X		X	ind.						
3105-025	27	Bl, Ro	QBR	Bl, G		Ro	14	11		X	X				ind.						
3105-026	27	G	QBG, part N	Bdxf, N	X	vit B, vit R	10,5	10,5				X		X	15						
3105-027	107	Bl	QBR	Bl		Bl, J	21,8	12,8			X	X	X	X	16		X	H			
3105-028	42	Bl	QBG	Ro, VJ	X	vit Gc	18,5	12,15			X				17		X	N			
3105-029	36	G	QBG	Bdxf, N	X	vit B, vit R	14	13,2		X					ind.						Très gros dégraissant
3105-030	35	G	QBG	Bdxf	X	vit B, vit J	14,9	12,2				X		X	15						
3105-031	61	Bl	QBG	Bc, Bl		Bc, Bl	16,3	16,3			X	X			ind.	int.				X	
3105-032	35	Bl	QBG	Gc, vit N	X	Gc, vit N	13,5	9,2			X	X		X	21						Recolle 3105-09, rechappe fissure ?

Numéro	Masse g	Pâte	Dégraissant	Coul. Int.	Vit. ext.	Coul. ext.	e max	e min	Fiss ext.	Fiss int.	Liss. ext.	Liss. int.	Tour ext.	Tour int.	Diam. int.	Métal	Bord	Type bord	Bec	Fond	Remarque
3105-033	22	Bl	QBG	Bc		Bc	13,3	12,8		X		X			ind.						
3105-034	30	Bl	QBG	Bl		Bl	13,2	13,2		X	X	X			ind.						
3105-035	27	Bl	QBG	B		Bl, G	18,3	13,6							ind.						
3105-036	20	Bl	QBG	Gf	X	vit B	11,3	10,4		X		X		X	16						
3105-037	25	Bl	QBG fin	Bl, J		Bl	14,5	11,4			X	X		X	ind.	ext.					
3105-038	34	Bl	QBG	Bl		Bl, J	16,3	15,6				X		X	15						
3105-039	14	G	QBG	Bdxf, VJ		B, R	11,4	11,4		X				X	16						
3105-040	21	G	QBG	VJ	X	B, vit R	12,7	10,3				X			ind.	int.					Recolle 3105-048
3105-041	23	Gc	QBR fin	Gc		Gc	13,6	12,6							ind.						idem 3111-013
3105-042	16	Bl	QBR fin	Ro		Bl, J	14,5	13,8							ind.						
3105-043	25	G	QBG	Gf		Bc	15,5	8,8		X	X				18						
3105-044	8	Bl	QBG	B, G		Bl	9,3	9,3	X			X		X	14						
3105-045	20	Bl	QBG	Bdxf	X	vit Bc	11,4	9,3						X	17						
3105-046	22	G	QBG	Bdxf, Vj		Bc, Mf	14,6	13,8							ind.	int.					
3105-047	13	Bl	QBG	Bl, J		Bl	13,2	13,2			X	X			ind.						
3105-048	14	G	QBG	Bdxf, N		B, R	10,3	10,3			X	X		X	16						Recolle 3105-039
3105-049	29	Bl	QBR, mica	N		Bl	19,2	17,5							ind.					X	
3105-050	12	G	QBG	G, M		B, R	11,8	11				X		X	17						
3105-051	35	G	QBG	Gf, VJ	X	Bc, vit N	20,6	19,3							ind.						
3105-052	30	G	QBG	Bdx, VJ		Bc, VJ	13,3	9,4				X			ind.						
3105-053	16	G	QBG	Bdx, VJ		B, R	11,3	9,3						X	ind.						
3105-054	19	Bl	QBG	N	X	vit Bc	19,9	19,9			X	X			ind.						
3105-055	9,1	Ro	QBR	Ro		Bl	13,1	13,1				X			ind.						
3105-056	8,9	G	QBG	Bdxf	X	vit Bc	9,7	9,7				X			15						
3105-057	7,9	G	QBG	Gf	X	B, vit R	12,2	10,7							ind.						
3105-058	6,8	Gc	QBR, mica	Gc		Gc	14	14							ind.						
3105-059	11	Bl	QBG	N	X	vit Bc	14,2	14,2							ind.	int.					
3105-060	9,9	Bl	QBR	Bl,J	X	vit V	12,2	12,2							17						
3105-061	12	Gc	QBG	G		R	9,4	9,4				X		X	21						
3105-062	9,4	Gc	QBG	Bdxf	X	vit Bc, vit R	11	11				X		X	14						
3105-063	9,5	G	QBG	M		B	11,6	11,6							ind.						
3105-064	20	G	QBG	Bdx	X	Bc, vit M	14,3	12,7				X			ind.						
3105-065	11	G	QBG	M	X	vit Bc	13	9							ind.						

Numéro	Masse g	Pâte	Dégraissant	Coul. Int.	Vit. ext.	Coul. ext.	e max	e min	Fiss ext.	Fiss int.	Liss. ext.	Liss. int.	Tour ext.	Tour int.	Diam. int.	Métal	Bord	Type bord	Bec	Fond	Remarque
3105-066	10	G	QBG	N	X	vit Bc	13,8	13,8							ind.						
3105-067	12	G	QBG	Bdx, vit N	X	vit B, vit V	10,1	9,7							15		X	P			
3105-068	17	Bl	QBR	Bl		G	14,6	12,1							15						
3105-069	11	Bl	QBG	Bl, J	X	Bc, vit N	9,3	9,3				X		X	21						
3105-070	6,9	Bl	QBG	Bdx, G	X	vit Bc, vit M	10,7	10,7						X	ind.						
3105-071	5	G	QBG	Bdx, G	X	vit Bc, vit M	9,8	9,8							ind.						
3105-072	5,9	G	QBG	Bdx	X	vit B	11,2	11,2				X			ind.						
3105-073	6,6	Bl	QBG	N		Bc	14,7	14,7				X		X	ind.						
3105-074	13	Bl	QBG	Bdx		B	12	12				X		X	ind.						
3105-075	14	G	QBG	Bdx		Bc	14	14	X					X	18						
3105-076	9,6	Bl	QBG	Gf	X	vit Bc	14,2	11,6				X		X	ind.						
3105-077	8,9	G	QBG	GF		Bc, J	10,4	10,4				X		X	ind.						
3105-078	9,7	Bl	QBG	Bdx		Bc	11,1	8,8			X			X	15						
3105-079	11	Bl	QBG	Bl		B	12,3	11,4				X			ind.						
3105-080	5,3	Bl	QBG	VJ		N	15,1	15,1							ind.						
3105-081	11	B	QBG	Gf		B, Ro	9,8	9,8				X			16						
3105-082	109	Bl	QBR	Bl		Bl	15,7	13,7	X	X		X		X	15						Recolle 3105-088
3105-083	55	Gc	QBG	G	X	vit Bc	15,3	14,5							ind.						
3105-084	56	Bl	QBR	Bl		Bl, J	12,2	12,2	X		X	X		X	15						
3105-085	26	Gc	QBG	Bdx	X	B, vit V	13,5	11,2				X			16						
3105-086	22	Gc	QBG	Bdx		B, R	16,5	14,4			X				ind.						
3105-087	23	Gc	QBG, part N	G		Bc	12,7	10,3				X		X	17						
3105-088	7,9	Bl	QBR	Bl		Bl	13,7	13,7				X		X	15						Recolle 3105-082
3105-089	5,3	Gc	QBG	Bdx	X	B, R, vit N	13,3	13,3							ind.						
3105-091	166	Bl	QBR	Jc		Bl	20,1	20,1		X	X	X			ind.					X	
3105-092	74	Bl	QBG	Bl		Bl	15,7	14,3	X			X		X	15						
3105-093	93	Bl, Ro	QBR, mica	Roc		Roc	17,3	15,8				X		X	13						
3105-094	102	Gc	QBG	Mc		Gc	18,4	12,2				X		X	19		X	D	frag.		
3105-095	46	Bl	QBG	Bl		Bl	12,9	11			X	X		X	18						
3105-096	51	Bl	QBG	Bdx	X	vit B	16,9	10,3	X			X			16	int.	X	B			
3105-097	32	Gc	QBG	Gf		R, Vc	12,5	12,5			X	X			21						
3105-098	26	Bl	QBG	Bl		Gc	10,4	10,4	X		X	X			ind.						
3105-099	41	Bl	QBG	Mc		Mc	17,5	13,6				X		X	15		X	A			

Numéro	Masse g	Pâte	Dégraissant	Coul. Int.	Vit. ext.	Coul. ext.	e max	e min	Fiss ext.	Fiss int.	Liss. ext.	Liss. int.	Tour ext.	Tour int.	Diam. int.	Métal	Bord	Type bord	Bec	Fond	Remarque
3105-100	31	Gc	QBG	G	X	vit B	14	11,3				X		X	17						
3105-101	28	Gc, Ro	QBG	Mc, N		B, Gc	16,5	15,2			X	X		X	ind.						
3105-102	20	Gc	QBG	Ro	X	Gc, vit V	16,2	16,2				X			ind.						Recolle 3105-103
3105-103	22	Gc, Ro	QBG	Mc		Bc	16,5	16,5				X			ind.						
3105-104	28	B	QBR	B		B	20,7	20,7				X			16		X	C			Recolle 3105-101
3105-105	27	Gc	QBG	Bdxf		Bl	12,8	11,5						X	ind.						
3105-108	18	Gc	QBG	Bdxf	X	vit B	14,9	14,9				X			ind.						Scorie, recolle 3105-106
3105-109	71	Gc	QBG	Gf		G	14,4	13	X			X		X	19						
3105-110	48	Bl	QBG	Bl		Bl	13,8	12,3				X		X	15						
3105-111	42	Bl	QBR	Roc		Roc	19	13,6						X	18		X	F			
3105-112	49	Bl	QBG	G		Bl	16,6	11,6	X					X	21						
3105-113	63	Gc	QBG	G		Gc	16,9	13,2						X	17		X	L			
3105-114	35	Bl	QBG	Bl		Bc	13,5	10,7		X	X	X			16	int.					
3105-115	21	Bl	QBG	Gf		Gc	15	15			X	X			ind.						
3105-116	27	Bl	QBG	Mc		Bl	14,1	14,1				X			18						
3105-117	26	Bl	QBR	Bl		Bl	15,8	15,8				X			ind.						
3105-118	17	Bl	QBG	Bl		Bl	14	12,1			X	X			ind.						
3105-121	6,3	Bl, Ro	QBG	M		Gc	14,8	14,8				X			ind.						
3105-122	5	Gc	QBG	Gf		B	10,3	10,3				X			ind.						
3105-123	3,4	Gc, Ro	QBR			G	ind.	ind.							ind.						
3105-126	49	Bl	QBR	Bl		Bl	18,5	16,8				X	X	X	16		X	O			
3105-127	109	Bl	QBG	Bl		Bl	17,3	11,8			X	X		X	ind.					X	
3105-128	24	Gc	QBG	Gc		Gc	15,3	15,3			X				ind.		X	J			
3105-129	109	Gc	QBG	G		Gc	18,2	13,3				X		X	17		X	M			
3105-130	44	Ro	QBR	Ro		Ro	18,1	14,2			X	X		X	15		X	D			
3107-001	75	Bl	QBG	Bl		Bl	18,5	12,5	X	X	X				23		X	A	frag.		Doigt au bec
3107-002	40	Bl	QBG	Bl		Roc	14,8	12,7			X	X		X	ind.						
3107-003	28	Gc	QBG	Gf	X	vit B	13	11,4		X		X		X	18						
3107-004	7	Bl	QBG	Bl		Bl	19,7	16,3			X	X			17		X	N			
3107-005	23	Bl	QBG	N		G	12	8,9	X		X	X			ind.						
3107-006	54	Gc	QBG	G		G	16,5	12,1			X			X	16		X	M			
3107-007	65	Bl	QBG	Bdx, G		Gc	19,4	11,4		X		X		X	15		X	D			
3107-008	72	Ro	QBG	Gf	X	G, vit N	19,3	14	X			X		X	21						

Numéro	Masse g	Pâte	Dégraissant	Coul. Int.	Vit. ext.	Coul. ext.	e max	e min	Fiss ext.	Fiss int.	Liss. ext.	Liss. int.	Tour ext.	Tour int.	Diam. int.	Métal	Bord	Type bord	Bec	Fond	Remarque
3107-009	85	Gc	QBR	Roc		Ro	20,8	18,3							ind.					X	
3107-010	60	Gc	QBG	Gf		B	17,2	15		X		X			18						
3107-011	115	Bl	QBG	Jc		Jc	18,4	13,8				X		X	16		X	D			
3107-012	43	Bl	QBG	Bdx		M	15,8	12,4			X				15		X	F			
3107-013	58	Bl, Ro	QBG	J, M		Ro	16,7	15,2	X	X		X		X	22						
3107-014	37	Gc	QBG	G		G, R	16,6	9,6	X	X	X	X			ind.						
3107-015	40	Gc	QBG	Gf	X	vit B	12,6	11,3				X		X	21						
3107-016	22	Bl	QBR	Bl		Bl	16,8	14,6							18		X	I			
3107-017	27	Gc	QBG	Bdx, G	X	vit B	12,5	12,5	X	X		X		X	ind.						
3107-018	31	Bl	QBG	Bl		Bl	15,1	14,2	X		X				ind.						
3107-019	14	Gc	QBG	Mf		B	11,3	11,3				X		X	ind.						
3107-020	21	Bl	QBG	G		Bl	15,7	14,7	X	X		X			ind.						
3107-021	19	Bl	QBG	G		Gf	17,3	15,3		X	X	X			ind.						
3107-022	14	Gc	QBG	Bdxf, N	X	vit B	11,5	9,8						X	15						
3107-023	11	Gc	QBG	G		G	10,4	10,4				X		X	17						
3107-024	12	Bl	QBG	Bl		Jc	10,8	10	X						24						
3107-025	14	Bl	QBG	vit N		Bl	17,4	15,9							ind.						
3107-026	9,7	Bl	QBR	Bl		Bl	15,3	13,5							ind.						
3107-027	7,7	Bl	QBG	N		B	13	13	X					X	ind.						
3107-028	7,6	Bl	QBG	Bl		Bc	16,2	16,2		X					ind.						
3107-029	9,4	Bl	QBG	Bl		Bl	18,3	18,3							ind.						
3108-001	60	Bl	QBG	vit N		Gc	14,2	11			X				ind.	int.					
3108-002	39	Bl	QBG	Mc	X	Bc, vit N	12,9	12				X		X	19						
3108-003	19	Bl	QBR	Bl		Bl	14,2	11,2	X	X	X	X			ind.						
3108-004	58	Bl	QBG	M		G	19,2	17,2			X				ind.						
3108-005	9,8	Bl	QBG	Jc		Bl	7,9	7,9	X			X		X	14						
3108-006	21	Gc	QBG	Bdx		Bc	15,8	13,1							ind.						
3108-007	30	Bl, O	QBG	G		Roc	17,7	16,9			X	X			15		X	O			
3108-008	14	Bl	QBG	M		Gc	15,8	12						X	ind.						
3108-009	14	Ro	QBR	Ro		Ro	13,6	13,6							ind.						
3108-010	22	Bl	QBR	Ro		Bl	16,2	16,2				X			ind.						
3108-011	16	Bl	QBG	Bl		Jc	13,2	13,2				X		X	17						
3108-012	15	Bl	QBG	M		Bl	15,4	12,1			X	X			ind.						
3108-013	9,5	Bl	QBR	Bl		Bl	11,8	11,8			X	X			ind.						

Numéro	Masse g	Pâte	Dégraissant	Coul. Int.	Vit. ext.	Coul. ext.	e max	e min	Fiss ext.	Fiss int.	Liss. ext.	Liss. int.	Tour ext.	Tour int.	Diam. int.	Métal	Bord	Type bord	Bec	Fond	Remarque
3109-001	21	Gc	QBG	Gf	X	vit Bc, vit V	17,1	17,1		X					ind.						
3111-001	92	Bl	QBG	G	X	G, vit R, vit N	18	9,8				X		X	15	int.	X	B			
3111-002	52	Bl	QBG	J		B, R	19,6	15	X	X					15		X	D			
3111-003	32	Gc,Gf	QBG	Bdxf	X	B, R, vit V, vit R	10	10		X		X		X	15	int.					2 couleurs de pâte foncé à l'intérieur
3111-004	86	Bl	QBG	Bdxf, VJ	X	vit B, vit R, vit V	13,8	10,7				X		X	16	int.					
3111-005	56	Gc,Gf	QBG	Gf	X	vit B, vit V	18,9	13,9		X	X	X		X	ind.						Pâte une peu Ro à l'int
3111-006	159	Bl	QBR, mica	Bl, Jc		Bl, Jc	19,7	11,9			X	X			ind.					X	Lissage à la main
3111-007	69	Gc,Gf	QBG	Gf, VJ		G, R	15,3	11,9							16	int.					
3111-008	74	Bl	QBG, vit N	Jc		Jc	17,3	11,2			X	X			16		X	N			
3111-009	48	Roc	QBR, mica, fin	Roc		Roc	15,4	14			X	X		X	15						Dégraissant - gros
3111-010	45	Bl	QBG	Jc, vit N, VJ	X	vit B	13	10	X				X		18						
3111-011	21	Gc,Gf	QBG	Gf	X	B, vit M	18	14				X			ind.						
3111-012	40	Bl	QBG	Ro, VJ	X	vit B, vit R	17,3	13,4			X	X	X		16		X	B			
3111-013	33	Gc,Gf	QBR, fin	Gc		Gc	14,3	13,7							ind.					X	Idem 3105-041
3111-014	34	Bl	QBR	Bl		Bl	16,2	15,5							18		X	B	frag.		
3111-015	26	Bl	QBG	G, N		Bl	12,9	12,2						X	18						
3111-016	36	Bl	QBR, mica, fin	Bl		Bl	18,2	16,2				X		X	17		X	O			
3111-017	36	Bl	QBG	Bl		Bl	19,5	17,5							ind.						
3111-018	28	Gc,Gf	QBG	Ro, G	X	vit Gc	17,3	13,2						X	16		X	O			
3111-019	27	B	QBR	B		B	17,8	17,2			X				ind.					X	
3111-020	25	Bl	QBR	Gc		Jc	17,1	15,6				X			ind.						
3111-021	77	Bl	QBG	Gf	X	vit B, R	10,1	9,4		X		X			ind.						
3111-022	20	Bl	QBG	Bl		B, R	13,3	11,6				X			23						
3111-023	36	Bl, Ro	QBG	Gf, VJ		B	17,9	15,3						X	ind.						Strate Ro dans la pâte
3111-024	21	Bl	QBG	Gf	X	vit B, vit R	13,2	11,1				X		X	15						
3111-025	40	Gc	QBG	Gf, Bdx		B, R	17,8	14,9				X		X	19		X	F			
3111-026	34	Bl	QBG	Bdx	X	vit B, R	10,6	8,9							18						
3111-027	27	Bl	QBG	G	X	B, vit Bdx	16	16				X			ind.	int.					
3111-028	29	Bl	QBG	Bdx	X	vit B, vit R, vit N	17,2	16,9				X		X	ind.						
3111-029	147	Bl	QBG	Bl		Bl	20	12				X	X	X	21						
3111-030	20	Bl	QBG	Gf	X	vit B, vit V	12,6	12,6				X		X	21						

Numéro	Masse g	Pâte	Dégraissant	Coul. Int.	Vit. ext.	Coul. ext.	e max	e min	Fiss ext.	Fiss int.	Liss. ext.	Liss. int.	Tour ext.	Tour int.	Diam. int.	Métal	Bord	Type bord	Bec	Fond	Remarque
3111-031	33	Bl	QBG, mica	Bl		Gc	14,5	10,7				X		X	12		X	P			
3111-032	67	Bl	QBG	G	X	vit Bl	19,4	11					X	X	16		X	G			
3111-033	25	Gc	QBG	Bdxf, VJ	X	Bc, vit N	11,9	10,3		X				X	ind.						
3111-034	16	Bl	QBG	Bdxc, VJ		Bl	15,6	14,4	X						ind.						
3111-035	16	G, Bl	QBG	O		J	15,1	13,6						X	ind.						
3111-036	13	Bl	QBG	Gf, J		Gc, J	15,7	15				X		X	ind.						
3111-037	39	G	QBG	Gf, J	X	vit B	14,7	12,5				X		X	17						
3111-038	61	Bl	QBG	Gf, J		Bc	18,2	15,8						X	17		X	F			
3111-039	35	Bl, Ro	QBR	Bdx, VJ	X	Bl, vit R	17	15	X			X			ind.	int.					
3111-040	52	Bl	QBG	Bl, J		Bl	16	16			X	X		X	ind.						
3111-041	37	Bl	QBG	Bl		Bl	20,7	16,7			X	X		X	ind.						
3111-042	76	G	QBG, vit N	Bdx	X	G, vit R	18,3	11,6							15	int.	X	B			
3111-043	9,6	G	QBG	Bdxf, Gf	X	B, vit R	10,4	10,4				X		X	16						
3111-044	66	Bl	QBR	Bl		Bl	18,7	17,6				X		X	ind.					X	
3111-045	26	G	QBG	Bdx, Gf	X	vit B, vit R	12,6	10,4				X		X	14						
3111-046	81	Bl	QBR	Bl		Bl	17,2	11,1				X		X	17		X	N	frag.		
3111-047	31	Bl	QBG	Bl		Bl	18,3	16,2							ind.						
3111-048	52	BL	QBR, mica	Bl		Bl	19,4	13,1				X		X	16		X	C			
3111-049	48	Gc	QBG	Bdxf, Gf, VJ		G, Ro	14,7	12		X					ind.	?					
3111-050	35	Gc	QBR fin	Gc		Gc	15,9	15,2		X		X		X	ind.						
3111-051	56	Bl	QBG	Gc, G	X	vit G	20,5	15				X		X	15		X	A			
3111-052	32	G	QBG	Gf, vit Bdx	X	vit B	16,6	15,7							ind.						
3111-053	23	Ro	QBR	Ro		Bl	13,4	11,8				X			ind.						
3111-054	30	Bl	QBG, mica	Bl		Bl	15,1	14,2			X	X	X		ind.						
3111-055	23	Bl	QBG	Bdxc, Gc		Jc	17	17				X			17		X	N			
3111-056	18	Bl	QBG	J, N		Gc, N	9,9	8,2	X		X				ind.						
3111-057	16	Bl	QBG	J, N		Gc, N	11,9	10,3				X		X	17						
3111-058	15	G	QBG	Bdx, Gf, VJ	X	B, vit R	11,3	10,8							14						
3111-059	12	G	QBG, part N	Bdx, VJ	X	B, vit R	11,9	10,7						X	15						
3111-060	16	G	QBG	B		G, N	12,2	11,6	X	X		X		X	17						
3111-061	14	G	QBG	Gf	X	vit Gc	11,2	11,2						X	15						
3111-062	13	Bl	QBG	B, G	X	vit B, vit R	13,1	12,1						X	ind.						
3111-063	10	Bl	QBG	Gf		B	11,3	9,8				X		X	19						
3111-064	12	Bl	QBG	Gf		Gc	12,9	11,7				X			ind.						

Numéro	Masse g	Pâte	Dégraissant	Coul. Int.	Vit. ext.	Coul. ext.	e max	e min	Fiss ext.	Fiss int.	Liss. ext.	Liss. int.	Tour ext.	Tour int.	Diam. int.	Métal	Bord	Type bord	Bec	Fond	Remarque
3111-065	8,5	Bl	QBG	Gf		Gc	10,3	8,4			X				ind.						
3111-066	7,9	G	QBG	Bdx	X	vit B, vit R	12,1	10,5							ind.						
3111-067	7,9	G	QBG	Gf	X	vit Gc	10,2	10,2						X	17						
3111-068	16,5	G	QBG	Bdxf, Gf	X	vit B, vit J	14,4	10,8						X	15						
3111-069	7,12	G	QBG	Bdx	X	vit B, vit R	9,1	9,1							ind.						
3111-070	5,38	Bl	QBG	G	X	Gc, vit R	10,4	10,4	X					X	ind.						
3111-071	4,7	Bl	QBG	Gf	X	vit Gc, vit N	10,8	10,8							ind.						
3111-074	75	Bl	QBR	Jc		Bl	16,5	14,8	X	X	X	X			ind.					X	Recolle 3111-080
3111-075	63	Bl	QBG	Gf		G	15,5	13				X		X	15						
3111-076	49	Bl	QBR	Roc		Roc	19,4	15,8				X			ind.						
3111-077	53	Bl	QBG	Gf		Bl	19,8	17,4				X			ind.					X	
3111-078	29	Bl	QBG	G		Gc	13,9	11,6			X			X	15						
3111-079	58	Bl	QBG	Gf		G	16,2	13,3				X		X	15						
3111-080	24	Bl	QBR	Jc		Bl	14,8	13	X		X	X			ind.					X	Recolle 3111-074
3111-081	107	Bl	QBG	Mc		Gc	16,1	11,6			X	X		X	13		X	J			
3111-082	9,6	G	QBG	G		G	12,2	12,2			X				ind.						
3111-083	12	Bl	QBR	Roc		G	14,2	14,2			X				ind.						
3111-084	13	Bl	QBR	Bl		Gc	15	15				X		X	14						
3111-085	5,1	Gc	QBG	Bdxf		Bc	10,8	10,8							ind.						
3111-088	115	Gc	QBG	G		Gc	18,6	13,6				X		X	16		X	M			
3113-001	26	Gc	QBG	B, R		Bc	18,3	18,3				X			17		X	A			
3115-001	78	Bl	QBG	Bdx		Bc	17,2	8,9			X				17		X	H			
3118-001	35	Bl	QBG	Bl		Jc	ind.	ind.	X			X			16		X	A			
3118-002	85	Gc	QBG	G	X	vit V	19,4	18,2				X		X	ind.		X	C			
3118-003	76	Bl	QBG, part N	Roc		Bl	17,2	14,7	X	X	X	X			ind.						
3118-004	42	Bl	QBG	Bl		Bl	15,4	15,4		X	X	X		X	16						
3118-005	83	Bl	QBG	G		Bdx, G, Jc	18,1	12,2				X		X	18						Recolle 3118-024
3118-006	41	Bl	QBR	Bl		Bl	17,5	13,5						X	15		X	D			
3118-007	93	Gc	QBG	M	X	Bc, vit N, vit N	19	17,5		X	X	X		X	17						
3118-008	34	Bl	QBR	Bdxc	X	Bl, vit N	19,1	16,7							ind.						
3118-009	63	Gc	QBG	G, Mc		Gc	18,4	11,8				X		X	18		X	C			
3118-010	36	Bl	QBG	Bdxf, VJ		Gc	17,5	15,2			X				ind.	int.				X	
3118-011	36	Bl	QBG	Bdxf, N	X	vit B	11,6	11,6				X		X	ind.						

Numéro	Masse g	Pâte	Dégraissant	Coul. Int.	Vit. ext.	Coul. ext.	e max	e min	Fiss ext.	Fiss int.	Liss. ext.	Liss. int.	Tour ext.	Tour int.	Diam. int.	Métal	Bord	Type bord	Bec	Fond	Remarque
3118-012	36	Gc	QBG	G	X	Bc, vit V	16,4	14,7			X	X			ind.						
3118-013	47	Gc	QBG	G, VJ		Bc	15,9	15,9							ind.						
3118-014	38	Gc	QBG	G		Bc, vit V	14,8	12,7			X	X			ind.						
3118-015	30	Bl	QBG	Bl		Bl	13,4	11,9				X		X	16						
3118-016	35	Bl	QBG	G		B	15,2	13,1			X	X			ind.						
3118-017	28	Bl	QBG	Bdx		Roc	13,7	13,7	X		X			X	ind.						
3118-018	31	Bl	QBG	Bl		Gc	15,1	15,1				X		X	14						
3118-019	29	Bl	QBG	Roc		Gc	15,9	15,9				X			ind.						
3118-020	19	Bl	QBG	Bl		Gc	16,3	12,9						X	ind.						
3118-021	16	Bl	QBR	Roc		Roc	14,1	14,1			X	X			ind.						
3118-022	20	Ro	QBR, mica	Ro		G	16,7	16,7				X			ind.						
3118-023	22	Bl	QBR	Bl		Bl	20,3	19,3				X			ind.						
3118-024	22	Bl	QBR	G		G	12,2	12,2			X	X		X	18						Recolle 3118-005
3118-025	27	Bl	QBG	M		Ro	13,8	12,4		X		X		X	ind.						
3118-026	9,2	Ro	QBR	G		G	18,8	18,8							ind.						
3118-027	5,5	Bl	QBG	Bdx		B	12,3	12,3							ind.						
3118-028	6,9	Bl	QBG			Bc	ind.	ind.							ind.						
3118-031	97	Gc	QBG	G		Gc	18,7	10,5				X		X	17		X	M			
3120-001	11	Gc	QBG	Gf	X	vit B	17,7	14,8			X	X			13	int.					
3120-002	95	Bl	QBG	Jc		Jc	20,4	14,5				X		X	15		X	D			
3120-003	135	Bl	QBG, mica	Jc		Jc	16,5	15			X	X		X	15						
3120-004	31	Gc	QBG	G		B	15,6	12,5				X		X	24						
3120-005	71	Bl	QBR	Ro		Ro	19,3	12,6				X		X	18		X	B			
3120-006	47	Bl	QBG	Bdxf		B	13,1	13,1	X	X		X		X	18						
3120-007	62	Bl	QBG	Bdxf		B	13,6	11,1							14		X	P			
3120-008	84	Bl	QBG	Bdx, G		Gc	16,8	12,7				X	X	X	16						
3120-009	47	Bl	QBG fin	Bl		Bl	16,1	14,1	X		X	X			ind.						
3120-010	52	B	QBR	B		B	18,1	17,3				X			ind.					X	Recolle 3111-019
3120-011	15	Gc	QBG	Bdx	X	G, vit M	10,1	10,1				X		X	14						
3120-012	13	Bl	QBG	Jc		Jc	10,6	10,6			X	X			ind.						
3120-013	35	Gc	QBR	Ro		Bl, G	14,7	13,9				X			ind.						
3120-014	29	Bl	QBG	M		Gc	18,6	18,6				X			ind.		X	E			
3120-015	12	Gc	QBG	G	X	vit Bc	13,6	13,6	X			X		X	ind.						
3120-016	5,7	Gc	QBG	Bdx	X	vit Bc	12,6	12,6						X	ind.						

Numéro	Masse g	Pâte	Dégraissant	Coul. Int.	Vit. ext.	Coul. ext.	e max	e min	Fiss ext.	Fiss int.	Liss. ext.	Liss. int.	Tour ext.	Tour int.	Diam. int.	Métal	Bord	Type bord	Bec	Fond	Remarque
3120-020	77	Gc	QBG	Mf		Gc, J	18	18	X		X	X			ind.						4 frag.
3120-021	13	Bl	QBG	Jc		Jc	ind.	ind.						X	ind.						
4100-001	98	Bl	QBR, mica	Bl		Bl	19,5	12,2				X		X	17		X	N			
4100-002	49	Ro	QBR	Gc		Gc	11,1	9,7				X		X	18						
4100-003	59	Bl	QBR	Ro		Ro	20,1	12,7			X	X			18		X	G			
4100-004	74	Bl	QBR	Jc		Bl	19,3	10,8			X	X	X	X	17		X	E			
4100-005	29	Bl	QBR	Roc		Bl	16,5	16,5		X		X			ind.						
4100-006	12	Bl	QBR	Bl		Bl	13,8	13,8							ind.		X	P			
HS-001	14	Bl	QBG	G		Roc	10,1	10,1			X				ind.				frag.		
HS-002	47	Bl	QBG	Bl		G, Jc	13,8	10,6	X	X	X	X			ind.						
HS-003	47	B	QBR	Gf		Gf	18,2	18,2							ind.						
HS-004	30	Bl	QBR	Ro		Gc	17,1	15,2			X				22						
HS-005	25	Gc	QBR	Gc		G	14	11,3				X			ind.						
HS-006	19	Gc	QBG	Gf	X	vit B	12,6	12,6			X	X		X	ind.						
HS-007	19	Bl	QBR	Bl		Bl	12,6	12,6							14						
HS-008	24	B	QBR	G		G	17	17				X		X	22						
HS-009	20	Bl	QBG	Bl		Bl	19,6	19,6	X		X	X			ind.						
HS-010	17	Bl	QBR	Bl		Jc	14,3	14,3			X	X			21						

Annexe J :
Corpus des fragments de creusets en relation avec la fonderie de l'atelier monétaire de La Rochelle

Liste des abréviations :

Coul : couleur de la surface interne ou externe des fragments.
Fiss : fissure.
Tour : traces de tournage.
Liss : traces de lissage.
Diam : diamètre interne estimé du creuset.

int. : intérieur.
ext. : extérieur.
vit. : vitrification.
tr. : trace.
trans. : transparent.

Dégraissant :
- QBG : quartz blanc gris.
- QBR : quartz blanc rouge.
- part. N : petites particules noires.

Couleurs de pâte et des surfaces internes et externes :
- f. : foncé.
- c. : clair.
- B : bleu.
- Bdx : bordeaux.
- Be : beige.
- Bl : blanc.
- G : gris.
- J : jaune.
- M : marron.
- N : noir.
- R : rouge.
- Ro : rose.
- V : vert.

Numéro	Masse g	Pâte	Dégraissant	Dégr. mm	Coul int	Coul ext	e min	e max	Fis ext	Fis int	Liss ext	Liss int	Tour ext	Tour int	D int	Métal	Bord	Bec	Fond	Remarque
2008-01	62,8	Ro	QBR	<0,5	Bl	Bl	8,2	17,7			x	x		x	13		17,7			
2008-02	91	Ro	QBR	<0,5	Bl	Bl	8,2	17,7						x	13		17,7			
2008-03	8	Bl, Ro	QBR	<0,2	Bl	J	7,6	7,6						x	16					Creuset ? Recolle 2038-14
2008-04	19,5	Bl	QBG	<0,5	Bl	Bl	17,5	17,5					x		15		17,5			Trace de retournement sur bord
2008-05	17,7	Bl	QBR	<0,5	Bl	J	9,2	9,2				x		x	17					
2008-06	5,5	Bl	QBR	<0,5	Bl	J	9,1	9,1			x	x			-					
2009-01	84,4	Bl	QBJ	<0,5	Bl	Bl	10,8	18,6			x	x	x	x	14		18,6		x	
2009-02	27,4	Bl	QBR	<1	Bl	Bl	15	16,7			x	x	x	x	18		0,0		x	
2009-03	75,8	Bl	QBJ	<1	Bl	Bl	10,8	19,2			x	x	x	x	11 13		19,2		x	
2009-04	9,16	Bl	QBR	<1	0	Bl	0	0			x	x	x	x	-		0,0		x	
2009-05	11,5	Bl	QBR	<0,5	Bl	Bl	10,3	10,3			x	x	x	x	-		0,0		10,3	
2009-06	8,2	Bl	QBR	<0,5	0	Bl	0	0			x	x	x	x	-		0,0		x	
2009-07	6,1	Bl	QBR	<0,5	Bl	Bl	8,6	8,6			x	x	x	x	16		0,0		x	
2009-08	5,9	Bl	QBR	<0,5	Bl	Bl	9,1	9,1			x	x	x	x	17		0,0		x	
2009-09	4,5	Ro	QBR	<1	Ro	Ro	10,8	12,3			x	x	x	x	-		0,0		x	
2009-10	36,4	Ro	QBR	<1	Ro	Ro	11,1	11,1	x		x	x		x	16					
2009-11	39	Bl	QBJ	<0,5	Bl	Bl	14,5	18,4			x	x		x	18		18,4	x		
2009-12	12,4	Bl	QBR	<0,5	Bl	Jc, vit V	9,7	9,7			x	x		x	18					
2009-13	18,5	Bl	QBR	<0,5	Bl	Bl	9,4	11,2			x	x			15					
2009-14	15,8	Bl	QBR	<1	Bl	Bl	11,1	12,7							-					
2009-15	9,9	G, Ro	QBR	<0,5	Bdx, J, N	Gc, vit	6,5	8,5				x		x	13					
2009-16	5,5	Bl	QBJ	<1	Bl	Bl	8,9	8,9			x	x		x	15					
2009-17	-	Bl	QBJ	<0,5	Bl	Bl	9,3	19,9			x	x		x	12 13		19,9			Recolle 2039-01-01, 2039-03
2011-13-01	116,1	Bl	QBR	<0,5	Bl	Bl	12,1	18,2			x	x	x	x	18		18,2	x	x	
2011-14-01	37,5	Bl	QBJ	<0,5	Bl	Jc	12,4	15,9			x	x	x	x	16		0,0		x	prélevé pour coupe
2011-14-02	90,2	Ro c	QBR	<0,5	Ro c	Ro c	11,6	19			x	x			18		19,0	x		
2011-14-03	108,5	Bl	QBR	<0,5	Bl	Bl	12,1	18,7			x	x			15		18,7	x		Recolle 2011-14-04
2011-14-04	-	Bl	QBR	<0,5	Bl	Bl	12,1	18,7			x	x			15		18,7	x		Recolle 2011-14-03
2011-14-05	44	Ro	QBR	<0,5	Ro	Ro	11,8	16,8			x	x		x	-		16,8	x		
2011-14-06	32,4	Bl	QBR	<0,5	Bl	Bl	9,4	10,2			x	x		x	-					
2011-14-07	26,6	Ro c	QBR	<0,5	Ro c	Ro c	14,2	17			x	x			15		17,0			
2011-14-08	24,3	Bl	QBJ	<0,5	Bl	Jc	14,7	17,9			x	x			-		17,9	x		Doigt

Numéro	Masse g	Pâte	Dégraissant	Dégr. mm	Coul int	Coul ext	e min	e max	Fis ext	Fis int	Liss ext	Liss int	Tour ext	Tour int	D int	Métal	Bord	Bec	Fond	Remarque
2011-14-09	24,4	Bl	QBG	<0,5	Bl	Jc	10,5	10,5				x		x	15					
2011-14-10	10,1	Bl	QBJ	<0,5	Bl	G, Ro c	13,5	13,5			x				14					
2011-14-11	13,1	Ro c	QBR	<0,5	Ro c	Ro c	17,2	17,2			x	x			-		17,2			
2011-14-12	16,3	Bl	QBJ	<0,5	Bl	Bl	12,6	15,8			x	x			15					
2011-14-13	13,3	Bl	QBR	<0,5	Ro c	Ro c	10,6	10,6			x	x			-					
2011-14-14	13	Bl	QBR	<0,5	Bl	Bl	9,6	9,6			x	x		x	13					
2011-14-15	16,9	Bl	QBG	<0,5	Bl	J	10,7	10,7			x	x			-					
2011-14-16	15,3	Ro c	QBR	<0,5	Ro c	Ro c	10,3	10,3			x	x			15					
2011-14-17	6,8	Bl	QBR	<0,5	Bl	Bl	10,5	10,5				x			13					
2011-14-18	16,9	Bl	QBR	<0,5	Bl	Bl	11,6	12,6			x	x		x	-					
2011-14-19	37,53	Bl	QBR	<0,5	Bl	J	12,6	12,6			x	x			14					coupe
2019-13-01	134,5	Roc	QBR	<1	Bl	Bl	13,2	15,8			x	x	x	x	-		0,0		15,8	3 fragments recollés
2019-13-02	51,1	Ro c	QBR	<0,5	Ro c	Ro c	15,2	19,3			x	x			13		19,3			
2019-13-03	103	Bl	QBR	<0,5	Bl	Bl	13,1	18,7			x	x		x	13 15		18,7			Resserré au niveau du bord
2019-13-04	96,7	Bl	QBJ	<0,5	Bl	Bl	10,9	18,9			x	x		x	13 14		18,9			Resserré au niveau du bord
2019-13-05	102,4	Bl	QBR	<1	Ro c	Ro c	10,5	16,6			x	x			13 15		16,6			Resserré au niveau du bord
2019-13-06	92	Bl	QBR	<0,5	Bl	Bl	11,4	17,2			x				12		17,2	x		
2019-13-07	15,3	Bl	QBG	<0,5	Bl	Bl	10,6	10,6			x	x		x	15					
2019-13-08	110,4	Bl	QBG	<0,5	Bl	J	10,6	18,7		x	x	x		x	12 13		18,7			Resserré au niveau du bord, recolle 2019-40-41
2019-40-41-01	181,1	Bl	QBR	<0,5	Bl	Bl	10,5	18,8	x	x		x		x	13 15		18,8			
2019-40-41-02	21,7	Bl	QBR	<0,5	Bl	Bl	10,9	10,9			x	x		x	14					
2019-40-41-03	35,9	Bl	QBJ	<0,5	Bl	Bl	10,7	15,7			x			x	-			x		
2019-40-41-04	39,7	Bl	QBR	<1	Bl	Bl	12	18,5			x	x			13					
2019-40-41-05	18,5	Bl	QBR	<1	Bl	Bl	9,9	9,9			x	x		x	15					
2019-40-41-06	10,2	Bl	QBR	<0,5	Bl	Jc	10,1	10,1			x	x		x	13					
2019-40-41-07	16,5	Bl	QBJ	<0,5	Bl	Bl	9,2	9,2	x			x		x	14					

