

Aurore Ledésert
Théo Levaltier
Alice Moog
Yaël Peyran

Encadré par :
Nicolas Thomas
Lise Saussus

Archéologie expérimentale
Affinage de l'argent par coupellation



juin 2023

Sommaire

Introduction	3
I) Etat de l'art	4
a) La coupellation, technique	4
b) La coupellation, historique.	6
II. Méthodes	11
a) Le four	11
b) Préparation des alliages pour les prises d'essai et du plomb à ajouter	13
d) Fabrication coupelles	15
e) Les différents postes	17
f) La coupellation	18
III. Les résultats	22
1. Fiche d'expérience	22
2. Traitement des données	23
3. Quelques aléas	29
a. Les fissures	29
b. Moussage ? Rochage ?	30
c. Conditions climatiques	34
Conclusion	35
Remerciements	36
Bibliographie	37
Annexe	39

Introduction

Nous avons réalisé une semaine d'archéologie expérimentale au sein de l'INP. Nous étions quatre élèves de première année, deux en céramique et deux en métal. Durant ces quelques jours, nous avons pu expérimenter les techniques de coupellation de l'argent, telles que nous les connaissons aux alentours du Xe siècle. Nous étions accompagnés de Mr. Nicolas Thomas et Mme. Lise Saussus, qui dans le cadre de leurs recherches avaient déjà réalisé ce type d'expérience.

La coupellation de l'argent a pour objectif d'affiner le métal précieux et de connaître le titre d'un alliage. Le but est d'isoler l'argent du cuivre présent dans l'alliage. Lors de l'opération, du plomb est ajouté, il va alors s'agglomérer au cuivre lorsque la température suffisante pour faire entrer les métaux en fusion sera atteinte. L'oxyde de plomb va être en partie absorbé par la coupelle, emmenant avec lui l'oxyde de cuivre. Lorsque l'opération est utilisée pour déterminer la concentration en argent de l'alliage initial, le métal restant est pesé et comparé à la masse de l'alliage avant la coupellation, la différence correspond à la quantité de cuivre présente dans l'alliage.

Différentes sources ont été essentielles à cette démarche, tout d'abord, les restes d'ateliers d'orfèvres découverts en fouilles archéologiques, notamment le site d'Oostvleteren, situé en Flandre-occidentale, en Belgique. Sur ce site, ont été découverts des restes de four, de creusets et de coupelles, permettant d'avoir des exemples concrets des outils utilisés par les artisans de cette époque.

De plus, des sources écrites décrivent ce processus de coupellation, notamment le moine Théophile, au XIIe siècle, qui donne une description des étapes pour mener à bien une coupellation.

Durant cette semaine, nous avons donc essayé de reproduire des analogues aux objets archéologiques, en créant un four, des coupelles et des creusets en se rapprochant le plus possible des artefacts retrouvés en fouilles. Les objectifs étaient de valider les observations faites sur les sites archéologiques, de valider l'utilité de la cendre d'os dans les coupelles, d'évaluer la difficulté des savoir-faire nécessaires à la coupellation, de caractériser l'efficacité de la purification des alliages et de pouvoir faire des analyses sur des échantillons prélevés.

I) Etat de l'art

a) La coupellation, technique¹

Le but de cette technique est de séparer les métaux les moins nobles du métal recherché. Pour cette semaine d'expérimentation, les sources textuelles et archéologiques sur lesquelles nous nous sommes appuyés décrivent l'essai et l'affinage de l'argent ou de l'or.

Il faut savoir que pour séparer ces deux métaux, la coupellation n'est pas possible, excepté par le complexe procédé de l'inquartation². On a recours à un autre procédé, la cémentation³: on place de fines feuilles d'AgAu dans un mélange de NaCl et de terre cuite broyée, puis après cuisson sous la température de fusion des deux métaux, l'argent est « tiré » de l'or par formation d'AgCl (éliminé à la fin de l'opération).

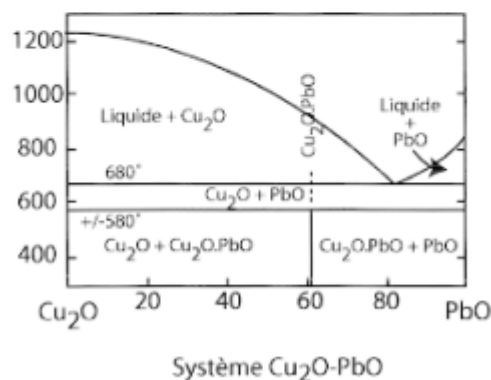
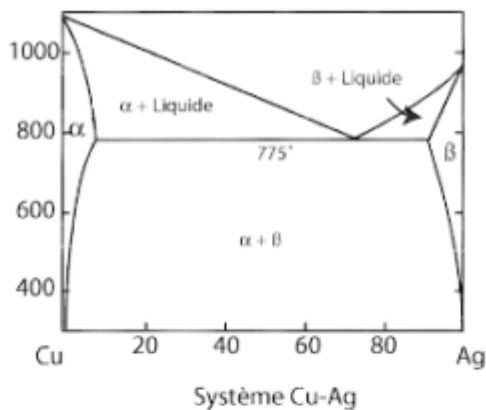


Fig. 1 : Diagrammes de phase Cu-Ag et Cu₂O-PbO, d'après Gebhardt E. et Obrowski, W. Z. Metall., 45, (1954).

Dans notre cas nous cherchons, par coupellation, à séparer l'argent du cuivre d'un alliage contenant ces deux espèces.

Cette technique s'appuie sur la capacité de l'argent (et de l'or) à ne pas s'oxyder à hautes températures (plus de 800°C) contrairement au cuivre (et autres métaux « moins nobles »). Une fois porté à 1200°C à l'air le cuivre oxydé devient liquide et moins dense, sort de l'alliage en fusion ; le souci étant qu'il est difficile d'obtenir de telles températures. Or comme le montre les diagrammes⁴ ci-contre, l'ajout de plomb dans l'alliage à hauteur de 90-80% fait chuter le point de fusion de l'alliage et des oxydes, permettant cette réaction d'oxydation puis d'élimination du bain métallique bien plus facilement (on chauffe moins).

¹ Nicolas Thomas, Florian Téreygeol ; 2003

² <https://www.911metallurgist.com/blog/inquartation>

³ <https://www.orobel.biz/info/32790#:~:text=L'affinage%20de%20l'or%20par%20C%3%A9mentation%20avec%20le%20sel.&text=Avec%20le%20chauffage%2C%20l'argent,or%20ne%20devrait%20pas%20fondre.>

⁴ Nicolas Thomas, Florian Téreygeol ; 2003



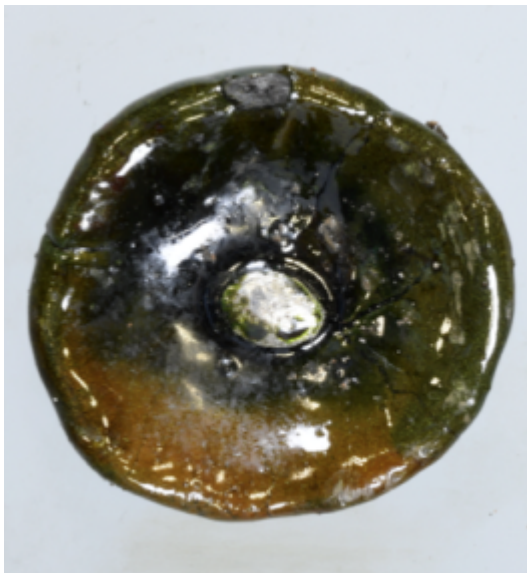
Dans les faits, il faut donc toujours s'assurer que le bain métallique contient au moins 80% de plomb dans sa composition et de maintenir une température de 800 °C au minimum.

En effet, si la température est trop basse, le bain métallique se recouvre d'une pellicule solide et interdit tout échange avec l'air : ce qui empêche toute réaction oxydante (les oxydes combinés avec la silice ayant une structure amorphe, ils restent liquides plus longtemps que l'alliage).

Fig 2 - Oxydes sortant du bouton en fusion et se déposant dans la coupelle

Si le bain ne contient pas assez de plomb, la réaction n'a pas lieu, en effet, le bain ne « court » plus. Ce qui signifie qu'on ne voit pas de dégagement d'oxydes à sa surface, ce qui lui donne un effet de mouvement.

De plus, si durant le traitement ou à cause d'une erreur de dosage, la teneur en plomb descend en-dessous de 80%, une légère baisse de température entraîne la solidification du CuO et donc l'incapacité de cet oxyde à être absorbé par la coupelle (qui pendant ce temps-là, se gorgera de PbO jusqu'à saturation, rendant l'opération inutile).



Cependant, si l'on ajoute trop de plomb, on constate un allongement de la durée du traitement qui peut entraîner une perte d'argent (et l'augmentation du coût de l'essai).

L'argent ainsi purifié se retrouve au milieu de la coupelle sous la forme d'un « bouton », et lorsqu'il est très pur, on peut le voir très brillant dans la coupelle au milieu du bain d'oxydes fondus : c'est l'éclair d'argent. Le mélange d'oxydes de plomb et de cuivre une fois sortis du bain métallique en fusion dans la coupelle réagit avec la silice qu'elle contient pour former un composé amorphe, une fois refroidi, ce composé est assimilable à une « glaçure ».

Fig 3 - Exemple d'une coupelle après coupellation (XP-2023-2-3)

b) La coupellation, historique.

Les traces qui ont été retrouvées au Moyen-Orient, et plus particulièrement à Uruk, nous laissent à penser que la coupellation était déjà pratiquée il y a environ 5000 ans⁵. Puis le procédé est évoqué dans les textes grecs⁶ (chez qui la métallurgie de l'argent nous est plutôt bien connue⁷), arabes⁸ ou asiatiques. C'est le moine Théophile avec son *Essai sur divers arts* qui va diffuser la technique auprès des élites, et deviendra sous Philippe de Valois, en 1343 la seule méthode d'essai conseillée pour les monnaies.

Le titre (taux de métal précieux dans l'alliage) était déterminé par la différence de masse entre l'alliage placé dans la coupelle et la masse du bouton récupéré après coupellation. Le but étant de renforcer la confiance dans une monnaie métallique qui, dans son alliage constitutif, contient de plus en plus de cuivre au fil du temps. Dans la littérature, à partir du bas Moyen-Âge et de la Renaissance, ce genre de coupelles de terre est parfois également appelé *scorificatoires* et sert à divers essais en milieu oxydant (notamment de minerais).