Numéro	Masse g	Pâte	Dégraissant	Dégr. mm	Coul int	Coul ext	e min	e max	Fis ext	Fis int	Liss ext	Liss int	Tour ext	Tour int	D int	Métal	Bord	Bec	Fond	Remarque
2019-40-41-08	19,4	Bl	QBG	<1	Bl	Bl	10,8	10,8		x	x	x		x	14					
2019-40-41-09	12,1	Bl	QBR	<0,5	Bl	Bl	10,6	10,6			x	x		x	15					
2019-40-41-10	12,6	Bl	QBR	<0,5	Bl	Bl	12,1	12,1			x	x		x	14					
2019-40-41-11	11	Bl	QBR	<0,5	Bl	Bl	10,3	10,3			x	x		x	14					
2019-40-41-12	10,2	Bl	QBR	<0,5	Bl	Bl	10,1	10,1			x	x		x	-					
2019-40-41-13	17,2	G	QBG	<0,5	Ro	G	9,2	12				x			15					
2019-40-41-14	6,5	Bl	QBR	<0,5	Bl	Bl	11	11						x	15					
2019-40-41-15	8,2	Bl	QBG	<0,5	Bl	Bl	9,6	9,6			x	x		x	14					
2019-40-41-16	4,9	Bl	QBJ	<0,5	Bl	Bl	18,1	18,1			x				-		18,1			
2019-40-41-17	6,5	Bl	QBJ	<0,5	Bl	Bl	19	19			x				13		19,0			
2019-40-41-18	6,3	Bl	QBJ	<0,5	Bl	Bl	10,8	10,8				x		x	14					
2019-40-41-19	2,2	Bl	QBJ	<0,5	Bl	Bl	16,4	16,4							-		16,4			
2027-01	32,1	Bl	QBG	<1	Bl	Bl	10,7	11,6			x	x	x	x	-		0,0		11,7	
2027-02	9,3	Bl	QBJ	<0,5	Bl	Bl	12,5	12,5			x	x	x	x	-		0,0		x	
2028-01	60,5	Bl	QBG	<1	Bl	Bl	10,6	10,6	x		x	x	x	x	14		0,0		x	
2028-02	31,9	Bl	QBJ	<1	Bl	Bl	11,1	13,2			x	x	x	x	16		0,0		x	doigt
2038-01	183,6	Bl	QBG	<0,5	Bl	Bl	8,7	16,9			x	x		x	12 15	Fe ext	16,9			
2038-02	95,9	Bl	QBJ	<0,5	Bl/N	Bl/N	10,5	12,4			x	x			-				12,4	Recolle 2038-10
2038-03	169,3	Bl	QBJ	<0,5	Bl	Jc	8,9	12,7			x	x		x	14					2 fragments
2038-04	55,2	Bl	QBJ	<0,5	Bl	Bl	8,5	10,5			x	x		x	14					4 fragments
2038-04-01	243,2	Gc	QBG mica	<1	Mc, Bdx	Gc, vit	22,6	14,8			x	x	x	x	11 14		0,0		x	
2038-05	147,4	Bl	QBR	<0,5	Bl	Jc	10,7	18,6			x	x		x	13		18,6			
2038-06	54,5	Bl	QBR	<0,5	Bl	Bl	9,7	11,8			x	x	x	x	15				11,8	
2038-07	117,6	Bl	QBR	<0,5	Bl	Bl	9,7	11,8							-				11,8	
2038-08	43	Bl	QBG	<0,5	Bl	Bl	13,8	18,3			x	x		x	-		18,3			Lien 2008-04
2038-09	35,5	Bl	QBR	<0,5	Bl	Jc	13,8	18,2			x	x		x	15		18,2			
2038-10	46,7	Bl	QBR	<0,5	Bl/N	Bl/N	10,5	12,4				x			-				12,4	Recolle 2038-02

Numéro	Masse g	Pâte	Dégraissant	Dégr. mm	Coul int	Coul ext	e min	e max	Fis ext	Fis int	Liss ext	Liss int	Tour ext	Tour int	D int	Métal	Bord	Bec	Fond	Remarque
2038-11	34,7	Bl	QBR	<1	Bl	J	8,9	10,8						x	15					
2038-12	35,6	Ro c	QBR	<0,5	Ro c	Ro c	10,9	10,9			x	x			14					
2038-13	47,6	Bl	QBR	<0,5	Bl	Jc	10,4	13,8			x			x	17					
2038-14	12,4	Bl, ro	QBR	<0,2	Bl	J	7,6	7,6			x			x	16					Recolle 2008-03
2038-15	8,7	Bl, G	QBJ	<0,5	G	Bl, G	10,2	10,2			x	x		x	15					
2038-16	14,1	Bl	QBG	<0,5	Bl	Bl	13,5	13,5			x	x			-					
2038-17	29,5	Ro	QBR	<0,5	Ro c	Ro c	10,7	11,2			x	x		x	15					
2038-18	13,6	Bl	QBJ	<0,5	Bl	Jc	10,2	10,2			x	x		x	9					
2039-01-01	380	Bl	QBJ	<0,5	Bl	Bl	9,3	19,9			x	x		x	12 13		19,9			Recolle 2009-17, 2039-02
2039-01-04	153,3	Bl	QBJ	<0,5	Bl	Bl	9	16,6			x	x		x	13 15		16,6			Recolle groupe A
2039-01-05	113,6	Bl	QBJ	<0,5	Bl	Bl	9	16,6			x	x		x	13 15		16,6			Recolle groupe A
2039-01-06	-	Bl	QBJ	<0,5	Bl	Bl	9	16,6			x	x		x	13 15		16,6			Recolle groupe A
2039-01-07	30,7	Bl	QBR	<0,5	Bl	Bl	8,6	10,6			x	x			15				10,6	Diamètre du fond : 13, recolle groupe B
2039-01-08	-	Bl	QBR	<0,5	Bl	Bl	8,6	10,6			x	x			15				10,6	Diamètre du fond : 13, recolle groupe B
2039-01-09	112,3	Bl	QBR	<0,5	Bl	Bl	8,6	10,6			x	x			15				10,6	Diamètre du fond : 13, recolle groupe B
2039-01-10	-	Bl	QBR	<0,5	Bl	Bl	8,6	10,6			x	x			15				10,6	Diamètre du fond : 13, recolle groupe B
2039-01-11	18,2	Bl	QBR	<0,5	Bl	Bl	8,6	10,6			x	x			15				10,6	Diamètre du fond : 13, recolle groupe B
2039-01-12	111	Bl	QBR	<0,5	Bl	Bl	8,6	10,6			x	x			15				10,6	Diamètre du fond : 13, recolle groupe B
2039-01-13	-	Bl	QBR	<0,5	Bl	Bl	8,6	10,6			x	x			15				10,6	Diamètre du fond : 13, recolle groupe B
2039-01-14	-	Bl	QBR	<0,5	Bl	Bl	8,6	10,6			x	x			15				10,6	Diamètre du fond : 13, recolle groupe B
2039-01-15	-	Bl	QBR	<0,5	Bl	Bl	8,6	10,6			x	x			15				10,6	Diamètre du fond : 13, recolle groupe B
2039-02	17,3	Bl	QBJ	<0,5	Bl	Bl	9,3	19,9			x	x		x	12 13		19,9			Recolle 2009-17, 2039-01-01
2039-02-01	113,7	Bl	QBG	<0,5	Bl	Bl	9,8	9,8			x	x	x	x	-		0,0		9,8	
2039-02-02	120,8	Bl	QBR	<0,5	Bl	Bl	10,5	19,2			x	x			13 15		19,6			Recomme 2039-02-11
2039-02-03	77,5	Ro	QBR	<0,5	Ro c	Ro c	10,3	10,3			x	x	x	x	-				x	

Numéro	Masse g	Pâte	Dégraissant	Dégr. mm	Coul int	Coul ext	e min	e max	Fis ext	Fis int	Liss ext	Liss int	Tour ext	Tour int	D int	Métal	Bord	Bec	Fond	Remarque
2039-02-04	69	Bl	QBG	<0,5	Bl, G	Bl, G	9,9	9,9			x	x			-				x	
2039-02-05	41,8	Ro	QBR	<0,5	Bl	Bl	10	10			x	x			-				x	
2039-02-06	31,5	Bl	QBJ	<0,5	Bl	Bl	10,5	10,5			x	x		x	18					
2039-02-07	20,4	Bl	QBJ	<0,5	M	Mc	10	10			x			x	13					
2039-02-08	21,1	Ro	QBR	<0,5	Ro c	Ro	11,1	11,1				x			15					
2039-02-09	18	Bl	QBG	<0,5	Bl	Jc	14,7	18,5			x	x			16		18,5			
2039-02-10	10,3	Ro c	QBR	<0,5	Ro c	Ro c	9,7	9,7				x			-					
2039-02-11	12,1	Bl	QBR	<0,5	Bl	Bl	10,5	19,2			x	x			13 15		19,6			Recolle 2039-02-02
2039-02-12	13,8	Bl	QBR	<0,5	Bl	Bl	10	10			x	x		x	14					
2039-02-13	11,1	Ro c	QBR	<0,5	Ro c	Ro c	8,9	8,9						x	13					
2039-03	127,4	Bl	QBJ	<0,5	Bl	Bl	9	16,6			x	x		x	13 15		16,6			Recolle groupe A
2040-01	-	Bl	QBJ	<0,5	Bl	Bl	9	16,6			x	x		x	13 15		16,6			Recolle groupe A
2040-02	-	Bl	QBJ	<0,5	Bl	Bl	9	16,6			x	x		x	13 15		16,6			Recolle groupe A
2040-09-01	32,8	Bl	QBR	<0,5	Bl	Bl, N	9,6	9,6			x	x	x	x	14		0,0		x	Prélevé pour coupe, relié 2040-09-02
2040-09-02	38,6	Bl	QBR	<0,5	Bl	N	9,6	9,6			x	x	x	x	-		0,0		x	prélevé pour coupe, relié 2040-09-01
2040-09-03	166,4	Bl	QBG	<0,5	Bl	Bl	11,1	17	x		x	x			14 15		17,0			Reserré au niveau du bord
2040-09-04	26,4	Ro c	QBJ	<0,5	Bl	Bl	9,7	9,7	x		x	x		x	-					Recolle 2040-09-05
2040-09-05	111,7	Ro c	QBJ	<0,5	Bl	Bl	9,7	9,7			x	x		x	-					Recolle 2040-09-04
2040-09-06	34,5	Ro c	QBR	<0,5	Ro	Ro	10,7	10,7			x			x	15					
2040-09-07	18,7	Ro c	QBJ	<0,5	Bl	Bl	11,9	11,9			x	x			13					
2040-09-08	50,3	Ro c	QBR	<0,5	Ro c	Ro c	11,7	11,7					x		15					
2041-01	83,3	Bl	QBJ	<0,5	Bl	Bl	13	18,2			x	x	x	x	13		18,2	x	x	
2041-02	15,5	Bl	QBR	<0,5	Bl	Bl	10,5	10,5			x	x	x	x	-		0,0		10,5	
2044-01	18,4	Bl	QBR	<0,5	Bl	Bl	11	11			x	x	x	x	16		0,0		x	

Annexe K :
Corpus des vestiges métalliques de l'atelier monétaire de La Rochelle

Légendes et abréviations :

Numéro : Référence individuelle définie pour cette étude.
Contexte (unité stratigraphique, isolat) : référence du mobilier archéologique avant qu'il ne soit individualisé pour cette étude.
m : masse.
Diam : diamètre.
Long. : longueur.
Larg. : largeur.
Epais. : épaisseur.
Frm. : forme des échantillons.

- 1 : flan parfaitement rond.
- 2 : flan.
- 3 : carreau.
- 4 : flan ou carreau de petite taille.
- 5 : lames, découpes.
- 999 : informe.

Ph. : phases correspondant à celles proposées par les archéologues dans les deux rapports de fouille de la place de Verdun à La Rochelle[26].

- A : construction de l'enceinte et 1er état du château (seconde moitié du XII^{ème} au 1er quart du XIII^{ème} siècle).
- Ab : second état du château (second quart du XIII^{ème} siècle).
- B : occupation (fin XII^{ème} siècle).
- C : occupation (jusqu'en 1372)
- D : installation fin XIV^{ème} siècle.
- E : début de l'hôtel de la monnaie (fin XIV^{ème} - 1er quart XV^{ème} siècle).
- F : 2ème quart XV^{ème} - début XVI^{ème} siècle.
- G : début XVI^{ème} - début XVII^{ème} siècle (entre 1611-1618).
- H : début XVI^{ème} siècle - 1689.
- I : après 1689.

Méth. : méthode d'analyse utilisée.

- Fluo : spectrométrie de fluorescence X
- ANRC : analyse par activation aux neutrons rapides de cyclotron.
- EDS : spectrométrie en dispersion d'énergie couplée à un microscope électronique à balayage.
- n. a. : non analysé.
- n. d. : non détecté.

Grp. : groupes définis lors de l'étude analytique.

---

[26] Bocquet A. *et al.*, *La Rochelle Place de Verdun, Fouille préventive AFAN, octobre 1994 Juillet 1995*, Document final de synthèse, SRA Poitou-Charentes, Poitiers, 1995, n. p.
Nibodeau J.-P., *Rapport de sauvetage urgent AFAN, 2ème campagne : La Rochelle Place de Verdun, septembre 1996 mars 1997*, Document final de synthèse, SRA Poitou-Charentes, Poitiers, 1997, 126 p.

Numéro	Contexte	m g	Dia mm	Long, mm	Larg. mm	Epais. mm	Frm.	Ph.	Méth.	Ni %mass	Sn %mass	Zn %mass	Sb %mass	Pb %mass	Au %mass	Ag %mass	As %mass	Fe %mass	Cu %mass	Commentaires	Grp.
1009_01	1009, 01	2,06	20,5	20,5	20,5	1,01	2	I	ANRC	0,153	1,08	n.d.	0,173	0,241	0,0693	30,38	0,162	n.d.	67,74		B1
1009_02	1009, 02	0,53	11,5	11,5	11,5	0,66	4	I	ANRC	0,108	0,029	0,032	0,052	0,071	0,0062	2,85	0,203	0,251	96,40		C
1009_03	1009, 03	0,53	13,5	13,5	13,5	0,47	2	I	ANRC	0,179	0,034	0,115	0,166	0,217	0,0126	4,37	0,100	0,196	94,61	Petit flan	C
1009_11	1009, 11	2,68	-	15,5	9	2,93	3	I	ANRC	n.d.	n.d.	n.d.	0,197	1,05	0,0766	30,54	0,207	n.d.	67,93		B2
1012_08	1012, 08	2,1	19,5	19,5	19,5	1,27	2	H	ANRC	0,135	n.d.	n.d.	0,340	0,230	n.d.	0,050	0,092	n.d.	99,15		D
1018_01	1018, 01	1,65	17	17	17	1,32	1	F	ANRC	0,065	0,197	n.d.	0,220	0,278	n.d.	2,76	0,157	0,158	96,16		C
1018_02	1018, 02	1,15	20	20	20	0,94	2	F	ANRC	0,204	0,163	0,443	0,211	0,198	n.d.	2,28	0,269	0,206	96,02		C
1018_03	1018, 03	2,11	17	17	17	1,28	1	F	ANRC	0,118	0,777	5,21	0,122	0,476	n.d.	0,064	0,129	0,160	92,94		E
1018_04	1018, 04	1,47	-	14	14	1,84	3	F	Fluo	0,141	4,56	4,22	n.d.	0,763	n.d.	n.d.	n.d.	0,320	90,32		E
1018_05	1018, 05	1,44	16	16	16	1,36	2	F	ANRC	0,201	0,760	3,47	0,110	0,600	n.d.	0,245	0,108	0,358	94,15		E
1021_01	1021, 01	2,52	20	20	20	1,2	1	G	ANRC	n.d.	1,15	n.d.	0,121	0,936	0,0609	27,16	0,184	n.d.	70,40		B2
1021_02	1021, 02	9,4	-	27	27	1,78	2	G	ANRC	n.d.	n.d.	n.d.	0,009	1,80	0,0768	91,29	n.d.	n.d.	6,82		A
1021_03	1021, 03	9,51	-	26	26,5	1,94	2	G	ANRC	n.d.	n.d.	n.d.	0,026	1,38	0,0360	91,73	n.d.	n.d.	6,83		A
1021_05	1021, 05	4,73	-	21	21	1,56	2	G	ANRC	n.d.	n.d.	n.d.	0,015	1,78	0,0313	92,10	n.d.	n.d.	6,07		A
1021_06	1021, 06	1,62	19	19	19	0,85	2	G	ANRC	0,163	0,435	3,32	0,128	0,460	n.d.	0,119	0,176	0,203	94,99		E
1021_07	1021, 07	1,53	18	18	18	1,01	1	G	ANRC	0,146	0,507	3,78	0,103	0,422	n.d.	0,123	0,117	0,205	94,59		E
1021_08	1021, 08	1,74	18	18	18	0,96	1	G	ANRC	0,212	0,747	4,35	0,095	0,507	n.d.	0,139	0,161	0,218	93,57		E
1021_09	1021, 09	1,12	19	19	19	0,76	1	G	ANRC	0,140	0,505	2,82	0,117	0,418	n.d.	0,136	0,110	0,351	95,40		E
1021_10	1021, 10	1,68	18	18	18	1,2	1	G	ANRC	0,153	0,712	5,09	0,117	0,577	n.d.	0,186	0,143	0,422	92,60		E
1021_11	1021, 11	1,59	17,5	17,5	17,5	1,24	2	G	ANRC	0,142	0,345	3,76	0,128	0,387	n.d.	0,101	0,091	0,347	94,69		E
1021_12	1021, 12	9,41	-	22,5	21,5	2,67	2	G	ANRC	n.d.	n.d.	n.d.	0,025	0,778	0,0824	92,35	n.d.	n.d.	6,76		A
1021_13	1021, 13	2,25	18,5	18,5	18,5	1,24	1	G	ANRC	0,123	1,02	8,62	0,089	0,656	n.d.	0,070	0,115	0,286	89,02		E
1021_14	1021, 14	1,35	18	18	18	0,88	2	G	ANRC	0,240	0,802	4,44	0,098	0,523	n.d.	0,187	0,167	0,380	93,16		E
1021_15	1021, 15	1,52	18	18	18	0,99	2	G	ANRC	0,210	0,930	6,07	0,071	0,535	n.d.	0,077	0,147	0,266	91,70		E
1021_16	1021, 16	2,05	-	15	15	1,47	2	G	ANRC	0,170	1,00	7,65	0,080	2,18	n.d.	0,103	0,138	0,332	88,34		E
1021_17	1021, 17	1,69	17,5	17,5	17,5	1,15	2	G	Fluo	0,181	5,62	2,61	n.d.	0,512	n.d.	n.d.	0,191	0,320	90,89		E
1021_18	1021, 18	1,73	17	17	17	1,21	2	G	ANRC	0,161	0,633	3,86	0,126	0,473	n.d.	0,159	0,107	n.d.	94,48		E
1021_19	1021, 19	1,6	18,5	18,5	18,5	1,5	2	G	ANRC	0,161	0,671	4,38	0,087	0,565	n.d.	0,143	0,127	0,282	93,59		E
1021_20	1021, 20	1,84	17	17	17	1,35	2	G	ANRC	0,108	0,685	5,73	0,133	0,577	n.d.	0,122	0,099	0,480	92,07		E
1021_21	1021, 21	1,63	18	18	18	1,00	2	G	ANRC	0,172	0,685	3,90	0,116	0,486	n.d.	0,079	0,167	0,367	94,03		E
1021_22	1021, 22	1,53	17,5	17,5	17,5	1,04	2	G	ANRC	0,158	0,574	4,42	0,119	0,489	n.d.	0,140	0,165	0,413	93,52		E

Numéro	Contexte	m g	Dia mm	Long, mm	Larg. mm	Epais. mm	Frm.	Ph.	Méth.	Ni %mass	Sn %mass	Zn %mass	Sb %mass	Pb %mass	Au %mass	Ag %mass	As %mass	Fe %mass	Cu %mass	Commentaires	Grp.
1021_23	1021, 23	1,53	17,5	17,5	17,5	1,39	2	G	ANRC	n.d.	0,180	n.d.	0,123	1,50	0,1141	45,20	0,115	n.d.	52,77		B'
1021_24	1021, 24	1,53	19	19	19	1,05	2	G	ANRC	0,129	0,622	3,31	0,143	0,419	n.d.	0,063	0,131	0,157	95,03		E
1021_25	1021, 25	2,17	18,5	18,5	18,5	1,57	2	G	ANRC	0,138	0,776	4,68	0,107	0,527	n.d.	0,283	0,135	0,693	92,66		E
1021_26	1021, 26	1,83	21	21	21	1,57	2	G	ANRC	0,134	1,13	6,62	0,102	0,590	n.d.	0,087	0,129	0,240	90,97		E
1021_27	1021, 27	1,61	18	18	18	1,31	2	G	ANRC	0,199	0,963	6,06	0,080	0,453	n.d.	0,075	0,140	0,276	91,75		E
1021_28	1021, 28	1,46	-	33	7,5	1,42	5	G	Fluo	0,200	0,170	n.d.	n.d.	0,590	n.d.	n.d.	n.d.	0,050	99,04		D
1021_29	1021, 29	1,91	18	18	18	1,6	2	G	ANRC	0,136	0,361	4,15	0,139	0,387	n.d.	0,098	0,087	0,269	94,38		E
1021_30a	1021, 30	2,12	-	16	15	1,39	3	G	ANRC	0,100	n.d.	n.d.	0,197	0,392	n.d.	0,050	0,083	n.d.	99,18		D
1021_30b	1021, 30	2,17	-	15	14	1,57	3	G	ANRC	0,084	n.d.	n.d.	0,219	0,466	n.d.	0,032	0,086	0,054	99,06		D
1029_01	1029, 01	2,2	17	17	17	1,48	2	H	Fluo	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1,18	n.d.	46,28	n.d.	0,600	52,55		B'
1029_02	1029, 02	1,59	-	19	12,5	1,41	3	H	ANRC	n.d.	0,272	n.d.	0,148	1,45	0,1232	48,76	0,116	n.d.	49,13		B'
1038_01	1038, 01	5,14	-	26	12	1,8	5	C	ANRC	n.d.	0,224	n.d.	0,117	0,835	0,0571	28,98	0,190	n.d.	69,59		B2
1045_01	1045, 01	9,32	21	21	21	3,3	2	G	ANRC	n.d.	n.d.	n.d.	0,016	3,64	0,0541	88,75	n.d.	n.d.	7,54		A
1046_02	1046, 02	2,11	18,8	18,8	18,8	1,36	2	H	ANRC	0,102	0,123	n.d.	0,110	0,402	0,0763	31,71	0,153	n.d.	67,32		B1
1058_01	1058, 01	2,98	-	15	14	2,13	3	G	ANRC	0,086	n.d.	0,231	0,223	0,451	n.d.	0,039	0,075	n.d.	98,89	Gros carreau	D
1061_01	1061, 01	0,4	12,5	12,5	12,5	0,85	4	G	ANRC	0,152	0,079	0,117	0,265	0,133	0,0135	4,79	0,133	0,239	94,08		C
1061_02	1061, 02	0,45	-	12,07	11,5	0,63	4	G	Fluo	0,151	n.d.	n.d.	n.d.	0,823	n.d.	n.d.	n.d.	0,420	99,03		D
1066_2a	1066, 02	0,49	13,5	13,5	13,5	0,73	4	E	ANRC	0,111	0,017	n.d.	0,087	0,332	0,0181	3,01	0,069	n.d.	96,35		C
1066_2b	1066, 02	0,49	12,5	12,5	12,5	0,7	4	E	ANRC	0,135	0,045	n.d.	0,124	0,283	0,0092	4,04	0,154	n.d.	95,21		C
1066-71_1	1066/1071, 02	0,58	17	17	17	-	2	E	Fluo	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1,83	n.d.	n.d.	n.d.	0,190	98,17		D
1066-71_2a	1066/1071, 02	0,6	-	13,51	11,37	0,71	4	E	ANRC	0,139	0,141	n.d.	0,150	0,950	0,0111	3,83	0,115	n.d.	94,66		C
1066-71_2b	1066/1071, 02	0,49	14	14	14	0,88	4	E	ANRC	0,079	0,066	n.d.	0,046	1,58	0,0318	10,58	0,064	n.d.	87,56		C
1066-711	1066/1071, 01	0,57	13	13	13	0,8	4	E	ANRC	0,138	0,100	0,486	0,070	0,093	0,0177	7,72	0,131	n.d.	91,25		C
1067_01	1067, 01	2,13	21,5	21,5	21,5	0,93	1	G	ANRC	n.d.	0,184	n.d.	0,121	1,77	0,0688	31,55	0,163	n.d.	66,15		B1
1067_02	1067, 02	2,42	23	23	23	1,24	2	G	ANRC	n.d.	n.d.	n.d.	0,112	1,54	0,0758	32,15	0,140	n.d.	65,98		B2
1067_03	1067, 03	2,14	21	21	21	1,09	1	G	ANRC	n.d.	n.d.	n.d.	0,116	1,64	0,0763	31,22	0,177	n.d.	66,78		B1
1067_05	1067, 05	0,13	12	12	12	0,3	4	G	Fluo	0,190	n.d.	n.d.	n.d.	0,270	n.d.	7,31	n.d.	0,160	92,23		C
1067_07	1067, 07	22,86	-	126,5	15	1,13/2	5	G	EDS	0,100	2,000	0,65	n.d.	0,940	n.d.	10,52	n.d.	n.d.	85,78	Lame, moy. de 5 analyses EDS	C
1067_08	1067, 08	1,89	20	20	20	1,15	2	G	Fluo	0,191	0,543	n.d.	n.d.	1,36	n.d.	35,21	n.d.	0,600	62,70	Couleur verte	B1
1067_08aa	1067, 08	0,64	-	11,4	10,93	0,58	4	G	ANRC	0,086	0,177	0,364	0,094	0,083	0,0160	6,47	0,127	n.d.	92,58	Carreau déformé	C

Numéro	Contexte	m g	Dia mm	Long, mm	Larg. mm	Epais. mm	Frm.	Ph.	Méth.	Ni %mass	Sn %mass	Zn %mass	Sb %mass	Pb %mass	Au %mass	Ag %mass	As %mass	Fe %mass	Cu %mass	Commentaires	Grp.
1067_08ab	1067, 08	0,45	-	11,76	10,72	0,57	4	G	ANRC	0,117	0,061	0,219	n.d.	0,295	0,0094	3,67	0,160	n.d.	95,47	Carreau déformé	C
1067_08ac	1067, 08	0,74	-	11,21	10,11	0,87	4	G	ANRC	0,149	0,057	n.d.	0,121	0,239	0,0083	3,56	0,232	n.d.	95,63	Carreau déformé	C
1067_08ad	1067, 08	0,62	-	12,9	11,59	0,61	4	G	ANRC	0,077	0,168	0,357	n.d.	0,070	0,0168	6,26	0,123	n.d.	92,93	Carreau déformé	C
1067_08ae	1067, 08	0,58	-	11,19	10,65	0,71	4	G	ANRC	0,100	0,017	0,454	n.d.	0,271	0,0095	3,93	0,049	n.d.	95,17	Carreau déformé	C
1067_08af	1067, 08	0,46	-	10,93	10,72	0,77	4	G	ANRC	0,119	0,103	0,403	n.d.	0,339	0,0091	3,69	0,161	n.d.	95,17	Carreau déformé	C
1067_08ag	1067, 08	0,77	-	12,7	11,79	0,68	4	G	ANRC	0,072	0,172	0,464	0,067	0,123	0,0172	6,99	0,119	n.d.	91,97	Carreau déformé	C
1067_08ah	1067, 08	0,52	-	11,2	10,24	0,75	4	G	ANRC	0,031	n.d.	0,372	0,042	0,111	0,0525	3,63	0,024	n.d.	95,73	Carreau déformé	C
1067_08ai	1067, 08	0,4	-	12,07	11,5	0,52	4	G	ANRC	0,127	0,043	0,193	0,139	0,503	0,0075	3,66	0,193	n.d.	95,13	Carreau déformé	C
1067_08aj	1067, 08	0,76	-	11,53	11,48	0,72	4	G	ANRC	0,100	0,083	0,285	0,114	0,642	0,0192	7,23	0,231	n.d.	91,29	Carreau déformé	C
1067_08ak	1067, 08	0,58	-	11,47	10,78	0,74	4	G	ANRC	0,091	0,072	n.d.	0,090	0,442	0,0175	7,79	0,132	0,453	90,92	Carreau déformé	C
1067_08al	1067, 08	0,56	-	11,01	10,86	0,68	4	G	ANRC	0,081	0,041	n.d.	0,143	0,163	0,0095	4,46	0,113	0,270	94,71	Carreau déformé	C
1067_08am	1067, 08	0,97	-	11,53	11,41	1,17	4	G	ANRC	0,074	0,125	0,385	0,122	0,418	0,0184	7,74	0,208	0,506	90,41	Carreau déformé	C
1067_08an	1067, 08	0,48	-	11,69	11,16	0,53	4	G	ANRC	0,144	0,044	0,072	0,099	0,134	0,0109	4,42	0,237	0,106	94,74	Carreau déformé	C
1067_08ao	1067, 08	0,52	-	10,97	10,35	0,63	4	G	ANRC	0,130	0,037	n.d.	0,100	0,334	0,0087	4,24	0,212	n.d.	94,94	Carreau déformé	C
1067_08ap	1067, 08	0,61	-	10,72	9,46	0,81	4	G	ANRC	0,112	0,023	n.d.	0,050	0,174	0,0089	3,85	0,042	0,665	95,07	Carreau déformé	C
1067_08aq	1067, 08	0,33	-	12,04	9,73	0,63	4	G	ANRC	0,069	0,017	n.d.	0,203	0,295	0,0116	4,91	0,061	n.d.	94,44	Carreau déformé	C
1067_08ar	1067, 08	0,39	-	12,03	10,96	0,52	4	G	ANRC	0,068	0,071	0,164	0,085	0,424	0,0199	8,45	0,146	0,212	90,36	Carreau déformé	C
1067_08as	1067, 08	0,45	-	11,73	9,86	0,53	4	G	ANRC	0,123	0,029	n.d.	0,061	0,113	0,0093	4,09	0,039	0,110	95,43	Carreau déformé	C
1067_08at	1067, 08	0,47	-	10,81	10,38	0,59	4	G	ANRC	0,119	0,056	n.d.	0,154	0,200	0,0118	4,47	0,176	0,127	94,69	Carreau déformé	C
1067_08au	1067, 08	0,46	-	10,58	9,26	0,7	4	G	ANRC	0,101	0,047	n.d.	0,147	0,428	0,0154	4,34	0,097	n.d.	94,82	Carreau déformé	C
1067_08av	1067, 08	0,32	-	9,06	8,38	0,81	4	G	ANRC	0,100	0,038	n.d.	0,050	0,204	0,0108	4,58	0,038	0,213	94,77	Carreau déformé	C
1067_08aw	1067, 08	0,37	-	12,18	10,27	0,47	4	G	ANRC	0,106	0,044	n.d.	0,123	0,396	0,0103	4,54	0,143	0,321	94,31	Carreau déformé	C
1067_08ax	1067, 08	0,19	-	9,94	9,45	0,29	4	G	ANRC	0,103	0,025	n.d.	0,161	0,193	0,0116	4,72	0,086	n.d.	94,70	Carreau déformé	C
1067_08ay	1067, 08	0,47	-	11,08	10,82	0,63	4	G	ANRC	0,076	0,203	0,869	0,208	0,287	0,0090	4,15	0,117	0,349	93,73	Carreau déformé	C
1067_08az	1067, 08	0,28	-	13,16	10,72	0,28	4	G	ANRC	0,096	0,189	0,881	0,162	0,274	0,0097	4,54	0,129	0,238	93,48		C
1067_08ba	1067, 08	0,25	-	12,68	11,21	0,42	4	G	ANRC	0,071	0,038	n.d.	0,225	0,338	0,0086	4,07	0,075	n.d.	95,18		C
1067_08bb	1067, 08	0,29	-	11,06	9,15	0,45	4	G	ANRC	0,100	0,054	0,061	0,128	0,301	0,0082	4,12	0,176	n.d.	95,05		C
1067_08bc	1067, 08	0,36	-	9,89	8,71	0,66	4	G	ANRC	0,086	0,056	0,154	0,142	0,295	0,0093	4,08	0,119	0,178	94,88		C
1067_08bd	1067, 08	0,31	-	10,24	10,12	0,56	4	G	ANRC	0,101	0,069	0,132	0,050	0,210	0,0113	3,77	0,094	0,188	95,37		C
1067_08be	1067, 08	0,25	-	-	-	0,63	4	G	ANRC	0,088	0,059	0,119	0,128	0,257	0,0100	4,63	0,149	0,188	94,37	Carreau oxydé ?	C
1067_08bf	1067, 08	0,25	-	-	-	0,76	4	G	ANRC	0,067	0,133	0,198	0,152	0,368	0,0107	5,15	0,135	0,349	93,43	Carreau oxydé ?	C

Numéro	Contexte	m g	Dia mm	Long, mm	Larg. mm	Epais. mm	Frm.	Ph.	Méth.	Ni %mass	Sn %mass	Zn %mass	Sb %mass	Pb %mass	Au %mass	Ag %mass	As %mass	Fe %mass	Cu %mass	Commentaires	Grp.
1067_08bg	1067, 08	0,26	-	10,6	10,55	0,46	4	G	ANRC	0,090	0,083	0,134	0,137	0,175	0,0111	4,72	0,155	0,224	94,27		C
1067_08bh	1067, 08	0,24	-	-	-	0,48	4	G	ANRC	0,088	0,062	n.d.	0,111	0,191	0,0111	4,86	0,163	0,216	94,30	Carreau oxydé ?	C
1067_08bi	1067, 08	0,28	-	-	-	0,47	4	G	ANRC	0,095	0,015	n.d.	0,045	0,136	0,0078	2,79	0,072	0,123	96,72	Carreau oxydé ?	C
1067_08bj	1067, 08	0,19	-	-	-	0,37	4	G	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	Carreau oxydé ?	-
1067_08bk	1067, 08	0,17	-	-	-	0,64	4	G	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	Carreau oxydé ?	-
1067_08bl	1067, 08	0,13	-	-	-	0,46	4	G	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	Carreau oxydé ?	-
1067_08bm	1067, 08	0,19	-	-	-	0,4	4	G	ANRC	0,095	0,055	0,085	0,060	0,117	0,0116	3,45	0,083	0,367	95,67	Carreau oxydé ?	C
1067_08bn	1067, 08	0,53	-	7,85	6,95	1,03	4	G	ANRC	0,074	0,043	0,131	0,038	0,166	0,0062	3,06	0,075	0,176	96,23	Brut de découpe	C
1067_09	1067, 09	1,49	19,5	19,5	19,5	1,12	2	G	Fluo	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1,10	0,1302	43,07	n.d.	0,170	55,69		B'
1067_10	1067, 10	0,43	13	13	13	0,61	4	G	ANRC	0,141	0,074	0,475	0,081	0,058	0,0096	4,05	0,062	n.d.	95,04		C
1067_11	1067, 11	2,01	19,5	19,5	19,5	1,07	1	G	ANRC	n.d.	0,133	1,70	0,104	0,930	0,0729	33,22	0,183	n.d.	63,65		B1
1068_01a	1068, 01	0,41	12	12	10,86	0,65	4	G	ANRC	0,097	0,044	n.d.	0,062	0,091	0,0108	4,31	0,051	n.d.	95,33		C
1068_01b	1068, 01	0,35	12	12	12	0,6	4	G	ANRC	0,087	0,259	1,46	0,186	0,282	0,0090	3,83	0,076	n.d.	93,81		C
1068_01c	1068, 01	0,11	-	-	-	-	5	G	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.		-
1068_01d	1068, 01	0,15	-	-	-	-	5	G	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.		-
1068_01e	1068, 01	0,27	-	-	-	-	5	G	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.		-
1068_02a	1068, 02	0,26	12	12	9,7	0,48	4	G	ANRC	0,131	0,058	1,12	0,128	0,963	0,0100	3,18	0,098	n.d.	94,31		C
1068_02b	1068, 02	0,22	11,5	11,5	9,25	0,68	4	G	ANRC	0,095	0,197	0,746	0,182	0,480	0,0102	3,82	0,096	n.d.	94,37		C
1068_02c	1068, 02	0,12	-	-	-	-	5	G	Fluo	0,059	0,291	n.d.	n.d.	0,902	n.d.	9,53	n.d.	0,270	89,22		C
1068_02d	1068, 02	0,13	-	-	-	-	999	G	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.		-
1068_02e	1068, 02	0,3	13	13	13	0,69	4	G	ANRC	0,104	0,012	n.d.	0,102	0,581	0,0478	3,73	0,077	0,418	94,93		C
1068_02f	1068, 02	0,43	13	13	9,4	0,7	4	G	ANRC	0,049	0,008	n.d.	0,056	0,433	0,0442	3,11	0,033	n.d.	96,27		C
1068_02g	1068, 02	0,5	11,5	11,5	10,7	0,73	4	G	ANRC	0,115	0,066	0,214	0,174	0,425	0,0100	3,98	0,085	n.d.	94,93		C
1068_2a1	1068, 02	1,48	18	18	18	1,13	2	G	ANRC	n.d.	0,167	n.d.	0,125	1,67	0,1129	47,13	0,095	n.d.	50,71		B'
1068_2a2	1068, 02	1,77	20	20	20	0,97	1	G	ANRC	0,136	0,291	n.d.	0,106	1,35	0,1082	38,70	0,141	n.d.	59,17		B1
1068_2a3	1068, 02	2,04	17	17	17	1,4	2	G	ANRC	n.d.	0,094	n.d.	0,089	0,591	0,0644	28,77	0,113	n.d.	70,28		B1
1068_2a4	1068, 02	1,64	17,5	17,5	17,5	1,56	3	G	ANRC	n.d.	0,261	n.d.	0,136	n.d.	0,1191	43,56	0,129	n.d.	55,79		B'
1068_2a5	1068, 02	1,97	-	13	10,5	2,75	3	G	ANRC	n.d.	0,137	n.d.	0,109	1,46	0,0651	36,21	0,149	n.d.	61,87		B1
1069_01	1069, 01	2,41	17,5	17,5	17,5	1,33	3	H	ANRC	n.d.	0,219	n.d.	0,118	n.d.	0,0465	29,55	0,292	n.d.	69,78		B2
1069_02a	1069, 02	1,84	-	14,5	14,5	1,49	2	H	ANRC	0,168	1,02	7,83	0,081	0,618	n.d.	0,098	0,141	0,310	89,74		E
1069_02b	1069, 02	0,54	-	12,5	11	0,77	4	H	Fluo	0,110	0,291	n.d.	n.d.	0,522	n.d.	15,06	n.d.	0,140	84,02		C

Numéro	Contexte	m g	Dia mm	Long, mm	Larg. mm	Epais. mm	Frm.	Ph.	Méth.	Ni %mass	Sn %mass	Zn %mass	Sb %mass	Pb %mass	Au %mass	Ag %mass	As %mass	Fe %mass	Cu %mass	Commentaires	Grp.
1069_02c	1069, 02	0,95	-	16	14,5	0,84	3	H	Fluo	0,100	0,291	n.d.	n.d.	0,462	n.d.	16,05	n.d.	0,290	83,09		C
1069_02d	1069, 02	0,4	16,42	16,42	8,53	1,06	3	H	Fluo	0,071	n.d.	1,51	n.d.	0,292	n.d.	n.d.	n.d.	0,090	98,12		D
1069_02e	1069, 02	0,37	-	-	-	-	4	H	Fluo	0,170	n.d.	n.d.	n.d.	0,441	n.d.	7,62	n.d.	0,290	91,77		C
1070_01	1070, 01	0,56	13	13	13	0,77	4	H	ANRC	0,118	1,31	0,813	0,069	0,580	0,0201	8,64	0,219	n.d.	88,23		C
1071_01	1071, 01	0,44	16,5	16,5	16,5	0,61	2	G	ANRC	0,110	0,049	n.d.	0,077	0,083	0,0171	6,83	0,128	0,567	92,14		C
1071_02a	1071, 02	0,49	12,5	12,5	12,5	0,61	4	G	ANRC	0,117	0,018	0,533	0,177	0,305	0,0091	3,49	0,084	n.d.	95,27		C
1071_02b	1071, 02	0,56	15	15	15	0,63	4	G	ANRC	0,108	0,083	0,074	0,063	0,746	0,0179	7,57	0,192	n.d.	91,15		C
1071_02c	1071, 02	0,42	13	13	13	0,55	4	G	ANRC	0,126	0,023	n.d.	0,127	0,857	0,0119	3,95	0,104	n.d.	94,80		C
1071_02d	1071, 02	0,35	14	14	14	0,47	4	G	ANRC	0,070	0,204	0,164	0,075	0,281	0,0073	3,25	0,076	n.d.	95,87		C
1071_02e	1071, 02	0,68	14,5	14,5	14,5	0,75	4	G	ANRC	0,086	0,059	n.d.	0,066	0,435	0,0191	8,15	0,095	n.d.	91,09		C
1072_01a	1072, 01	0,37	12	12	12	0,75	4	G	ANRC	0,141	0,057	0,406	0,057	0,280	0,0154	2,96	0,039	n.d.	96,05		C
1072_01b	1072, 01	0,57	12	12	12	0,78	4	G	ANRC	0,089	0,111	1,06	0,191	0,444	0,0092	3,64	0,142	n.d.	94,31		C
1072_01c	1072, 01	0,37	13	13	13	0,84	4	G	ANRC	0,106	0,171	0,763	0,137	0,424	0,0087	3,60	0,157	n.d.	94,63		C
1072_01d	1072, 01	0,23	-	12,73	10,81	0,4	4	G	ANRC	0,134	0,042	0,785	0,125	0,296	0,0082	3,66	0,198	n.d.	94,76		C
1072_01e	1072, 01	0,24	-	10,79	9,81	0,53	4	G	ANRC	0,126	0,119	0,847	0,125	0,567	0,0081	3,71	0,237	n.d.	94,26		C
1072_01f	1072, 01	0,32	13,5	13,5	13,5	0,56	4	G	ANRC	0,131	0,043	0,564	0,116	0,444	0,0088	3,71	0,187	n.d.	94,79		C
1072_01g	1072, 01	0,51	11,5	11,5	11,5	0,86	4	G	ANRC	0,048	0,094	0,225	0,073	0,487	0,0072	3,17	0,041	n.d.	95,85		C
1072_02a	1072, 02	2,2	18,5	18,5	17,24	1,13	1	G	ANRC	n.d.	0,198	n.d.	0,123	1,24	0,0791	31,62	0,228	n.d.	66,52		B1
1072_02b	1072, 02	0,48	-	12,12	9,98	0,74	4	G	ANRC	0,091	0,069	0,199	0,172	0,262	0,0153	4,06	0,156	n.d.	94,98		C
1072_02c	1072, 02	0,38	12,5	12,5	9,79	0,67	4	G	ANRC	0,098	0,019	n.d.	0,102	0,869	0,0409	3,85	0,078	n.d.	94,95		C
1072_02d	1072, 02	0,48	-	16,8	15,45	0,47	1	G	Fluo	0,160	0,210	n.d.	n.d.	0,571	n.d.	10,02	n.d.	0,190	89,04		C
1072_02e	1072, 02	0,59	-	11,69	10,8	0,9	4	G	ANRC	0,089	0,071	0,583	0,094	0,181	0,0181	7,31	0,142	n.d.	91,51		C
1072_02f	1072, 02	0,49	-	9,37	8,41	0,64	4	G	Fluo	0,055	0,227	n.d.	n.d.	0,723	n.d.	n.d.	n.d.	0,460	98,99		D
1072_02g	1072, 02	0,22	10	10	8,45	0,59	4	G	ANRC	0,133	0,029	0,201	0,101	0,227	0,0143	4,28	0,076	0,244	94,70		C
1072_2a1	1072, 02	1,28	18,5	18,5	18,5	1,12	2	G	ANRC	n.d.	0,398	n.d.	0,164	0,282	0,1754	62,52	0,091	n.d.	36,37		B'
1072_2a2	1072, 02	1,5	17	17	17	1,51	3	G	ANRC	n.d.	1,52	n.d.	0,151	1,28	0,1328	48,59	0,156	n.d.	48,18		B'
1072_2a3	1072, 02	2,16	15	15	15	1,65	3	G	ANRC	n.d.	0,215	n.d.	0,108	1,50	0,0722	32,45	0,170	n.d.	65,49		B1
1072_2a4	1072, 02	1,99	20	20	20	1,13	2	G	ANRC	0,098	0,298	n.d.	0,099	0,963	0,0845	30,73	0,160	n.d.	67,57		B1
1072_2a5	1072, 02	2,06	18,5	18,5	18,5	1,12	3	G	ANRC	n.d.	0,124	n.d.	0,113	n.d.	0,1159	34,47	0,183	n.d.	64,99		B1
1072_2a6	1072, 02	2,28	-	17,2	17,89	1,32	2	G	ANRC	n.d.	2,38	n.d.	0,117	1,27	0,0693	28,87	0,228	n.d.	67,06		B2
1072_2a7	1072, 02	2,4	16,5	16,5	16,5	1,8	3	G	ANRC	n.d.	3,17	n.d.	0,122	1,09	0,0814	28,31	0,261	n.d.	66,96		B2