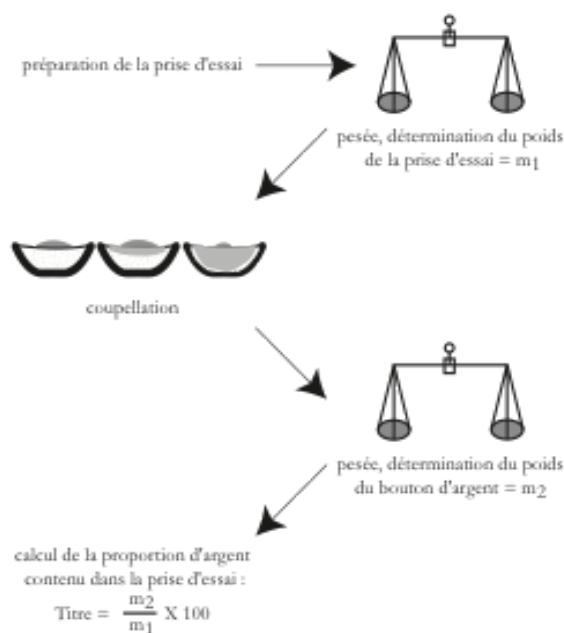


Fig 4 - Obtention du titre d'un alliage⁹

Fig. 84. La coupellation comme technique d'analyse (essai).
Schéma de Nicolas Thomas.

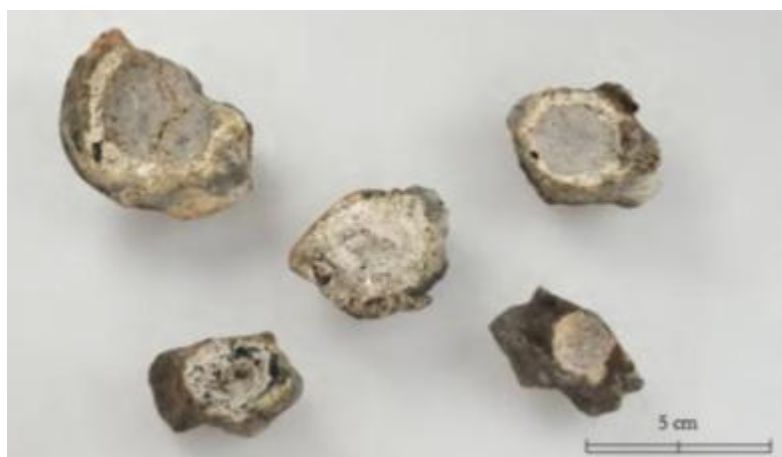


Fig 5 - Coupelles retrouvées sur le site d'Oostvleteren (Be)¹⁰.

⁵ Ernst Pernicka, Thilo Rehren, Sigrid Schmitt-Strecker ; 1998

⁶ Dont le papyrus de Leyde, daté du 3-4^e siècle de notre ère.

⁷ Constantin.E Conophagos ; 1989

⁸ Nicolas Thomas, Florian Téreygeol ; 2003

⁹ Lise Saussus, Nicolas Thomas 2019

¹⁰ Ibid

Sur plusieurs sites étudiés dans l'Europe médiévale, de la Baltique à la France, (notamment Helgö, Winchester, Locronan, Blois ou Oostvleteren) et ce quelles que soient les formes de coupelles, quelques constantes semblent se dégager. On trouve des oxydes vitrifiés noirs, rouges ou verts sur la surface intérieure de la coupelle, mais très peu à l'extérieur. Des dépôts jaunâtres, blanchâtres, verdâtres pulvérulents sur différentes parties des coupelles avec parfois des inclusions de charbons, ce qui indique la position du feu au-dessus et non au-dessous de la coupelle. On constate également le négatif du bouton d'argent dans la couche d'oxydes. Les bords du bouton présentent parfois des irrégularités qui indiquent la présence de soufflets. L'angle entre les deux tuyères a été estimé entre 20 et 30°.