Numéro	Contexte	m g	Dia mm	Long, mm	Larg. mm	Epais. mm	Frm.	Ph.	Méth.	Ni %mass	Sn %mass	Zn %mass	Sb %mass	Pb %mass	Au %mass	Ag %mass	As %mass	Fe %mass	Cu %mass	Commentaires	Grp.
1072_2a8	1072, 02	2,29	-	16,87	15,03	1,84	3	G	ANRC	n.d.	0,168	n.d.	0,139	n.d.	0,0518	28,26	0,208	n.d.	71,17		B2
1072_2a9	1072, 02	1,96	15	15	15	1,89	3	G	ANRC	n.d.	0,544	n.d.	0,202	1,68	0,1190	35,65	0,262	n.d.	61,54		B1
1081_01	1081, 01	1,84	18	18	18	1,29	2	H	ANRC	0,128	1,00	6,49	0,139	0,634	n.d.	0,075	0,164	0,269	91,09		E
1081_03	1081, 03	1,29	17,5	17,5	17,5	0,88	2	H	ANRC	0,163	0,749	5,15	0,125	0,572	n.d.	0,132	0,202	n.d.	92,91		E
1081_04	1081, 04	2,07	17,5	17,5	17,5	1,5	2	H	ANRC	0,296	1,34	0,417	0,177	1,40	0,1425	38,89	0,355	n.d.	56,99		B1
1084_01	1084, 01	1,97	26,5	26,5	26,5	0,67	1	G	ANRC	n.d.	0,133	n.d.	0,105	1,00	0,0684	31,08	0,153	n.d.	67,46		B1
1084_02a	1088, 02	2,39	-	17,05	15,75	1,18	3	G	ANRC	0,546	0,208	n.d.	0,107	1,02	0,0691	28,68	0,162	n.d.	69,20		B2
1084_02b	1088, 02	2,37	-	20,66	17,03	0,88	2	G	ANRC	n.d.	0,122	n.d.	0,109	1,06	0,0616	27,21	0,180	n.d.	71,25		B2
1084_02c	1088, 02	2,26	-	19,11	18,06	0,99	2	G	ANRC	n.d.	0,134	n.d.	0,103	1,15	0,0609	29,26	0,158	n.d.	69,13		B2
1084_02d	1088, 02	2,39	-	18,47	17,14	0,97	2	G	ANRC	0,165	0,140	n.d.	0,105	n.d.	0,0682	28,71	0,177	n.d.	70,63		B2
1084_02e	1088, 02	2,51	-	17,11	15,59	1,3	2	G	ANRC	0,138	0,131	0,472	0,147	1,74	0,0645	22,72	0,162	n.d.	74,42		B2
1088_02a	1088, 02	2,49	19	15,64	15,24	1,52	3	H	ANRC	0,208	0,115	n.d.	0,121	n.d.	0,0716	28,77	0,183	n.d.	70,53		B2
1088_02b	1088, 02	2,49	-	17,11	14,05	1,44	3	H	ANRC	n.d.	0,165	n.d.	0,101	n.d.	0,0753	28,57	0,172	n.d.	70,92		B2
2005_01	2005, 01	2,2	-	16,98	16,94	1,38	1	I	ANRC	0,146	0,496	3,12	0,126	0,559	n.d.	0,199	0,167	0,441	94,75		E
2010_03	2010, 03	9,33	-	27,5	25	1,75	2	C	ANRC	n.d.	n.d.	n.d.	0,026	1,30	n.d.	90,89	n.d.	n.d.	7,78		A
2020_04	2020, 04	2,22	19	19	19	3,7	5	D	Fluo	1,86	0,667	6,56	n.d.	14,44	n.d.	n.d.	6,35	8,60	70,12		E
3000_04	3000, 04	0,28	11,5	11,5	11,5	0,94	4	I	Fluo	0,112	0,258	n.d.	n.d.	1,50	n.d.	n.d.	n.d.	1,90	98,13		D
3000_05	3000, 05	2,61	-	15	12,5	3,23	3	I	Fluo	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	9,73	n.d.	n.d.	n.d.	3,10	90,27	Non restauré	D
3007_02	3007, 02	2,29	19	19	19	1,11	1	G	ANRC	0,146	0,108	n.d.	0,113	5,51	0,0663	22,79	0,151	n.d.	71,12		B2
3009_13aa	3009, 13	2,17	-	12,16	12,04	1,98	3	G	Fluo	0,090	n.d.	n.d.	n.d.	0,130	n.d.	n.d.	n.d.	0,080	99,78		D
3009_13ab	3009, 13	2,51	-	14,44	13,5	2,01	3	G	ANRC	0,156	n.d.	n.d.	0,294	0,428	n.d.	0,038	0,096	n.d.	98,99		D
3009_13ac	3009, 13	1,95	-	15,41	14,7	1,48	3	G	Fluo	0,170	n.d.	n.d.	n.d.	0,140	n.d.	n.d.	0,620	0,077	99,07		D
3009_13ad	3009, 13	1,51	-	11,89	11,71	1,53	3	G	ANRC	0,013	0,018	0,012	0,006	0,395	n.d.	0,095	0,008	n.d.	99,45		D
3009_13ae	3009, 13	1,27	-	14,7	13,15	1,21	4	G	Fluo	0,170	n.d.	n.d.	n.d.	0,330	n.d.	n.d.	n.d.	0,080	99,50		D
3009_13af	3009, 13	0,43	-	14,23	11,67	0,66	3	G	Fluo	0,701	n.d.	n.d.	n.d.	0,500	n.d.	n.d.	0,390	0,091	98,41		D
3009_13ag	3009, 13	2,06	-	15,03	14,6	1,35	3	G	Fluo	0,190	n.d.	n.d.	n.d.	0,260	n.d.	n.d.	0,410	0,050	99,14		D
3009_13ah	3009, 13	1,12	-	13,64	13,14	1,02	3	G	Fluo	0,160	n.d.	n.d.	n.d.	0,130	n.d.	n.d.	0,400	0,060	99,31		D
3009_13ai	3009, 13	1,97	-	14,33	13,38	1,65	3	G	Fluo	0,170	n.d.	n.d.	n.d.	0,180	n.d.	n.d.	0,420	0,060	99,23		D
3009_13aj	3009, 13	1,29	-	15,6	13,32	1,18	3	G	Fluo	0,090	n.d.	n.d.	n.d.	0,370	n.d.	n.d.	n.d.	0,080	99,54		D
3009_13ak	3009, 13	1,59	-	16,71	15,82	1,14	2	G	Fluo	0,200	n.d.	n.d.	n.d.	0,571	n.d.	n.d.	0,085	0,091	99,14		D
3009_13al	3009, 13	2,08	-	16,6	13,9	1,55	2	G	Fluo	0,080	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1,33	1,90	98,60		D

Numéro	Contexte	m g	Dia mm	Long, mm	Larg. mm	Epais. mm	Frm.	Ph.	Méth.	Ni %mass	Sn %mass	Zn %mass	Sb %mass	Pb %mass	Au %mass	Ag %mass	As %mass	Fe %mass	Cu %mass	Commentaires	Grp.
3009_13am	3009, 13	2,24	-	16,82	15,17	1,39	3	G	Fluo	0,140	n.d.	n.d.	n.d.	0,330	n.d.	n.d.	0,100	0,080	99,43		D
3009_13an	3009, 13	1,94	-	14,38	14,14	1,49	3	G	Fluo	0,160	n.d.	n.d.	n.d.	0,360	n.d.	n.d.	0,461	0,110	99,02		D
3009_13ao	3009, 13	1,75	-	15,2	14,88	1,29	3	G	Fluo	0,090	n.d.	n.d.	n.d.	0,581	n.d.	n.d.	0,060	0,090	99,27		D
3009_13ap	3009, 13	1,88	-	14,83	12,09	2,07	3	G	Fluo	0,160	n.d.	n.d.	n.d.	0,582	n.d.	n.d.	0,080	0,300	99,18		D
3009_13aq	3009, 13	1,37	-	15,23	14,53	1,7	3	G	Fluo	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,330	n.d.	n.d.	n.d.	0,059	99,67		D
3009_13ar	3009, 13	2,12	-	15,27	14,57	1,77	3	G	Fluo	0,074	n.d.	n.d.	n.d.	0,490	n.d.	n.d.	n.d.	0,097	99,44		D
3009_13as	3009, 13	3,12	-	15,88	14,56	2,25/1,21	3	G	Fluo	0,140	n.d.	n.d.	n.d.	0,300	n.d.	n.d.	0,420	0,070	99,14		D
3009_13at	3009, 13	2,02	-	14,94	13,68	1,62	3	G	Fluo	0,081	n.d.	n.d.	n.d.	0,450	n.d.	n.d.	n.d.	0,065	99,47		D
3009_13au	3009, 13	2,23	-	16,37	15,05	1,58	3	G	Fluo	0,090	n.d.	n.d.	n.d.	0,210	n.d.	n.d.	n.d.	0,190	99,70		D
3009_13av	3009, 13	1,93	-	15,88	15,26	1,53	3	G	Fluo	0,100	0,200	1,30	n.d.	0,619	n.d.	n.d.	n.d.	0,060	97,78		D
3009_13aw	3009, 13	3,13	-	15,15	14,72	1,83	3	G	ANRC	0,019	0,008	n.d.	0,017	1,49	0,0227	0,308	0,014	0,021	98,10		D
3009_13ax	3009, 13	2,91	-	17,43	16,07	1,61	3	G	Fluo	0,220	n.d.	n.d.	n.d.	0,290	n.d.	n.d.	n.d.	0,090	99,49		D
3009_13ay	3009, 13	2,36	-	14,61	14,28	1,58	3	G	Fluo	0,180	n.d.	n.d.	n.d.	0,270	n.d.	n.d.	n.d.	0,110	99,55		D
3009_13az	3009, 13	1,76	-	15,18	14,98	1,13	3	G	Fluo	0,160	n.d.	n.d.	n.d.	0,470	n.d.	n.d.	0,450	0,088	98,92		D
3009_13ba	3009, 13	2,46	-	16,02	14,07	1,67	3	G	Fluo	n.d.	0,199	1,70	n.d.	0,205	n.d.	n.d.	n.d.	0,089	97,89		D
3009_13bc	3009, 13	2,25	-	17,2	14,54	1,54	3	G	Fluo	0,097	n.d.	n.d.	n.d.	0,245	n.d.	n.d.	n.d.	0,076	99,66		D
3009_13bd	3009, 13	2,52	-	15,56	15,33	1,64	3	G	Fluo	0,140	n.d.	n.d.	n.d.	0,230	n.d.	n.d.	0,500	0,063	99,13		D
3009_13be	3009, 13	2,26	-	17,16	16,38	1,34	3	G	Fluo	0,085	n.d.	n.d.	n.d.	0,200	n.d.	n.d.	n.d.	0,067	99,71		D
3009_13bf	3009, 13	2,7	-	15,77	15,03	1,83	3	G	Fluo	0,171	n.d.	n.d.	n.d.	0,553	n.d.	n.d.	n.d.	0,520	99,28		D
3009_13bg	3009, 13	2,86	-	14,72	14,56	1,93	3	G	Fluo	0,171	n.d.	n.d.	n.d.	0,241	n.d.	n.d.	n.d.	0,520	99,59		D
3009_13bh	3009, 13	2,83	-	15,78	15	1,73	3	G	Fluo	0,098	n.d.	n.d.	n.d.	0,120	n.d.	n.d.	n.d.	0,068	99,78		D
3009_13bi	3009, 13	3,06	-	18,15	17,65	1,48	1	G	Fluo	0,090	0,170	n.d.	n.d.	0,530	n.d.	n.d.	n.d.	0,090	99,21		D
3009_13bj	3009, 13	2,22	-	17,02	16,46	1,29	3	G	Fluo	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,350	n.d.	n.d.	n.d.	0,070	99,65		D
3009_13bk	3009, 13	2,1	-	15,43	14,93	1,41	3	G	Fluo	0,090	n.d.	n.d.	n.d.	0,190	n.d.	n.d.	n.d.	0,060	99,72		D
3009_13bl	3009, 13	2,12	-	16,03	14,98	1,51	3	G	Fluo	0,064	n.d.	n.d.	n.d.	0,160	n.d.	n.d.	n.d.	0,073	99,78		D
3009_13bm	3009, 13	2,23	-	15,49	13,14	1,55	3	G	Fluo	0,061	n.d.	n.d.	n.d.	0,270	n.d.	n.d.	n.d.	0,110	99,67		D
3009_13bn	3009, 13	2,04	-	14,97	14,46	1,38	3	G	Fluo	0,190	n.d.	n.d.	n.d.	0,320	n.d.	n.d.	0,370	0,070	99,12		D
3009_13bo	3009, 13	2,34	-	17,16	16	1,19	3	G	Fluo	0,190	n.d.	n.d.	n.d.	0,240	n.d.	n.d.	n.d.	0,037	99,57		D
3009_14	3009, 14	6,98	-	20	15,5	3	3	G	ANRC	n.d.	n.d.	n.d.	0,025	0,341	0,0828	84,83	n.d.	n.d.	14,72		A
3009_14a	3009, 14	2,2	16,5	16,5	16,5	1,36	2	G	ANRC	0,016	0,037	0,076	0,006	0,342	n.d.	0,088	0,007	n.d.	99,42	Travail sur les coins	D
3009_14b	3009, 14	2,83	16,5	16,5	16,5	1,77	2	G	Fluo	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,220	n.d.	n.d.	n.d.	0,060	99,78	Coins courbés	D

Numéro	Contexte	m g	Dia mm	Long, mm	Larg. mm	Epais. mm	Frm.	Ph.	Méth.	Ni %mass	Sn %mass	Zn %mass	Sb %mass	Pb %mass	Au %mass	Ag %mass	As %mass	Fe %mass	Cu %mass	Commentaires	Grp.
3009_14c	3009, 14	1,63	19,5	19,5	19,5	0,96	1	G	Fluo	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,070	100,00	Flan travaillé	D
3009_14d	3009, 14	1,42	19	19	19	0,88	2	G	ANRC	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,183	n.d.	0,068	0,003	n.d.	99,73		D
3009_14e	3009, 14	1,22	18	18	18	0,84	1	G	Fluo	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,123	n.d.	n.d.	n.d.	0,050	99,88		D
3009_14f	3009, 14	1,96	19	19	19	1,34	2	G	Fluo	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,210	n.d.	n.d.	n.d.	0,097	99,79		D
3009_14g	3009, 14	2,13	19	19	19	1,22	2	G	ANRC	0,160	n.d.	n.d.	0,591	0,611	n.d.	0,093	0,150	0,021	98,37		D
3009_14h	3009, 14	2,18	19	19	19	1,26	2	G	Fluo	0,230	n.d.	n.d.	n.d.	0,721	n.d.	n.d.	n.d.	0,080	99,05		D
3009_14i	3009, 14	2,45	20	20	20	1,69	1	G	Fluo	0,710	n.d.	n.d.	n.d.	0,214	n.d.	n.d.	0,500	0,063	98,58		D
3009_14j	3009, 14	2,05	-	14	12,5	1,68	3	G	Fluo	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,130	n.d.	n.d.	n.d.	0,120	99,87		D
3009_14k	3009, 14	1,97	22,5	22,5	22,5	0,94	2	G	Fluo	0,860	n.d.	n.d.	n.d.	0,410	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	98,73		D
3009_14l	3009, 14	2,69	21,5	21,5	21,5	1,36	3	G	Fluo	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1,45	n.d.	n.d.	n.d.	0,070	98,55		D
3009_14m	3009, 14	2,34	-	13	12,5	1,86	3	G	Fluo	0,068	n.d.	n.d.	n.d.	0,079	n.d.	n.d.	0,731	0,110	99,12		D
3009_14n	3009, 14	0,97	-	21,5	15	0,74	5	G	Fluo	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,058	n.d.	n.d.	n.d.	0,070	99,94		D
3009_14o	3009, 14	1,65	21,5	21,5	21,5	1,12	2	G	Fluo	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,210	n.d.	n.d.	n.d.	0,090	99,79		D
3009_14p	3009, 14	0,56	-	16	14	0,67	3	G	Fluo	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,079	n.d.	n.d.	n.d.	0,100	99,92		D
3009_14q	3009, 14	1,73	-	18,5	15,5	1,94	5	G	Fluo	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,320	n.d.	n.d.	n.d.	0,080	99,68		D
3009_15	3009, 15	0,85	-	15,34	13,02	0,9	3	G	Fluo	0,097	n.d.	n.d.	n.d.	0,264	n.d.	n.d.	0,080	0,120	99,56		D
3009_15a	3009, 15	2,33	-	27,13	13,78	1,6	5	G	Fluo	0,084	n.d.	n.d.	n.d.	0,380	n.d.	n.d.	n.d.	0,130	99,54		D
3009_15b	3009, 15	1,32	-	17,63	14,17	0,96	2	G	Fluo	0,190	n.d.	n.d.	n.d.	0,180	n.d.	n.d.	0,028	0,060	99,60		D
3009_15c	3009, 15	1,63	-	14,38	10,45	1,75	3	G	Fluo	0,130	n.d.	n.d.	n.d.	0,130	n.d.	n.d.	0,580	0,078	99,16		D
3009_15d	3009, 15	2,1	-	19,02	10,11	1,94	5	G	Fluo	0,091	n.d.	n.d.	n.d.	0,241	n.d.	n.d.	0,431	0,120	99,24		D
3009_15e	3009, 15	0,53	-	10,56	6,35	1,1	4	G	Fluo	0,060	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,170	0,140	99,77		D
3009_15f	3009, 15	1,01	-	18,01	8,01	1,4	5	G	Fluo	0,682	n.d.	n.d.	n.d.	0,094	n.d.	n.d.	n.d.	1,70	99,22		D
3009_15g	3009, 15	0,13	-	8	7,5	1,75	5	G	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.		-
3009_15h	3009, 15	2	-	15	14,48	1,7	3	G	Fluo	0,070	n.d.	n.d.	n.d.	0,089	n.d.	n.d.	n.d.	0,090	99,84		D
3009_15i	3009, 15	1,16	-	13,32	7,83	1,74	4	G	Fluo	0,070	n.d.	n.d.	n.d.	0,160	n.d.	n.d.	n.d.	0,050	99,77		D
3009_15j	3009, 15	2,31	-	14,33	9,34	2,23	3	G	Fluo	0,170	n.d.	n.d.	n.d.	0,220	n.d.	n.d.	0,040	0,071	99,57		D
3009_15k	3009, 15	1,67	-	13,78	12,43	2,5	5	G	Fluo	0,065	n.d.	n.d.	n.d.	0,370	n.d.	n.d.	n.d.	0,082	99,56		D
3009_15l	3009, 15	1	-	12	8,18	1,82	4	G	Fluo	0,080	n.d.	n.d.	n.d.	0,220	n.d.	n.d.	n.d.	0,051	99,70		D
3009_15m	3009, 15	1,25	-	-	-	-	999	G	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	Scorie	-
3009_15n	3009, 15	1,4	-	14,64	12,34	1,32	5	G	Fluo	0,170	n.d.	n.d.	n.d.	0,311	n.d.	n.d.	n.d.	0,130	99,52		D
3009_15o	3009, 15	2,02	-	21,49	15,41	1,08	5	G	Fluo	0,180	n.d.	n.d.	n.d.	0,430	n.d.	n.d.	0,093	0,067	99,30		D

Numéro	Contexte	m g	Dia mm	Long, mm	Larg. mm	Epais. mm	Frm.	Ph.	Méth.	Ni %mass	Sn %mass	Zn %mass	Sb %mass	Pb %mass	Au %mass	Ag %mass	As %mass	Fe %mass	Cu %mass	Commentaires	Grp.
3009_15p	3009, 15	1,08	-	15,3	14,07	1,4	5	G	Fluo	0,230	n.d.	1,00	n.d.	0,230	n.d.	n.d.	0,250	0,085	98,29		D
3009_15q	3009, 15	2,44	-	19,34	14,49	2,15	5	G	Fluo	0,073	n.d.	n.d.	n.d.	0,060	n.d.	n.d.	n.d.	0,066	99,87	Travail marteau	D
3009_15r	3009, 15	1,38	-	13,19	12,66	1,7	5	G	Fluo	0,090	n.d.	n.d.	n.d.	0,100	n.d.	n.d.	n.d.	0,070	99,81		D
3009_15s	3009, 15	1,44	-	12,94	-	1,48	5	G	Fluo	0,071	n.d.	n.d.	n.d.	0,094	n.d.	n.d.	n.d.	0,380	99,83		D
3009_15t	3009, 15	1,09	-	14,71	13,24	1,05	5	G	Fluo	0,180	n.d.	n.d.	n.d.	0,580	n.d.	n.d.	0,410	0,080	98,83		D
3009_15u	3009, 15	2,72	-	27,45	16,59	1,23	5	G	Fluo	0,130	n.d.	n.d.	n.d.	0,350	n.d.	n.d.	0,180	0,100	99,34		D
3009_15v	3009, 15	1,33	-	-	-	0,88	5	G	Fluo	0,180	n.d.	n.d.	n.d.	0,210	n.d.	n.d.	0,390	0,070	99,22		D
3009_15w	3009, 15	1,41	-	-	-	1,27	5	G	Fluo	0,170	n.d.	n.d.	n.d.	0,730	n.d.	n.d.	0,080	0,060	99,02		D
3009_15x	3009, 15	1,12	-	13,76	12,42	1,33	5	G	Fluo	0,110	n.d.	n.d.	n.d.	0,090	n.d.	n.d.	0,540	0,050	99,26		D
3009_15y	3009, 15	1,02	-	17,44	14,39	1,21	5	G	Fluo	0,070	n.d.	n.d.	n.d.	0,110	n.d.	n.d.	n.d.	0,090	99,82		D
3009_15z	3009, 15	0,87	-	20,33	10,47	1,25	5	G	Fluo	0,010	n.d.	n.d.	n.d.	0,190	n.d.	n.d.	n.d.	0,075	99,80		D
3009_16a	3009, 16	4,34	-	33	8,5	2,36	5	G	Fluo	0,070	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,450	0,090	99,48	Brute de lame ?	D
3009_16b	3009, 16	2,45	-	32,5	7,5	1,81	5	G	Fluo	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,250	n.d.	n.d.	0,380	0,060	99,37		D
3009_16c	3009, 16	10,6	-	45	10	3,47	5	G	Fluo	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,260	n.d.	n.d.	n.d.	0,080	99,74		D
3009_16d	3009, 16	0,71	-	29	5	1,6	5	G	Fluo	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,141	n.d.	n.d.	n.d.	0,100	99,86		D
3009_16e	3009, 16	2,24	-	40	5,5	1,91	5	G	Fluo	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,290	n.d.	n.d.	0,034	0,120	99,68		D
3009_16f	3009, 16	0,99	-	22	6	1,47	5	G	Fluo	0,170	n.d.	n.d.	n.d.	0,200	n.d.	n.d.	0,671	0,130	98,96		D
3009_16g	3009, 16	0,37	-	3	12	1,3	5	G	Fluo	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1,81	n.d.	n.d.	n.d.	0,090	98,19		D
3009_16h	3009, 16	0,95	-	34,5	4	1,15	5	G	Fluo	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,310	n.d.	n.d.	n.d.	0,096	99,69		D
3009_16i	3009, 16	3,98	-	19	11	2,31	5	G	Fluo	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,360	n.d.	n.d.	0,500	0,080	99,14		D
3009_a	3009, 15	2,12	-	13,5	11,5	1,96	3	G	ANRC	n.d.	n.d.	n.d.	0,011	0,153	0,0927	92,32	n.d.	n.d.	7,43		A
3009_b	3009, 15	3,25	-	19,5	11,5	2,03	3	G	ANRC	1,36	1,78	n.d.	0,022	2,52	0,0961	78,89	n.d.	n.d.	15,33		A
3009_c	3009, 15	2,65	-	-	-	4,77	5	G	ANRC	n.d.	n.d.	n.d.	0,012	1,97	0,0720	91,20	n.d.	n.d.	6,75		A
3029_01	3029, 01	2,74	20	20	20	1,51	2	H	ANRC	n.d.	0,176	n.d.	0,116	0,233	0,1061	35,47	0,194	n.d.	63,70		B2
3055_01	3055, 01	1,37	18	18	18	0,87	1	G	ANRC	0,007	0,026	n.d.	n.d.	0,273	n.d.	0,090	0,005	0,031	99,56		D
3055_02	3055, 02	2,62	18	18	18	1,54	3	G	ANRC	0,006	0,022	0,043	n.d.	0,259	n.d.	0,074	0,005	n.d.	99,58	Coin plié	D
3055_03	3055, 03	1,34	-	16,5	15	1,07	3	G	ANRC	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,151	n.d.	0,070	0,003	n.d.	99,76		D
3056_01	3056, 01	1,2	19	19	19	1,14	2	G	Fluo	n.d.	n.d.	1,40	n.d.	0,160	n.d.	4,48	n.d.	0,130	93,96		C
3068_01	3068, 01	0,42	12,5	12,5	12,5	0,56	4	G	ANRC	0,080	0,044	n.d.	0,087	0,209	0,0085	3,53	0,107	n.d.	95,93		C
3068_02	3068, 02	2,21	21	21	21	1,55	2	G	ANRC	0,217	1,83	n.d.	0,118	1,26	0,0756	32,33	0,192	n.d.	63,98		B1
3068_05	3068, 05	1,15	23	23	23	1,1	1	G	ANRC	n.d.	0,146	n.d.	0,135	2,00	0,1652	58,50	0,090	n.d.	38,97		B'

Numéro	Contexte	m g	Dia mm	Long, mm	Larg. mm	Epais. mm	Frm.	Ph.	Méth.	Ni %mass	Sn %mass	Zn %mass	Sb %mass	Pb %mass	Au %mass	Ag %mass	As %mass	Fe %mass	Cu %mass	Commentaires	Grp.
3074-5_3	3074/3075, 03	2,48	16,5	16,5	16,5	0,44	2	G	ANRC	0,118	0,198	0,285	0,251	0,113	0,0442	10,31	0,359	0,310	88,01		C
30745_4a	3074/3075, 04	7,24	-	41	9,5	-	5	G	Fluo	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,762	n.d.	31,07	n.d.	0,220	68,17		B2
30745_4b	3074/3075, 04	1,08	-	32,5	0,5	-	5	G	Fluo	0,085	7,03	9,04	n.d.	0,572	n.d.	n.d.	n.d.	0,410	83,28		E
30745_4c	3074/3075, 04	1,29	-	19,5	2,5	-	5	G	ANRC	0,117	0,091	n.d.	0,105	0,762	0,0735	26,69	0,163	n.d.	72,00		B1
30745_4d	3074/3075, 04	1,04	-	13	4,5	-	5	G	ANRC	1,28	n.d.	n.d.	0,164	1,81	0,0475	89,81	n.d.	n.d.	6,90		A
30745_4e	3074/3075, 04	0,17	15	15	15	0,57	5	G	Fluo	0,161	9,06	4,73	n.d.	0,473	n.d.	n.d.	0,574	0,630	85,01		E
30745_4f	3074/3075, 04	0,12	9,5	9,5	9,5	0,53	5	G	Fluo	0,161	5,24	6,35	n.d.	0,373	n.d.	n.d.	0,655	0,720	87,23		E
3074-5_5a	3074/3075, 05	0,42	11	11	11	0,73	4	G	Fluo	0,150	0,247	n.d.	n.d.	0,331	n.d.	8,42	0,130	0,270	90,72		C
3074-5_5b	3074/3075, 05	0,11	10,3	10,3	2	0,48	4	G	Fluo	0,131	0,201	n.d.	n.d.	0,211	n.d.	11,06	n.d.	0,190	88,40	Moitier de flan	C
3077_01	3077, 01	0,24	-	12,81	10,4	0,42	4	G	ANRC	0,159	0,036	0,184	0,067	0,035	0,0084	3,19	0,053	n.d.	96,27		C
3078_02	3078, 02	0,63	16,5	16,5	16,5	0,48	2	G	ANRC	0,106	0,033	n.d.	0,077	0,076	0,0178	7,41	0,117	0,445	91,72		C
3078_03	3078, 03	0,29	13,5	13,5	13,5	0,59	4	G	ANRC	0,128	0,090	0,296	0,134	0,182	0,0070	2,82	0,126	n.d.	96,21		C
3078_04	3078, 04	1,55	16	16	16	1,39	3	G	ANRC	0,722	0,197	n.d.	0,149	1,67	0,1018	36,90	0,189	n.d.	60,08		B1
3078_05	3078, 05	0,85	16,5	16,5	16,5	0,77	2	G	ANRC	0,095	0,050	n.d.	0,083	0,273	0,0185	7,42	0,128	n.d.	91,93		C
3078_06	3078, 06	0,82	16,5	16,5	16,5	0,45	2	G	ANRC	0,119	0,044	n.d.	0,079	0,362	0,0171	7,34	0,134	n.d.	91,90		C
3078_07	3078, 07	0,92	13,5	13,5	13,5	1,09	4	G	ANRC	0,093	0,120	0,268	0,120	0,411	0,0200	7,56	0,144	n.d.	91,26		C
3078_08	3078, 08	0,65	15	15	15	0,72	4	G	ANRC	0,113	0,146	0,368	0,124	0,295	0,0090	3,72	0,176	n.d.	95,05		C
3078_09	3078, 09	0,63	16	16	16	0,55	4	G	ANRC	0,130	0,058	0,673	0,082	0,150	0,0172	7,57	0,139	n.d.	91,19		C
3078_10	3078, 10	0,61	12	12	12	0,82	4	G	ANRC	0,066	0,055	0,198	0,045	0,419	0,0118	3,88	0,066	n.d.	95,26		C
3078_11	3078, 11	2,46	12,5	12,5	12,5	2,14/2,62	3	G	Fluo	0,202	0,282	n.d.	n.d.	3,73	0,2017	43,36	n.d.	0,820	52,23		B'
3078_12	3078, 12	0,64	14	14	14	0,97	4	G	ANRC	0,092	0,119	1,20	0,203	0,525	0,0087	3,76	0,144	n.d.	93,95		C
3078_13	3078, 13	0,89	10	10	10	1,81	4	G	ANRC	0,110	0,088	0,120	0,094	0,402	0,0211	8,12	0,292	n.d.	90,75		C
3119_01	3119, 01	0,73	14	14	14	0,97	2	F	ANRC	0,210	0,116	n.d.	0,145	0,040	0,0542	8,24	0,323	0,566	90,31		C
3123_01	3123, 01	1,69	-	-	-	1,94	5	F	Fluo	0,355	n.d.	n.d.	n.d.	5,47	n.d.	n.d.	n.d.	0,270	94,18		D
3140_01	3140, 01	0,5	13	13	13	0,58	1	E	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.		-
3148_01	3148, 01	0,61	14	14	14	2,92	5	F	Fluo	0,060	n.d.	6,15	n.d.	3,67	n.d.	n.d.	0,178	11,00	89,94		E
Net-HS	Décapage	0,64	13,5	13,5	13,5	0,9	3	I	Fluo	0,098	n.d.	n.d.	n.d.	0,571	n.d.	n.d.	n.d.	0,820	99,33		D

Annexe L :
Analyse des résidus métallurgiques de l'atelier monétaire de La Rochelle

Liste des abréviations :

Phases : elles correspondent à celles proposées par les archéologues dans les deux rapports de fouille de la place de Verdun à La Rochelle[27].

- A : construction de l'enceinte et 1er état du château (seconde moitié du XII^{ème} au 1er quart du XIII^{ème} siècle).
- Ab : second état du château (second quart du XIII^{ème} siècle).
- B : occupation (fin XII^{ème} siècle).
- C : occupation (jusqu'en 1372)
- D : installation fin XIV^{ème} siècle.
- E : début de l'hôtel de la monnaie (fin XIV^{ème} - 1er quart XV^{ème} siècle).
- F : 2ème quart XV^{ème} - début XVI^{ème} siècle.
- G : début XVI^{ème} - début XVII^{ème} siècle (entre 1611-1618).
- H : début XVI^{ème} siècle - 1689.
- I : après 1689.

Fluo : information qualitative obtenue à partir de dosages en spectrométrie de fluorescence X.

Métal : indique si l'échantillon est métallique.

[27] Bocquet A. *et al.*, *La Rochelle..., op. cit.*, n. p.
Nibodeau J.-P., *Rapport de sauvetage..., op. cit.*, 126 p.

Numéro	Phase	Masse g	Fluo	Métal	Remarque	Ni %mass	Sn %mass	Zn %mass	Sb %mass	Pb %mass	Apu %mass	Ag %mass	As %mass	Fe %mass	Cu %mass	%Ag billon	%Sn bz
1025	H	24,85	Cu Pb	x	Coulure	0,240	0,168	n.d.	0,124	28,36	0,006	0,301	0,771	0,319	69,72	0,430	0,241
1021_01_01	G	1,65	Ag Cu	x		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1021_01_02	G	0,76	Cu	x		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1021_01_03	G	1,04	Cu	x		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1021_01_04	G	0,35	Cu	x		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1021_01_05	G	1,49	Cu Pb	x		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1021_01_06	G	0,36	Cu	x		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1021_01_07	G	0,55	Cu	x		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2020_05	D	1,33	Cu Sn			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3000_01	I	2,71	Ag Cu	x		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3009_01	G	37,96	Cu	x	Plaque	0,087	0,006	n.d.	0,229	0,257	0,001	0,041	0,072	0,092	99,21	0,041	0,006
3009_02	G	16,45	Cu Pb	x		0,120	0,029	n.d.	0,024	69,14	0,001	0,205	0,031	0,068	30,38	0,671	0,096
3009_03	G	8,86	Cu Pb	x		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3009_04	G	8,92	Cu Pb	x		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3009_05	G	15,88	Cu Pb	x		0,222	0,088	n.d.	0,131	64,12	0,001	0,156	0,124	n.d.	35,16	0,442	0,249
3009_06	G	10,01	Cu Pb	x		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3009_07	G	5,63	Cu Pb	x		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3009_08	G	15,82	Cu Pb	x		0,158	0,073	n.d.	0,074	62,56	0,001	0,147	0,132	n.d.	36,85	0,398	0,197
3009_09	G	7,17	Cu Pb	x		0,043	0,023	0,022	0,033	90,39	0,002	0,671	0,042	n.d.	8,77	7,105	0,265
3009_10	G	9,39	Cu Pb	x		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3050_02_01	G	24,58	Pb		Scorie légère	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3050_02_02	G	8,08	Pb		Scorie légère	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3050_02_03	G	27,19	Pb		Scorie légère	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3050_02_04	G	16,13	Cu Pb		Scorie légère	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3050_03_01	G	291,76	Cu Pb	x		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3050_03_02	G	30,98	Cu Pb	x		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Numéro	Phase	Masse g	Fluo	Métal	Remarque	Ni %mass	Sn %mass	Zn %mass	Sb %mass	Pb %mass	Au %mass	Ag %mass	As %mass	Fe %mass	Cu %mass	%Ag billon	%Sn bz
3050_03_03	G	61,78	Cu Pb	x		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3050_03_04	G	68,02	Cu Pb	x		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3050_03_05	G	28,1	Cu Pb	x		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3050_03_06	G	28,73	Cu Pb	x		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3050_03_07	G	49,44	Cu Pb	x		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3050_03_08	G	36,27	Cu Pb	x		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3050_03_09	G	132,64	Cu Pb	x		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3050_03_10	G	27,34	Cu Pb		Scorie	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3050_04_01	G	52,27	Cu Pb	x		0,165	0,008	0,447	0,024	46,23	0,003	0,187	0,007	n.d.	52,93	0,353	0,014
3050_04_02	G	57,04	Cu Pb	x		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3050_04_03	G	43,39	Cu Pb	x		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3050_04_04	G	33,05	Cu Pb	x		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3050_04_05	G	45,4	Cu Pb	x		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3050_05_01	G	17,21	Cu	x		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3050_05_02	G	14,17	Cu Pb	x		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3050_05_03	G	12,7	Cu Pb	x		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3050_06_01	G	79,12	Cu Pb			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3050_06_02	G	53,73	Cu Pb			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3050_06_03	G	58,48	Cu Pb			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3050_06_04	G	95,44	Cu Pb			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3050_06_05	G	25,8	Cu Pb			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3050_06_06	G	31,47	Cu Pb	x		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3055_04_01	G	1,27	Cu	x		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3055_04_02	G	1,16	Cu	x		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3068_03_01	G	2,64	Ag Cu	x		0,145	0,109	n.d.	0,161	0,942	0,066	24,14	0,160	0,651	73,62	24,695	0,148

Numéro	Phase	Masse g	Fluo	Métal	Remarque	Ni %mass	Sn %mass	Zn %mass	Sb %mass	Pb %mass	Au %mass	Ag %mass	As %mass	Fe %mass	Cu %mass	%Ag billon	%Sn bz
3068_03_02	G	2,25	Ag Cu	x		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3068_03_03	G	0,77	Ag Cu	x		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3068_03_04	G	0,42	Ag Cu	x		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3068_03_05	G	0,3	Ag Cu	x		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3074-75_01	G	275,88	Cu Pb		Masse dense non métallique	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3074-75_02	G	5,12	Cu Sn	x		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3078_06	G	43,92	Cu Sn	x		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3078_07	G	24,66	Cu Sn	x		0,143	20,29	n.d.	0,519	1,947	0,001	0,118	0,408	0,139	76,44	0,154	20,975
3078_08	G	18,7	Cu Sn	x		0,133	19,72	n.d.	0,439	1,655	0,002	0,105	0,327	0,837	76,78	0,136	20,436
3078_09	G	13,49	Cu Sn	x		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3078_10	G	3,58	Cu Sn	x		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3078_11	G	0,13	Cu	x	Petite plaque	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3078_12	G	8,71	Cu Sn	x		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3078_13	G	5,4	Cu Sn	x		0,092	22,55	n.d.	0,452	1,983	0,001	0,105	0,343	0,263	74,21	0,141	23,305
3079_01	G	5,12	Cu Sn	x		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3079_02	G	165,76	Cu Sn	x		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3079_03	G	15,46	Cu Sn	x		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3079_04	G	6,01	Cu Sn	x		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3119_02_01	F	47,13	Cu Sn	x		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3119_02_02	F	12,82	Cu Sn	x		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3119_02_03	F	3,52	Cu Sn	x		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3123_02	F	16,19	Cu Sn	x		0,114	20,65	n.d.	0,425	1,994	0,001	0,109	0,315	n.d.	76,39	0,142	21,280
3143_01	F	19,96	Cu Sn	x		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3143_02	F	28,62	Cu Sn	x		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3143_03	F	14,46	Cu Sn	x		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Numéro	Phase	Masse g	Fluo	Métal	Remarque	Ni %mass	Sn %mass	Zn %mass	Sb %mass	Pb %mass	Au %mass	Ag %mass	As %mass	Fe %mass	Cu %mass	%Ag billon	%Sn bz
3143_04	F	6,74	Cu Sn	x		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3143_05	F	1,73	Cu Sn	x		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3143_06	F	6,61	Cu Sn	x		0,095	21,52	n.d.	0,371	1,202	0,000	0,105	0,277	0,397	76,03	0,138	22,064
3143_07	F	5,46	Cu Sn	x		0,113	17,25	n.d.	0,355	0,933	0,001	0,090	0,263	0,513	80,49	0,112	17,645
3150_01	F	4,74	Cu Sn	x		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3163_03_01	I	2720	Cu Pb		Masse dense non métallique Coupelle d'affinage	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3163_03_02	I	207,91	Cu Pb		Masse dense non métallique	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3163_03_03	I	189,25	Cu Pb		Masse dense non métallique	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3188_01	D	54,72	Pb	x		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3188_02	D	24,46	Cu Sn	x	Agrégats	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Annexe M :
Compte de fabrication de l'atelier de Crémieu pour la période du 14 décembre 1419 au 17 avril 1420

Ce compte de fabrication m'a été confié par M. Bompaire. Ce document a été publié partiellement dans *Numismatique médiévale* pour illustrer les rythmes de fabrication d'un atelier monétaire médiéval[28].