VII. Les coupelles et l'effigie de l'argent par coagulation

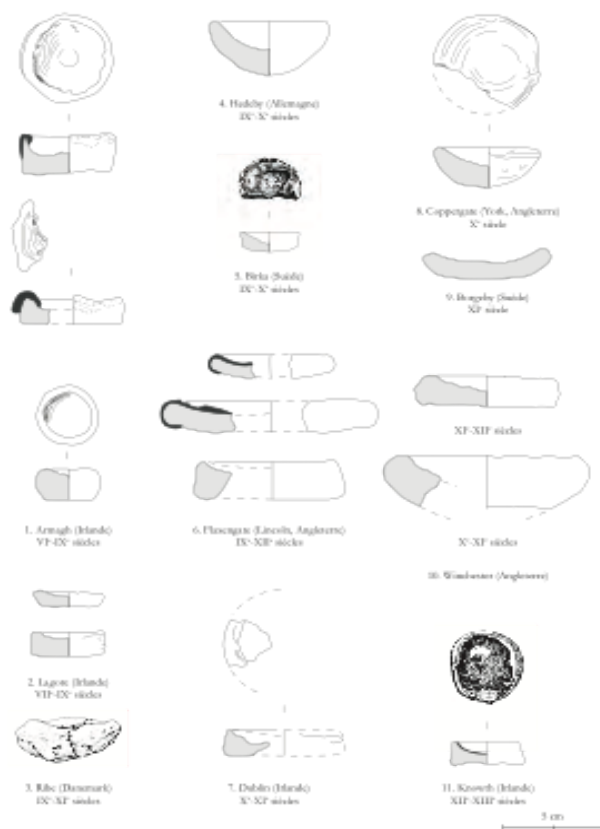


Fig. 81. Coupelles de différents sites, datées de VI à XII siècles. 1. D'après BROWN, H. 1994, p. 147. 2. D'après COHEN, 2004, p. 157. 3. D'après BROWN, 1984, p. 27. 4. D'après MORRIS, et al., 2012, p. 180. 5. D'après JENSEN, 2004, p. 115. 6. D'après BROWN, 1984, p. 28. 7. D'après BROWN, 1989, p. 5. 8. D'après BROWN, 1992a, p. 730. 9. D'après BROWN, 1995, p. 217. 10. D'après BROWN, 1996, p. 180. 11. D'après HARRISON, et al., 1991, p. 117.

Les vestiges archéologiques assimilés à des coupelles ont des tailles, des formes, et des compositions très différentes selon le site et l'époque dont elles nous sont parvenues. Dans le cas des fouilles d'Oostvleteren¹¹, l'un des exemples les mieux documentés, 76 fragments de coupelles ont été retrouvés, avec 23 spécimens complets et 13 autres identifiables. Ici, les coupelles sont circulaires à hauteur de 54% (28 spécimens) pour 32% (8 spécimens) de forme ovoïdes, voir quadrangulaires (pour 14% indéterminées). A propos des dimensions, leur diamètre est compris entre 25 et 70mm pour les circulaires, les quadrangulaires et ovoïdes ayant des côtés compris entre 57 et 28mm. La paroi de terre a une épaisseur comprise entre 4 et 16mm, avec en général les bords plus fins que le fond, enfin leur profondeur s'échelonne entre 1 et 7mm.

Fig 6 - Dessins des coupelles retrouvées sur divers sites archéologiques européens.

¹¹ Ibid

La terre utilisée pour la fabrication de coupelles est parfois extraite à proximité plus ou moins directe du site où la coupellation est attestée. Dans le cas du site d'Oostvleteren, il s'agit de terres de type limon argileux, avec de fortes teneurs en silice (environ 80% de SiO_2) sous forme de quartz qui leur confère une propriété réfractaire (matériau qui absorbe et restitue facilement la chaleur sans trop modifier sa structure). On y trouve également d'autres composés comme de l'Alumine (Al_2O_3) à hauteur de 2% et de l'oxyde de fer (Fe_2O_3) à hauteur de 5%. Il est aussi à noter que ces terres sont souvent dégraissées, grâce à l'ajout de matière organique et/ou de sable.

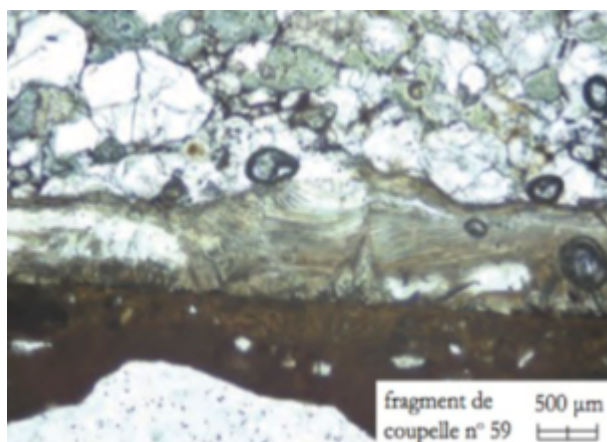


Fig 7 - Vue en coupe sur lame mince d'une coupelle archéologique trouvée sur le site d'Oostvleteren¹².

- Haut : Masse en cours de vitrification riche en quartz, craquelée par la chaleur.
- Milieu : Glaçure avec une structure proche d'un fluide (vitrifiée presque intégralement) et quelques restes de quartz.
- Bas : Croûte brun foncé amorphe avec quelques grains de quartz.

Cependant, ces coupelles présentent, comme nous l'avons expérimenté, certaines restrictions d'usage sur la taille des prises et donc la fiabilité des tests devient limitée. En effet, la sensibilité des appareils de mesure peut avoir un impact important : une erreur de 0,1g lors de la pesée représente 10% sur une prise de 1g, alors qu'elle représente 1% pour 10g d'alliage à essayer. Les premiers essayeurs ont donc dus être confrontés à cette faible quantité d'alliage à tester, car le dégagement d'oxydes est parfois tel qu'il déborde de la coupelle (suivant ses parois grâce à la différence de tension de surface). Ces oxydes attaquent les coupelles, se combinant avec la silice contenue dans la terre (processus de vitrification), et finissent parfois par les percer, en emportant le métal.

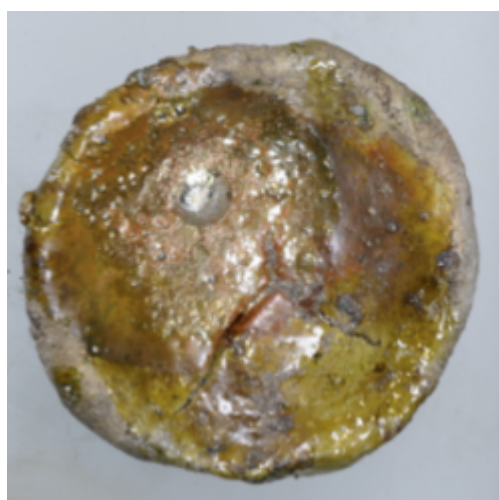


Fig 8 - Coupelle percée avec fuite d'argent dans le four (XP-2023-2-4)

¹² Ibid

Bien que l'une des premières traces écrites connue de l'usage de cendres dans ce contexte soit le traité du moine Théophile, on a retrouvé à Silchester¹³ (UK) des éléments de four de coupellation avec des traces de composés provenant de cendre d'os. Cette cendre évite la combinaison des oxydes de plomb aux silicates et ainsi leur vitrification (un procédé similaire est utilisé pour l'élaboration des glaçures au plomb à la même époque¹⁴), cette vitrification peut polluer la surface, voire « noyer » le bouton d'argent (ou d'or) qui devient plus compliqué à extraire et à peser avec certitude. De plus, la tension de surface du métal en fusion l'empêche de s'enfoncer dans la cendre. En revanche, la tension des oxydes étant plus basse, ceux-ci diffusent dans la cendre, permettant non seulement de ne pas polluer la surface du bouton mais également d'optimiser le coût d'un traitement, car pour la même quantité de métal une seule coupellation en remplace 3 voir 4 avec des coupelles sans cendres (utilisant donc moins de coupelles, moins de combustible et moins de temps).



Fig 9 - Creuset rempli de cendre d'os (XP-2023-20-1)

Peu à peu, la technique s'affine, l'usage de cendre d'os devient systématique et la fabrication de coupelles évolue. Les cendres humidifiées sont placées dans un moule nommé moine/none¹⁵, puis compressées, ne nécessitant plus aucune terre pour leur fabrication.



Fig 10 - Images prises lors d'un chantier d'archéologie expérimentale¹⁶ sur des coupelles de cendre dans un four à tirage par convection.

¹³ William Gowland ; 1900

¹⁴ Claire Hanusse, Marie Leenhardt, Nicole Meyer-Rodrigues, Lucy Vallauri ; 1996

¹⁵ Nicolas Thomas, Florian Téreygeol ; 2003

¹⁶ Ibid



Le glas de cette technique d'essai commence à être sonné au XVIIIe siècle¹⁷, notamment suite aux travaux résultant des expériences de Mathieu Tillet, alors inspecteur général des essais et affinages, publiés en 1761, 1763 et 1769. Jean-Pierre D'Arcet, son adjoint, démontra quelques décennies plus tard l'inadéquation de la technique notamment à cause des pertes de métal, de son imprécision et l'hétérogénéité des alliages d'argent à bas titre. Enfin au début du XIXe siècle, la technique est peu à peu abandonnée au profit de l'essai par voie humide inventé par Gay-Lussac en 1828¹⁸. On pèse l'alliage à essayer avant de le dissoudre dans de l'acide nitrique, ensuite l'argent précipite totalement grâce à l'ajout de chlorure de sodium et il ne reste plus qu'à peser l'argent pur ainsi récupéré pour obtenir le titre de l'alliage de départ¹⁹.

Fig 11 - L'ouvrage de J. Gay-Lussac présentant la technique qui remplacera la coupellation.

¹⁷ Laurence Calmels ; 2002

¹⁸ Joseph Louis Gay-Lussac ; 1832

¹⁹ <https://www.universalis.fr/encyclopedie/essais-or-et-argent/>

II. Méthodes

a) Le four



Fig 12 - Vue du four à soufflets

Pour réaliser les expérimentations qui permettent une approche pratique s'appuyant et complétant la documentation exposée précédemment, nous avons commencé par construire un four à soufflets sur le terrain de l'INP. Ce type de four, principalement utilisé pour des fusions oxydantes comme la coupellation, dispose d'un système de ventilation mécanique à air pulsé induit par les soufflets, contrairement aux fours à convection généralement utilisés pour la fusion des métaux non ferreux qui sont naturellement ventilés au moyen d'une sole perforée par laquelle le vent pénètre dans le foyer. L'usage de soufflets permet d'élever la température très localement tout en assurant un apport suffisant en oxygène à la surface du bain pour permettre l'oxydation du métal.²⁰

Pour la construction du four, nous creusons alors un trou d'environ 50 cm de diamètre et 20 cm de profondeur. Nous plaçons quelques briques au centre que nous calons à l'aide de sable afin de créer une plateforme. Nous ajoutons une brique de part et d'autre du foyer destinée à caler les tuyères en terre cuite des deux soufflets. Nous recouvrons ensuite le foyer d'un mélange de sable, de terre et d'eau. Nous fixons les tuyères sur les briques avec de l'argile blanche grossière. Ensuite, nous installons des rangées de briques pour soutenir chaque soufflet. Nous disposons de l'autre côté du foyer plusieurs briques que nous calons avec de la terre et du sable afin d'obtenir une surface plane dont nous vérifions l'horizontalité grâce à un niveau à bulle. Cette plateforme a pour utilité d'y déposer la lingotière dans laquelle sera versé le métal en fusion.