L'original est disponible aux Archives départementales de L'Isère, sous la côte B 4403.

Le taux de cisailles qui nous intéresse particulièrement n'est pas indiqués dans le recueil original, cependant, ils peuvent être calculé à partir de la différence entre la masse de métal confiée chaque jour aux ouvrier et celle qu'ils rendent une fois leur travail de mise en forme terminé.

Ce compte de fabrication est particulièrement détaillé car il indique le nombre d'ouvrier par fournaise et si elles accueillent un apprenti (recuchon).

[28] Bompaire M. *et al.*, *Numismatique médiévale..., op. cit.*, t. 7, p. 489-490.

Date	Ouvriers	Recuchon	Donné (marc)	Rendu (marc)	% cisailles	Marcs/ouvrier
14-12-1419	3		39,0	36,0	7,7	13,0
14-12-1419	4		44,0	40,0	9,1	11,0
14-12-1419	2		26,0	24,0	7,7	13,0
14-12-1419	2		26,0	24,0	7,7	13,0
15-12-1419	3		39,0	37,0	5,1	13,0
15-12-1419	4		44,0	41,0	6,8	11,0
15-12-1419	2		26,0	25,0	3,8	13,0
15-12-1419	2		28,0	27,0	3,6	14,0
16-12-1419	2		26,0	24,5	5,8	13,0
16-12-1419	2		26,0	25,0	3,8	13,0
16-12-1419	4		44,0	41,0	6,8	11,0
16-12-1419	3		39,0	37,0	5,1	13,0
18-12-1419	2		39,0	37,0	5,1	19,5
18-12-1419	4		44,0	40,0	9,1	11,0
18-12-1419	2		26,0	25,0	3,8	13,0
18-12-1419	2		26,0	24,0	7,7	13,0
19-12-1419	4		44,0	41,0	6,8	11,0
19-12-1419	3		39,0	37,0	5,1	13,0
19-12-1419	2		26,0	25,0	3,8	13,0
20-12-1419	3		31,0	27,5	11,3	10,3
20-12-1419	4		30,0	27,0	10,0	7,5
20-12-1419	2		20,0	18,0	10,0	10,0
20-12-1419	2		20,0	18,0	10,0	10,0
22-12-1419	3		39,0	36,5	6,4	13,0
22-12-1419	4		44,0	40,5	8,0	11,0
22-12-1419	2		26,0	25,0	3,8	13,0
22-12-1419	2		26,0	24,5	5,8	13,0
10-01-1420	3		54,0	51,0	5,6	18,0
10-01-1420	4	x	60,0	55,0	8,3	15,0
10-01-1420	2		36,0	34,0	5,6	18,0
10-01-1420	2		36,0	34,0	5,6	18,0
11-01-1420	3		54,0	49,0	9,3	18,0
11-01-1420	4		58,0	52,5	9,5	14,5
11-01-1420	1		36,0	32,0	11,1	36,0
11-01-1420	1		36,0	32,5	9,7	36,0
12-01-1420	3		54,0	49,5	8,3	18,0
12-01-1420	4		58,0	52,0	10,3	14,5
12-01-1420	3		50,0	43,0	14,0	16,7
15-01-1420	3		42,0	38,5	8,3	14,0
15-01-1420	2		28,0	25,0	10,7	14,0
15-01-1420	2		42,0	36,5	13,1	21,0
15-01-1420	4		48,0	33,5	30,2	12,0
16-01-1420	3		30,0	27,0	10,0	10,0
16-01-1420	2		8,0	7,0	12,5	4,0
16-01-1420	2		12,0	10,0	16,7	6,0
16-01-1420	2		18,0	16,5	8,3	9,0
18-01-1420	3		48,0	44,5	7,3	16,0
18-01-1420	4	x	50,0	45,0	10,0	12,5
18-01-1420	3		48,0	42,5	11,5	16,0

Date	Ouvriers	Recuchon	Donné (marc)	Rendu (marc)	% cisailles	Marcs/ouvrier
19-01-1420	3		48,0	44,5	7,3	16,0
19-01-1420	4	x	52,0	40,5	22,1	13,0
19-01-1420	2	x	32,0	29,5	7,8	16,0
19-01-1420	3		48,0	40,5	15,6	16,0
20-01-1420	3		48,0	44,0	8,3	16,0
20-01-1420	4	x	48,0	43,0	10,4	12,0
20-01-1420	3		48,0	44,0	8,3	16,0
20-01-1420	2		32,0	28,5	10,9	16,0
23-24-01-1420	4	x	88,0	81,5	7,4	22,0
23-24-01-1420	3		78,0	71,5	8,3	26,0
23-24-01-1420	3		74,0	67,0	9,5	24,7
23-24-01-1420	2		52,0	49,0	5,8	26,0
25-01-1420	3		39,0	35,0	10,3	13,0
25-01-1420	4	x	44,0	38,5	12,5	11,0
25-01-1420	3		39,0	33,5	14,1	13,0
25-01-1420	1		13,0	12,0	7,7	13,0
26-27-01-1420	3		72,0	66,0	8,3	24,0
26-27-01-1420	4	x	84,0	71,5	14,9	21,0
26-27-01-1420	3		77,5	72,0	7,1	25,8
26-27-01-1420	1		24,0	22,5	6,3	24,0
29-01-1420	3		54,0	50,5	6,5	18,0
29-01-1420	4	x	60,0	55,0	8,3	15,0
29-01-1420	3		54,0	49,0	9,3	18,0
29-01-1420	2		31,0	28,5	8,1	15,5
30-01-1420	3		54,0	49,5	8,3	18,0
30-01-1420	4	x	58,0	52,5	9,5	14,5
30-01-1420	3		54,0	47,0	13,0	18,0
30-01-1420	2		36,0	33,0	8,3	18,0
31-01-1420	3*		37,5	35,0	6,7	12,4
31-01-1420	4*		43,0	39,5	8,1	10,8
31-01-1420	3*		36,0	32,0	11,1	12,0
31-01-1420	2*		24,0	23,0	4,2	12,0
01-02-1420	3*		42,0	39,0	7,1	14,0
01-02-1420	4*		48,0	43,5	9,4	12,0
01-02-1420	3*		38,0	36,0	5,3	12,7
01-02-1420	2*		25,0	23,5	6,0	12,5
05-02-1420	3*		36,0	34,0	5,6	12,0
05-02-1420	4*		40,0	36,0	10,0	10,0
05-02-1420	3*		54,0	48,0	11,1	18,0
05-02-1420	2*		36,0	34,0	5,6	18,0
06-02-1420	3		40,0	35,5	11,3	13,3
06-02-1420	5	x	46,0	42,0	8,7	9,2
06-02-1420	4		64,0	58,0	9,4	16,0
06-02-1420	3		40,0	37,0	7,5	13,3
07-02-1420	3		40,0	37,0	7,5	13,3
07-02-1420	4	x	66,0	57,5	12,9	16,5
07-02-1420	3		60,0	56,0	6,7	20,0
07-02-1420	2		40,0	37,0	7,5	20,0
07-02-1420	3		40,0	38,0	5,0	13,3

Date	Ouvriers	Recuchon	Donné (marc)	Rendu (marc)	% cisailles	Marcs/ouvrier
07-02-1420	4	x	66,0	56,5	14,4	16,5
07-02-1420	3		60,0	56,5	5,8	20,0
07-02-1420	2		40,0	37,0	7,5	20,0
08-02-1420	2		40,0	37,0	7,5	20,0
08-02-1420	4	x	66,0	61,0	7,6	16,5
08-02-1420	3		60,0	53,0	11,7	20,0
08-02-1420	2		40,0	36,0	10,0	20,0
09-02-1420	2*		50,0	46,0	8,0	25,0
09-02-1420	3*		60,0	51,0	15,0	20,0
09-02-1420	2*		40,0	37,0	7,5	20,0
10-02-1420	3		45,0	41,0	8,9	15,0
10-02-1420	4	x	53,0	43,5	17,9	13,3
10-02-1420	3		45,0	39,5	12,2	15,0
10-02-1420	2	x	30,0	27,0	10,0	15,0
12-02-1420	2		30,0	27,5	8,3	15,0
12-02-1420	4	x	50,0	44,0	12,0	12,5
13-02-1420	3	x	50*	43,5	13,0	16,7
13-02-1420	2		30,0	27,0	10,0	15,0
13-02-1420	3		45,0	39,0	13,3	15,0
13-02-1420	2		30,0	27,5	8,3	15,0
14-02-1420	3		45,0	40,5	10,0	15,0
14-02-1420	4		50,0	45,0	10,0	12,5
14-02-1420	3		45,0	40,5	10,0	15,0
14-02-1420	2		30,0	28,0	6,7	15,0
15-02-1420	3		33,0	30,0	9,1	11,0
15-02-1420	4		39,0	35,5	9,0	9,8
15-02-1420	3		33,0	29,5	10,6	11,0
15-02-1420	2		22,0	20,5	6,8	11,0
29-02-1420	2		30,0	27,5	8,3	15,0
29-02-1420	4	x	53,0	48,0	9,4	13,3
29-02-1420	2		30,0	26,0	13,3	15,0
29-02-1420	2		30,0	28,5	5,0	15,0
01-03-1420	3		45,0	42,0	6,7	15,0
01-03-1420	4		52,0	48,0	7,7	13,0
01-03-1420	3		45,0	41,0	8,9	15,0
01-03-1420	1	x	30,0	27,0	10,0	30,0
02-03-1420	3		45,0	41,5	7,8	15,0
02-03-1420	4	x	52,0	46,0	11,5	13,0
02-03-1420	3		46,0	42,0	8,7	15,3
02-03-1420	2		30,0	27,5	8,3	15,0
04-03-1420	3		45,0	42,5	5,6	15,0
04-03-1420	4		52,0	48,5	6,7	13,0
04-03-1420	3		45,0	42,5	5,6	15,0
04-03-1420	2		30,0	28,0	6,7	15,0
05-03-1420	3		45,0	41,5	7,8	15,0
05-03-1420	3		52,0	48,0	7,7	17,3
05-03-1420	3		45,0	42,5	5,6	15,0
05-03-1420	2		30,0	28,0	6,7	15,0
06-03-1420	3		36,0	34,0	5,6	12,0

Date	Ouvriers	Recuchon	Donné (marc)	Rendu (marc)	% cisailles	Marcs/ouvrier
06-03-1420	3		42,0	39,0	7,1	14,0
06-03-1420	3		36,0	34,0	5,6	12,0
06-03-1420	2		24,0	20,0	16,7	12,0
07-03-1420	3		50,0	47,0	6,0	16,7
07-03-1420	3		44,0	41,0	6,8	14,7
07-03-1420	3		37,0	36,0	2,7	12,3
07-03-1420	2		25,0	22,0	12,0	12,5
13-02-1420	4		17,5	15,5	11,4	4,3
13-02-1420	5		21,0	19,0	9,5	4,2
13-02-1420	5		23,5	22,0	6,4	4,7
19-03-1420	3		24,0	22,0	8,3	8,0
19-03-1420	4	x	30,0	28,0	6,7	7,5
19-03-1420	4		36,0	33,0	8,3	9,0
19-03-1420	4		36,0	34,5	4,2	9,0
20-03-1420	3		34,0	32,0	5,9	11,3
20-03-1420	4	x	30,0	28,0	6,7	7,5
21-03-1420	3		30,0	28,5	5,0	10,0
21-03-1420	4	x	37,5	34,5	8,0	9,3
21-03-1420	4		45,0	42,0	6,7	11,3
21-03-1420	4		45,0	43,0	4,4	11,3
22-03-1420	3		30,0	28,5	5,0	10,0
22-03-1420	4	x	37,5	35,5	5,3	9,3
22-03-1420	4		45,0	42,0	6,7	11,3
22-03-1420	4		45,0	42,0	6,7	11,3
13-04-1420	3		45,0	42,0	6,7	15,0
13-04-1420	4	x	30,0	27,0	10,0	7,5
13-04-1420	2		30,0	26,0	13,3	15,0
13-04-1420	3		45,0	42,5	5,6	15,0
15-04-1420	5		45,0	42,0	6,7	9,0
15-04-1420	4	x	37,0	33,5	9,5	9,3
15-04-1420	4		45,0	40,0	11,1	11,3
15-04-1420	3		30,0	27,0	10,0	10,0
16-04-1420	3		48,0	46,0	4,2	16,0
16-04-1420	3	x	40,0	38,0	5,0	13,3
16-04-1420	3		48,0	43,5	9,4	16,0
16-04-1420	3		48,0	46,0	4,2	16,0
17-04-1420	3		54,0	51,5	4,6	18,0
17-04-1420	2	x	40,0	34,0	15,0	20,0
17-04-1420	3		54,0	46,5	13,9	18,0
17-04-1420	3		54,0	51,5	4,6	18,0

Annexe N :
Compte de fabrication de l'atelier de Bayonne pour la période du 2 janvier 1555 au 11 août 1556

Ce compte de fabrication m'a été confié par M. Bompaire. Ce document a été publié dans les actes du colloque international de numismatique de 1986 pour illustrer les rythmes de fabrication des ateliers monétaires médiévaux[29].

L'original est disponible aux Archives nationales, sous la côte Z1b 821.

Le taux de cisailles qui nous intéresse particulièrement n'est pas indiqués dans le recueil original, cependant, ils peuvent être calculé à partir de la différence entre la masse de métal confiée chaque jour aux ouvrier et celle qu'ils rendent une fois leur travail de mise en forme terminé.

[29] Bompaire M., Les cadences de production (XIV^{e}-XVI^{e} s.), en France principalement, dans Depeyrot G. *et al.*, eds., *Rythmes de la production monétaire, de l'Antiquité à nos jours*, Paris, Université Catholique de Louvain, 1986, t. 7, p. 608-612.

Date	Donné (marcs)	Rendu (marcs)	% cisailles	Monnaie
02-01-1555	64,0	48,9	23,6	Testons
04-01-1555	86,5	61,3	29,2	Douzains
08-01-1555	63,8	44,4	30,5	Douzains
11-01-1555	58,5	41,0	29,9	Testons
22-01-1555	65,0	52,4	19,4	Testons
27-01-1555	64,5	43,9	32,0	Douzains
01-02-1555	56,9	42,1	25,9	Douzains
06-02-1555	58,7	45,5	22,5	Testons
12-02-1555	49,0	38,1	22,1	Testons
15-02-1555	57,8	42,8	25,9	Douzains
20-02-1555	78,5	61,3	21,9	Testons
26-02-1555	57,5	45,7	20,6	Testons
27-02-1555	96,5	78,8	18,3	Testons
02-03-1555	75,9	58,6	22,8	Douzains
06-03-1555	58,9	46,3	21,4	Testons
10-03-1555	58,8	43,8	25,6	Douzains
12-03-1555	82,6	68,1	17,6	Testons
13-03-1555	98,7	81,0	17,9	Testons
18-03-1555	96,8	81,0	16,3	Testons
23-03-1555	78,0	63,0	19,3	Testons
28-03-1555	58,9	39,5	32,8	Douzains
01-04-1555	65,0	52,2	19,8	Testons
03-04-1555	55,8	44,3	20,7	Testons
10-04-1555	58,9	45,2	23,3	Testons
12-04-1555	81,8	62,6	23,4	Douzains
18-04-1555	53,6	38,3	28,6	Douzains
22-04-1555	62,4	44,7	28,4	Douzains
23-04-1555	56,4	40,5	28,2	Testons
26-04-1555	64,6	50,2	22,3	Testons
29-04-1555	65,8	45,4	31,0	Douzains
03-05-1555	75,4	61,2	18,9	Testons
06-05-1555	55,8	43,4	22,2	Testons
08-05-1555	58,6	43,0	26,7	Testons
10-05-1555	62,5	46,5	25,6	Testons
13-05-1555	54,0	41,0	24,0	Testons
17-05-1555	97,6	77,9	20,2	Testons
27-05-1555	58,9	42,4	28,0	Douzains
29-05-1555	64,6	45,0	30,4	Douzains
01-06-1555	76,9	59,8	22,2	Testons
04-06-1555	59,4	48,1	19,0	Testons
05-06-1555	58,5	43,3	26,0	Testons
08-06-1555	57,8	44,5	23,0	Testons
10-06-1555	65,5	49,1	25,0	Douzains
12-06-1555	58,3	44,0	24,5	Douzains
18-06-1555	64,8	58,4	9,8	Testons
20-06-1555	78,5	60,5	22,9	Testons
18-06-1555	72,9	58,0	20,4	Testons
01-07-1555	64,8	51,4	20,7	Testons
04-07-1555	66,9	51,0	23,8	Testons
06-07-1555	72,0	55,4	23,1	Testons
17-07-1555	55,4	42,4	23,5	Testons
20-07-1555	57,9	43,3	25,2	Testons
23-07-1555	54,8	42,5	22,3	Testons
02-08-1555	56,4	42,5	24,6	Testons
07-08-1555	56,4	42,6	24,6	Testons
12-08-1555	72,5	49,6	31,6	Testons
14-08-1555	54,0	40,0	25,9	Testons
17-08-1555	53,0	38,8	26,8	Testons
21-08-1555	48,6	37,9	22,0	Testons
26-08-1555	74,6	59,6	20,2	Testons
05-09-1555	57,4	45,3	21,1	Testons
16-09-1555	75,5	63,4	16,1	Testons
18-09-1555	52,5	39,1	25,5	Testons
23-09-1555	50,8	37,7	25,7	Testons
30-09-1555	62,4	47,4	24,0	Testons
08-10-1555	65,8	56,6	13,9	Testons
09-10-1555	54,5	45,2	17,1	Testons
22-10-1555	75,9	62,0	18,3	Testons
04-11-1555	58,4	45,9	21,4	Testons
05-11-1555	66,8	51,4	23,0	Testons
08-11-1555	59,9	46,5	22,4	Testons
13-11-1555	64,0	51,1	20,1	Testons
15-11-1555	51,5	40,0	22,3	Testons
26-11-1555	76,8	63,1	17,8	Testons
27-11-1555	55,8	43,3	22,4	Testons
05-12-1555	65,0	50,6	22,1	Testons
11-12-1555	54,8	42,5	22,4	Testons
06-12-1555	55,4	41,3	25,5	Testons
16-12-1555	52,4	38,0	27,5	Testons
20-12-1555	54,4	40,1	26,2	Testons
24-12-1555	55,5	42,5	23,4	Testons
02-01-1556	52,4	39,3	24,9	Testons
07-01-1556	55,0	43,3	21,4	Testons
08-01-1556	62,6	44,9	28,3	Testons
11-01-1556	60,8	45,3	25,5	Testons
13-01-1556	62,4	46,5	25,5	Testons
15-01-1556	85,9	70,5	17,9	Testons
16-01-1556	56,9	42,2	25,9	Testons
18-01-1556	59,5	42,0	29,4	Testons
21-01-1556	96,3	71,9	25,3	Testons
22-01-1556	65,6	50,1	23,6	Testons
23-01-1556	58,5	42,4	27,5	Testons
25-01-1556	72,8	56,7	22,2	Testons
28-01-1556	82,5	64,4	22,0	Testons
30-01-1556	97,0	80,0	17,5	Testons
31-01-1556	68,0	52,8	22,4	Douzains
04-02-1556	64,9	50,4	22,4	Testons
05-02-1556	59,0	46,2	21,7	Testons
07-02-1556	66,1	52,5	20,6	Testons
08-02-1556	78,1	61,0	21,9	Testons
10-02-1556	64,3	50,0	22,2	Testons
11-02-1556	57,4	41,1	28,4	Testons

Date	Donné (marcs)	Rendu (marcs)	% cisailles	Monnaie
14-02-1556	72,4	59,7	17,5	Testons
15-02-1556	65,8	51,3	22,1	Testons
19-02-1556	65,5	49,3	24,8	Testons
20-02-1556	72,3	53,2	26,4	Testons
21-02-1556	75,6	58,6	22,5	Testons
24-02-1556	98,0	82,0	16,3	Testons
27-02-1556	96,5	78,7	18,5	Testons
28-02-1556	65,4	51,0	22,0	Testons
02-03-1556	64,6	50,1	22,4	Testons
04-03-1556	80,5	62,4	22,5	Douzains
06-03-1556	67,0	43,5	35,1	Douzains
07-03-1556	72,0	55,0	23,6	Testons
10-03-1556	75,8	58,4	22,9	Testons
11-03-1556	72,8	56,3	22,6	Testons
13-03-1556	70,9	54,2	23,5	Testons
16-03-1556	81,4	64,7	20,5	Testons
18-03-1556	75,9	50,3	33,8	Testons
21-03-1556	58,4	45,3	22,5	Testons
23-03-1556	74,9	59,4	20,7	Testons
26-03-1556	72,4	59,0	18,5	Testons
27-03-1556	64,5	50,0	22,4	Testons
28-03-1556	76,4	56,7	25,8	Testons
01-04-1556	73,0	56,3	22,9	Testons
02-04-1556	78,4	62,1	20,8	Testons
03-04-1556	58,9	43,0	26,9	Testons
08-04-1556	75,6	58,7	22,3	Testons
09-04-1556	77,9	61,3	21,3	Testons
11-04-1556	65,5	50,1	23,5	Testons
13-04-1556	72,9	56,0	23,2	Testons
14-04-1556	58,5	42,4	27,6	Testons
16-04-1556	64,4	49,3	23,5	Testons
18-04-1556	75,4	59,5	21,1	Testons
20-04-1556	62,6	44,4	29,1	Testons
22-04-1556	72,5	56,5	22,1	Testons
24-04-1556	69,6	53,3	23,5	Testons
27-04-1556	58,5	42,3	27,8	Testons
29-04-1556	65,6	51,4	21,7	Testons
30-04-1556	58,9	-	-	Testons
02-05-1556	55,0	41,4	24,8	Testons
04-05-1556	50,4	38,1	24,3	Testons
06-05-1556	62,5	45,5	27,2	Testons
08-05-1556	64,4	42,0	34,8	Testons
09-05-1556	55,3	42,0	24,0	Testons
11-05-1556	63,8	56,5	11,4	Testons
12-05-1556	61,9	50,1	19,0	Testons
13-05-1556	56,4	-	-	Douzains
15-05-1556	62,0	52,1	15,9	Testons
16-05-1556	60,2	51,0	15,3	Testons
18-05-1556	54,0	40,4	25,2	Douzains
19-05-1556	59,5	43,4	27,1	Testons
20-05-1556	61,3	50,6	17,5	Testons
22-05-1556	64,0	50,1	21,7	Testons
27-05-1556	64,9	56,4	13,1	Testons
29-05-1556	58,9	44,3	24,8	Testons
30-05-1556	65,4	51,0	22,0	Testons
01-06-1556	63,6	50,1	21,2	Testons
02-06-1556	50,4	37,1	26,3	Testons
03-06-1556	64,4	46,4	28,0	Douzains
06-06-1556	58,5	43,1	26,3	Testons
10-06-1556	53,3	41,1	22,8	Testons
12-06-1556	51,0	40,5	20,6	Testons
13-06-1556	52,3	41,5	20,6	Testons
15-06-1556	45,5	32,1	29,4	Testons
17-06-1556	46,0	34,3	25,5	Testons
19-06-1556	64,0	44,9	29,9	Testons
20-06-1556	54,4	40,3	26,0	Testons
22-06-1556	56,5	41,3	27,0	Testons
23-06-1556	51,4	38,6	24,8	Testons
26-06-1556	52,5	39,6	24,5	Testons
27-06-1556	56,6	43,9	22,5	Testons
30-06-1556	54,9	41,3	24,8	Testons
01-07-1556	55,0	43,1	21,6	Testons
03-07-1556	46,9	31,3	33,3	Testons
06-07-1556	64,4	47,1	26,8	Testons
07-07-1556	42,5	30,4	28,5	Testons
08-07-1556	96,6	78,4	18,9	Testons
10-07-1556	66,0	44,0	33,3	Douzains
11-07-1556	44,0	28,4	35,5	Douzains
13-07-1556	66,0	43,5	34,1	Douzains
14-07-1556	64,6	48,9	24,4	Testons
18-07-1556	55,4	41,0	26,0	Testons
20-07-1556	64,4	47,0	27,0	Testons
21-07-1556	63,0	40,0	36,5	Douzains
23-07-1556	55,9	41,3	26,2	Testons
24-07-1556	60,1	45,1	24,9	Testons
27-07-1556	54,6	40,1	26,5	Testons
28-07-1556	62,4	43,2	30,7	Testons
01-08-1556	56,5	42,0	25,6	Testons
03-08-1556	64,0	43,0	32,8	Douzains
04-08-1556	55,4	41,0	25,9	Testons
05-08-1556	64,6	42,0	35,0	Douzains
08-08-1556	87,0	80,0	8,0	Testons
11-08-1556	16,0	14,0	12,5	Testons

Annexe O :
Corpus de la grotte de Lauradieu

Numéro	Nature	Masse (g)	Diamètre (mm)	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	Commentaires
Aur _001	Flan	2,57	24,5	24,5	24,5	0,8	
Aur _002	Flan	3	25,3	25,3	25,3	0,9	
Aur _003	Flan	1,86	25	25	25	0,7	
Aur _004	Flan	3,05	26	26	26	1	
Aur _005	Flan	2,61	25,2	24,8	22,1	0,9	
Aur _006	Flan	2,46	24,5	23,6	22,5	0,9	
Aur _007	Flan	2,23	24,2	24,2	24,2	0,7	plié
Aur _008	Flan	2,16	23,9	23,5	22,1	0,7	
Aur _009	Flan	1,37	20,3	20,3	20,3	0,7	
Aur _010	Flan	1,03	19,3	19,3	19,3	0,5	
Aur _011	Flan	1	16	16	16	0,7	
Aur _012	Flan	0,96	18,2	17,8	17,6	0,6	
Aur _013	Flan	0,75	17,9	17,9	17,9	0,5	plié
Aur _014	Flan	1,65	16,4	15,2	14,9	1,1	
Aur _015	Flan	1,19	23,1	23,1	23,1	0,6	coupé, argenté
Aur _016	Flan	0,93	25	25	25	0,6	coupé, argenté
Aur _017	Carreau	3,94		24,2	24,1	1	
Aur _018	Carreau	3,53		27,4	25,1	0,9	
Aur _019	Chute	2,2		24,9	16	0,9	
Aur _020	Chute	1,52		22,1	16,2	0,6	
Aur _021	Chute	1,93		26,7	12,5	0,7	
Aur _022	Chute	2		27,9	12,4	0,8	
Aur _023	Chute	1,77		23,8	14,4	0,7	
Aur _024	Chute	0,63		22,2	12,1	0,4	
Aur _025	Chute	1,5		25	11,9	0,7	
Aur _026	Chute	0,7		20,1	13,9	0,4	
Aur _027	Chute	1,35		26,4	9	0,8	
Aur _028	Chute	1,31		28,2	10,2	0,7	
Aur _029	Chute	1,16		21,3	13,2	0,7	
Aur _030	Chute	1,59		26,7	9,9	0,8	
Aur _031	Chute	1,16		24,2	10,2	0,7	
Aur _032	Chute	1		23,7	8,6	0,7	déformé
Aur _033	Chute	1,06		22,2	12,8	0,6	bord arrondi
Aur _034	Chute	1,03		24,9	8,7	0,6	
Aur _035	Chute	0,88		22	9,3	0,6	
Aur _036	Chute	1,3		25,3	12,9	0,6	
Aur _037	Chute	0,9		22,8	8,1	0,7	
Aur _038	Chute	1,14		23,9	9,2	0,7	
Aur _039	Chute	2,08		19,8	15,2	0,9	début de coupe (12mm)
Aur _040	Chute	0,91		24,9	6,7	0,7	
Aur _041	Chute	1,17		23	7,2	1	déformé
Aur _042	Chute	1,4		28,3	7,4	0,9	déformé
Aur _043	Chute	0,79		21,8	7,2	0,7	
Aur _044	Chute	1,14		25,9	9,7	0,7	début de coupe (5,8mm)
Aur _045	Chute	0,6		22	6,3	0,6	

Numéro	Nature	Masse (g)	Diamètre (mm)	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	Commentaires
Aur _046	Chute	0,74		25,2	5,9	0,7	déformé
Aur _047	Chute	0,92		15,9	12,9	0,6	
Aur _048	Chute	0,61		15,3	7,9	0,8	déformé
Aur _049	Chute	0,64		22,4	5,3	0,8	déformé
Aur _050	Chute	0,41		16	6	0,6	déformé
Aur _051	Chute	0,53		28,1	3,8	0,8	déformé
Aur _052	Chute	0,59		25,1	3,8	0,9	déformé
Aur _053	Chute	0,5		23,1	3,5	0,8	déformé
Aur _054	Chute	2,01		27,3	8	1,3	déformé
Aur _055	Chute	0,8		24,3	5,3	0,9	déformé
Aur _056	Chute	0,38		23,3	3,1	0,8	déformé
Aur _057	Chute	2,75					bord de lame
Aur _058	Chute	1,73					bord de lame
Aur _059	Chute	1,38		24,42	12,2	0,6	trou (4mm), début de coupe, confetti
Aur _060	Chute	1,9		24,7	13,4	0,8	trou (3mm)
Aur _061	Chute	1,16		23,1	11	0,6	trou (3mm)
Aur _062	Chute	1,21		21,7	10,4	0,7	trou (3mm)
Aur _063	Chute	0,82		25,2	7,7	0,6	trou tronqué (3mm), confetti
Aur _064	Chute	0,66		24,5	5,9	0,6	trou tronqué (3mm)
Aur _065	Chute	1,09		24,2	7,5	0,8	trou tronqué (2mm)
Aur _066	Chute	0,75		24,3	5,3	0,8	trou tronqué (2mm), courbé
Aur _067	Chute	0,76		24,8	5,8	0,6	trou tronqué (2mm), confetti
Aur _068	Chute	0,83		20,7	5,8	1	trou tronqué (3mm), courbé
Aur _069	Chute	1,83		23			bord de lame, trou 4mm
Aur _070	Chute	2,77		23,2	21,2	0,8	trou (3mm)
Aur _071	Chute	1,53		23,7	10,1	0,8	trou (4mm)
Aur _072	Chute	2,2		25,9	23,6	0,6	trou (4mm)
Aur _073	Chute	1,55		22,8	11,2	0,8	trou (2mm)
Aur _074	Chute	0,55		24,4	5,4	0,5	trou tronqué (2mm)
Aur _075	Chute	0,61		24,3	5,6	0,7	trou tronqué (2mm)
Aur _076	Chute	0,9		21,5	11,2	0,7	trou (2mm)
Aur _077	Chute	0,27		21,3	1,1	0,65	
Aur _078	Chute	0,42		21,5	1,5	0,6	
Aur _079	Chute	0,43		21,7	1,8	0,75	
Aur _080	Chute	0,44		21,8	1,8	0,75	
Aur _081	Chute	0,49		22	1,8	0,7	
Aur _082	Chute	0,49		22	3,3	0,76	
Aur _083	Chute	0,53		22,1	3,3	0,65	
Aur _084	Chute	0,56		22,2	3,4	0,73	
Aur _085	Chute	0,69		22,2	2,5	0,7	
Aur _086	Chute	0,92		44,8	3,8	0,68	
Aur _087	Chute	0,99		45,6	2,4	0,77	
Aur _088	Chute	1,21		45,6	2,7	1,2	
Aur _089	Monnaie	2,57	26,5	26,5	26	0,6	Faux blanc aux couronelles, laiton argenté
Aur _090	Monnaie	0,76	15,7			0,6	Véritable denier de François-Phébus, billon
Aur _091	Chutes	9,61					Lot de 41 rognures de découpe

Numéro	Nature	Masse (g)	Epaisseur (mm)
Aur _092	1 coin	0,05	0,39
Aur _093	1 coin	0,08	0,53
Aur _094	1 coin	0,08	0,53
Aur _095	1 coin	0,08	0,56
Aur _096	1 coin	0,09	0,46
Aur _097	1 coin	0,09	0,53
Aur _098	1 coin	0,1	0,52
Aur _099	1 coin	0,1	0,54
Aur _100	1 coin	0,1	0,54
Aur _101	1 coin	0,1	0,6
Aur _102	1 coin	0,1	0,6
Aur _103	1 coin	0,11	0,53
Aur _104	1 coin	0,11	0,55
Aur _105	1 coin	0,11	0,58
Aur _106	1 coin	0,11	0,58
Aur _107	1 coin	0,11	0,62
Aur _108	1 coin	0,11	0,63
Aur _109	1 coin	0,11	0,66
Aur _110	1 coin	0,12	0,55
Aur _111	1 coin	0,12	0,63
Aur _112	1 coin	0,12	0,63
Aur _113	1 coin	0,12	0,65
Aur _114	1 coin	0,12	0,66
Aur _115	1 coin	0,12	0,66
Aur _116	1 coin	0,12	0,68
Aur _117	1 coin	0,13	0,43
Aur _118	1 coin	0,13	0,59
Aur _119	1 coin	0,13	0,61
Aur _120	1 coin	0,13	0,67
Aur _121	1 coin	0,13	0,67
Aur _122	1 coin	0,13	0,68
Aur _123	1 coin	0,14	0,53
Aur _124	1 coin	0,14	0,53
Aur _125	1 coin	0,14	0,65
Aur _126	1 coin	0,14	0,67
Aur _127	1 coin	0,14	0,74
Aur _128	1 coin	0,14	0,8
Aur _129	1 coin	0,15	0,64
Aur _130	1 coin	0,15	0,66
Aur _131	1 coin	0,15	0,68
Aur _132	1 coin	0,16	0,55
Aur _133	1 coin	0,16	0,6
Aur _134	1 coin	0,16	0,61
Aur _135	1 coin	0,16	0,63
Aur _136	1 coin	0,16	0,66
Aur _137	1 coin	0,16	0,67
Aur _138	1 coin	0,16	0,74
Aur _139	1 coin	0,16	0,75
Aur _140	1 coin	0,16	0,84
Aur _141	1 coin	0,17	0,56
Aur _142	1 coin	0,17	0,58
Aur _143	1 coin	0,17	0,58
Aur _144	1 coin	0,17	0,6
Aur _145	1 coin	0,17	0,65
Aur _146	1 coin	0,17	0,67
Aur _147	1 coin	0,17	0,68
Aur _148	1 coin	0,17	0,7
Aur _149	1 coin	0,17	0,76
Aur _150	1 coin	0,17	0,77
Aur _151	1 coin	0,18	0,55
Aur _152	1 coin	0,18	0,55
Aur _153	1 coin	0,18	0,57
Aur _154	1 coin	0,18	0,58
Aur _155	1 coin	0,18	0,63
Aur _156	1 coin	0,18	0,7
Aur _157	1 coin	0,18	0,74
Aur _158	1 coin	0,19	0,55
Aur _159	1 coin	0,19	0,58
Aur _160	1 coin	0,19	0,66
Aur _161	1 coin	0,19	0,7
Aur _162	1 coin	0,19	0,8
Aur _163	1 coin	0,2	0,57
Aur _164	1 coin	0,2	0,65
Aur _165	1 coin	0,2	0,67
Aur _166	1 coin	0,2	0,68
Aur _167	1 coin	0,2	0,68
Aur _168	1 coin	0,2	0,7
Aur _169	1 coin	0,21	0,57
Aur _170	1 coin	0,21	0,6
Aur _171	1 coin	0,21	0,66
Aur _172	1 coin	0,22	0,55
Aur _173	1 coin	0,22	0,55
Aur _174	1 coin	0,22	0,6
Aur _175	1 coin	0,22	0,64
Aur _176	1 coin	0,22	0,7
Aur _177	1 coin	0,24	0,65
Aur _178	1 coin	0,24	0,67
Aur _179	1 coin	0,24	0,7
Aur _180	1 coin	0,24	0,7
Aur _181	1 coin	0,25	0,59
Aur _182	1 coin	0,25	0,66
Aur _183	1 coin	0,26	0,62
Aur _184	1 coin	0,26	0,76
Aur _185	1 coin	0,26	0,95
Aur _186	1 coin	0,27	0,53
Aur _187	1 coin	0,27	0,68
Aur _188	1 coin	0,27	0,7
Aur _189	1 coin	0,27	0,78
Aur _190	1 coin	0,28	0,76
Aur _191	1 coin	0,28	0,8
Aur _192	1 coin	0,3	0,53
Aur _193	1 coin	0,32	0,71
Aur _194	1 coin	0,43	0,85
Aur _195	1 coin	0,44	0,7
Aur _196	2 coins	0,19	0,36
Aur _197	2 coins	0,19	0,47
Aur _198	2 coins	0,21	0,47
Aur _199	2 coins	0,21	0,53
Aur _200	2 coins	0,21	0,55
Aur _201	2 coins	0,21	0,55
Aur _202	2 coins	0,21	0,8
Aur _203	2 coins	0,22	0,42
Aur _204	2 coins	0,22	0,6
Aur _205	2 coins	0,24	0,57
Aur _206	2 coins	0,24	0,68
Aur _207	2 coins	0,24	0,69
Aur _208	2 coins	0,25	0,52
Aur _209	2 coins	0,25	0,52
Aur _210	2 coins	0,25	0,66
Aur _211	2 coins	0,25	0,72
Aur _212	2 coins	0,26	0,54
Aur _213	2 coins	0,26	0,57
Aur _214	2 coins	0,27	0,6
Aur _215	2 coins	0,27	0,67
Aur _216	2 coins	0,27	0,73
Aur _217	2 coins	0,28	0,52
Aur _218	2 coins	0,28	0,62
Aur _219	2 coins	0,29	0,55
Aur _220	2 coins	0,29	0,6
Aur _221	2 coins	0,3	0,54
Aur _222	2 coins	0,3	0,59
Aur _223	2 coins	0,3	0,63
Aur _224	2 coins	0,3	0,65
Aur _225	2 coins	0,3	0,67
Aur _226	2 coins	0,3	0,69
Aur _227	2 coins	0,3	0,7
Aur _228	2 coins	0,31	0,5
Aur _229	2 coins	0,31	0,62
Aur _230	2 coins	0,32	0,55
Aur _231	2 coins	0,32	0,58
Aur _232	2 coins	0,32	0,6
Aur _233	2 coins	0,32	0,64
Aur _234	2 coins	0,32	0,73
Aur _235	2 coins	0,33	0,46
Aur _236	2 coins	0,33	0,59
Aur _237	2 coins	0,33	0,6
Aur _238	2 coins	0,33	0,66
Aur _239	2 coins	0,33	0,68
Aur _240	2 coins	0,34	0,59
Aur _241	2 coins	0,34	0,61

Numéro	Nature	Masse (g)	Epaisseur (mm)
Aur _242	2 coins	0,34	0,64
Aur _243	2 coins	0,34	0,68
Aur _244	2 coins	0,35	0,46
Aur _245	2 coins	0,35	0,48
Aur _246	2 coins	0,35	0,57
Aur _247	2 coins	0,35	0,57
Aur _248	2 coins	0,35	0,62
Aur _249	2 coins	0,35	0,63
Aur _250	2 coins	0,35	0,64
Aur _251	2 coins	0,35	0,7
Aur _252	2 coins	0,35	0,73
Aur _253	2 coins	0,35	0,8
Aur _254	2 coins	0,36	0,5
Aur _255	2 coins	0,36	0,6
Aur _256	2 coins	0,36	0,64
Aur _257	2 coins	0,36	0,65
Aur _258	2 coins	0,36	0,67
Aur _259	2 coins	0,36	0,69
Aur _260	2 coins	0,36	0,7
Aur _261	2 coins	0,36	0,75
Aur _262	2 coins	0,37	0,48
Aur _263	2 coins	0,37	0,5
Aur _264	2 coins	0,37	0,55
Aur _265	2 coins	0,37	0,61
Aur _266	2 coins	0,37	0,61
Aur _267	2 coins	0,37	0,64
Aur _268	2 coins	0,37	0,64
Aur _269	2 coins	0,37	0,66
Aur _270	2 coins	0,38	0,62
Aur _271	2 coins	0,38	0,62
Aur _272	2 coins	0,38	0,7
Aur _273	2 coins	0,38	0,71
Aur _274	2 coins	0,38	0,72
Aur _275	2 coins	0,39	0,35
Aur _276	2 coins	0,39	0,54
Aur _277	2 coins	0,39	0,62
Aur _278	2 coins	0,39	0,63
Aur _279	2 coins	0,4	0,51
Aur _280	2 coins	0,4	0,65
Aur _281	2 coins	0,4	0,65
Aur _282	2 coins	0,4	0,71
Aur _283	2 coins	0,4	0,74
Aur _284	2 coins	0,4	0,8
Aur _285	2 coins	0,41	0,68
Aur _286	2 coins	0,41	0,79
Aur _287	2 coins	0,42	0,52
Aur _288	2 coins	0,42	0,55
Aur _289	2 coins	0,42	0,64
Aur _290	2 coins	0,42	0,65
Aur _291	2 coins	0,42	0,66
Aur _292	2 coins	0,42	0,67
Aur _293	2 coins	0,42	0,74
Aur _294	2 coins	0,42	0,74
Aur _295	2 coins	0,42	0,77
Aur _296	2 coins	0,42	0,8
Aur _297	2 coins	0,43	0,55
Aur _298	2 coins	0,43	0,6
Aur _299	2 coins	0,43	0,67
Aur _300	2 coins	0,43	0,69
Aur _301	2 coins	0,43	0,8
Aur _302	2 coins	0,44	0,37
Aur _303	2 coins	0,44	0,57
Aur _304	2 coins	0,44	0,63
Aur _305	2 coins	0,44	0,63
Aur _306	2 coins	0,44	0,69
Aur _307	2 coins	0,44	0,7
Aur _308	2 coins	0,44	0,8
Aur _309	2 coins	0,45	0,34
Aur _310	2 coins	0,45	0,53
Aur _311	2 coins	0,45	0,57
Aur _312	2 coins	0,45	0,61
Aur _313	2 coins	0,45	0,61
Aur _314	2 coins	0,45	0,62
Aur _315	2 coins	0,46	0,57
Aur _316	2 coins	0,46	0,57
Aur _317	2 coins	0,46	0,58
Aur _318	2 coins	0,46	0,63
Aur _319	2 coins	0,46	0,65
Aur _320	2 coins	0,46	0,75
Aur _321	2 coins	0,47	0,45
Aur _322	2 coins	0,47	0,58
Aur _323	2 coins	0,47	0,63
Aur _324	2 coins	0,47	0,64
Aur _325	2 coins	0,47	0,68
Aur _326	2 coins	0,47	0,71
Aur _327	2 coins	0,48	0,6
Aur _328	2 coins	0,48	0,68
Aur _329	2 coins	0,49	0,61
Aur _330	2 coins	0,49	0,67
Aur _331	2 coins	0,49	0,7
Aur _332	2 coins	0,49	0,7
Aur _333	2 coins	0,49	0,75
Aur _334	2 coins	0,49	0,85
Aur _335	2 coins	0,5	0,54
Aur _336	2 coins	0,5	0,69
Aur _337	2 coins	0,5	0,72
Aur _338	2 coins	0,5	0,8
Aur _339	2 coins	0,51	0,67
Aur _340	2 coins	0,51	0,73
Aur _341	2 coins	0,52	0,7
Aur _342	2 coins	0,52	0,77
Aur _343	2 coins	0,53	0,54
Aur _344	2 coins	0,53	0,61
Aur _345	2 coins	0,53	0,67
Aur _346	2 coins	0,53	0,82
Aur _347	2 coins	0,54	0,73
Aur _348	2 coins	0,55	0,65
Aur _349	2 coins	0,55	0,89
Aur _350	2 coins	0,56	0,73
Aur _351	2 coins	0,56	0,74
Aur _352	2 coins	0,57	0,64
Aur _353	2 coins	0,57	0,67
Aur _354	2 coins	0,57	0,68
Aur _355	2 coins	0,57	0,81
Aur _356	2 coins	0,58	0,59
Aur _357	2 coins	0,58	0,65
Aur _358	2 coins	0,58	0,7
Aur _359	2 coins	0,58	0,73
Aur _360	2 coins	0,59	0,57
Aur _361	2 coins	0,59	0,74
Aur _362	2 coins	0,6	0,61
Aur _363	2 coins	0,61	0,75
Aur _364	2 coins	0,62	0,45
Aur _365	2 coins	0,62	0,75
Aur _366	2 coins	0,63	0,55
Aur _367	2 coins	0,65	0,84
Aur _368	2 coins	0,67	0,61
Aur _369	2 coins	0,67	0,68
Aur _370	2 coins	0,69	0,65
Aur _371	2 coins	0,74	0,73
Aur _372	2 coins	0,81	0,72
Aur _373	2 coins	0,81	0,76
Aur _374	2 coins	0,83	0,67
Aur _375	2 coins	0,93	0,76
Aur _376	2 coins	1,05	0,85
Aur _377	2 coins	1,13	0,7
Aur _378	3 coins	0,6	0,6
Aur _379	3 coins	0,62	0,65
Aur _380	3 coins	0,62	0,65
Aur _381	3 coins	0,64	0,73
Aur _382	3 coins	0,65	0,71
Aur _383	3 coins	0,65	0,75
Aur _384	3 coins	0,66	0,9
Aur _385	3 coins	0,77	0,65
Aur _386	3 coins	0,78	0,67
Aur _387	3 coins	0,8	0,65
Aur _388	3 coins	0,83	0,93
Aur _389	3 coins	1,22	1,03
Aur _390	4 coins	0,12	0,65
Aur _391	4 coins	0,79	0,6

Numéro	Nature	Masse (g)	Epaisseur (mm)
Aur _392	4 coins	0,8	0,75
Aur _393	4 coins	0,84	0,63
Aur _394	4 coins	0,92	0,71
Aur _395	4 coins	0,94	0,65
Aur _396	4 coins	0,96	0,6
Aur _397	4 coins	0,97	0,55
Aur _398	4 coins	0,99	0,75
Aur _399	4 coins	1,15	0,61
Aur _400	4 coins	1,39	0,7
Aur _401	4 coins	1,61	0,85

Annexe P :
Corpus de la grotte de La Catette

<u>Légendes et abréviations</u> :

N° : Référence individuelle définie pour cette étude.
Carré, US, ISO : référence du mobilier archéologique donné lors de la fouille de la grotte de La Catette. La référence « Fortuit » signale le matériel découvert par F. Matta.
m : masse en gramme.
Diam : diamètre en millimètres.
Long. : longueur en millimètres.
Larg. : largeur en millimètres.
Epais. : épaisseur en millimètres.