²⁰ Paul Benoît, Nicolas Thomas, 2010

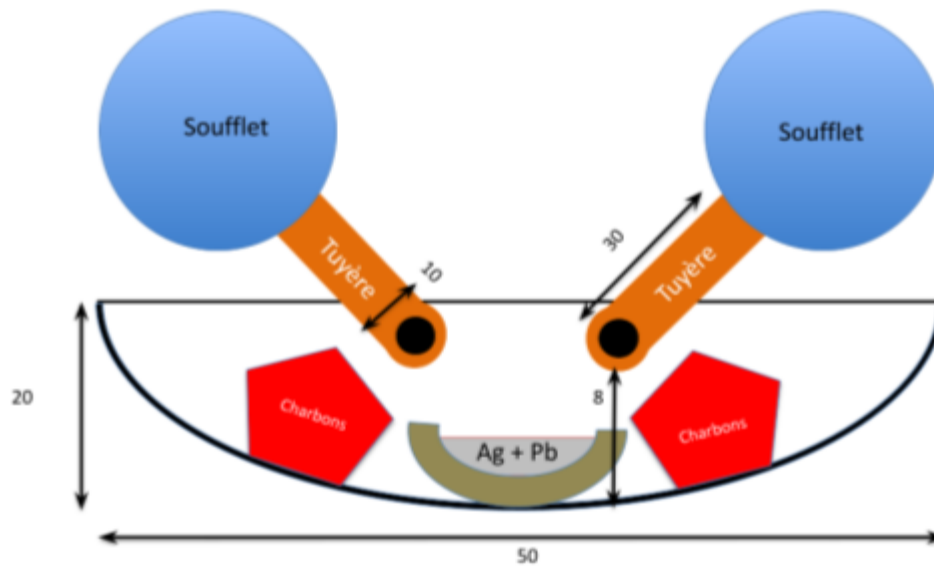


Fig 13 - Vue en coupe du four à soufflets avec une coupelle placée au centre du foyer

Nous utilisons des morceaux de charbon de bois d'environ 10 cm comme combustible pour le four à soufflets. Ces morceaux, rendus incandescents par la ventilation transmettent la chaleur à la coupelle par conduction et par rayonnement.

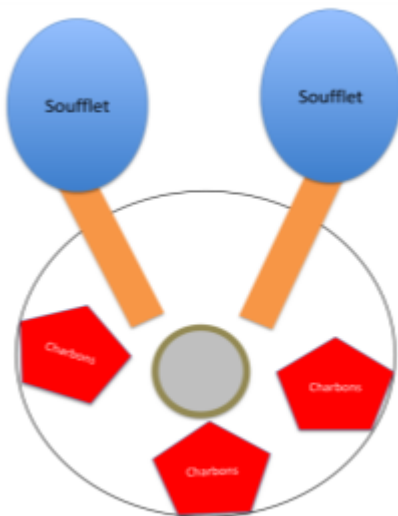


Fig 14 - Vue du dessus du four à soufflets

A partir du deuxième jour, après avoir constaté qu'un grand nombre de coupelles (qui étaient utilisées crues) se fissuraient lorsqu'elles étaient placées dans le foyer du four à soufflets, nous décidons d'utiliser un four de préchauffage des coupelles afin de minimiser les chocs thermiques lors de leur placement dans le foyer du four à soufflets. Ce four de préchauffage se compose de deux plaques posées sur des briques. Il est alimenté par du bois de récupération provenant de cagettes ou de palettes.



Fig 15 - Four de préchauffage

b) Préparation des alliages pour les prises d'essai et du plomb à ajouter



Pour faire les expérimentations de coupellation, nous avons besoin de préparer des alliages avec des concentrations en argent et en cuivre bien définies afin de pouvoir tirer des interprétations de nos résultats. Nous pesons alors les billes d'argent et les plaques de cuivre que nous découpons de sorte à obtenir des proportions de 90% d'argent pour 10% de cuivre et nous plaçons le tout dans des sachets étiquetés.

Fig 16 - Table de préparation des essais, qui se trouvent dans des sachets

Ensuite, le manipulateur met la ou les plaques de cuivre d'un sachet dans un creuset au milieu des charbons incandescents du four à soufflets pour faire fondre le cuivre puis, ajoute les billes d'argent enveloppées au préalable dans un papier absorbant. Lorsque tout le métal est en fusion, il saisit le creuset avec une pince et verse son contenu dans la lingotière placée sur la rangée de briques bien horizontale. Après refroidissement, l'alliage ainsi obtenu est laminé puis découpé pour en faire des prises d'essai d'environ 5g.



Sur cette photo, le creuset contenant le cuivre se trouve au milieu des charbons tandis que la papillote de billes d'argent se trouve dans un bol sur la rangée de briques à côté de la lingotière.

Fig 17 - Vue du four

Par ailleurs, nous avons également besoin de préparer en amont des morceaux de plomb ayant une masse précise. Nous faisons principalement des morceaux de 2,5g et de 5g mais aussi certains de 10g pour une expérimentation particulière : l'expérimentation dans un creuset rempli de cendre d'os, selon la technique expliquée par le moine Théophile.