Type : type des échantillons.
- C : Carreau.
- F : flan.
- R : Cisaille.
- Frag. : Fragment.
- G : Goutte.

Dz : Douzain.
Insc : Inscription.

N°	Carré	US	ISO	Fluo X	Type	m	Diam	Long	Larg	Epais	Remarques
1	Fortuit			AgHgCu	M	2,16	24,5			0,6	Dz aux croissants
2	Fortuit			Ag Cu	M	1,94	26,3			0,6	Réal 3 fragments
3	Fortuit			Cu Zn	F	1,96	22,8			0,62	
4	Fortuit			Cu	F	2,07	24,1			0,65	
5	Fortuit			Cu	F	2,45	24,8			0,63	2 traces coupe
6	Fortuit			Cu	F	1,83	22,1			0,68	
7	Fortuit			Cu	F	2,2	26,6			0,48	
8	Fortuit			AgHgCu	F	2,68	24,1			0,9	
9	Fortuit			Cu	F	2,36	22,1			0,8	
10	Fortuit			AgHgCu	F	2,97	22,3			0,95	
11	Fortuit			Cu	F	2,53	21,8			0,92	
12	Fortuit			AgHgCu	F	2,21	22			0,84	
13	Fortuit			Cu	F	1,81	24,8			0,5	
14	Fortuit			Cu	F	2,65	20,6			1	
15	Fortuit			AgHgCu	F	1,74	22,3			0,55	
16	Fortuit			AgHgCu	F	2,06	23,9			0,6	
17	Fortuit			Cu	F	2,63	23,1			0,7	
18	Fortuit			AgHgCu	F	2,58	22,4			0,75	
19	Fortuit			Cu	F	1,91	23,3			0,58	
20	Fortuit			Cu	F	1,78	24,3			0,5	
21	Fortuit			Cu	F	1,96	20,1			0,7	
22	Fortuit			AgHgCu	F	3,36	22,2			1,1	
23	Fortuit			AgHgCu	F	1,88	20,8			0,68	
24	Fortuit			AgHgCu	F	2,37	22,3			0,8	Coup au milieu
25	Fortuit			Cu	F	1,6	22,75			0,55	
26	Fortuit			Cu	F	2,16	23,4			0,8	Insc Dz aux croissants
27	Fortuit			Cu	F	1,76	21,2			0,6	Insc Dz aux croissants
28	Fortuit			AgHgCu	F	1,71	21,3			0,7	
29	Fortuit			Cu	F	2,47	21			0,9	
30	Fortuit			Cu	F	2,53	21,5			0,85	
31	Fortuit			Cu	F	1,73	19,7			0,8	
32	Fortuit			Cu	F	1,96	18,7			0,9	
33	Fortuit			Cu	F	2,32	18,5			1	
34	Fortuit			Cu	F	1,19	14,5			1	
35	Fortuit			Cu	F	1,97	17,6			1,1	
36	Fortuit			Cu	F	1,99	19,1			0,85	
37	Fortuit			Cu	F	2,74	19,7			1,1	
38	Fortuit			Cu	F	1,82	19,9			0,85	
39	Fortuit			Cu	F	1,38	17,1			0,75	
40	Fortuit			Cu	F	1,14	15,7			0,82	
41	Fortuit			Cu	F	0,92	17,1			0,57	
42	Fortuit			Cu	F	0,51	14			0,54	
43	Fortuit			Cu	F	0,75	15,2			0,45	
44	Fortuit			Cu	F	0,78	15,5			0,7	
45	Fortuit			Cu	F	1,5	15,3			1,1	
46	Fortuit			Cu	F	0,77	13,5			0,65	
47	Fortuit			Cu	F	0,8	14,4			0,7	1 côté entaillé
48	Fortuit			Cu	F	0,76	13			0,77	
49	Fortuit			Cu	F	1,08	12,8			1,1	

N°	Carré	US	ISO	Fluo X	Type	m	Diam	Long	Larg	Epais	Remarques
50	Fortuit			Cu	F	0,78	13,1			0,8	
51	Fortuit			Cu	F	0,93	12,6			1,15	
52	Fortuit			Cu	F	0,49	13,6			0,48	
53	Fortuit			Cu	F	0,66	13,3			0,6	
54	Fortuit			Cu	C	1		12,5	12,5	0,85	
55	Fortuit			Cu	F	0,49	12,2			0,55	
56	Fortuit			Pb Sn	G	2,79					
57	Fortuit			Pb Sn	G	2,51					
58	Fortuit			Pb Sn	G	2,85					Coulure métal
59	Fortuit			Pb Sn	G	5,33					
60	Fortuit			Pb Sn	G	3,88					
61	Fortuit			Cu	C	2,7		13,74	12,4	2,33	Poids-étalon du Dz?
62	Fortuit			Cu	C	0,9		12,3	12	0,86	Bord recourbé
63	Fortuit			Cu	C	0,7		11,36	11,2	0,91	1 côté arrondi
64	Fortuit			Cu	C	0,44		12,84	9,92	0,47	
65	Fortuit			Cu	C	0,53		10,7	8,9	0,8	
66	Fortuit			Cu	C	0,48		10,9	9,9	0,79	1 côté arrondi
67	Fortuit			AgHgCu	F	0,33	11,1			0,5	
68	Fortuit			Cu	C	0,48		8,5	8,4	0,94	1 coin à 90°, 3 coupés
69	Fortuit			Cu	C	0,46		8,3	7,5	1,1	
70	Fortuit			Cu	C	0,4		7,4	7	1,07	
71	Fortuit			Cu	C	0,54		8,1	7,4	1,32	
72	Fortuit			Cu	C	0,7		9,5	7,5	1,52	
73	Fortuit			Cu	C	0,69		8	7,5	1,61	
74	Fortuit			Cu	C	0,63		8,6	7,8	1,39	
75	Fortuit			Cu	C	0,6		8,4	7,7	1,36	
76	Fortuit			Cu	C	0,65		8,5	7,8	1,37	
77	Fortuit			Cu	C	0,45		7,6	7,5	1,24	Traces de coupe derrière
78	Fortuit			Cu	C	0,5		8,3	7,7	1,19	
79	Fortuit			Cu	C	0,41		8,4	7,9	0,88	
80	Fortuit			Cu	C	0,58		9	8,2	1,17	
81	Fortuit			Cu	C	0,45		8,5	8,1	0,92	
82	Fortuit			Cu	C	0,57		9,1	8,6	1,08	
83	Fortuit			Cu	C	0,63		9,6	9,2	1,02	
84	Fortuit			Cu	C	0,54		8,9	8,5	1,04	
85	Fortuit			Cu	C	0,54		9,4	8,8	1,12	
86	Fortuit			Cu	C	0,49		9	8,4	0,94	
87	Fortuit			Cu	C	0,54		8,5	8,5	1,1	
88	Fortuit			Cu	C	0,81		9,6	9,2	1,35	
89	Fortuit			Cu	C	0,86		10	9,6	1,29	
90	Fortuit			Cu	C	0,68		9,7	8,6	1,17	
91	Fortuit			Cu	C	0,63		9,2	9,1	1,07	1 coin déchiré
92	Fortuit			Cu	C	0,95		9,6	8,6	1,66	
93	Fortuit			Cu	C	0,22		9,3	8,5	0,47	
94	Fortuit			Cu	C	0,74		10,1	9,5	1,12	
95	Fortuit			Cu	C	0,49		8,7	8,6	1,16	Presque rond
96	Fortuit			Cu	C	0,4		9,5	9,1	0,76	Rayure derrière
97	Fortuit			Cu	C	0,81		10	9,8	1,47	
98	Fortuit			Cu	C	0,71		9,8	9,8	1,21	
99	Fortuit			Cu	C	0,69		9,8	9,7	1,04	
100	Fortuit			Cu	C	0,66		10,1	10,1	1,03	

N°	Carré	US	ISO	Fluo X	Type	m	Diam	Long	Larg	Epais	Remarques
101	Fortuit			Cu	C	0,83		10,2	10	1,2	
102	Fortuit			Cu	C	0,76		10,6	10,4	1,07	
103	Fortuit			Cu	C	0,57		10,8	9,7	0,82	
104	Fortuit			Cu	C	0,8		9,6	9,1	1,35	
105	Fortuit			Cu	C	0,86		10,9	9,8	1,29	
106	Fortuit			Cu	C	0,74		10,4	10,2	1	
107	Fortuit			Cu	C	0,86		10,6	9,4	1,41	1 côté abimé par la coupe
108	Fortuit			Cu	C	0,65		11,2	10,5	0,76	
109	Fortuit			Cu	C	0,86		10,5	10,5	1,29	
110	Fortuit			Cu	C	0,98		11,5	10,1	1,23	
111	Fortuit			Cu	C	0,75		10,8	10	1,1	
112	Fortuit			Cu	C	1,02		11,2	10,3	1,32	
113	Fortuit			Cu	C	1,05		11,8	11,5	1,17	
114	Fortuit			Cu	C	1,08		11,4	11,2	1,31	
115	Fortuit			Cu	C	1,43		11	10,9	1,81	
116	Fortuit			Cu	C	1,08		11,9	11,2	1,34	
117	Fortuit			Cu	C	0,8		11,2	10,5	1,05	
118	Fortuit			Cu	C	0,91		11,2	11,1	1,19	Presque rond
119	Fortuit			Cu	C	0,63		11,1	10,5	1	
120	Fortuit			Cu	C	0,57		11,5	11,5	0,73	
121	Fortuit			Cu	C	0,68		10,4	10,3	0,95	
122	Fortuit			Cu	C	0,94		11,2	10,6	1,26	
123	Fortuit			Cu	C	0,5		11,6	11,2	0,72	½ ronde
124	Fortuit			Cu	C	0,32		11,7	8,2	0,53	Coupé
125	Fortuit			Cu	C	0,48		11,8	9,7	0,7	Recoupé
126	Fortuit			Cu	C	0,43		11,5	10,5	0,62	
127	Fortuit			Cu	C	0,7		11,5	10,4	0,93	
128	Fortuit			Cu	C	0,74		10,7	10,6	1,05	
129	Fortuit			Cu	C	0,65		10,6	10,1	1,14	
130	Fortuit			Cu	C	0,74		11,5	11,2	0,88	
131	Fortuit			Cu	F	0,31	11,2			0,45	
132	Fortuit			Cu	C	0,56		11,5	11,4	0,8	
133	Fortuit			Cu	F	0,45	12			0,55	
134	Fortuit			Cu	F	0,48	12,5			0,56	
135	Fortuit			Cu	F	0,38	11,9			0,45	
136	Fortuit			Cu	F	0,5	11,7			0,72	
137	Fortuit			Cu	F	0,4	10,9			0,69	
138	Fortuit			Cu	F	0,59	11,6			0,72	
139	Fortuit			Cu	R	0,21				0,56	
140	Fortuit			Cu	R	1,23				0,79	
141	Fortuit			Cu	R	1,4				1,3	
142	Fortuit			Cu	R	1,65		22,6	10,2	1,2	Replié derrière
143	Fortuit			Cu	R	0,21		11	9,7	1,12	Tres abimé
144	Fortuit			Cu	R	0,66		12	9,9	0,83	
145	Fortuit			-	R	0,15		9,4	6,7	0,72	
146	Fortuit			Cu	R	0,5		19,3	4,1	1,04	
147	Fortuit			Cu	R	0,65				0,56	
148	Fortuit			Ag Cu	Frag	0,83		8,7	6,7	2,85	
149	Fortuit			Cu	R	0,88				1,02	Bord arrondi
150	Fortuit			Cu	R	0,29		11,3	7	0,73	

N°	Carré	US	ISO	Fluo X	Type	m	Diam	Long	Larg	Epais	Remarques
151	Fortuit			Cu	R	0,52		14,6	9,8	0,7	
152	Fortuit			Cu	R	0,43		15,8	11,4	0,49	Bord arrondi; A
153	Fortuit			-	R	0,2		11,5	7,7	0,88	Bord arrondi
154	Fortuit			Cu	R	0,32		11,2	8,3	0,64	
155	Fortuit			-	R	0,12		9,3	5,2	0,63	
156	Fortuit			Cu	G	0,75					
157	Fortuit			Cu	R	0,6		46,5	6	0,5	1 bord droit; tres gondolé
158	Fortuit			Cu	R	0,33		27,2	5,9	0,63	
159	Fortuit			Cu	R	0,35		24,5	1,6	0,6	Arrondi
160	Fortuit			Cu	R	0,59		31,8	2,9	1,2	
161	Fortuit			Cu	R	0,59		19	2,4	1	
162	Fortuit			Cu	R	0,25		23,8	2	0,94	
163	Fortuit			AgHgCu	R	0,29		15	2,8	0,85	
164	Fortuit			AgHgCu	R	0,14		14,4	1,8	0,8	
165	Fortuit			Cu	R	0,23		14,8	2,2	0,78	
166	Fortuit			Cu	R	0,21		15,2	2,1	0,92	
167	Fortuit			Cu	R	0,16		11,1	2	0,8	
168	Fortuit			Cu	R	0,32		18,5	3,8	0,92	
169	Fortuit			Cu	R	0,21		14,3	4,3	0,74	
170	Fortuit			Cu	R	0,34		9,4	5,4	0,7	
171	Fortuit			Cu	R	0,24		11,8	4,8	1,18	
172	Fortuit			-	R	0,15				0,7	
173	1	2	703	AgHgCu	F	1,44	24,78			0,48	Bien ronde
174	1	2	703	AgHgCu	M	1,61	24,64			0,57	Dz aux croissants
175	1	2	703	AgHgCu	F	2,38	23,4			0,9	
176	1	2	708	AgHgCu	F	1,29	23,91			0,56	
177	1	2	695	AgHgCu	F	2,07	26,15			0,6	
178	1	2	699	AgHgCu	F	1,58	25,34			0,56	
179	1	2	704	AgHgCu	F	1,92	21,32			0,7	
180	1	2	705	-	R	0,16		14,25		0,95	
181	1	2	694	AgHgCu	R	0,06		15,37		0,74	
182	1	2	698	AgHgCu	F	1,66	24,86			0,58	
183	1	2	706	AgHgCu	F	2,64	19,53			1,1	
184	1	2	696	AgHgCu	F	2,14	24,69			0,54	
185	1	2	696	AgHgCu	F	5,17	23,31			1,33	Inscs, découpé
186	1	2	696	AgHgCu	F	1,91	24,85			0,54	
187	1	2	696	AgHgCu	M	1,88	21,22			0,85	Dz à la croisette
188	1	2	697	AgHgCu	F	1,92	24,91			0,58	
189	1	2	697	AgHgCu	F	2,03	24,74			0,6	
190	1	2	697	AgHgCu	F	1,24	22,16			0,5	
191	1	2	697	AgHgCu	F	1,27	22,58			0,51	
192	1	2	697	AgHgCu	M	1,93	25,72			0,5	Dz aux croissants - incuse
193	1	2	707	-	M	2,16	22,96			0,9	Réal
194	1	2	701	Cu Zn	F	2,93	21,61			1	
195	1	2	700	AgHgCu	M	2,21	24,41			0,76	Dz aux croissants
196	1	2	700	AgHgCu	M	1,82	25,5			0,6	Dz aux croissants
197	1	2	700	AgHgCu	M	1,98	24,47			0,6	Dz aux croissants
198	1	2	700	AgHgCu	F	1,5	24,42			0,49	
199	1	2	700	AgHgCu	F	1,78	25,12			0,56	
200	1	2	700	AgHgCu	F	0,91	23,46			0,32	Déchiré sur un bord

N°	Carré	US	ISO	Fluo X	Type	m	Diam	Long	Larg	Epais	Remarques
201	1	2	700	AgHgCu	F	2,07	25,64			0,6	
202	1	2	700	AgHgCu	F	4,18	26,12			0,94	
203	1	2	700	AgHgCu	F	1,71	25,9			0,61	
204	1	2	700	AgHgCu	F	1,91	23,94			0,55	
205	1	2	700	AgHgCu	F	1,53	23,9			0,5	
206	1	2	700	AgHgCu	F	2,27	26,84			0,55	
207	1	2	700	AgHgCu	F	1,02	21,44			0,4	
208	1	2	700	-	F	2,79	25,3			0,8	Insc : H de "henri" du Dz
209	1	2	700	AgHgCu	F	2,16	25,48			0,48	
210	1	2	700	AgHgCu	F	1,3	22,04			0,5	
211	1	2		AgHgCu	F	3,36	21,38			1,23	
212	1	2		Cu	F	2	21,5			0,82	
213	1	2		-	R	0,31		13,22		0,73	
214	1	2		Cu	F	0,85	13,6			0,8	
215	1	2		Cu	F	1,12	15,16			1	
216	1	2		Cu	R	0,63		26,34		0,68	
217	1	2		-	R	0,09		11,67		0,71	
218	2	2		Cu	F	0,58	11,66			0,85	
219	2	2		Cu	F	0,72	11,14			0,92	
220	2	2		Cu	F	0,73	9,85			1,12	
221	2	2		Cu	F	0,3	9,74			0,57	
222	2	4		Cu	F	1,88	19,13			0,93	
223	2	5		-	R	0,17		17,27		0,68	
224	2	5	711	AgHgCu	F	0,33		13,49	10,43	0,39	Déchiré sur le côté
225	3	1		-	R	0,42		27,04		0,89	
226	4	4		Cu	F	1,99	23,74			0,64	
227	4	4		-	R	0,17		15,38		1,06	
228	4	4		-	R	0,12		19,59		0,86	
229	4	4		-	R	0,11		10,7		0,98	
230	4	4		-	R	0,11		16,06		0,94	
231	4	4		-	R	0,16		19,47		0,84	
232	4	4		Cu	R	0,16		12,16		0,83	
233	4	2		Cu	F	0,41	14,83			0,71	Cassure récente
234	5	2		Cu	F	1,97	20,76			0,84	
235	5	2		AgHgCu	R	0,14		13,03		0,67	
236	5	2		-	R	0,24		24,17		1,17	
237	6	2		AgHgCu	F	2,26	20,96			0,86	
238	6	2		-	R	0,16		14,65		1,06	
239	5	4		-	R	0,8		38,08		0,8	
240	5	4		-	R	0,17		14,36		0,73	
241	5	4		AgHgCu	R	0,24		17,78		0,65	
242	5	4		-	R	0,01		9		0,43	
243	5	4		-	R	0,25		25,19		0,8	
244	5	4		-	R	0,08		14,95		0,65	
245	7	9		-	R	0,34		26,62		0,91	
246	7	9		AgHgCu	R	0,22		19,99		1,09	
247	7	9		-	R	0,21		22,68		0,89	
248	7	9		-	R	0,11		16,45		0,75	
249	7	9		-	R	0,29		31,79		0,7	
250	7	9		-	Fer	0,09		26,15		0,9	Fer

N°	Carré	US	ISO	Fluo X	Type	m	Diam	Long	Larg	Epais	Remarques
251	8	4		Cu	F	1,74	17,4			0,85	
252	8	4		Cu	F	0,51	12			0,86	
253	8	4		Cu	R	0,44		14,54		0,67	morceau de flan brûlé
254	8	9		AgHgCu	F	2,4	23,1			0,73	
255	11	2		Cu	F	0,55	12,84			0,56	marque d'outil
256	11	4		Cu	F	0,84	12,67			0,86	
257	11	4		Cu	F	0,63	13,67			0,97	
258	11	4		Cu	F	0,61	13,52			0,82	
259	11	4		AgHgCu	R	0,18		14,69		0,65	
260	11	4		-	R	0,13		11,21		0,66	
261	11	11		AgHgCu	F	0,54	13,26			0,44	
262	11	11	747	Cu	F	0,58	11,39			0,72	
263	10	4	709	Cu	C	0,73		10,1	9,14	1,29	
264	10	4	710	Cu	C	0,73		10,53	10,48	1,09	
265	10	4		Cu	F	1,86	17,66			0,87	
266	10	4		Cu	F	2,5	17,68			1,16	
267	10	4		-	C	1,94		16,88	16,88	1,16	
268	10	4		-	R	0,36		16,13		1,21	
269	10	4		AgHgCu	R	0,04		9,54		0,42	
270	10	4		Cu	C	0,92		11,02	9,86	1,06	
271	10	4		Cu	C	0,96		10,51	10,3	1,32	
272	10	4		Cu	F	0,62	-	11,68	11	0,93	
273	10	4		Cu	C	0,82		11,46	10,1	1,16	
274	10	4		Cu	C	0,67		10,02	9,87	1,15	
275	10	4		Cu	C	0,87		10,66	10,63	1,36	
276	10	4		Cu	C	0,8		11,61	11,36	0,76	
277	10	4		Cu	C	0,94		11,19	9,67	1,42	
278	10	4		Cu	C	0,76		9,35	9,33	1,33	
279	10	4		Cu	C	0,65		9,55	8,71	1,2	
280	10	4		Cu	C	0,69		9,62	9,17	1,39	
281	10	4		Cu	C	0,8		11,71	11,33	1,31	
282	10	4		Cu	C	0,51		9,09	8,57	1,1	
283	10	4		Cu	C	0,75		11,57	11,15	1,2	
284	10	4		Cu	C	0,95		10,89	9,44	1,28	
285	10	4		Cu	C	0,58		7,99	7,46	1,26	
286	10	4		Cu	C	1,72		14,14	11,98	1,36	
287	10	4		Cu	C	0,53		8,79	8,45	1,18	
288	10	4		Cu	C	0,58		8,81	8,12	1,26	
289	10	4		Cu	C	0,76		10,68	10,22	0,95	
290	10	4		Cu	C	0,83		11,48	9,6	1,19	
291	10	4		Cu	C	0,82		10,65	10,54	1,06	
292	10	4		Cu	C	0,41		8,4	7,82	0,98	
293	10	4		Cu	C	0,79		10,94	10,18	1,09	
294	10	4		Cu	C	0,57		9,21	9,16	1,01	
295	10	4		Cu	C	1,07		11,78	11,01	1,35	
296	10	4		Cu	C	1,29		13,12	12,41	1,28	
297	10	4		Cu	C	0,79		10,48	9,48	1,14	
298	10	4		Cu	C	0,81		11,8	10,44	1,06	
299	10	4		Cu	C	0,56		9,32	8,95	1,15	
300	10	4		Cu	C	0,93		10,02	9,84	1,33	

N°	Carré	US	ISO	Fluo X	Type	m	Diam	Long	Larg	Epais	Remarques
301	10	4		Cu	C	0,61		8,95	8,35	1,12	
302	10	4		Cu	C	0,91		7,29	7,28	0,88	
303	10	4		Cu	C	0,94		10,7	10,16	1,29	
304	12	2		Cu	F	0,81	13,74			0,81	
305	13	1		Cu	F	0,42	10,58			0,64	
306	15	4		Cu	F	1,02	16,1			0,43	Demi flan plié
307	17	5		Cu	C	0,74		10,55	10,42	0,91	
308	18	5		Cu	F	0,56	14,87			0,62	
309	19	5		Cu	F	0,39	14,86			0,41	Complètement plié
310	19	3		-	R	0,11		20,89		0,54	
311	19	2		-	R	0,15		19,9		0,66	
312	20	3		-	R	0,21		28,58		0,6	
313	20	3		-	R	0,15		20,8		0,67	
314	20	3		-	R	0,13		17,41		0,76	
315	20	3		-	R	0,04		10,65		0,56	
316	20	3		-	R	0,19		20,11		0,63	
317	20	3		-	R	0,22		20,84		0,73	
318	20	3		-	R	0,22		23,69		0,64	
319	20	3		-	R	0,12		19,27		0,62	
320	20	3		-	R	0,1		26,25		0,58	
321	20	3		-	R	0,05		17,39		0,67	
322	20	3		-	R	0,04		13,12		0,74	
323	20	3	607	-	R	0,08		14,1		0,67	
324	20	3	608	-	R	0,06		10,66		0,7	
325	20	3	499	-	R	0,13		20,49		0,77	
326	20	3	523	-	R	0,32		26,53		0,88	
327	20	3	606	-	R	0,2		20,38		0,98	
328	20	3	609	-	R	0,12		18,65		0,79	
329	21	2		Cu	F	1,93	17,83			0,86	
330	21	2		-	R	0,37		16,46		0,69	
331	21	2		AgHgCu	R	0,28		18,64		0,76	
332	21	2		-	R	0,1		12,66		0,58	
333	21	2		-	R	0,1		15,56		0,71	
334	22	2		Cu	F	0,72	12,33			0,73	
335	22	2		Cu	F	0,64	10,9			0,9	
336	22	2		-	R	0,24		20,93		0,9	
337	22	2		-	R	0,2		12,83		0,54	
338	22	4		Cu	F	0,74	13,76			0,67	
339	23	2		-	R	0,12		16,32		0,58	
340	23	2		-	R	0,12		13,46		0,71	
341	23	2		AgHgCu	R	0,23		13,1		1,05	
342	23	2		AgHgCu	R	0,24		10,72		0,75	
343	23	4		AgHgCu	R	0,37		17,35		0,76	
344	23	4		-	R	0,23		17,21		0,86	
345	23	4		-	R	0,09		16,6		0,47	
346	23	4		-	R	0,1		15,45		0,87	
347	24	2		Cu	F	0,66	15,2			0,55	
348	24	2		-	R	0,09		9,7		0,82	
349	24	2		-	R	0,16		11,39		0,71	
350	24	4	771	AgHgCu	F	2,05	24,44			0,62	

N°	Carré	US	ISO	Fluo X	Type	m	Diam	Long	Larg	Epais	Remarques
351	24	4	772	-	R	0,15		25,04		0,77	
352	25	2		Cu	R	0,28		15,66		0,55	
353	25	2		-	R	0,26		14,05		0,69	
354	25	2		AgHgCu	R	0,16		13,62		0,68	
355	25	4	811	AgHgCu	F	2,75	25,34			0,62	
356	25	4		Cu	M	2,11	21,41			0,67	Insc Dz aux croissants
357	25	4		AgHgCu	R	0,04		7,78		0,5	
358	25	4		-	R	0,2		20,55		0,74	
359	25	4		-	R	0,08		10,52		0,66	
360	25	4		-	R	0,18		12,99		0,53	
361	25	4		-	R	0,43		12,7		0,83	
362	25	4		-	R	0,14		24,1		0,66	
363	25	4		-	R	0,14		15,89		0,61	
364	25	4		-	R	0,18		13,24		0,67	

Annexe Q :
Références des reconstitutions expérimentales

Références des échantillons expérimentaux réalisés dans le cadre de cette étude entre 2004 et 2008 sur la plateforme paléométallurgique des Mines des Rois Francs à Melle, au laboratoire Pierre Süe (LSP), ainsi qu'au Centre Ernest-Babelon (CEB).

C'est analogues ne constituent qu'une partie des échantillons produits. Ceux présentés ici correpondent aux échantilons utilisés dans les différentes démonstrations de cette étude.

n°	Date et lieu	Expérimentation	Description
04-01	Melle, 2004	Moulage	Lame de billon Ag30-Cu70, moulée en lingotière horizontale de fer.
04-10	Melle, 2004	Moulage	Alliage de bas billon Ag10-Cu90, moulé en lingotière, mise en forme par martelage et recuits.
04-58	Melle, 2004	Frappe	Flan d'argent pur frappé.
04-59	Melle, 2004	Blanchiment	Flan de billon Ag30-Cu70, blanchi, non frappé
04-60	Melle, 2004	Blanchiment	Flan de billon Ag30-Cu70, blanchi, frappé
05-01	Melle, 2005	Moulage	Lame de billon Ag30-Cu70, moulée au sable.
05-02	Melle, 2005	Blanchiment	Lame de cuivre, moulée au sable, mise en forme par martelage et recuits.
05-10	Melle, 2005	Blanchiment	Alliage de billon Ag30-Cu70, moulée au sable, mis en forme de flan par martelage (6x) et recuit (6x), puis finalement recuit pendant une semaine.
05-20	LPS, 2005	Blanchiment	Essai de blanchiment d'échantillons de cuivre dans une solution ne contenant pas de chlorure de sodium
05-30	LPS, 2005	Mécanisme blanchiment	Alliage de billon Ag30-Cu70, moulée en lingotière de fer verticale.
05-31	LPS, 2005	Mécanisme blanchiment	Alliage de billon Ag30-Cu70, martelé (1x).
05-32	LPS, 2005	Mécanisme blanchiment	Alliage de billon Ag30-Cu70, martelé et recuit (1x).
05-33	LPS, 2005	Mécanisme blanchiment	Alliage de billon Ag30-Cu70, martelé (2x) et recuit (1x).
05-34	LPS, 2005	Mécanisme blanchiment	Alliage de billon Ag30-Cu70, martelé (2x) et recuit (2x).
05-35	LPS, 2005	Mécanisme blanchiment	Alliage de billon Ag30-Cu70, martelé (3x) et recuit (2x).
05-36	LPS, 2005	Mécanisme blanchiment	Alliage de billon Ag30-Cu70, martelé (3x) et recuit (3x).
05-37	LPS, 2005	Mécanisme blanchiment	Alliage de billon Ag30-Cu70, martelé (4x) et recuit (3x).
05-38	LPS, 2005	Mécanisme blanchiment	Alliage de billon Ag30-Cu70, martelé (4x) et recuit (4x).
05-39	LPS, 2005	Mécanisme blanchiment	Alliage de billon Ag30-Cu70, martelé (4x) et recuit (4x), blanchi 3 min.
05-40	LPS, 2005	Mécanisme blanchiment	Alliage de billon Ag30-Cu70, martelé (4x) et recuit (4x), blanchi 4 min.
05-41	LPS, 2006	Mécanisme blanchiment	Alliage de billon Ag30-Cu70, martelé (4x) et recuit (4x), blanchi 4 min.
05-42	LPS, 2005	Mécanisme blanchiment	Alliage de billon Ag30-Cu70, martelé (4x) et recuit (4x), blanchi 9 min.
05-43	LPS, 2005	Mécanisme blanchiment	Alliage de billon Ag30-Cu70, martelé (4x) et recuit (4x), blanchi 9 min.

n°	Date et lieu	Expérimentation	Description
05-44	LPS, 2005	Mécanisme blanchiment	Alliage de billon Ag30-Cu70, martelé (4x) et recuit (4x), blanchi 16 min.
05-45	LPS, 2005	Mécanisme blanchiment	Alliage de billon Ag30-Cu70, martelé (4x) et recuit (4x), blanchi 32 min.
05-46	LPS, 2005	Mécanisme blanchiment	Alliage de billon Ag30-Cu70, martelé (4x) et recuit (4x), blanchi 32 min.
05-47	LPS, 2005	Mécanisme blanchiment	Alliage de billon Ag30-Cu70, martelé (4x) et recuit (4x), blanchi 2h.
05-48	LPS, 2005	Mécanisme blanchiment	Alliage de billon Ag30-Cu70, martelé (4x) et recuit (4x), blanchi 2h.
05-49	LPS, 2005	Mécanisme blanchiment	Alliage de billon Ag30-Cu70, martelé (4x) et recuit (4x), blanchi 4h.
05-50	LPS, 2005	Mécanisme blanchiment	Alliage de billon Ag30-Cu70, martelé (4x) et recuit (4x), blanchi 8h.
05-51	LPS, 2005	Mécanisme blanchiment	Alliage de billon Ag30-Cu70, martelé (4x) et recuit (4x), blanchi 8h.
05-52	LPS, 2005	Mécanisme blanchiment	Alliage de billon Ag30-Cu70, martelé (4x) et recuit (4x), blanchi 1 jour.
05-53	LPS, 2005	Mécanisme blanchiment	Alliage de billon Ag30-Cu70, martelé (4x) et recuit (4x), blanchi 2 jours.
05-54	LPS, 2005	Mécanisme blanchiment	Alliage de billon Ag30-Cu70, martelé (4x) et recuit (4x), blanchi 2 jours.
05-55	LPS, 2005	Mécanisme blanchiment	Alliage de billon Ag30-Cu70, martelé (4x) et recuit (4x), blanchi 1 semaine.
05-56	LPS, 2006	Mécanisme blanchiment	Alliage de billon Ag30-Cu70, martelé (4x) et recuit (4x), blanchi 1 semaine.
06-01	Melle, 2006	Découpe	Découpe au ciseau à métal d'une lame de billon 10 %massAg 90 %mass Cu mis en forme par martelage.
06-02	Melle, 2006	Découpe	Découpe au ciseau à métal d'une lame de billon 10 %massAg 90 %mass Cu mis en forme par martelage. 2chantillon plus épais que le n° 06-01
06-03	Melle, 2006	Découpe	Découpe au ciseau à métal d'une plaque de cuivre mise en forme par martelage.
06-10	Melle, 2006	Argenture à l'amalgame	Echantillon de laiton Zn20-80Cu dont la surface n'a pas été préparée en vue de l'application de l'amalgame.

n°	Date et lieu	Expérimentation	Description
06-11	Melle, 2006	Argenture à l'amalgame	Echantillon de laiton Zn20-80Cu dont la surface a été préparée en vue de l'application de l'amalgame selon le protocole décrit dans le traité de Théophile.
06-15	Melle, 2006	Argenture à l'amalgame	Echantillon de laiton Zn20-80Cu dont la surface a été préparée en vue de l'application de l'amalgame selon le protocole décrit dans le traité de Théophile.
06-22	Melle, 2006	Argenture à l'amalgame	Echantillon de laiton Zn20-80Cu dont la surface a été préparée en vue de l'application de l'amalgame selon le protocole décrit dans le traité de Théophile.
06-30	Melle, 2006	Argenture à l'amalgame	Flan de cuivre partiellement bruni, dont la surface a été préparée en vue de l'application de l'amalgame selon le protocole décrit dans le traité de Théophile.
06-31	Melle, 2006	Argenture à l'amalgame	Flan de cuivre non bruni avant d'être frappé, dont la surface a été préparée en vue de l'application de l'amalgame selon le protocole décrit dans le traité de Théophile.
06-A	Melle, 2006	Découpe	Essais de découpe de carreaux avec des cisalles et un ciseau à métal.
07-01 à 24	Melle, 2007	Déchets de coupe	Flans de cuivre mis en forme selon la chaîne opératoire du faux monnayage de bas billon de la grotte de La Catette
07-101	Melle, 2007	Argenture à l'amalgame	Echantillon de cuivre pur décapé dans une solution de vinaigre et de chlorure de sodium recouvert d'un amalgame de mercure et d'argent pur. Chauffé à 500 °C jusqu'à obtenir deux changements de couleur.
07-25 à 39	Melle, 2007	Déchets de coupe	Flans de cuivre mis en forme par découpe arrondie de carreaux.
07-40 à 48	Melle, 2007	Déchets de coupe	Flans de cuivre mis en forme par rognage arrondi de carreaux.
07-A	Melle, 2007	Déchets de coupe	Expérimentation de production de déchets de coupe : n° 07-01à 48.
07-B	Melle, 2007	Essais de découpe	Essais de découpe arrondie de flan dans des carreaux de cuivre.
08-10	Melle, 2008	Chaîne opératoire officielle	Flan de cuivre mis en forme par martelage.
08-11	Melle, 2008	Chaîne opératoire officielle	Flan de cuivre mis en forme par martelage, blanchi.
08-12	Melle, 2008	Chaîne opératoire officielle	Monnaie de cuivre mise en forme par martelage et blanchie

n°	Date et lieu	Expérimentation	Description
08-13	Melle, 2008	Chaîne opératoire officielle	Monnaie de cuivre mise en forme par martelage, blanchie. Trois mois après la frappe la surface est oxydée.
08-14	Melle, 2008	Chaîne opératoire officielle	Carreau de cuivre placé à l'extrémité de la pile lors d'un rechaussage.
08-15	Melle, 2008	Chaîne opératoire officielle	2 flans du cuivre dont l'un présente un défaut de surface après avoir été boué contre le second.
08-20 à 52	Melle, 2008	Déchets de coupe	Flans de cuivre mis en forme selon la chaîne opératoire officielle.
08-60	CEB, 2007	Blanchiment à l'eau forte	Alliage de billon Ag30-Cu70 blanchi à l'eau forte pendant 5 min.
08-A	Melle, 2008	Chaîne opératoire officielle	Echantillons n° 08-01 à 52.