Fig 18 - Prises de plomb

Concernant la quantité de plomb, Théophile reste imprécis dans son *Essai sur divers arts*: "Mettez l'argent et par-dessus un peu de plomb [...] si vous vous apercevez que l'argent n'est pas encore pur, remettez du plomb."²¹

Une autre indication se trouve dans *L'Art de l'essayeur* de Riche et Gélis, qui fournit les quantités de plomb nécessaires selon les alliages. C'est ce tableau que nous suivons durant nos expérimentations, étant donné que nous avons des alliages contenant 90% d'argent et 10% de cuivre, nous multiplions par 7 la masse des prises pour obtenir la quantité de plomb à ajouter.²²

Titres de l'argent.	Quantités de cuivre alliées à l'argent suivant les titres correspondants	Doses de plomb nécessaires pour l'affinage complet de l'argent.	Rapport qui existe dans le bain entre le plomb et le cuivre.
Argent à 1000 mill	0	3/10	0
— 950 —	50	3	60 à 1
— 900 —	100	7	70 à 1
— 800 —	200	10	50 à 1
— 700 —	300	12	40 à 1
— 600 —	400	14	35 à 1
— 500 —	500	de 16 à 17	32 à 1
— 400 —	600	de 16 à 17	26.666 à 1
— 300 —	700	de 16 à 17	22.857 à 1
— 200 —	800	de 16 à 17	20 à 1
— 100 —	900	de 16 à 17	17.777 à 1
1	999	de 16 à 17	16.016 à 1
Cuivre pur.	"	de 16 à 17	16 à 1

Fig 19 - Tableau indiquant les doses de plomb nécessaires pour un affinage complet de l'argent en fonction des teneurs d'argent et de cuivre de l'alliage

²¹ Théophilus. *Essai sur divers arts*. Editions paleo, 2000

²² Riche.A. Gélis.E. *L'art de l'essayeur*. 1888.

c) Fabrication des coupelles

Les premiers jours, nous disposions de quelques coupelles circulaires et rectangulaires issues du précédent module d'archéologie expérimentale sur la coupellation de l'argent qui avait eu lieu en 2019. Cependant, nous avons besoin d'un nombre bien plus important de coupelles. C'est pourquoi, nous entreprenons d'en fabriquer à partir de terre rouge additionnée de sable de Fontainebleau qui est très fin. Pour ce faire, nous pétrissons la terre afin d'éliminer un maximum de grumeaux puis nous en faisons des pâtons que nous laissons ensuite sécher car la terre était trop humide pour être travaillée directement. Nous façonnons des coupelles circulaires d'environ 4cm de diamètre et 1cm de profondeur mais également quelques coupelles rectangulaires du même ordre de grandeur puis nous les plaçons dans le four de l'atelier céramique et nous sélectionnons un programme de séchage lent (sur deux heures). Quelques coupelles et le creuset de 8cm de diamètre destiné à l'expérimentation "à la Théophile" sont fabriqués à partir d'argile blanche grossière. En effet, Théophile mentionne les coupelles de terre cuites recouvertes de cendres d'os: *"Tamisez des cendres, les mêlant à l'eau; prenez un vase en terre éprouvé au feu, [...] mettez-y les cendres, légères au milieu, épaisses autour du bord, et séchez aux charbons."*²³



Fig 20 - Exemples de coupelles

²³ Théophrastus. *Essai sur divers arts*. Editions paleo, 2000, p.108



Fig 21 - Exemples de coupelles

Sur certaines coupelles, de la cendre d'os pilée est appliquée, généralement au doigt, en couche plus ou moins épaisse et souvent pressée. Ce procédé s'appelle le facing. La cendre d'os, parfois mentionnée dans les écrits médiévaux, permet d'éviter que l'oxyde de plomb rouge la coupelle et la perce. Nous souhaitons donc par nos expérimentations comparer les résultats entre les coupelles qui contiennent de la cendre d'os et celles qui n'en contiennent pas.



Fig 22 - Coupelles avec ou sans cendre d'os en cours de préchauffage

d) Les différents postes



Fig 23 - Vue d'ensemble d'une coupellation en cours

Pour mener à bien les expérimentations, chacun de nous (élèves et encadrants) occupe un des postes que nous allons décrire et nous échangeons régulièrement de sorte à ce que nous puissions tous les expérimenter.

Premièrement, l'un de nous s'occupe de manier les soufflets, ce qui requiert une certaine technique et de la coordination afin d'assurer une ventilation constante. Pendant qu'une main se referme pour joindre les baguettes tout en s'abaissant de sorte à propulser l'air dans la tuyère, l'autre main doit s'ouvrir et se lever pour remplir l'autre soufflet d'air. Cette personne doit adapter son rythme en fonction du stade de la coupellation. Ce poste peut se révéler assez fatigant lorsqu'il faut maintenir un rythme soutenu pendant plus d'une dizaine de minutes, c'est pourquoi il arrive régulièrement qu'une autre personne prenne le relais. De plus, nous avons mis du temps avant de trouver comment s'installer de façon suffisamment confortable pour ne pas ressentir trop de douleurs dans les jambes. Il faut ajouter à cela, que le vent dirige parfois la chaleur et la fumée dans la direction de cette personne qui ne peut se décaler. Elle s'équipe alors d'un tablier de forgeron et peut porter un masque doté d'une grille pour se protéger.

Le manipulateur, qui s'équipe de la même façon et enfile aussi des gants de forge, était chargé de manipuler les coupelles, les charbons et le métal à ajouter à l'aide de différentes pinces en fer. Il doit s'assurer de toujours pouvoir apercevoir le métal dans la coupelle malgré les charbons qui la recouvraient pour surveiller l'état de celui-ci. Ce poste demande de manipuler calmement et délicatement les coupelles afin de ne pas les casser ou les renverser.