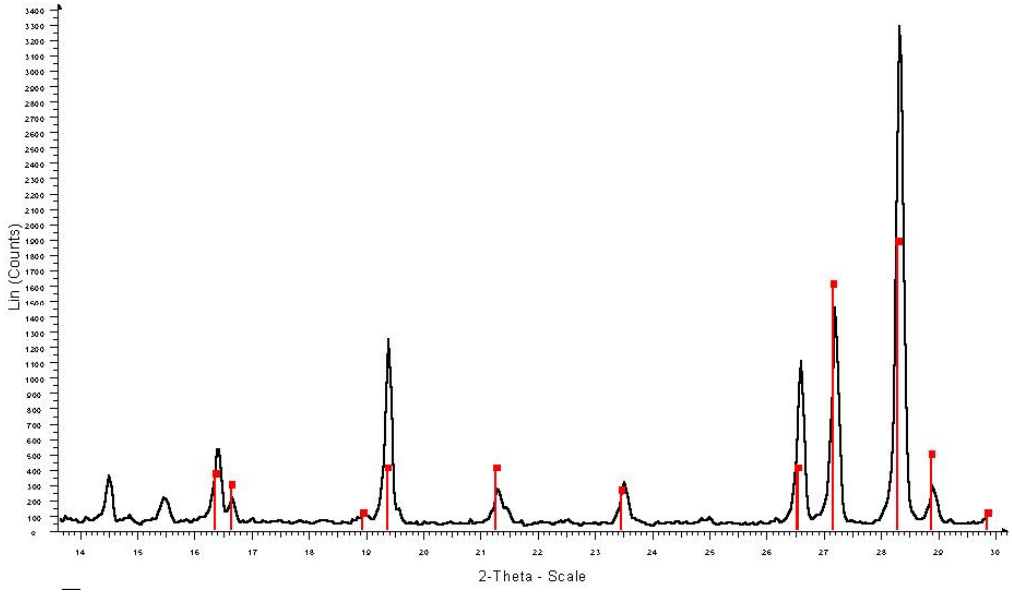
Annexe R :
Productions expérimentales de déchets de coupe

Données expérimentales concernant la production de déchets de coupe lors de la mise en œuvre de différentes chaînes opératoires de fabrication monétaire.

n°	Chaine opératoire	Masse initiale (g)	Masse finale (g)	Déchets de coupe (%)
07-01	Rognage	0,24	0,23	4,2
07-02	Rognage	0,18	0,17	5,6
07-03	Rognage	0,23	0,21	8,7
07-04	Rognage	0,24	0,21	12,5
07-05	Rognage	0,26	0,23	11,5
07-06	Rognage	0,26	0,2	23,1
07-07	Rognage	0,22	0,18	18,2
07-08	Rognage	0,27	0,22	18,5
07-09	Rognage	0,24	0,22	8,3
07-10	Rognage	0,19	0,17	10,5
07-11	Rognage	0,2	0,17	15,0
07-12	Rognage	0,24	0,2	16,7
07-13	Rognage	0,31	0,26	16,1
07-14	Rognage	0,27	0,24	11,1
07-15	Rognage	0,31	0,27	12,9
07-16	Rognage	0,3	0,26	13,3
07-17	Rognage	0,33	0,28	15,2
07-18	Rognage	0,27	0,22	18,5
07-19	Rognage	0,27	0,24	11,1
07-20	Rognage	0,29	0,24	17,2
07-21	Rognage	0,32	0,29	9,4
07-22	Rognage	0,32	0,28	12,5
07-23	Rognage	0,29	0,26	10,3
07-24	Rognage	0,35	0,29	17,1
07-25	Coupe arrondie	0,41	0,31	24,4
07-26	Coupe arrondie	0,68	0,48	29,4
07-27	Coupe arrondie	0,42	0,31	26,2
07-28	Coupe arrondie	0,66	0,53	19,7
07-29	Coupe arrondie	0,65	0,49	24,6
07-30	Coupe arrondie	0,61	0,47	23,0
07-31	Coupe arrondie	0,46	0,34	26,1
07-32	Coupe arrondie	0,45	0,35	22,2
07-33	Coupe arrondie	0,52	0,39	25,0
07-34	Coupe arrondie	0,58	0,41	29,3
07-35	Coupe arrondie	0,73	0,55	24,7
07-36	Coupe arrondie	0,42	0,31	26,2
07-37	Coupe arrondie	0,51	0,34	33,3
07-38	Coupe arrondie	0,62	0,45	27,4
07-39	Coupe arrondie	0,67	0,51	23,9

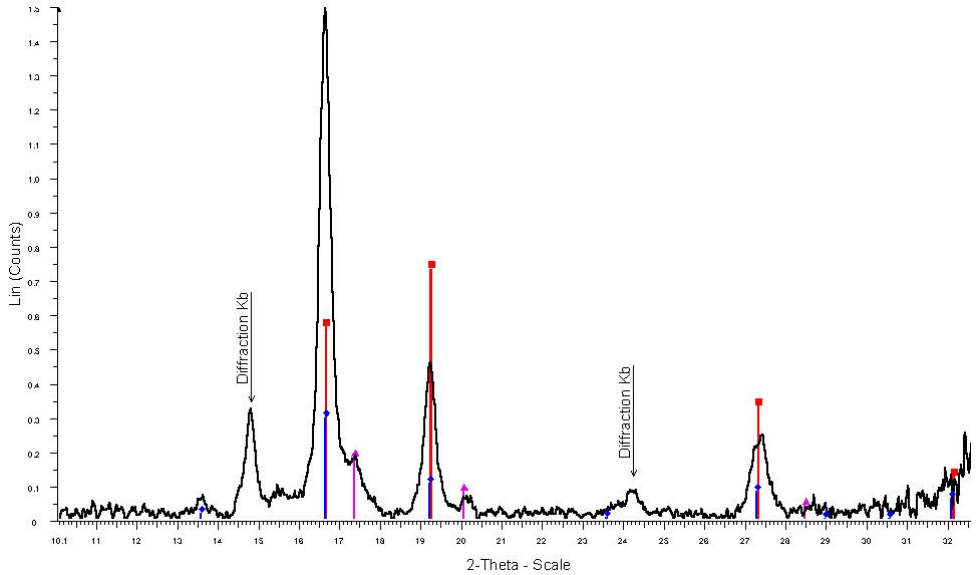
n°	Chaine opératoire	Masse initiale (g)	Masse finale (g)	Déchets de coupe (%)
07-40	Rognage arrondi	0,61	0,48	21,3
07-41	Rognage arrondi	0,65	0,55	15,4
07-42	Rognage arrondi	0,31	0,26	16,1
07-43	Rognage arrondi	0,72	0,58	19,4
07-44	Rognage arrondi	0,68	0,56	17,6
07-45	Rognage arrondi	0,77	0,65	15,6
07-46	Rognage arrondi	0,82	0,65	20,7
07-47	Rognage arrondi	0,55	0,47	14,5
07-48	Rognage arrondi	0,89	0,69	22,5
08-20	Rognage officiel	1,13	1	11,50
08-21	Rognage officiel	1,08	0,99	8,33
08-22	Rognage officiel	1,09	1	8,26
08-23	Rognage officiel	1,05	0,96	8,57
08-24	Rognage officiel	1,04	1	3,85
08-25	Rognage officiel	1,05	1	4,76
08-26	Rognage officiel	1,06	1	5,66
08-27	Rognage officiel	1,05	1	4,76
08-28	Rognage officiel	1,11	1	9,91
08-29	Rognage officiel	1,12	1	10,71
08-30	Rognage officiel	1,09	1	8,26
08-31	Rognage officiel	1,14	1	12,28
08-32	Rognage officiel	1,07	1	6,54
08-33	Rognage officiel	1,06	1	5,66
08-34	Rognage officiel	1,06	0,98	7,55
08-35	Rognage officiel	1,11	1	9,91
08-36	Rognage officiel	1,05	1	4,76
08-37	Rognage officiel	1,04	1	3,85
08-38	Rognage officiel	1,06	1	5,66
08-39	Rognage officiel	1,15	1	13,04
08-40	Rognage officiel	1,11	1	9,91
08-41	Rognage officiel	1,03	1	2,91
08-42	Rognage officiel	1,12	0,99	11,61
08-43	Rognage officiel	1,11	1	9,91
08-44	Rognage officiel	1,02	1	1,96
08-45	Rognage officiel	1,13	1	11,50
08-46	Rognage officiel	1,06	1	5,66
08-47	Rognage officiel	1,07	0,99	7,48
08-48	Rognage officiel	1,09	1	8,26
08-49	Rognage officiel	1,11	1	9,91
08-50	Rognage officiel	1,11	1	9,91
08-51	Rognage officiel	1,13	1	11,50
08-52	Rognage officiel	1,09	1	8,26

Annexe S :
Etude du blanchiment, analyses par diffraction des rayons X



K-tartratenp - File: K-tartrate np.RAW - Type: 2Th/Th locked - Start: 2.023 ° - End: 29.968 ° - Step: 0.045 ° - Step time: 1. s - Temp.: 2
Operations: Import
25-0644 (I) - Potassium Hydrogen Tartrate - C4H5KO6 - Y: 56.25 % - d x by: 1. - WL: 1.78901 - 0 - I/Ic PDF 0.3 -

Spectre de diffraction de la gravelle.

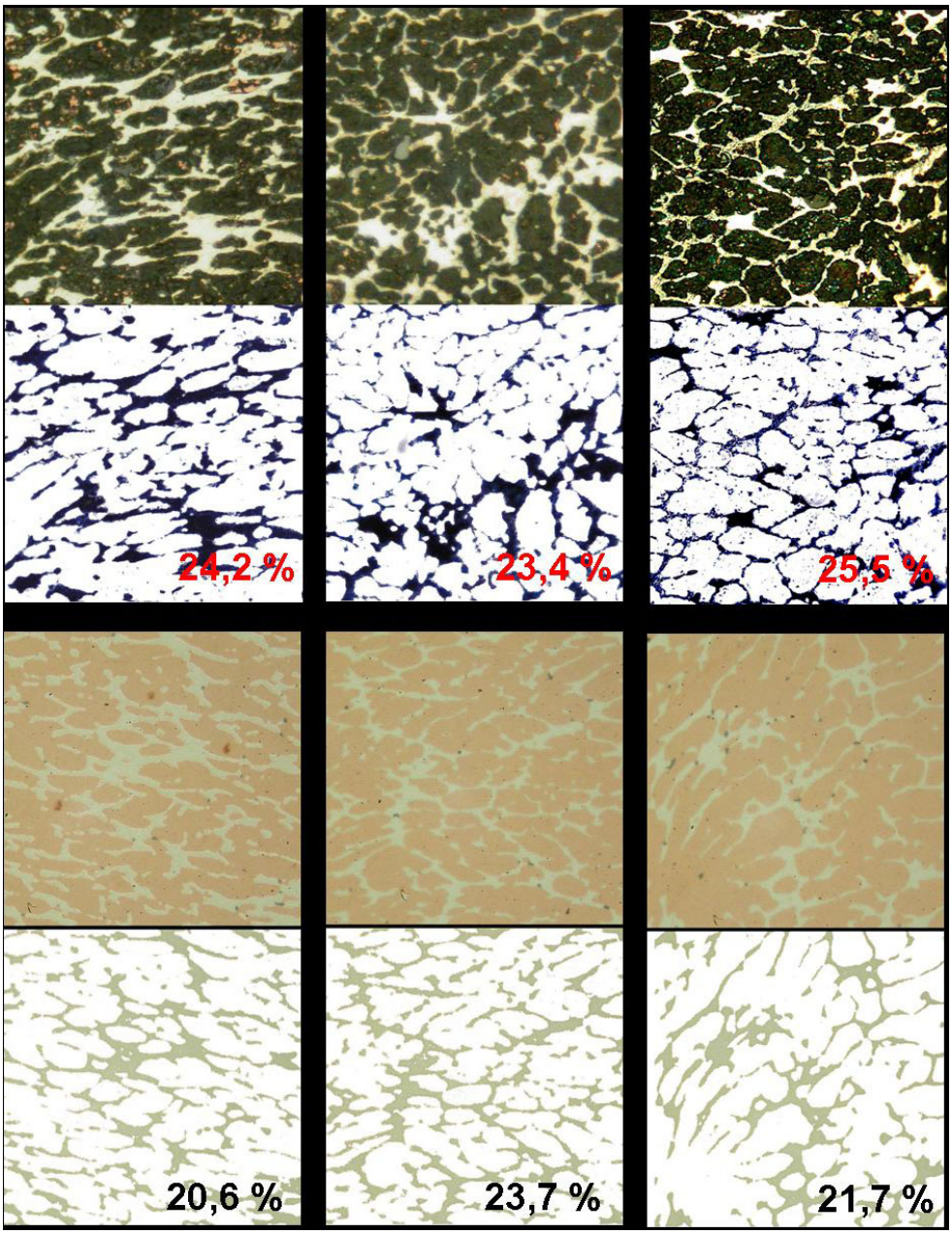


CU-AG3.CHI Ascii 2é/i converti par L2RAAscii 2é/i converti par L2RAW - File: CU-AG3.RAW - Type: 2Th/Th locked - Sta
Operations: X Offset -0.072 | X Offset -0.065 | Background 0.068,0.000 | Background 0.000,0.000 | Import
87-0720 (C) - Silver 3C - Ag - Y: 11.94 % - d x by: 1. - WL: 0.70932 - Cubic - I/Ic PDF 17.2 - S-Q 5.8 % -
74-1230 (C) - Cuprite, syn - Cu2O - Y: 19.74 % - d x by: 1. - WL: 0.70932 - Cubic - I/Ic PDF 8.3 - S-Q 19.8 % -
78-0428 (C) - Copper Oxide - CuO - Y: 48.75 % - d x by: 1. - WL: 0.70932 - Cubic - I/Ic PDF 5.4 - S-Q 74.5 % -

Spectre de diffraction des battitures.

Annexe T :
Analyses d'image de l'échantillon 1029-01

Mesures d'analyse d'image réalisées au niveau du cœur de l'échantillon 1029-01 ainsi qu'au niveau de la couche d'enrichissement superficielle en phase argentée pour déterminer le taux de compactage de cette dernière.



Annexe U :
Etude métallographique du faux-monnayage de la grotte de Lauradieu

La fouille qui a eu lieu dans la grotte de Lauradieu (Aude) a permis de mettre en évidence une grande quantité de matériel métallique lié à une fabrication de fausses monnaies. Ce *corpus* présente un grand intérêt d'un point de vue de la compréhension de la chaîne opératoire à laquelle il est associé. Il rassemble en effet une collection d'objets permettant *a priori* de décrire l'intégralité des différentes étapes de fabrication.

L'étude métallographique à partir d'un échantillonnage rendant compte des mises en forme successives constitue un apport intéressant dans la définition des différentes opérations propres à ce monnayage.

Elle est présentée en annexe pour simplifier la démonstration générale. Celle-ci fera référence à cette étude pour enrichir la discussion.

A. Définition du *corpus* de l'étude

Compte tenu de la simplicité de la chaîne opératoire *a priori* associée à ce faux-monnayage ainsi que de l'homogénéité de sa composition, il était nécessaire de caractériser trois échantillons seulement[30]. Ils ont donc été choisis tout au long du processus de mise en forme avec la contrainte supplémentaire de représenter la plus grande partie du *corpus*. C'est pour cette raison que l'échantillonnage s'est limité à la collection majoritaire des objets de laiton[31].

Dans un ordre chronologique suivant les mises en forme progressives, les différents échantillons sélectionnés sont les suivants :

+ Une extrémité de lame qui résulte *a priori* de l'étape de découpe des carreaux,
+ Le coin cisaillé d'un carreau pour obtenir un flan,
+ Un flan n'ayant pas été argenté.

La seule fausse monnaie retrouvée au sein de la grotte ne permettait pas d'envisager son examen métallographique pour des raisons évidentes de conservation. Il n'était en outre pas indispensable à la compréhension de cette dernière étape de fabrication.

B. Protocole expérimental

Le protocole expérimental est basé sur celui décrit dans la présentation des techniques analytiques propres à cette étude, en Annexe F. Ne seront ici présentés que les paramètres liés à l'étude du *corpus* de ce monnayage.

[30] Un flan argenté a également été préparé pour des observations métallographiques de la couche d'argenture. Son étude est présentée dans l'annexe qui traite de cette technique.

[31] Celle des objets de cuivre ne compte en effet qu'un unique carreau ainsi que deux flans.

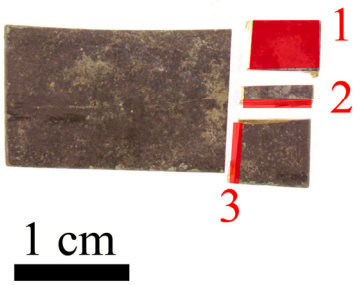
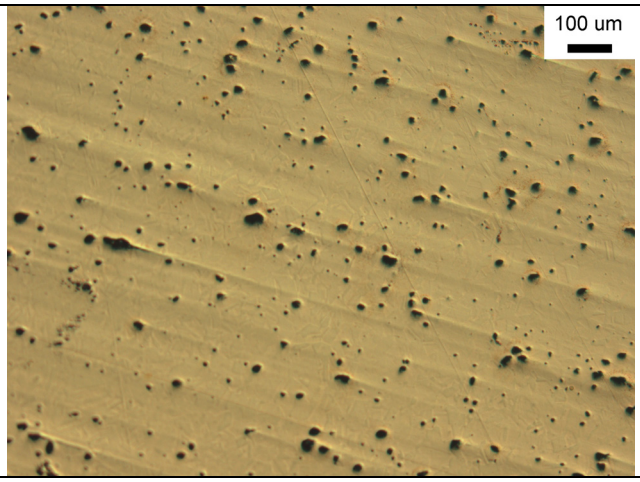
Les échantillons ont été préparés de manière à pouvoir être observés selon leur coupe mais aussi, pour certains, selon un plan parallèle à leur surface. Ils ont été examinés au microscope optique avant et après attaque métallographique. Etant donné qu'il s'agissait d'alliages de laiton, c'est le réactif métallographique au perchlorure de fer qui a été utilisé. Les attaques ont duré entre 20 et 30 secondes.

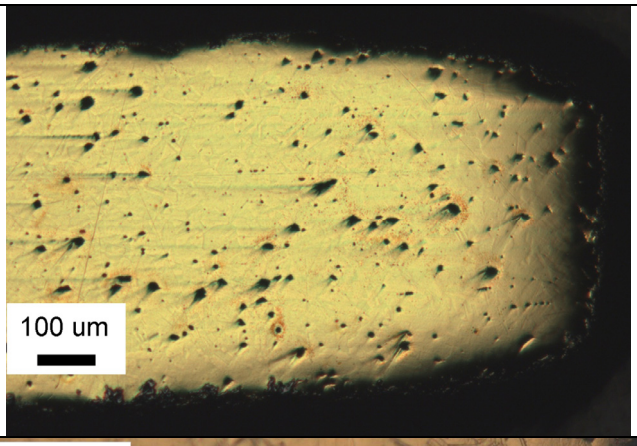
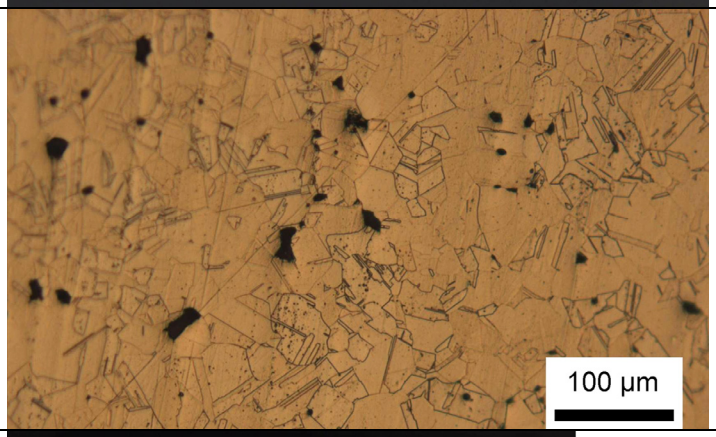
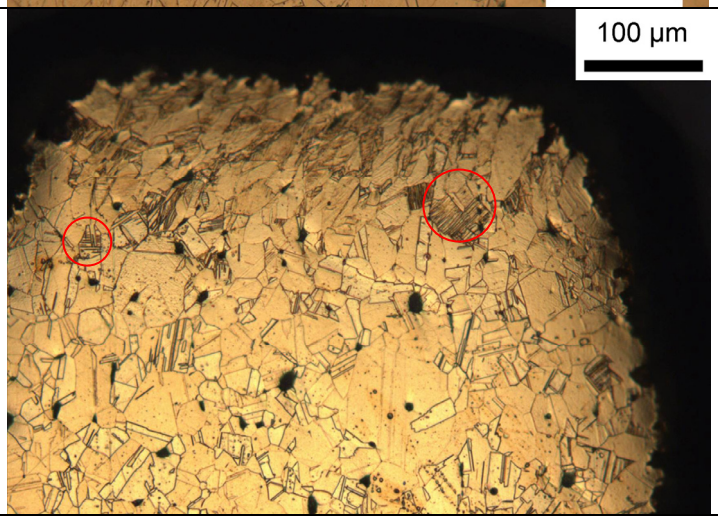
Compte tenu de l'homogénéité globale de composition, seul un des échantillons a été également observé et analysé au microscope électronique à balayage avant attaque métallographique. Les analyses ont pu mettre en évidence la composition des inclusions présentes.

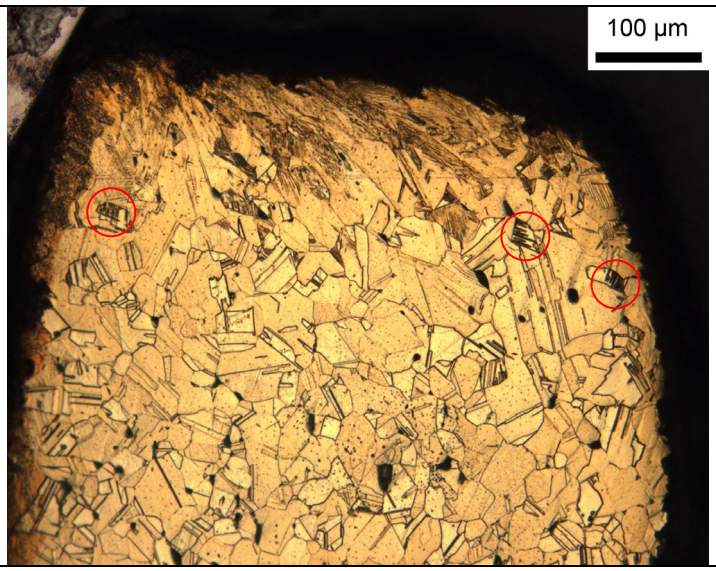
C. Résultats expérimentaux

Les différentes observations sont ici présentées dans la chronologie de la chaîne opératoire supposée pour être par la suite discutées.

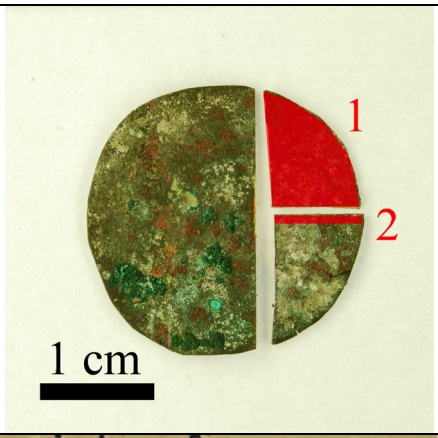
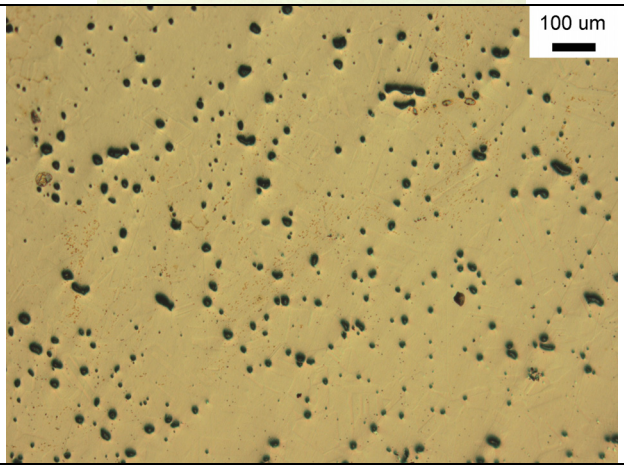
1 - Fragment de lame

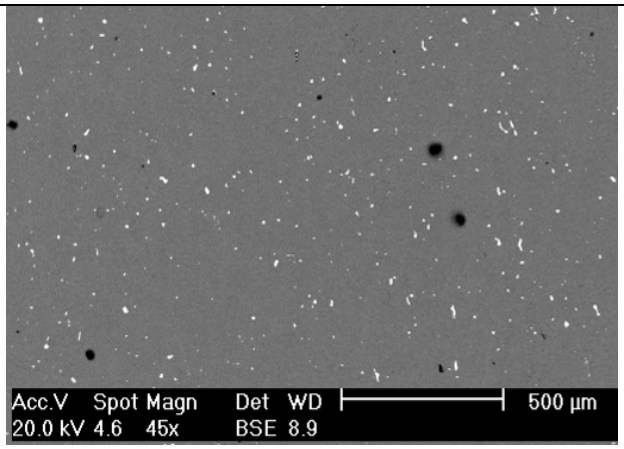
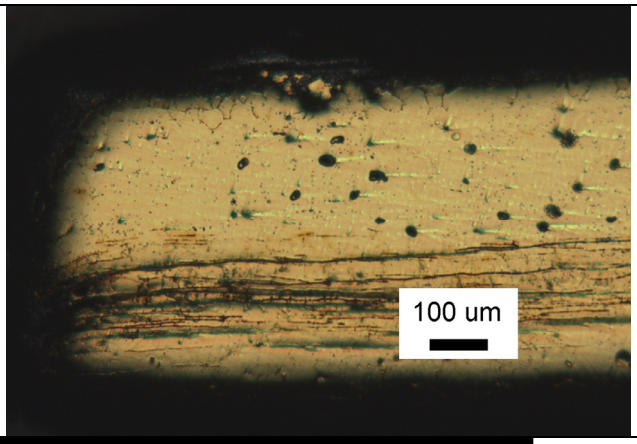
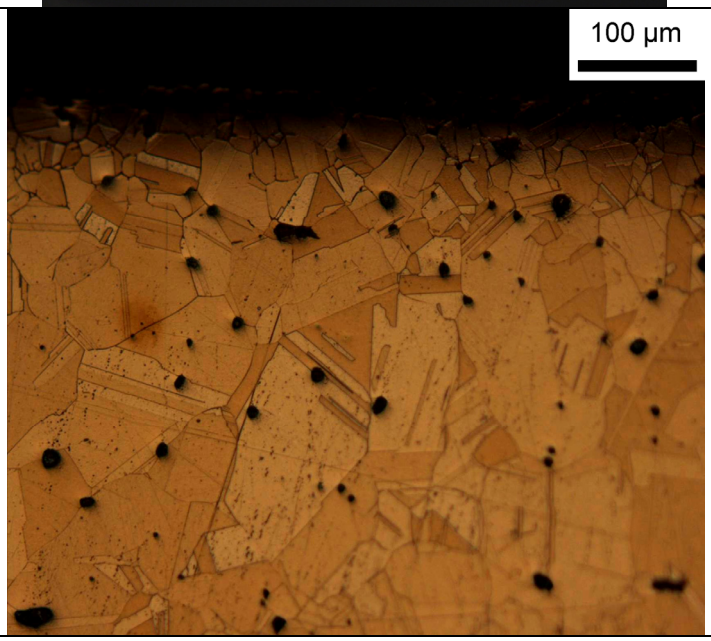
n° 01		**1 :** Observation selon un plan parallèle à la surface. **2 :** Observation en coupe selon un des axes caractéristiques de l'objet. **3 :** Observation en coupe selon une direction perpendiculaire à la précédente.
n° 02		**1 :** Surface, sans attaque. On n'observe pas d'orientation préférentielle des inclusions.

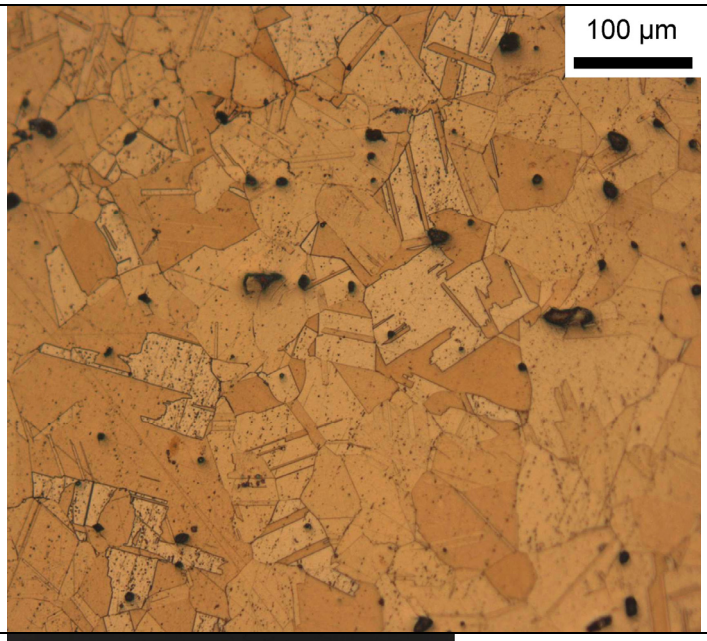
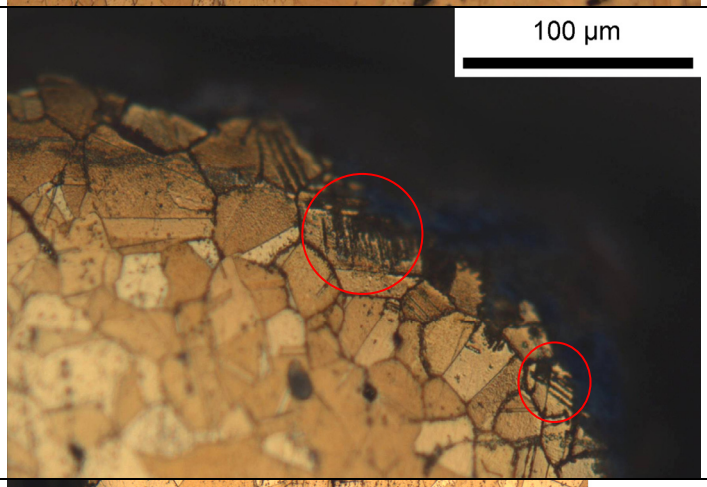
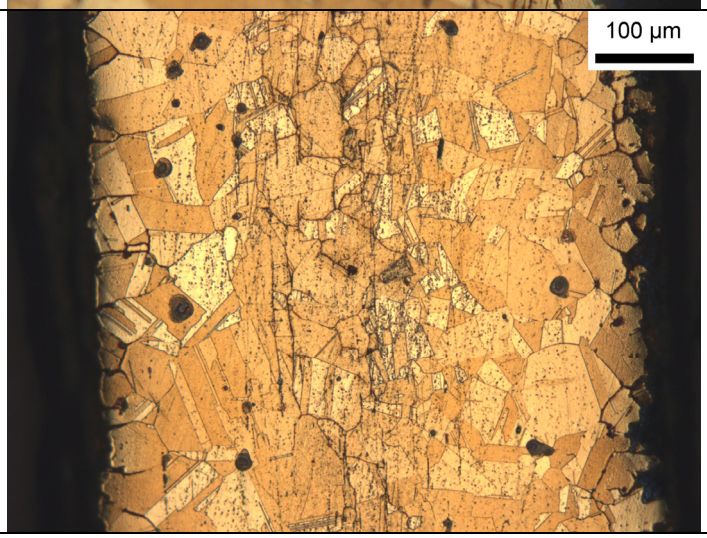
n° 03		**2 :** Coupe, sans attaque métallographique. On n'observe pas d'orientation préférentielle des inclusions.
n° 04		**1 :** Surface en bord de coupe, attaque au perchlorure de fer. Présence de macles mécaniques en périphérie (rouges). Présence de macles thermiques sur toute la surface (noires).
n° 05		**1 :** Surface, attaque au perchlorure de fer. Présence de macles thermiques. Il n'y a pas de macles mécaniques. Il n'y a pas de déformation particulière des grains.
n° 06		**2 :** Coupe, attaque au perchlorure de fer. Macles mécaniques localisées en bord de coupe. Présence de macles thermiques sur toute la surface. Il n'y a pas de déformation particulière des grains en dehors des bords de coupe.

n° 07		**3 :** Coupe, attaque au perchlorure de fer. Macles mécaniques localisées en bord de coupe. Présence de macles thermiques sur toute la surface. Il n'y a pas de déformation particulière des grains en dehors des bords de coupe.

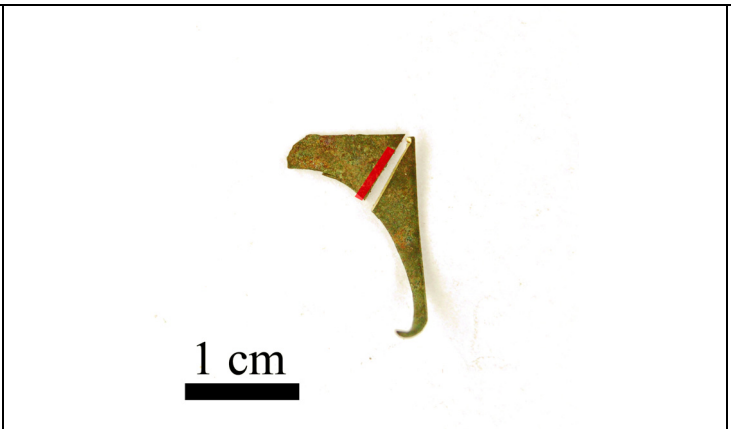
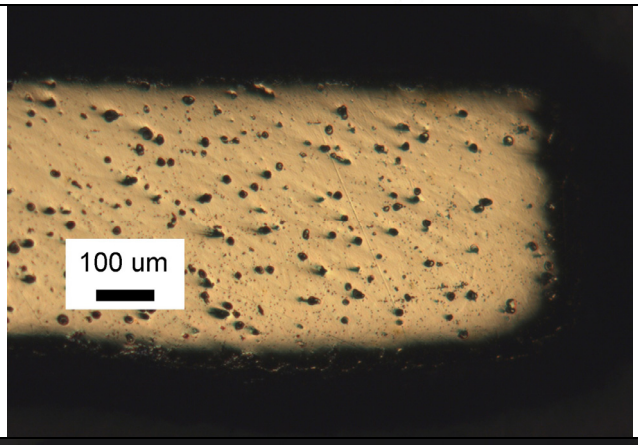
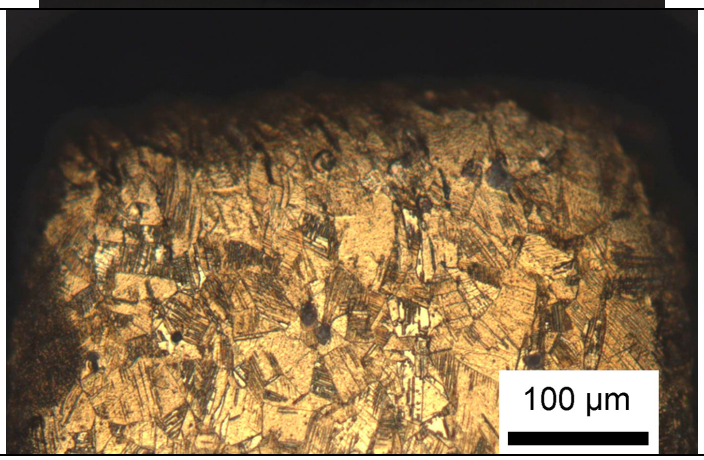
2 - Flan

n° 08		**1 :** Observation selon un plan parallèle à la surface. **2 :** Observation en coupe selon une direction perpendiculaire à une tangente de la découpe circulaire.
n° 09		**1 :** Surface, sans attaque. On n'observe pas d'orientation préférentielle des inclusions.

n° 10		**1 :** Surface, sans attaque. Observation au microscope électronique à balayage mode électrons rétrodiffusés. Les inclusions blanches, sur cette image, mettent en évidence un fort contraste chimique avec la matrice de laiton. Il s'agit de globules de plomb. Les autres inclusions présentent sont de très rares sulfures de cuivre. L'analyse de la matrice montre qu'il s'agit d'un laiton.
n° 11		**2 :** Coupe, sans attaque métallographique. On n'observe pas d'orientation préférentielle des inclusions. Un défaut interne a permis la mise en place d'un système de corrosion interganulaire.
n° 12		**1 :** Surface en bord de coupe, attaque au perchlorure de fer. Présence de macles thermiques. Il n'y a pas de macles mécaniques. La taille des grains est plus importante au niveau du bord de coupe que dans le cœur de l'alliage.

n° 13		**1 :** Surface, attaque au perchlorure de fer. Présence de macles thermiques. Il n'y a pas de macles mécaniques. Il n'y a pas de déformation particulière des grains. La taille des grains est plus importante par rapport à celles du fragment de lame.
n° 14		**2 :** Bord de coupe, attaque au perchlorure de fer. Présence de rares macles mécaniques au niveau du bord de coupe.
n° 15		**2 :** Coupe, attaque au perchlorure de fer. Présence de macles thermiques. Il n'y a pas de macles mécaniques. Il n'y a pas de déformation particulière des grains.

3 - Chute de découpe de flan

n° 16		Observation en coupe selon une direction perpendiculaire à une tangente de la découpe circulaire.
n° 17		Coupe, sans attaque métallographique. On n'observe pas d'orientation particulière des inclusions.
n° 18		Coupe, attaque au perchlorure de fer. Présence de macles thermiques ainsi que de très nombreuses macles mécaniques. La taille des grains est comparable à celle observée sur le fragment de lame.

D. Discussion des résultats

En préalable à toute attaque métallographique, les observations menées sur les différentes coupes à la fois en microscopie optique mais aussi électronique, permettent de rendre compte de la qualité de l'alliage utilisé. Comme l'ont par ailleurs attesté de précédentes analyses par ANRC[32], il s'agit d'un laiton constitué d'une majorité de cuivre et de zinc (autours de 79 et 20 %mass). Il contient également autour d'un pourcent de plomb qui n'est pas miscible dans ce dernier. Il forme les nodules observables sur les différentes micrographies (n° 02, 03, 09,

[32] cf. volume 1, Un faux-monnayage d'opportunité : La grotte de Lauradieu (11) : Les matières premières du faux-monnayage de la grotte de Lauradieu.

11 et 17) et répartis au niveau des joints de grains. L'utilisation du mode électrons rétrodiffusés du microscope électronique à balayage couplé à l'analyse des inclusions, permet de rendre compte de cette ségrégation au sein de l'alliage (n° 10).

Par ailleurs, l'examen n'a pas mis en évidence de porosités, ni de sulfures ou d'oxydes de cuivre qui peuvent généralement être observés au sein de ce type de matrice. Si dans une certaine mesure, cela traduit une « propreté » de la matière en relation avec une certaine qualité du matériau, la présence de ces composés aurait pu donner des informations sur les mises en forme subies par ce dernier. En effet, alors que les inclusions de plomb déformées au cours des martelages, forment de nouveau des nodules après avoir fondu lors des recuits, les sulfures et oxydes, moins fusibles aux températures considérées, conservent leurs déformations. Ces derniers, à l'inverse du plomb auraient pu permettre de témoigner des déformations subies par un alliage, lorsqu'ils y sont inclus.

S'agissant de nodules de plomb il n'est pas surprenant de ne pas constater d'orientation particulière de leur part. Chauffés, certainement au cours d'un recuit durant les mises en forme, ils auront perdu leurs morphologies qui auraient pu rendre compte d'une quelconque déformation des matériaux qui composent les différents objets étudiés.

L'observation des différents bords de coupe (n° 03, 11 et 17) ne montre pas de différences particulières entre chacun des échantillons de l'étude. Ils ont subi les mêmes découpes à l'aide d'une cisaille. Un seul outil semble avoir été utilisé pour tous les objets étant donné qu'ils présentent tous un profil de coupe identique. L'un des angles est plus orthogonal que le second. Cette asymétrie de bords de découpe peut être expliquée par le fait que l'une des deux lames des cisailles utilisées était moins aiguisée.

Par ailleurs, compte tenu de la faible épaisseur et certainement de l'alliage de ces tôles employées dans ce monnayage, le profil de découpe est tel qu'il ne nécessite par un martelage de la tranche afin d'adoucir les profils tranchants qui résultent parfois de cisaillements.

L'utilisation du réactif métallographique au perchlorure de fer a ensuite permis de mettre en évidence les grains des alliages qui composent les trois échantillons considérés. Certains défauts internes résultant des différentes mises en forme dont ils ont fait l'objet ont également été révélés.

En respectant la chronologie de la chaîne opératoire, il faut dans un premier temps considérer le fragment de lame. C'est l'échantillon dont la structure est *a priori* la plus proche de celles des matières premières utilisées dans ce monnayage. Les observations préliminaires font état de grains recristallisés, de morphologies homogènes. Ceci n'est pas surprenant, étant donné que l'objet considéré doit être assimilé à un semi-produit. Il s'agit d'une tôle qui a été préalablement mise en forme à partir d'un lingot. Les structures caractéristiques de solidification de ce dernier n'existent donc plus.

Du point de vue des défauts internes de cet échantillon, les macles mécaniques sont localisées au niveau des bords de coupes (n° 04, 06 et 07). Il n'y en a aucune au cœur de l'alliage (n° 05, 06 et 07), ni au niveau des surfaces (n° 06 et 07) qui ont dû subir les multiples martelages de mise en forme de la tôle. A l'inverse, il est possible de constater un grand nombre de macles thermiques réparties dans toute la matrice (n° 04, 05, 06 et 07).

Une telle configuration n'est pas inattendue compte tenu du type d'objet dont il est question. En tant que tôle devant être transformée en produit fini, il était indispensable de lui faire subir un recuit comme traitement final lors de sa préparation. Il doit garantir l'élimination des défauts internes préalablement formés. En effet, de la persistance de telles faiblesses au sein d'un alliage, peut résulter une dégradation accidentelle du matériau au cours de mises en forme ultérieures. Le fragment de lame considéré, constituant avant sa découpe

une matière première de ce monnayage, a donc été porté à une température assez élevée et pendant une durée suffisamment longue pour permettre la recristallisation des grains qui en constituent la matrice, comme en témoigne le nombre élevé de macle thermiques. Au cours de ce traitement, les défauts internes que représentaient les macles mécaniques, ont été les germes de nouveaux grains et se sont vus progressivement éliminés lors de la réorganisation des atomes.

De par leur localisation et la place du fragment de tôle dans la chaîne opératoire du monnayage, les macles mécaniques observées sur les différentes micrographies ont en définitive été formées au cours de la découpe des carreaux dans les lames préalablement recuites. Le cisaillement, imposant des contraintes au niveau des zones de coupe, est donc le responsable des quelques défauts mécaniques révélés.

Le second échantillon qu'il est maintenant intéressant de considérer, est celui correspondant à la chute de découpe du flan, dans la mesure où sa structure semble être celle se rapprochant le plus de celle du fragment de lame. Dans un premier temps, parce que les nodules de plomb qu'il contient ne traduisent pas non plus de déformation particulière (n° 17). Mais en particulier parce que d'un point de vue des tailles de grains, la coupe n° 18 est tout à fait comparable à celles de l'échantillon de tôle qui viennent d'être présentées (n° 05, 06 et 07).

Bien que le débris de coupe de flan révèle après attaque métallographique des macles mécaniques en quantité autrement plus importante et réparties dans toute la matrice (n° 18), il faut voir dans cette configuration la conséquence de sa mise en forme. En effet, cet échantillon ne semble pas avoir subi de traitements de recuits supplémentaires par rapport au fragment de lame étant donné que l'on peut penser qu'ils auraient modifié la taille des grains. D'autant que dans la chaîne opératoire, ils n'étaient pas nécessaires. Les macles mécaniques résultent dans un premier temps de la découpe du carreau initial. Mais il faut supposer que c'est lors du cisaillement du flan que la plupart des défauts internes ont été produits, notamment ceux qui se retrouvent au cœur de la matrice. Les chutes de métal formées lors de cette étape ont des morphologies fines qui facilitent leurs déformations au cours des découpes, comme en témoignent les nombreux échantillons tordus du *corpus* global.

Il est à présent possible de considérer le flan qui par sa structure différente, semble avoir fait l'objet d'un traitement supplémentaire par rapport aux échantillons précédents. Après avoir constaté que les nodules de plomb ne présentent toujours pas de déformation particulière (n° 09, 10 et 11), c'est dans un premier temps la quantité ainsi que la localisation des macles mécaniques qui traduit ces différences. Elles semblent dans une certaine manière beaucoup plus limitées que chez les autres ébauches caractérisées. Bien que la chute de découpe soit l'échantillon qui se rapproche le plus du flan dans la chaîne opératoire, l'hypothèse précédente concernant sa morphologie permet de justifier l'écart qui vient d'être souligné. Le flan plus massif que cette dernière, n'aura pas dû subir les mêmes déformations produisant une quantité importante de défauts internes.

Il est d'un autre côté plus inattendu de constater des différences entre le fragment de lame et l'ébauche de monnaie dont les proportions similaires permettent de supposer qu'ils réagissent dans un même rapport lors des découpes. D'autant qu'à ces différences concernant les défauts internes, s'ajoutent celles des tailles de grains. En effet, le flan présente en moyenne une matrice formée de cristaux de dimensions plus importantes que celles constatées sur les autres échantillons. Il montre également par ailleurs une variation au sein même de sa matrice, avec des grains beaucoup plus petits au niveau des bords de coupe. Il faut voir dans cette hétérogénéité le résultat d'un traitement thermique supplémentaire subi par l'ébauche.

En définitive, après avoir été découpée de manière à obtenir une géométrie circulaire, le flan devait présenter au niveau des bords de coupe ainsi qu'au cœur de l'alliage qui le compose, une statistique de macle mécanique similaire à celle du fragment de lame. Toutefois, à la différence de ce dernier, le flan semble avoir été porté à une température élevée pendant une durée suffisamment longue pour permettre l'élimination partielle des défauts mécaniques des bords de coupe entraînant la formation de nouveaux petits grains d'alliage. En revanche, le cœur du matériau n'ayant pas besoin de relâcher de nouvelles contraintes dont il aurait fait l'objet, a vu la taille de ses grains grossir pour dépasser les moyennes observées au voisinage des bords de coupe recristallisés, ainsi que sur le fragment de lame. Ce traitement est équivalent à un recuit. Cependant, il n'avait peut-être pas comme finalité l'élimination des quelques défauts internes formés lors des découpes.

En conclusion, les opérations métallurgiques subies par les trois échantillons présentés dans cette étude, semblent être relativement limitées. Elles se résument à un traitement de recuit qui est certainement intervenu lors de l'étape finale de préparation des tôles de laiton. Etant donné qu'elles constituent les matières premières de la chaîne opératoire de faux-monnayage dans laquelle elles ont été employées, il était nécessaire d'éliminer au préalable tous les défauts ayant pu être préalablement formés. A partir de ces semi-produits, il était par la suite possible d'y découper des carreaux puis des flans sans recourir à de nouveaux martelages. Ces opérations induisant finalement peu de contraintes internes dans les ébauches formées, il n'était *a priori* pas indispensable de leur faire subir des recuits pour relâcher de potentielles contraintes internes. Il apparaît toutefois qu'un traitement équivalent a semble-t-il été mis en œuvre pour le flan. La finalité d'une telle opération fait l'objet d'une discussion dans la présentation de la chaîne opératoire mise en place dans ce monnayage[33].

[33] cf. volume 1, Un faux-monnayage d'opportunité : La grotte de Lauradieu (11) : La chaîne opératoire du faux-monnayage de la grotte de Lauradieu.

Annexe V :
Expérimentations d'argenture à l'amalgame mercure-argent dans une fabrication médiéval de fausse monnaie

Cette annexe doit rendre compte des observations rassemblées après deux campagnes de reconstitution expérimentales du procédé d'argenture à l'amalgame mercure-argent. Elles ont été menées en 2006 et 2007, sur la plate-forme paléométallurgique de Melle. Il s'agit ici de présenter des résultats préliminaires qui demandent d'être complétés par des essais supplémentaires. Cependant, ils n'ont pu être mis en œuvre à ce jour compte tenu des difficultés d'hygiène et de sécurité, liées à la manipulation du mercure. Celles-ci sont explicitement exposées dans la fiche toxicologique de ce métal particulier[34].

Après avoir relevé que des procédés d'argenture à l'amalgame mercure-argent avaient été utilisés dans les deux contrefaçons monétaires des grottes de Lauradieu[35] et de La Catette[36]. Il a été décidé d'en proposer une reconstitution expérimentale. Le but principal des essais réalisés, était de reconstituer la totalité d'une chaîne opératoire applicable à une activité de faux-monnayage. Une telle démarche a permis d'appréhender la complexité relevant de certaines étapes de cette technique. En outre, dans la mesure où cette réflexion intervient, à l'origine, dans l'étude de cas précis de faux-monnayages, elle a également permis de considérer des problématiques propres à ces deux exemples.

A. Bibliographie

Dans cette présentation bibliographique, il était nécessaire de tenir compte des analogies qui rapprochent le procédé d'argenture à l'amalgame mercure argent avec celui de la dorure qui utilise la même démarche[37]. D'un point de vue des sources, autant aux périodes les plus anciennes qu'aux plus récentes, c'est la technique d'application d'une couche superficielle d'or à l'aide de mercure à la surface d'un objet qui est la plus documentée[38]. Cette inégalité se

---

[34] *Fiche toxicologique : Mercure et composés minéraux*, INRS, n° 55, 1997, 6 p.

[35] cf. volume 1, Un faux-monnayage d'opportunité : La grotte de Lauradieu (11).

[36] cf. volume 1, Les faux-monnayages de la grotte de La Catette (11).
La Niece S., Technology of silver-plated coin forgeries, dans Archibald M. M. *et al.*, eds., *Metallurgy in numismatics,* Londres, Angleterre, Royal numismatic society, 1993, t. 3, p. 230.

[38] Halleux R., ed., *Les alchimistes grecs, tome I : Papyrus de Leyde - Papyrus de Stockholm - Recettes*, Paris, Les Belles Lettres, coll. « Collection des universités de France Série grecque », 1981, p. 97-98.
Smith C. S. *et al.*, eds., *Mappae Clavicula: A little key to the world of medieval techniques*, Philadelphia, The American Philosophical Society, coll. « Transactions of the American Philosophical Society », t. 64, part 4, 1974, p. 36 et 60.
Théophile *et al.*, *Théophile, prêtre et moine. Essais sur divers arts*, Nogent-le-Roi, Laget J., Daviaud P., Librairie des Arts et Métiers, 1977, p. 163-171, 227-229.
Biringuccio V., *La pyrotechnie, ou art du feu*, Paris, Chez Claude Fremy, 1572, p. 147-148.
Baumé A., *Chymie expérimentale et raisonnée*, 3 tomes, Paris, P. F. Didot le jeune, t. 3, 1773, p. 106-108.
Mackenzie C., *Mémorial pratique du chimiste-manufacturier*, 3 tomes, Paris, Barrois l'aîné, t. 1, 1824, p. 16-17.

retrouve ensuite dans le nombre d'étude archéométriques qui traitent des techniques métallurgiques de plaquage de métaux précieux[39]. L'emploi de l'argent n'est cependant pas absent de la littérature puisque certains traités techniques l'évoquent[40]. Parmi les articles scientifiques qui l'attestent, à partir d'analyses d'objet archéologiques, l'approche expérimentale de C. Vlachou *et al.* est particulièrement intéressante[41]. Elle s'ajoute à celle de K. Anheuser qui s'est intéressé à la dorure mais dont certaines hypothèses peuvent être transposées au cas du métal blanc[42]. Ce dernier auteur est d'ailleurs le seul à reconnaître le danger d'utiliser un diagramme de phase dans une réflexion sur les mécanismes en jeu dans de tels procédés, car les systèmes impliqués doivent être considérés comme ouverts. Le taux de mercure ne constitue pas dans ce cas, un paramètre constant.

Ces procédés d'orfèvres dont les descriptions des textes anciens sont souvent simplement reprises dans les différents articles archéométriques, apparaissent en définitive peu connus du point de vue des mécanismes réactionnels impliqués. Leur détermination permettrait pourtant de comprendre la finalité des opérations mises en œuvre dans ces procédés. Une approche à partir d'analyses thermodynamiques est un moyen de disposer de telles informations. Cependant, aucune étude ne présente d'expériences thermogravimétrique voire d'analyse thermique ou calorimétrique différentielle. Il faut voir dans un tel constat le poids des précautions d'hygiène et de sécurité propre à la manipulation du mercure qui participent de manière importante à la difficulté de proposer de telles approches.

A partir des descriptions du procédé décrit dans les différents textes anciens et notamment médiévaux, il est possible de présenter la succession des étapes qui interviennent dans sa mise en œuvre[43] :

Pelouze T.-J. *et al.*, *Cours de chimie générale*, 4 tomes, Paris, V. Masson, t. 2, 1848, p. 696-698.
Barreswil C.-L. *et al.*, *Dictionnaire de chimie industrielle*, 4 tomes, Paris, Dezobry, E. Magdeleine et Cie, t. 2, 1864, p. 143-146.
Roseleur A., *Guide pratique du doreur, de l'argenteur et du galvanoplaste*, Paris, De Plazanet, 1873, p. 201-205.
La Niece S., Technology of silver-plated..., *op. cit.*, p. 230.
Vlachou C. *et al.*, Experimental investigation of silvering in late roman coinage, dans Vandiver P. B. *et al.*, eds., *Materials Issues in Art and Archaeology VI*, Boston, Massachusetts, 2002, Materials Research Society, 2001, t. 712, p. 463.
[39] Lins P. A. *et al.*, The origins of mercury gildings, *Journal of Archaeological Science*, vol. 2, n° 4, 1975, p. 365-373.
Oddy W. A. *et al.*, The techology of gilded coin forgeries, dans Archibald M. M. *et al.*, eds., *Metallurgy in numismatics,* Londres, Angleterre, Royal numismatic society, 1993, t. 3, p. 199-239.
Raub C., How to coat objects with gold- Pliny, Leyden X, Mappae Clavicula and Theophilus senn with a modern chemist's eyes, dans Eluère C., ed., *Outils et ateliers d'orfèvres des temps ancients*, Musée des antiquités Nationales de Saint-Germain-en-Laye, 2 t., Laboureur & Cie, 1993, t. 2, p. 101-110.
Anheuser K., The practice and characterization of historic fire gilding techniques, *JOM*, vol. 49, n° 11, 1997, p. 58-62.
Reiff F. *et al.*, Investigation of contemporary gilded forgeries of ancient coins, *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, vol. V371, n° 8, 2001, p. 1146-1153.
Giumlia-Mair A., On surface analysis and archaeometallurgy, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, vol. 239, n° 1-2, 2005, p. 35-43.
[40] Théophile *et al.*, *Essais sur divers arts..., op. cit.*, p. 166.
Biringuccio V., *La pyrotechnie..., op. cit.*, p. 147-148.
Mackenzie C., *Mémorial pratique du chimiste-manufacturier*, *op. cit.*, t. 1, p. 16-17.
[41] Vlachou C. *et al.*, Experimental investigation of silvering..., *op. cit.*, p. 463.
[42] Anheuser K., The practice and characterization..., *op. cit.*, p. 58-62.
[43] Halleux R., ed., *Les alchimistes grecs..., op. cit.*, p. 97-98.
Smith C. S. *et al.*, eds., *Mappae Clavicula..., op. cit.*, p. 36 et 60.
Théophile *et al.*, *Essais sur divers arts..., op. cit.*, p. 163-171, 227-229.
Biringuccio V., *La pyrotechnie..., op. cit.*, p. 147-148.
Baumé A., *Chymie expérimentale et raisonnée*, *op. cit.*, t. 3, p. 106-108.
Mackenzie C., *Mémorial pratique du chimiste-manufacturier*, *op. cit.*, t. 1, p. 16-17.

- Dans un premier temps l'amalgame est préparé en mettant en contacte du mercure avec de l'argent. Afin de favoriser les réactions, il est important d'augmenter la surface de contact entre les deux éléments. C'est pourquoi, il est nécessaire de préalablement battre le métal précieux pour le mettre sous forme de lamelles les plus fines possibles. Il est ensuite nécessaire de dégraisser leur surface auquel cas, la forte tension superficielle du mercure empêche le contact entre les deux matériaux. Cette préparation peut être faite pas calcination suivit d'un décapage acide. Pour faciliter l'amalgamation, il est intéressant de broyer le mélange[44].

- Une fois la réaction terminée, il est possible d'éliminer le mercure en excès dans le nouveau composé par une filtration et un pressage à travers un tissu (Figure 5). Cette opération permet en outre de contrôler la viscosité finale de l'amalgame suivant la quantité de mercure évacué[45]. Celle-ci peut aller du liquide jusqu'au solide plus ou moins dur.

Après avoir divisé l'amalgame formé en petites quantité équivalentes, il est possible de connaître la masse de métal précieux associée. Il suffit de rapporter la proportion d'argent initialement utilisée au nombre de portions définies[46].

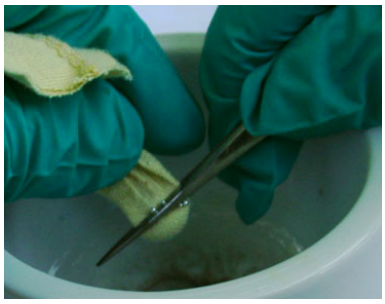


Figure 5 - Filtration de l'amalgame dans un tissu.

Figure 6 - Application de l'amalgame sur la surface préparée de l'échantillon.

- Cette pâte peut ensuite être appliquée sur l'objet qui doit être argenté (Figure 6). Il est également important de préparer la surface qui est par la suite recouverte et ce d'autant plus lorsqu'il s'agit de traiter des alliages cuivreux. L'affinité du mercure pour ces matériaux est moins importante dans la mesure où ils présentent généralement des oxydes superficiels. Après la calcination qui doit éliminer les corps gras déposé lors de la mise en forme des échantillons, il est absolument nécessaire de d'effectuer un décapage chimique pour dissoudre les oxydes formés lors du chauffage.

- Lorsque l'objet est recouvert d'amalgame, il est porté à haute température pour éliminer une grande part du mercure et ne laisser en surface qu'une couche enrichie en argent. Ce chauffage apparaît être un instant critique. S'il est trop important, il peut nuire à la qualité

Pelouze T.-J. *et al.*, *Cours de chimie générale*, *op. cit.*, t. 2, p. 696-698.
Barreswil C.-L. *et al.*, *Dictionnaire de chimie industrielle*, *op. cit.*, t. 2, p. 143-146.
Roseleur A., *Guide pratique du doreur..., op. cit.*, p. 201-205.
[44] Théophile *et al.*, *Essais sur divers arts..., op. cit.*, p. 166.
[45] *Ibidem*, p. 164.
Smith C. S. *et al.*, eds., *Mappae Clavicula..., op. cit.*, p. 36.
Figuier L., *Les merveilles de la science, ou description populaire des inventions modernes*, 8 tomes, Paris, Furne, Jouvet et Cie, t. 2, 1868, p. 332.
Anheuser K., The practice and characterization..., *op. cit.*, p. 58.
[46] Théophile *et al.*, *Essais sur divers arts..., op. cit.*, p. 167.
Roseleur A., *Guide pratique du doreur..., op. cit.*, p. 202.
Barreswil C.-L. *et al.*, *Dictionnaire de chimie industrielle*, *op. cit.*, t. 2, p. 143

finale du procédé, à cause de la formation d'oxydes à l'interface de la couche déposée et de l'objet traité.

- Compte tenu de la structure peu cohérente de la pellicule superficielle restante, il est nécessaire de réaliser un brunissage pour obtenir un aspect brillant argenté.

C'est à partir de cette description globale du procédé qui souligne certaines étapes particulièrement importantes qu'ont pu être mises en œuvre les expérimentations.

B. Protocole expérimental

Les protocoles expérimentaux proposés au cours de deux campagnes en 2006 et 2007, devaient reconstituer une chaîne opératoire d'argenture à l'amalgame mercure-argent associée aux deux exemples de faux-monnayage de cette étude. Les analogues obtenus ont pu dans ce cas être confrontés aux vestiges archéologiques qui ont par ailleurs mis en évidences différentes problématiques.

1 - Réalisation de différents types d'amalgames

Dans le cadre d'un faux-monnayage, la question des matières premières et notamment de celle de l'origine de l'argent utilisé lors de la mise en œuvre d'un procédé d'argenture, peut constituer un paramètre limitant. Finalement, de part les quantités de précieux que contiennent les monnaies authentiques, pourquoi ces dernières ne pourraient-elles pas être utilisées comme une source potentielle de métal blanc, très facilement accessible ? Cependant, l'argent étant systématiquement allié au cuivre dans les alliages monétaires, il était nécessaire de vérifier la possibilité de l'emploi de tels mélange dans la réalisation d'amalgame avec du mercure. Si la mise en œuvre du procédé d'argenture est très rarement évoquée dans les textes anciens, la production d'amalgames avec des alliages à base d'argent n'est en revanche, jamais prise en compte. L'objectif de ces essais préliminaires était de considérer la facilité de préparation de tels mélanges.

a. Protocole expérimental

Le choix des alliages utilisés dans cette expérimentation devait faire varier la quantité d'argent qu'ils contenaient, mais il a aussi été décidé d'utiliser un ternaire argent cuivre zinc, ou plutôt un mélange argent-laiton. Les quatre alliages utilisés sont présentés dans le tableau suivant :

Numéro	Argent	Cuivre	Zinc
01	90	10	0
02	90	10	0
03	70	30	0
04	30	49	21

Tableau 3 - Alliages à bases d'argent amalgamés à du mercure (%mass).

Chaque alliage a été laminé pour obtenir des feuilles de métal les plus fines possible. Ils ont ensuite été dégraissés dans de l'acétone pour éliminer la graisse du laminoir, et finalement décapés dans une solution de vinaigre à ébullition pour retirer les oxydes qui ont pu se former lors des recuits durant la mise en forme.

La différence entre les alliages 01 et 02 tient de leurs préparations. Le second échantillon a subi un recuit final après la dernière passe de laminage. En effet, le taux d'écrouissage est un paramètre qui intervient en général sur la réactivité d'un alliage. Il était intéressant de vérifier s'il pouvait intervenir sur la facilité d'amalgamation.

Après avoir été séchés les échantillons ont été placés en contacte d'un excès de mercure facilitant *a priori* la réaction. L'excédant étant alors éliminé en fin de réaction par simple filtration et pressage dans un tissu.

Compte tenu de la forte densité du mercure, les alliages utilisés surnageaient à la surface du bain, ceci diminuant les contactes et donc la possibilité de réaction. Les mélanges ont donc subi des agitations régulières sous agitateur magnétique. Cette opération est à rapprocher des celle décrite dans la littérature qui demande d'utiliser un moulin.

b. Résultats expérimentaux

Au terme d'une semaine de mise en contact du mercure avec les différents alliages, les mélanges présentent une pellicule superficielle de poussière jaune-verte (Figure 7). Les réactions d'amalgamation semblent dans des proportions différentes toutes incomplètes. Il n'est pas surprenant de constater que plus la quantité d'argent présent est faible moins la réaction est avancée. Cependant, même l'amalgame à base des mélanges 01 ou 02, donc de fort titre en métal précieux, est inutilisable. Il contient des paillettes d'alliage qui ne peuvent pas être séparées de l'amalgame (Figure 8).

Figure 7 - Amalgamation avec l'alliage à base de laiton.

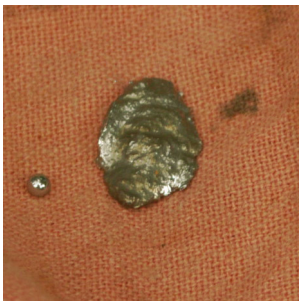


Figure 8 - Paillettes d'alliage dans l'amalgame.

c. Conclusion

Il est encore difficile de juger de la possibilité d'employer des alliages à base d'argent dans un but de réaliser des amalgames avec du mercure compte tenu que l'expérience proposée semble avoir manqué de temps. Il faut cependant remarquer que ce paramètre temporel n'est pas décrit dans la littérature. Pour la suite des reconstitutions, c'est un amalgame réalisé au préalable avec de l'argent pur qui a été employé.

En outre, l'agitation régulière mise en œuvre lors de ces essais n'est peut-être pas la meilleure solution car trop différente de l'utilisation de moulins pour préparer les amalgames.

Ces expériences préliminaires demandent d'être poursuivies sur de plus longues périodes et l'utilisation de moulins, ou plus simplement d'un mortier, devra aussi être envisagée.

2 - Préparation des échantillons devant être argentés

Dès les premiers essais expérimentaux, il est apparut impossible sans préparation particulière d'appliquer l'amalgame à la surfaces des échantillons d'alliages cuivreux similaires à ceux utilisés dans les deux exemples de contrefaçon monétaire de cette étude. Les sources les plus récentes prescrivent l'application d'un mélange d'acide nitrique et de mercure. Le nitrate de mercure qu'elle contient se réduit sur la surface traitée, la recouvrant de mercure[47]. Ce procédé ne pouvait cependant pas avoir été employé dans le cadre des deux faux-monnayage de cette étude dans la mesure où ils prennent place à la fin du Moyen Age et au début de la Période Moderne. C'est pourquoi, le principal traitement expérimenté est celui décrit par Théophile et V. Birringuccio dans leurs recueils de recettes. Il s'agit d'une solution chauffée, à base de pierre de vin, de sel et de mercure[48]. A titre expérimental, une seconde composition a été testée : la gravelle se voyant remplacée par du vinaigre. Un tel choix permet de s'affranchir des cristaux de bitartrate de potassium qui ont tendance à se déposer à la surface des échantillons.

Figure 9 - Traitement à la gravelle et au sel.

Figure 10 - Traitement au vinaigre et au sel.

D'un point de vue du résultat recherché, les deux mélanges expérimentés se sont montrés efficaces. Les échantillons placés dans la solution voient leur surface progressivement se recouvrir de mercure. Lorsque le métal a totalement colonisé la surface, l'amalgame peut être appliqué sans aucune difficulté (Figure 6).

Dans les études archéométrique qui traite de la dorure ou de l'argenture au mercure, la difficulté d'application de l'amalgame à la surface des objets n'est presque jamais prise en compte lorsqu'il s'agit de traiter des alliages cuivreux[49]. Or, c'est bien de ce traitement particulier que dépend la réussite globale du procédé. Dans notre étude, c'est finalement l'approche expérimentale qui a permis d'appréhender ce problème. C'est d'ailleurs grâce à cette même démarche que C. Vlachou *et al.* ont compris la nécessité de traiter leur échantillons expérimentaux avec de l'acide nitrique[50]. Toutefois cette technique n'est décrite que dans les sources les plus récentes alors que leur *corpus* de référence se rapporte à la période antique.

---

[47] Pelouze T.-J. *et al.*, *Cours de chimie générale*, *op. cit.*, t. 2, p. 697.
Barreswil C.-L. *et al.*, *Dictionnaire de chimie industrielle*, *op. cit.*, t. 2, p. 144.
Roseleur A., *Guide pratique du doreur..., op. cit.*, p. 202.

[48] Théophile *et al.*, *Essais sur divers arts..., op. cit.*, p. 168, 228.
V. Biringuccio prescrit également l'ajout d'alun de roche. Cette composition n'a pas été expérimentée.
Biringuccio V., *La pyrotechnie..., op. cit.*, p. 146.

[49] La Niece S., Technology of silver-plated..., *op. cit.*, p. 230.
Giumlia-Mair A., On surface analysis..., *op. cit.*, p. 40.

[50] Vlachou C. *et al.*, Experimental investigation of silvering..., *op. cit.*, p. 464.

3 - Argenture sur cuivre et sur laiton

L'étude des différentes sources rend compte d'une plus ou moins grande difficulté de mise en œuvre du procédé d'argenture selon le substrat métallique qui doit être couvert. Cependant, les informations apparaissent contradictoires d'un traité à l'autre. Quand Théophile indique la nécessité de prendre de plus grandes précautions pour traiter du laiton, les textes plus récents signalent le contraire[51]. S. La Niece affirme toutefois qu'il n'y a pas de différence dans l'argenture du cuivre et du laiton[52].

Or, ces deux matériaux ont justement été argentés à l'amalgame dans chacun des cas de faux-monnayage pris en compte dans cette étude : le laiton principalement dans la grotte de Lauradieu et le cuivre dan celle de La Catette. C'est pourquoi, il a été décidé d'expérimenter le traitement de ces différents métaux et alliage.

Les observations sur les échantillons expérimentaux seront notamment confrontées à celles mises en œuvre sur des artefacts archéologiques et notamment un flan de la grotte de Lauradieu[53] dont une coupe métallographique a pu être préparée. Elle a de plus permis de réaliser des analyses de la pellicule d'argent déposée.

A partir des résultats obtenus lors d'une première campagne d'essais, certains paramètres dont le temps et la température de chauffage ont été modifiés.

a. Echantillons archéologiques

Dans un premier temps, des observations de surface réalisées sur un flan découvert au sein de la grotte de La Catette, ont permis de rendre compte de structures d'argenture n'ayant pas encore été brunies (Figure 11).

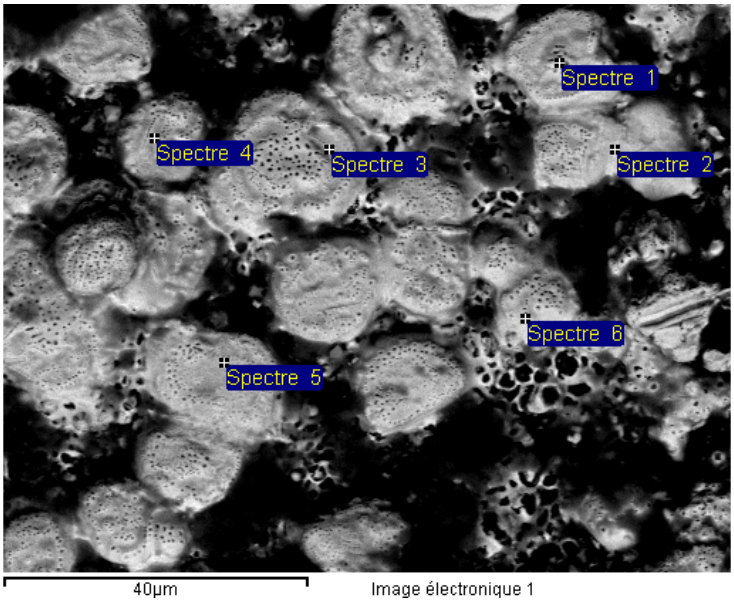


Figure 11 - Surface non brunie d'un flan argenté à l'amalgame découvert à La Catette[54].

[51] Théophile *et al.*, *Essais sur divers arts..., op. cit.*, p. 227-229.
Baumé A., *Chymie expérimentale et raisonnée*, *op. cit.*, t. 3, p. 106.
Pelouze T.-J. *et al.*, *Cours de chimie générale*, *op. cit.*, t. 2, p. 696.
Barreswil C.-L. *et al.*, *Dictionnaire de chimie industrielle*, *op. cit.*, t. 2, p. 143.
[52] La Niece S., Silvering, dans La Niece S. *et al.*, eds., *Metal plating and patination: cultural, technical and historical developments,* Oxford, Butterworth-Heinemann, 1993, p. 209.
[53] Référence Aur_15.
[54] Référence CA 18.

Les faciès observés présentent des profils en gouttelettes qui suggèrent la fusion de l'ensemble de la pellicule déposée. De même, les nombreuses vacuoles sont à mettre en relation avec la vaporisation du mercure. Malgré cela, la proportion de métal lourd rapportée à celle de l'argent est encore élevée puisqu'elle est proche de l'unité (Figure 17). En surface, le taux de mercure atteint jusqu'à 45 % de la masse totale de l'argenture.

La préparation métallographique du flan Aur_15 de la grotte de Lauradieu a par ailleurs mis en évidence la composition de la couche qui le recouvre, sa compacité ainsi que son adhérence au matériau sur lequel elle a été déposée, en l'occurrence un laiton contenant environs 20 % massique de zinc et 1 % de plomb.

L'observation de la coupe rend compte d'une épaisseur relativement fine de l'ordre de 30 à 40 µm (Figure 12). Elle présente quelques vacuoles dues à la vaporisation du mercure lors du traitement thermique. Plusieurs d'entre elles sont remplies de produits de corrosion du cœur en alliage cuivreux de l'objet.

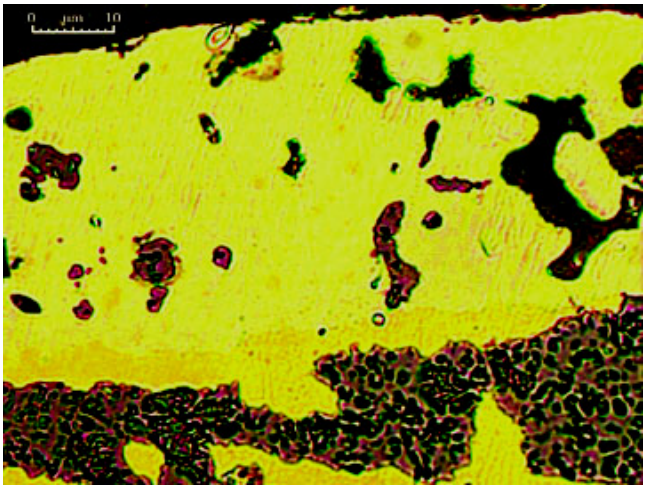


Figure 12 - Couche argentée sur le cœur de laiton partiellement oxydé d'un flan (échelle : 10 µm).

L'interface de la pellicule avec le substrat est particulièrement cohérente. Il n'y a aucun vide ni la présence d'éléments hétérogènes entre les deux matériaux (Figure 12).

La coupe a par ailleurs été observée au microscope électronique à balayage afin de réaliser des analyses de spectroscopie en dispersion d'énergie. Les taux de mercure mesurés sont encore relativement élevés puisqu'il représente jusqu'à 40 % de la masse totale de la couche déposée. Cette proportion restante de métal lourd n'est cependant pas gênante puisque la couleur de l'amalgame mercure-argent est également argentée.

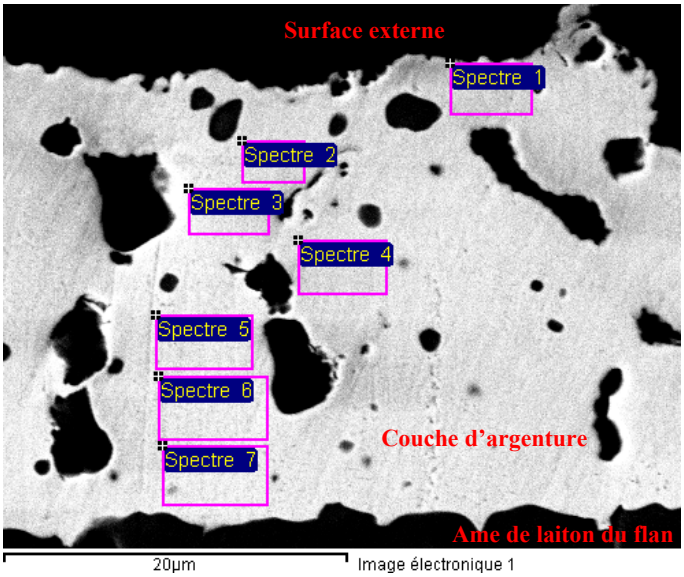


Figure 13 - Observation au microscope électronique à balayage

b. Echantillons expérimentaux

Au cours des deux campagnes d'expérimentations, les échantillons ont été recouverts d'une pellicule d'amalgame préparé à base d'argent pur, après avoir été préalablement traités selon le protocole de décapage décrit précédemment[55]. Ils ont été ensuite chauffés pour éliminer une partie du mercure du dépôt superficiel.

1. Première campagne (2006) :

Dans le cadre d'une approche préliminaire, les échantillons argentés étaient constitués d'un laiton contenant 20 % de zinc et 80 % de cuivre.

Pour le chauffage, les analogues ont été placés sur un support céramique disposé au milieu d'un feu de braises. La température de travail moyenne était d'environ 300 °C.

Après avoir constaté un changement de couleur des échantillons au cours des premiers essais (Figure 14 : de A vers B), il a été décidé de retenir cette transition pour interrompre le chauffage.

Figure 14 - Evolution de la couleur de l'argenture au cours de la chauffe.

[55] cf. Préparation des échantillons devant être argentés, p. 119.

Après leur chauffage, les échantillons ne présentaient ni un aspect argenté, ni même une couleur grise. Ce n'est qu'après le brunissage des analogues qu'il a été possible de constater l'esthétique recherchée. Toutefois, lors de cette opération, la pellicule superficielle est apparut relativement fragile et son adhérence limitée.

Avant d'être préparés pour les observations métallographiques, la surface des fragments argentés a été dans observée de façon globale. Les structures relevées sur l'ensemble des échantillons justifient que ces derniers ne présentent pas un aspect brillant. Celles-ci sont globalement très désordonnées et divisées (Figure 15).

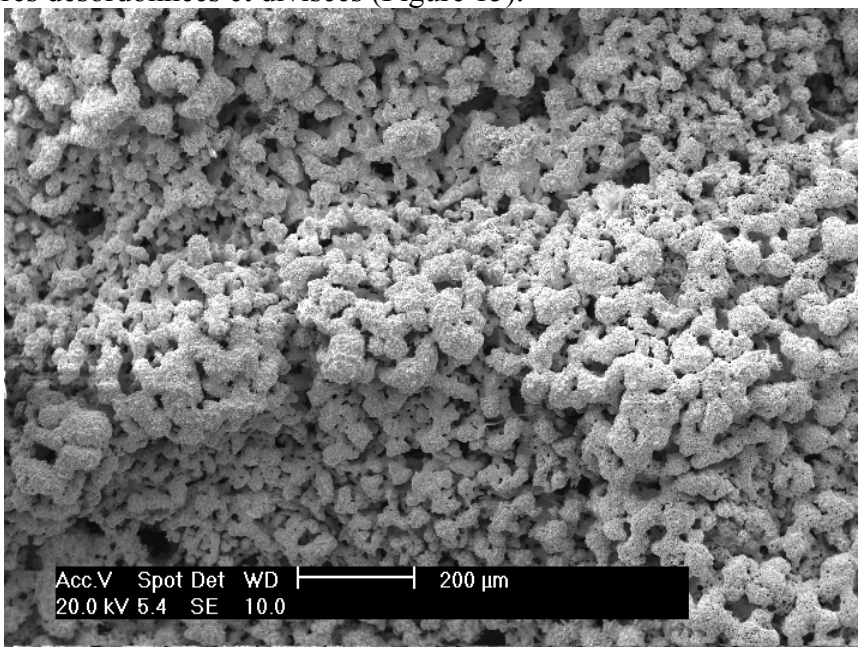


Figure 15 - Surface observée au MEB d'une couche d'argenture expérimentale (n° 06-15).

La structure générale est finalement très différente de celle mise en évidence notamment sur l'échantillon archéologique de La Catette qui présente des faciès de fusion (Figure 11). Dans ce cas, la température retenue pour vaporiser le mercure de l'amalgame n'était semble-t-il pas assez élevée[56].

L'analyse de l'argenture a ensuite été réalisée par spectrométrie en dispersion d'énergie à partir d'une coupe métallographique (Figure 16).

[56] La composition de la couche peut également être un paramètre qui influence la température de fusion de l'alliage qui la compose.

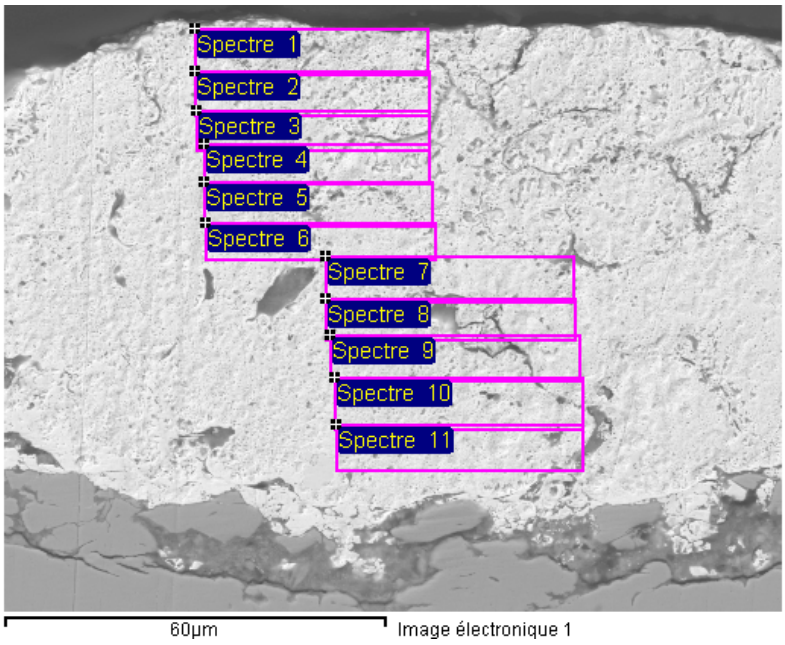


Figure 16 - Coupe métallographique et analyse de l'argenture expérimentale n° 06-22.

Les quantifications du taux de mercure restant dans l'argenture de l'échantillon expérimental confirment en définitive que le chauffage n'a pas été suffisant puisqu'il reste encore une très forte proportion du métal lourd (Figure 17). Celui-ci représente jusqu'à 60 % de la masse de la couche. Il est donc le composé majoritaire, ce qui n'a pas été observé sur les échantillons archéologiques (Figure 17). Cette quantité encore importante de mercure est d'ailleurs la raison pour laquelle la couche de présente pas de vacuoles comme de ce qui a été observé sur la coupe du flan de Lauradieu (Figure 12, Figure 13 et Figure 16).

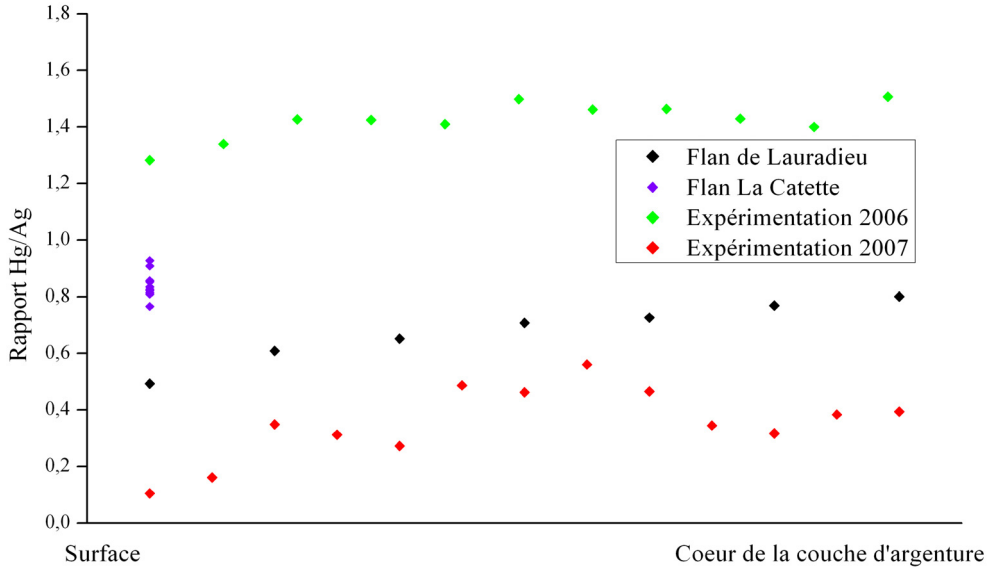


Figure 17 - Rapport Hg/Ag mesuré sur différents échantillons archéologiques et expérimentaux[57].

[57] Références : Flan de Lauradieu (Au_15), Flan de La Catette (CA 18), Expérimentation 2006 (n° 06-22), Expérimentation 2007 (n° 07-101).

La coupe métallographique a également permis de mettre en évidence la cause de la fragilité de la couche appliquée, constatée lors des essais de brunissage. En effet, contrairement à ce qui a été relevé sur la coupe du flan de Lauradieu, l'interface de l'échantillon expérimental est apparaît moins cohérente avec la présence de produit de corrosion cuivreux entre le substrat et le dépôt.

Enfin, avec 60 à 80 µm d'épaisseur de la pellicule apparaît plus importante que celle mesurées sur le flan de Lauradieu qui est de l'ordre de 30 à 40 µm.

2. Seconde campagne (2007)[58] :

A partir des résultats obtenus en 2006, il a été décidé de modifier les paramètres expérimentaux afin d'éliminer plus de mercure de la couche d'argenture et d'améliorer le contact de la couche d'amalgame avec le support. C'est pourquoi, la température de traitement a été augmentée jusqu'à 500 °C. De plus, alors que lors des premiers essais le chauffage a été interrompu après un premier changement de couleur de l'argenture, ici, il a été poursuivi jusqu'à une seconde transition (Figure 14 : de A vers B et C). L'aspect final n'est toutefois pas argenté et le brunissage est toujours indispensable.

Dans la mesure où le laiton pouvait être également à l'origine de la mauvaise qualité de l'argenture, celui-ci a été remplacé par du cuivre pur pour ces nouveau essais.

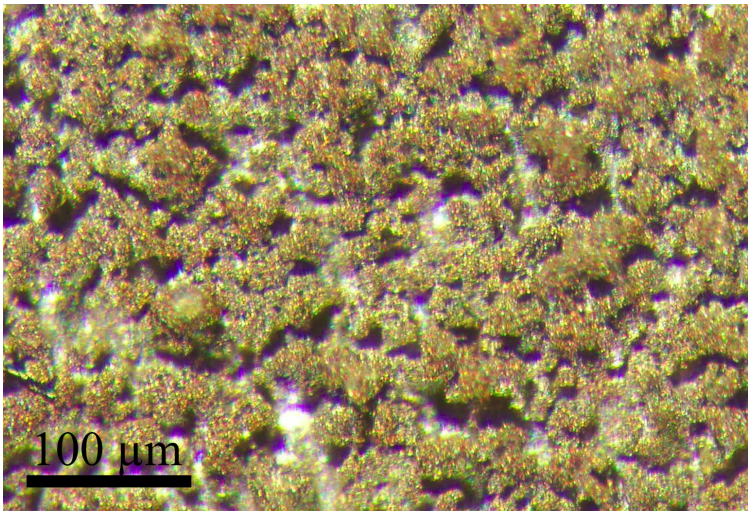


Figure 18 - Surface d'une couche d'argenture expérimentale (n° 07-101).

Les premières observations de la surface des échantillons obtenus révèlent des structures similaires à celles obtenues lors des premiers essais de 2006 (Figure 18). Il n'y a toujours pas de profils suggérant une fusion de la couche déposée qui aurait permis une meilleure adhésion de cette dernière au substrat. C'est d'ailleurs ce dont rendent compte les tentatives de brunissage. Elles ont également trahis la fragilité des dépôts.

D'un point de vue analytique, les mesures effectuées par spectrométrie en dispersion d'énergie sur une coupe métallographique ont révélé des différences avec les précédentes reconstitutions (Figure 19). Le mercure, toujours présent dans la couche superficielle est en revanche en proportions beaucoup plus limité. Il apparaît en moins grande proportion que sur

[58] Les observations et les analyses métallographiques présentées ici ont été réalisées par A. Michelin dans le cadre de son stage de Master 2-Recherche Archéomatériaux.

les précédents analogues expérimentaux ainsi que sur les échantillons archéologiques (Figure 17).

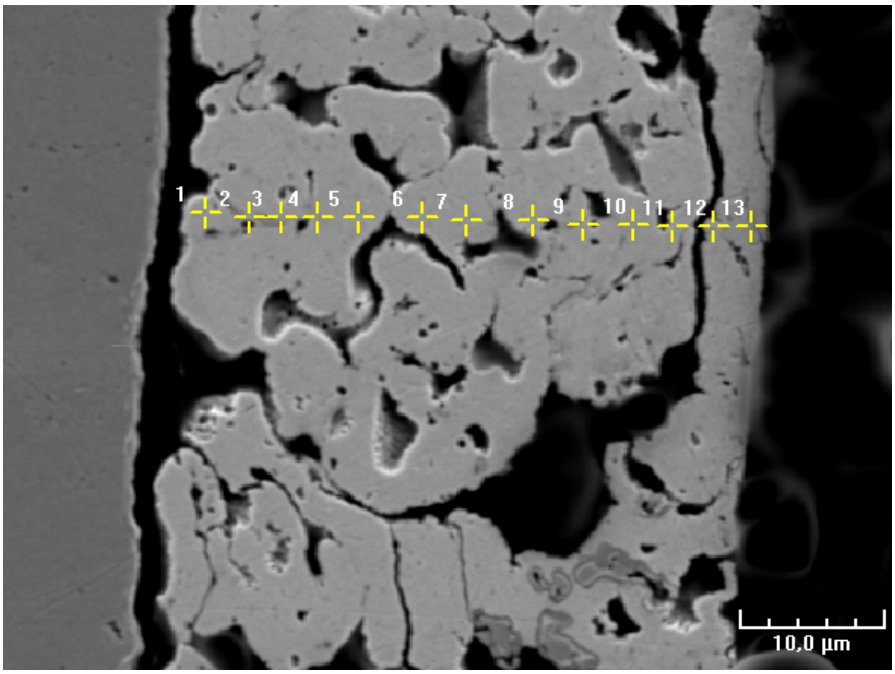


Figure 19 - Coupe métallographique et analyse de l'argenture expérimentale n° 07-101.

La compacité de la couche témoigne de la disparition du mercure puisqu'elle présente de nombreuses vacuoles. Elle est dans ce sens assez similaire à la coupe du flan de Lauradieu. De même que du point de vue de son épaisseur puisqu'elle mesure environ 40 µm.

Cependant, malgré les analogies importantes, l'interface très peu cohérente (Figure 19) explique la fragilité de la pellicule d'argenture. Ceci représente un défaut non négligeable dans la définition de la qualité de l'argenture.

c. Conclusion

Les différents essais réalisés ont montré la difficulté de mettre en œuvre une argenture à l'amalgame mercure argent puisqu'en définitive, il apparaît que les reconstituions mises en œuvre n'ont pas permis d'obtenir une qualité satisfaisante compte tenu notamment de la fragilité des dépôts formés. D'ailleurs, les échantillons archéologiques ne présentes pas globalement les mêmes structures.

Les essais doivent donc être poursuivis en se focalisant sur des paramètres plus limités ou du moins ne pas les faire varier simultanément. Cependant, certaines concessions des études préliminaires ont dû être acceptées compte tenu des difficultés associées à l'emploi du mercure. Il faut rappeler qu'il est volontairement vaporisé lors de ces expériences.

4 - Le brunissage de la couche d'argenture

Le brunissage est l'étape qui doit terminer le processus d'argenture à l'amalgame. Elle correspond en définitive à un polissage de la couche déposée afin de l'uniformiser et lui donner un aspect argenté (Figure 20).

Figure 20 - Flan de cuivre partiellement bruni (n° 06-30).

Pour traiter de cette question la collection de flans découverte au sein de la grotte de La Catette est particulièrement intéressante dans la mesure où elle a révélées des échantillons n'ayant pas été brunis (Figure 11), parallèlement à d'autres qui ont en revanche subi ce traitement (Figure 21).

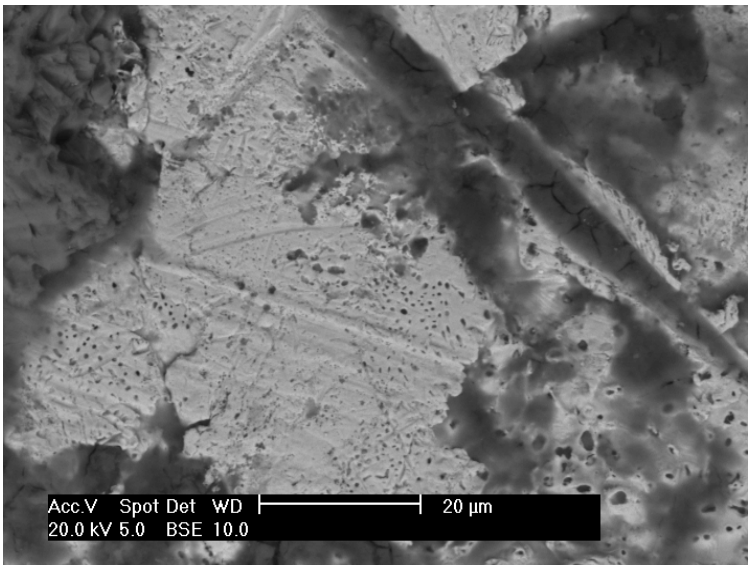


Figure 21 - Surface brunie d'un flan argenté à l'amalgame découvert à La Catette[59].

De telles observations permettent d'affirmer que le brunissage des fausses monnaies argentées dans cette contrefaçon intervient avant la frappe de ces dernières. Cependant, était-il envisageable qu'il soit mis en œuvre après, voire même évité ? En effet, certaines observations menées lors des essais de blanchiment intervenus dans le cadre de l'étude des techniques de monnayages officielles ont suggéré la possibilité d'une approche différente du brunissage.

Après avoir constaté que la compression de la surface d'une monnaie lors de sa frappe lui donnait un aspect brillant qu'elle ne présentait pas auparavant compte tenu de la rugosité de surface. Dans ce cas, il a été décidé de réaliser un essai de frappe sur un flan argenté à l'amalgame mais non bruni au préalable.

[59] Référence CA 22.

Figure 22 - Flan de cuivre argenté frappé sans avoir été bruni et détail de la surface (n° 06-31)

Le résultat d'une telle démarche permet en effet d'obtenir un aspect argenté (Figure 22). Cependant, elle nécessite que la frappe soit assez puissante et homogène pour que la compression affecte toute la superficie de la pièce et en particulier les motifs monétaires (Figure 22 : détail). Si dans le cas du monnayage royal, cette nécessité est moins grande compte tenu de la couleur déjà argentée de la surface, ici la couleur de la couche superficielle ne permet pas une telle configuration. Dans ce cas, si la frappe n'est pas parfaite sur un flan non bruni, il est tout de même nécessaire de le polir après qu'il ait été battu. Dans ce cas, cette opération peut être de surcroît plus difficile à mettre en œuvre dans la mesure où la présence des motifs monétaires gêne le passage de l'outil utilisé dans cette opération. Finalement, bien que la frappe d'un flan non bruni puisse présenter un intérêt dans la mesure où elle peut dispenser d'une opération de mise en forme, il est indispensable qu'elle soit parfaite du premier coup auquel cas l'avantage escompté devient un inconvénient puisque le brunissage alors nécessaire est beaucoup plus difficile.

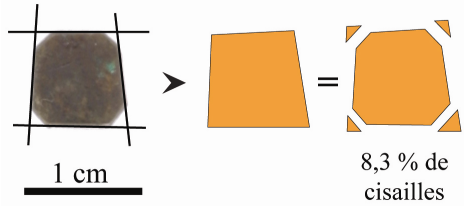
En définitive, les différentes expérimentations réalisées ont permis de rendre compte de la difficulté globale de mise en œuvre d'un procédé d'argenture à l'amalgame. En outre, si elles ont répondu à certaines questions, d'autres en revanche ne sont pas encore complètement maîtrisées.

Une information mérite particulièrement d'être soulignée dans la mesure où elle n'est jamais prise en compte dans les différentes études qui traite de ce sujet. On insistera donc sur l'impossibilité d'appliquer un amalgame de mercure argent sur un objet d'alliage cuivreux dont la surface n'aura pas été préalablement préparée.

Annexe W :
Evaluation du taux de cisaille du faux-monnayage de bas billon de la grotte de La Catette

Estimation du taux de cisailles produit dans le faux-monnayage de la grotte de La Catette à partir de la différence des aires mesurées en pixels.

Exemple pour l'échantillon CA 073 :



Numéro	Surface totale	Surface cisailles	% cisailles
CA 068	41797	4465	10,68
CA 069	36131	2995	8,29
CA 070	29442	1857	6,31
CA 071	33474	2609	7,79
CA 072	40395	6716	16,63
CA 073	35581	2954	8,30
CA 074	38227	3604	9,43
CA 075	38237	4391	11,48
CA 076	38837	3660	9,42
CA 077	32559	3825	11,75
CA 078	35276	4030	11,42
CA 079	38981	4049	10,39
CA 080	43876	5156	11,75
CA 081	40131	4256	10,61
CA 082	45377	4357	9,60
CA 083	51197	5069	9,90
CA 084	44274	4670	10,55
CA 086	43362	3729	8,60
CA 087	42723	4996	11,69
CA 088	50161	5155	10,28
CA 089	55453	7244	13,06
CA 090	48929	5536	11,31
CA 091	47429	6813	14,36
CA 092	44052	4736	10,75
CA 093	45372	5938	13,09
CA 095	55095	6134	11,13
CA 096	50224	10144	20,20
CA 097	54588	10608	19,43
CA 099	55015	7734	14,06
CA 100	55858	10102	18,09
CA 101	59378	7433	12,52
CA 102	62934	9163	14,56
CA 103	60779	11024	18,14
CA 104	50115	5910	11,79

Numéro	Surface totale	Surface cisailles	% cisailles
CA 105	61864	10936	17,68
CA 107	55368	8803	15,90
CA 108	68309	10010	14,65
CA 109	66262	11445	17,27
CA 110	67239	9664	14,37
CA 111	65523	11012	16,81
CA 112	67662	10990	16,24
CA 113	76541	10425	13,62
CA 114	72231	10955	15,17
CA 115	68884	11244	16,32
CA 117	67097	13326	19,86
CA 270	88562	7745	8,75
CA 271	87377	13018	14,90
CA 274	75031	9987	13,31
CA 275	89823	19415	21,61
CA 276	106033	23217	21,90
CA 278	72158	9793	13,57
CA 280	73519	12395	16,86
CA 282	63178	6568	10,40
CA 285	48334	0	0,00
CA 287	62256	7778	12,49
CA 288	59706	7724	12,94
CA 289	88149	13613	15,44
CA 290	91008	11919	13,10
CA 293	89917	12803	14,24
CA 294	69599	6941	9,97
CA 295	106113	17057	16,07
CA 297	83208	11565	13,90
CA 299	68190	10113	14,83
CA 300	79581	10147	12,75
CA 301	62409	6736	10,79
CA 302	44034	3562	8,09
CA 303	88224	10005	11,34
CA 307	86934	14319	16,47

Annexe X :
Etude métallographique du faux-monnayage de bas billon de la grotte de La Catette

Cette étude métallographique a été réalisée par M.-C. Vivier dans le cadre de sont stage de master professionnel Méthodes physiques appliquées au Patrimoine culturel de l'Université Michel de Montaigne de Bordeaux[60].

Les trois échantillons caractérisés ont été prélevés dans le *corpus* du faux-monnayage de bas billon de la grotte de La Catette[61]. Ils ont été sélectionnés principalement à partir de leur métrologie et de leur morphologie. Comme il s'agissait de mettre en évidence les déformations ou recuits successifs éventuellement subis par les objets au cours du processus de fabrication, il a été décidé de faire porter l'étude sur un carreau, un premier flan ainsi qu'un second présentant des défauts trahissant une opération particulière de mise en forme (Figure 23). Pour que ceux-ci puissent représenter les différentes étapes d'une même chaîne opératoire, ils ont été choisis présentant des masses les plus proches possible.

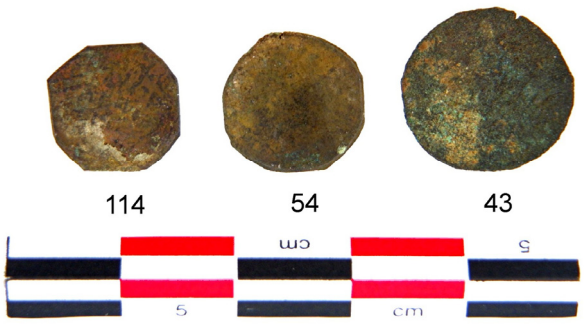


Figure 23 - Echantillons sélectionnés pour l'étude métallographique.

Les trois objets ont été préparés selon le protocole présenté en annexe F pour observer leur coupe métallographique.

Dans les échantillons étudiés, aucune inclusion de sulfures n'a été observée, ni au microscope optique, ni au microscope électronique à balayage. Les cartographies X réalisées n'ont pas permis de révéler la présence de soufre.

En revanche, l'abrasion parallèle à la surface des objets a révélé des nodules de plomb. Leur orientation rectiligne se distinguait clairement dans le cas des échantillons n° 114 (Figure 24) et n° 54 (Figure 25). Ce sont donc ces axes préférentiels qui ont été choisis

[60] Vivier M.-C., *Etude du faux-monnayage de la grotte de La Catette (Aude)*, Mémoire de Master 2-Pro « Méthodes physiques appliquées au Patrimoine culturel », sous la direction de F. Téreygeol et A. Arles, Bordeaux, 2007, 91 p.

[61] cf. volume 1, Les faux-monnayages de la grotte de La Catette (11) : La production de fausses monnaies de bas billon.

comme axes de découpe pour l'étude métallographique. Leur répartition à la surface de l'échantillon n° 43 était plus diffuse : deux échantillons seront prélevés sur cette pièce, suivant les axes qui semblent les plus évidents.

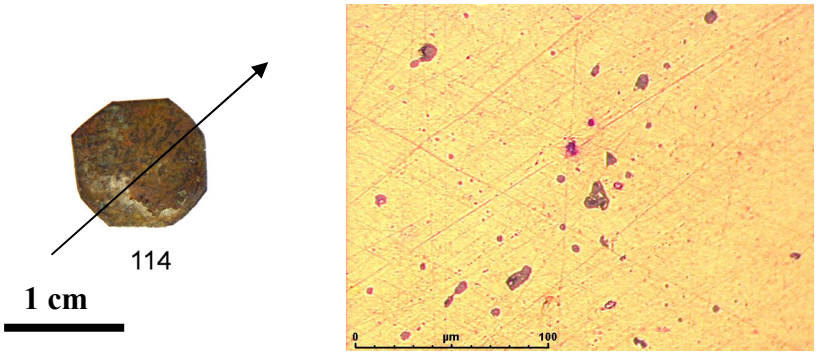


Figure 24 - Déformation des nodules de plomb de l'échantillon n° 114.

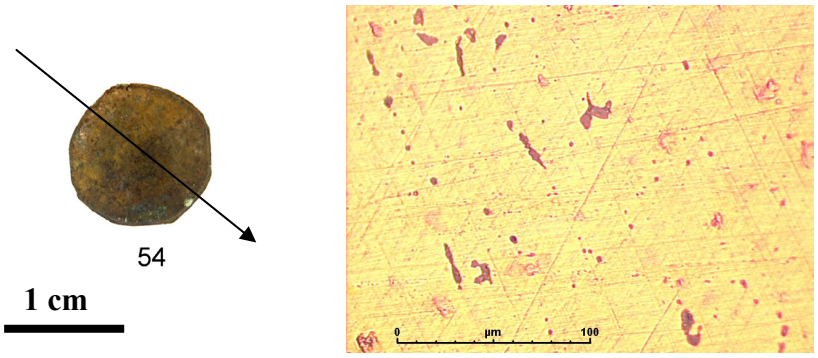


Figure 25 - Déformation des nodules de plomb de l'échantillon n° 54.

Compte tenu des points communs de la chaîne opératoire de cette contrefaçon monétaire avec les techniques officielle, il a été décidé de présenter l'étude métallographique en faisant référence à cette dernière.

5 - De la découpe à l'ajustement des carreaux

Dans la chaîne opératoire de la monnaie officielle, ces carreaux étaient recuits avant d'être ajustés. Le carreau n° 114 a été coupé pour que l'examen métallographique permette de mettre en évidence ou non cette étape.

Les clichés réalisés avant l'attaque métallographique ont permis d'observer l'alignement des inclusions de plomb sous la surface du carreau. Sous l'une des faces, ces inclusions de plomb sont de très petite taille (inférieures à 10 µm), et bien rondes, ce qui permet d'affirmer qu'après avoir été soumis à une importante pression (qui a provoqué l'étirement d'inclusions initiales jusqu'à leur éclatement en plusieurs petits nodules), un recuit à une température suffisante a permis à ces nodules de former de nouveaux globules :

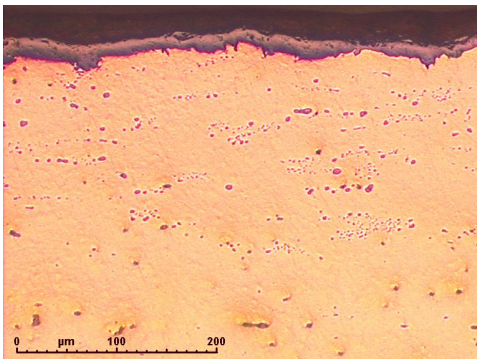


Figure 26 - Petites inclusions de plomb sous la surface.

Les clichés réalisés après l'attaque sous cette même surface ont ensuite révélé la présence de nombreuses macles thermiques de petites tailles (environ 50 µm). Lors du recuit, de nouveaux grains se sont donc formés à partir des défauts créés par le martelage et ont crû jusqu'à contact mutuel :

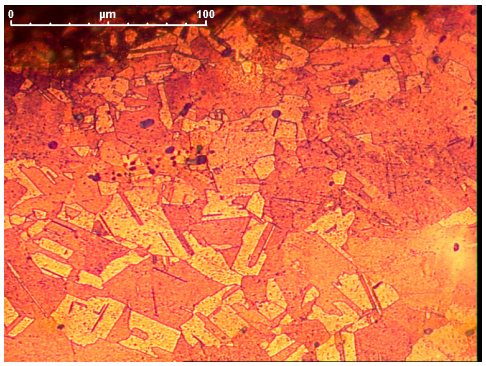


Figure 27 - Nombreux cristaux de petite taille et macles thermiques.

Le martelage subi par le carreau a donc été suivi d'un recuit qui a permis de faire disparaître les macles mécaniques qui s'étaient formées sous les contraintes de déformation.

Si l'on observe la forme des cristaux à l'extrémité de la coupe, c'est-à-dire à l'endroit où le faux monnayeur a tranché le métal, on remarque qu'ils sont plus étirés que sur le reste visible de l'échantillon, et que leur allongement est parallèle au bord : les cristaux ont donc été déformés lors de la coupe des angles des carreaux :

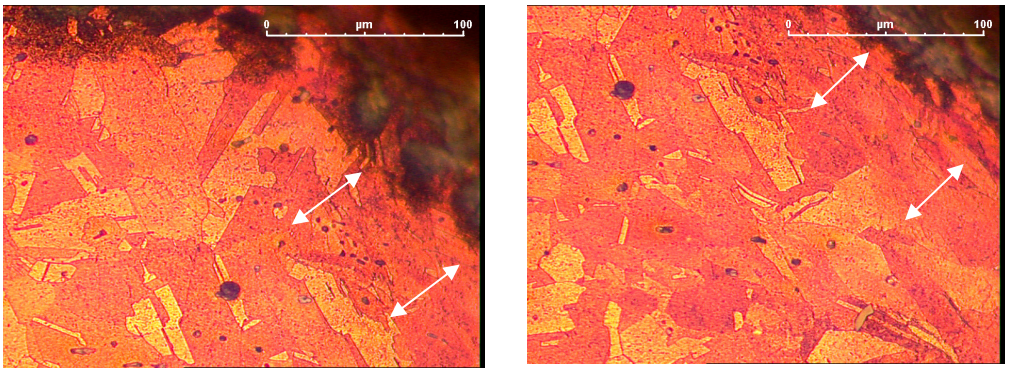


Figure 28 - Mise en évidence d'une déformation due à la coupe des carreaux.
Les cristaux et les macles thermiques sont comprimés sur l'épaisseur matérialisée par les flèches blanches, parallèlement à la « surface » de coupe, c'est-à-dire au bord.

Cela signifie que le recuit a précédé l'ajustement, comme dans le monnayage officiel. Cependant, ce traitement thermique a certainement eu lieu lors des opérations de mise en forme de la lame ou plaque de cuivre dans laquelle a été découpé le carreau.

6 - Outillage de découpe

Les photographies réalisées sur cette coupe ainsi que sur les suivantes permettent d'observer que les extrémités des pièces sont biseautées : les pointes des carreaux ont donc été coupées à l'aide de cisailles :

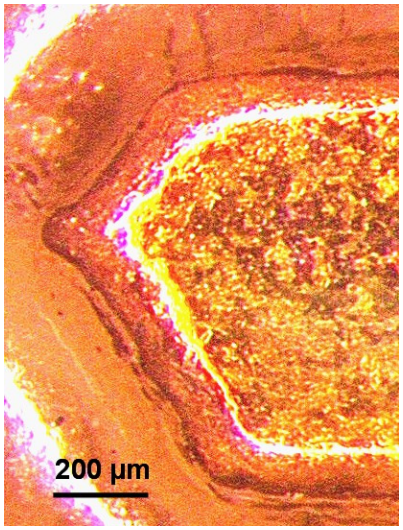


Figure 29 - Profil du bord de coupe cisaillé.

7 - La mise en forme des flans

Une fois ajusté le carreau était enfin arrondi pour être amené à l'état de flan, aux dimensions de la pièce. Plusieurs flans du *corpus* semblent avoir subi un traitement similaire. L'un d'entre eux a été observé en métallographie afin de vérifier cette hypothèse[62].

Les inclusions de plomb, généralement rondes, sont de très petite taille, et réparties sur toute la surface de la pièce (Figure 25). Cela suppose que la pièce ait été soumise à une pression importante, puis à un recuit qui a permis à ces nodules de former de nouveau des globules. D'ailleurs, des macles thermiques sont apparues après l'attaque métallographique, tandis qu'aucune macle mécanique n'a pu être observée. Les cristaux révélés sont très nombreux, et toujours de petite taille, sur toute la surface de l'échantillon (Figure 31).

[62] Référence CA 54.

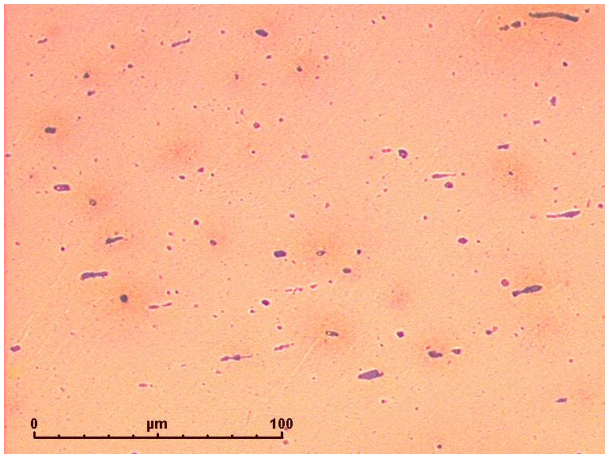


Figure 30 - Nodules de plomb orientés.

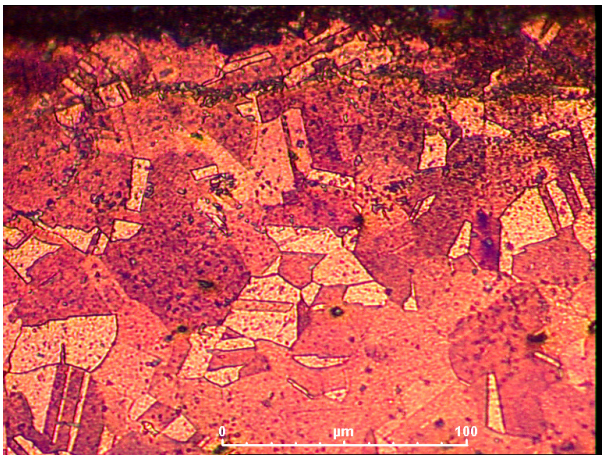


Figure 31 - Macles thermiques.

Ainsi, ce flan a été soumis à de nombreux martelages ; la dernière phase de travail a été un recuit.

8 - Les flans boués

Après ces nouvelles frappes, le flan devait être boué : plusieurs flans étaient empilés les uns sur les autres, puis on frappait sur ce bloc. Une grande partie des flans du *corpus* présentent ces marques d'empilage :

Figure 32 - Exemples de flans boués.

L'un d'entre eux, le n° 43, a été préparé pour l'étude métallographique. Les inclusions de plomb (Figure 33), les cristaux et les macles thermiques sont étirés (Figure 34) ; on aperçoit également des macles mécaniques orientées diagonalement par rapport à la surface (Figure 35).

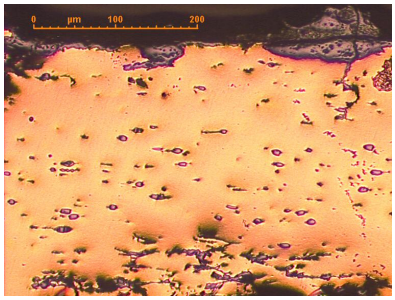


Figure 33 - Nodules de plomb orientés.

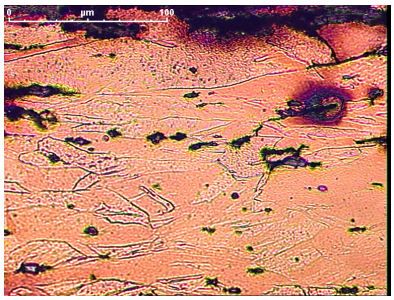


Figure 34 - Cristaux et macles thermiques.

Figure 35 - Macles mécaniques.

Le flan a donc été soumis à des déformations plastiques sans avoir subi de recuit. Comme ces caractéristiques se retrouvent sur toute la tranche observée, elles sont antérieures à la frappe sur le bloc de flans. Dans ce cas, l'étape au cours de laquelle étant la dernière opération de déformation plastique et compte tenu des caractéristiques mises en évidence sur le flan précédemment évoqué, il apparaît que les flans ne sont recuits après avoir été boués.

Bibliographie des Annexes

Anheuser K., The practice and characterization of historic fire gilding techniques, *JOM*, vol. 49, n° 11, 1997, p. 58-62.

Auray J. P., Duru G., Zighed A., *Analyse des données multidimensionnelles : les méthodes de description*, 4 tomes, Lyon, Ed. Alexandre Lacassagne, t. 1, 1990, 195 p.

Barreswil C.-L., Girard A., *Dictionnaire de chimie industrielle*, 4 tomes, Paris, Dezobry, E. Magdeleine et Cie, t. 2, 1864, 508 p.

Baumé A., *Chymie expérimentale et raisonnée*, 3 tomes, Paris, P. F. Didot le jeune, t. 3, 1773, 704 p.

Beauchesne F., *Analyse non destructive du cuivre et de ses alliages par activation à l'aide de neutrons rapides de cyclotron*, Thèse de doctorat de Sciences Physiques de l'Université d'Orléans, Orléans, 1986, 282 p.

Biringuccio V., *La pyrotechnie, ou art du feu*, Paris, Chez Claude Fremy, 1572, 167 p.

Bocquet A., Mille P., *La Rochelle Place de Verdun, Fouille préventive AFAN, octobre 1994 Juillet 1995*, Document final de synthèse, SRA Poitou-Charentes, Poitiers, 1995, n. p.

Bompaire M., Dumas F., *Numismatique médiévale, monnaies et documents d'origine française*, Turnhout, Belgique, Brepols, coll. « L'atelier du médiéviste », t. 7, 2000, 687 p.

Bompaire M., Les cadences de production (XIV^{e}-XVI^{e} s.), en France principalement, dans Depeyrot G., Tony H., Ghislaine M., eds., *Rythmes de la production monétaire, de l'Antiquité à nos jours*, Paris, Université Catholique de Louvain, 1986, t. 7, p. 579-613.

Brisset F., Repoux M., Ruste J., Grillon F., Robaut F., eds., *Microscopie électronique à balayage et microanalyses*, Les Ulis, EDP Sciences, 200, 893 p.

Fiche toxicologique : Mercure et composés minéraux, INRS, n° 55, 1997, 6 p.

Figuier L., *Les merveilles de la science, ou description populaire des inventions modernes*, 8 tomes, Paris, Furne, Jouvet et Cie, t. 2, 1868, 703 p.

Giumlia-Mair A., On surface analysis and archaeometallurgy, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, vol. 239, n° 1-2, 2005, p. 35-43.

Guerra M. F., Barrandon J.-N., Ion beam activation analysis with a cyclotron, dans Oddy W. A., Cowell M. R., eds., *Metallurgy in numismatics,* Londres, Angleterre, Royal numismatic society, 1998, t. 4, p. 15-34.

Halleux R., ed., *Les alchimistes grecs, tome I : Papyrus de Leyde - Papyrus de Stockholm - Recettes*, Paris, Les Belles Lettres, coll. « Collection des universités de France Série grecque », 1981, 242 p.

La Niece S., Silvering, dans La Niece S., Craddock P., eds., *Metal plating and patination: cultural, technical and historical developments,* Oxford, Butterworth-Heinemann, 1993, p. 201-210.

La Niece S., Technology of silver-plated coin forgeries, dans Archibald M. M., Cowell M. R., eds., *Metallurgy in numismatics,* Londres, Angleterre, Royal numismatic society, 1993, t. 3, p. 227-239.

Lesoult G., *Solidification, cristillastion et microstructures*, n° M58, Techniques de l'Ingénieur, 1986, 28 p.

Lins P. A., Oddy W. A., The origins of mercury gildings, *Journal of Archaeological Science*, vol. 2, n° 4, 1975, p. 365-373.

Mackenzie C., *Mémorial pratique du chimiste-manufacturier*, 3 tomes, Paris, Barrois l'aîné, t. 1, 1824, XXIV-456 p.

Massalski T. B., Okamoto H., Subramanian P. R., Kacprzak L., eds., *Binary alloy phase diagrams*, Cleveland, Etats Unis, ASM International, 1990, 3589 p.

Meyers P., Non-destructive activation analysis of ancient coins using charged particles and fast neutrons, *Archaeometry*, vol. 11, 1969, p. 67-84.

Morineau A., Aluja-Banet T., *Analyse en composantes principales*, Montreuil, CISIA-CERESTA, 1998, 142 p.

Nibodeau J.-P., *Rapport de sauvetage urgent AFAN, 2ème campagne : La Rochelle Place de Verdun, septembre 1996 mars 1997*, Document final de synthèse, SRA Poitou-Charentes, Poitiers, 1997, 126 p.

Oddy W. A., Cowell M. R., The techology of gilded coin forgeries, dans Archibald M. M., Cowell M. R., eds., *Metallurgy in numismatics,* Londres, Angleterre, Royal numismatic society, 1993, t. 3, p. 199-239.

Pelouze T.-J., Frémy E., *Cours de chimie générale*, 4 tomes, Paris, V. Masson, t. 2, 1848, 828 p.

Raub C., How to coat objects with gold- Pliny, Leyden X, Mappae Clavicula and Theophilus senn with a modern chemist's eyes, dans Eluère C., ed., *Outils et ateliers d'orfèvres des temps ancients*, Musée des antiquités Nationales de Saint-Germain-en-Laye, 2 t., Laboureur & Cie, 1993, t. 2, p. 101-110.

Reiff F., Bartels M., Gastel M., Ortner H., Investigation of contemporary gilded forgeries of ancient coins, *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, vol. V371, n° 8, 2001, p. 1146-1153.

Roos A., *Technique métallographique : Préparation des surfaces métalliques pour micrographie et macrographie*, Bayeux, Dunod, 1960, 121 p.

Roseleur A., *Guide pratique du doreur, de l'argenteur et du galvanoplaste*, Paris, De Plazanet, 1873, 321 p.

Smith C. S., Hawthorne J. G., eds., *Mappae Clavicula: A little key to the world of medieval techniques*, Philadelphia, The American Philosophical Society, coll. « Transactions of the American Philosophical Society », t. 64, part 4, 1974, 128 p.

Théophile, L'escalopier C. D., Guichard J.-M., *Théophile, prêtre et moine. Essais sur divers arts*, Nogent-le-Roi, Laget J., Daviaud P., Librairie des Arts et Métiers, 1977, LXXII pl. et 314 p.

Vivier M.-C., *Etude du faux-monnayage de la grotte de La Catette (Aude)*, Mémoire de Master 2-Pro « Méthodes physiques appliquées au Patrimoine culturel », sous la direction de F. Téreygeol et A. Arles, Bordeaux, 2007, 91 p.

Vlachou C., McDonnell J. G., Janaway R. C., Experimental investigation of silvering in late roman coinage, dans Vandiver P. B., Goodway M., Druzik J. R., Mass J. L., eds., *Materials Issues in Art and Archaeology VI*, Boston, Massachusetts, 2002, Materials Research Society, 2001, t. 712, p. 461-469.

Table des figures et tableaux

FIGURES :

Figure 1 - Schéma de la cible de production de neutrons rapides. 7
Figure 2 - Flux de rayons X selon les sources. 13
Figure 3 - Analyse de diffraction des rayons X en transmission. 17
Figure 4 - Principe de fonctionnement d'un MEB. 19
Figure 5 - Filtration de l'amalgame dans un tissu. 116
Figure 6 - Application de l'amalgame sur la surface préparée de l'échantillon. 116
Figure 7 - Amalgamation avec l'alliage à base de laiton. 118
Figure 8 - Paillettes d'alliage dans l'amalgame. 118
Figure 9 - Traitement à la gravelle et au sel. 119
Figure 10 - Traitement au vinaigre et au sel. 119
Figure 11 - Surface non brunie d'un flan argenté à l'amalgame découvert à La Catette. 120
Figure 12 - Couche argentée sur le cœur de laiton partiellement oxydé d'un flan (échelle : 10 µm). 121
Figure 13 - Observation au microscope électronique à balayage. 122
Figure 14 - Evolution de la couleur de l'argenture au cours de la chauffe. 122
Figure 15 - Surface observée au MEB d'une couche d'argenture expérimentale (n° 06-15). 123
Figure 16 - Coupe métallographique et analyse de l'argenture expérimentale n° 06-22. 124
Figure 17 - Rapport Hg/Ag mesuré sur différents échantillons archéologiques et expérimentaux. 124
Figure 18 - Surface d'une couche d'argenture expérimentale (n° 07-101). 125
Figure 19 - Coupe métallographique et analyse de l'argenture expérimentale n° 07-101. 126
Figure 20 - Flan de cuivre partiellement bruni (n° 06-30). 127
Figure 21 - Surface brunie d'un flan argenté à l'amalgame découvert à La Catette. 127
Figure 22 - Flan de cuivre argenté frappé sans avoir été bruni et détail de la surface (n° 06-31) 128
Figure 23 - Echantillons sélectionnés pour l'étude métallographique. 131
Figure 24 - Déformation des nodules de plomb de l'échantillon n° 114. 132
Figure 25 - Déformation des nodules de plomb de l'échantillon n° 54. 132
Figure 26 - Petites inclusions de plomb sous la surface. 133
Figure 27 - Nombreux cristaux de petite taille et macles thermiques. 133
Figure 28 - Mise en évidence d'une déformation due à la coupe des carreaux. 133
Figure 29 - Profil du bord de coupe cisaillé. 134
Figure 30 - Nodules de plomb orientés. 135
Figure 31 - Macles thermiques. 135
Figure 32 - Exemples de flans boués. 135
Figure 33 - Nodules de plomb orientés. 136
Figure 34 - Cristaux et macles thermiques. 136
Figure 35 - Macles mécaniques. 136

TABLEAUX :

Tableau 1 - Radioisotopes caractéristiques mesurés par spectrométrie γ lors de l'analyse par ANRC. 9
Tableau 2 - Limites de détection calculées pour l'ANRC dans nos conditions d'irradiation et de mesures de spectrométrie γ. 10
Tableau 3 - Alliages à bases d'argent amalgamés à du mercure (%mass). 117

Adrien Arles

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.

Suite aux fouilles du second atelier monétaire royal de La Rochelle (17), une grande quantité de matériel a pu être mis au jour. Cette découverte est exceptionnelle par deux aspects puisqu'il s'agit à ce jour de l'unique atelier officiel fouillé en France et que les structures et objets découverts permettent en une première lecture, d'ébaucher une chaîne de production de la monnaie. Ce matériel précurseur complété de céramiques provenant de l'atelier médiéval de Montreuil-Bonnin (86) constitue la base de cette étude archéométrique inédite des techniques monétaires officielles. Cette recherche, par définition multidisciplinaire, s'appuie sur la caractérisation physico-chimique de corpus archéologiques mais également sur une étude des sources historiques : traités monétaires, procès-verbaux, comptes d'atelier... Enfin, les reconstitutions paléométallurgiques participent pour une part importante aux discussions engagées. Elles renseignent sur la complexité des opérations tout en produisant des analogues librement étudiables, comparés aux échantillons anciens. La compilation de toutes les données collectées permet non seulement de proposer une description des techniques du monnayage au marteau telles qu'elles étaient mises en œuvre dans les fabriques monétaires jusqu'au milieu du XVII^{e} siècle et de révéler les matières premières utilisées mais également de comprendre le fondement des opérations pratiquées.

En tant que fabrication monétaire particulière, les techniques propres au faux-monnayage ont parallèlement été considérées par le biais de l'étude de deux exemples localisés au début de la Période Moderne dans le département de l'Aude (11). En suivant la même démarche expérimentale, il a été possible de mettre en évidence les particularismes de ces activités et de révéler plusieurs analogies avec les techniques officielles.

Mots-clés : monnayage au marteau, monnaie, atelier monétaire, faux-monnayage, prospection archéologique.

Coining and counterfeiting. The hammered coin production in France (XIIIth - XVIIth centuries). A physicochemical, experimental and historical approach.

In the Nineties excavations made in La Rochelle (France) have produced objects of archaeometallurgical evidence with regards to the second royal mint. For the time being, this workshop is still the only one that has been discovered in France. Moreover, the observations of the artefacts seem to allow the reading of the whole money making process. These archaeological samples, complemented with ceramics from the medieval mint of Montreuil-Bonnin (France), have been studied by an archaeometric approach to propose an original research on the official French hammer striking process. This multidisciplinary study is based on the analysis of historical samples but also on a bibliographic compilation: monetary treaties, official reports, mint accounts… The experimental work takes an important part in the study too. Providing more than experimental samples easily studied and compared with the archaeological ones, this pragmatic method allows to point out the complexity of a technique. Finally, the gathering of all data defines the raw materials and the processes used in the French hammer coining until the mid XVIIth century, but also their respective purposes. As a particular coinage, counterfeiting has also been studied through two post-medieval examples that took place in Southern France caves. The experimental study reveals the originalities of these illegal activities besides some links with the official processes.

Keywords: hammered coinage, coin, mint, counterfeiting, archaeological prospection.

INSTITUT DE RECHERCHE SUR LES ARCHÉOMATÉRIAUX
Centre Ernest-Babelon
CNRS – Université d'Orléans
3D rue de la Férollerie
45071 Orléans Cedex 2 - FRANCE