Un assistant portant les mêmes protections que le manipulateur, l'aide à positionner correctement les charbons surtout pour découvrir puis recouvrir rapidement la coupelle lorsque le manipulateur dépose du métal dans celle-ci.

Une autre personne consigne toutes les informations concernant une expérimentation (type de coupelle, heure de début, masse de l'alliage de départ, masse de plomb ajouté et l'heure de chaque ajout, etc.) sur une fiche élaborée par nos encadrants. Cette personne a besoin d'être très attentive à ce qui se passe pendant la coupellation pour éviter les erreurs et les oublis.

Puis, deux photographes sont chargés de prendre en photo les différentes étapes du processus de coupellation en lui-même mais également les autres activités afin de documenter notre travail. L'un dispose d'un Nikon D850 permettant de faire des photos de près de bonne qualité tandis que l'autre a un Nikon D5500 plutôt destiné à faire des photos avec davantage de recul. Une personne doit aussi photographier les coupelles après les expérimentations avec le Nikon D850. Ce poste nécessite de connaître les différents réglages des appareils photos afin d'être capable d'adapter rapidement l'exposition, et le cadrage à chaque situation, en particulier pour arriver à obtenir une photo du bouton d'argent en train d'être purifié de bonne qualité.

e) La coupellation

Nous pouvons de nouveau nous référer au moine Théophile, qui décrit la coupellation dans son *Essai sur divers arts*. Une fois les cendres appliquées sur la coupelle, et après avoir placé cette dernière dans le four, il dit: "*Mettez l'argent et par-dessus un peu de plomb; jetant des charbons dessus, fondez*". Il indique ensuite qu'il faut retirer toutes les scories qui surnagent sur le métal et souffler "*doucement à longs traits*". Il faut ensuite ajouter du plomb jusqu'à ce que l'argent soit pur.²⁴

La coupellation en elle-même commence avec une distribution des rôles cités précédemment. Nous devons également anticiper les outils et les matériaux nécessaires à l'opération avant de commencer: fiche, appareils photos, tablier et casques pour ceux se trouvant près du foyer, alliage et prises de plomb.

Tout d'abord, nous devons allumer le foyer, nous avons constaté qu'il fallait environ une poignée de charbon pour mener à bien une coupellation. Ensuite, il faut prendre à l'aide d'une pince une coupelle se trouvant sur le four de préchauffe. Cette coupelle est d'abord posée à une certaine distance du centre du foyer, et rapprochée progressivement vers la zone la plus chaude. Cette étape de préchauffage dure environ 10 à 15 minutes. Nous avons constaté qu'il est essentiel de ne pas rapprocher plus vite la coupelle afin de ne pas la fissurer. Durant cette étape, le souffleur va progressivement de plus en plus vite afin de monter graduellement en température.

²⁴ Théophilus. *Essai sur divers arts*. Editions paleo, 2000.



Fig 24 - Préchauffe d'une coupelle

Une fois la coupelle au centre, à distance égale entre les tuyères, le manipulateur place l'alliage au centre de la coupelle à l'aide d'une pince et recouvre immédiatement cette dernière de charbon. Le souffleur doit alors accélérer le rythme, afin d'atteindre une température suffisante pour faire fondre le métal. Le manipulateur doit s'assurer de toujours voir le métal pour surveiller son évolution.



Fig 25 - Alliage placé dans la coupelle



Fig 26 - Foyer recouvert de charbons

Une fois le métal en fusion, les charbons sont soulevés brièvement afin d'introduire une quantité de plomb. Le plomb abaisse alors le point de fusion de l'alliage, et commence alors réellement la coupellation. A la surface du bouton en fusion est alors visible une couche d'oxyde, qui va peu à peu être absorbée par la coupelle.

Fig 27 - Bouton en fusion, avec oxydes à la surface



Il faut ajouter du plomb jusqu'à oxyder entièrement le cuivre et donc obtenir de l'argent pur. On observe alors "l'éclair d'argent", moment où l'argent devient pur; il apparaît alors brillant tel un miroir. On diminue alors progressivement l'apport en air jusqu'à s'arrêter complètement. Cette opération dure en moyenne 10 minutes entre l'ajout de l'alliage dans la coupelle et l'arrêt de l'apport d'air.

Si la coupellation n'est pas terminée, dans les cas où la coupelle ne peut plus absorber d'oxydes, ou bien qu'elle se soit fissurée, on arrête l'opération.

Fig 28 - Exemple de coupelle ayant explosé dans le four





Fig 29 - Ici le creuset s'est fissuré, le métal est en train de couler progressivement, il faut donc arrêter l'opération pour ne pas perdre tout l'alliage

Le bouton est ensuite retiré de la coupelle, on découpe la coupelle en deux à l'aide d'un micro-tour et le bouton est extrait. Il est parfois noyé dans de l'oxyde, il est alors nécessaire de le poncer légèrement à l'aide de papier abrasif pour retirer les oxydes. Il est ensuite laminé, et un échantillon est prélevé dans le but de faire des analyses. Le reste du bouton est placé dans une nouvelle coupelle afin de continuer la coupellation et l'opération est répétée.

Fig 30 - Découpe d'une coupelle



Fig 31 - Ponçage d'un bouton

Si la coupellation est terminée, on coule alors dans la lingotière le métal, qui sera par la suite pesé. Sa masse sera comparée à celle avant la coupellation, permettant de connaître la teneur en argent de l'alliage.

III. Les résultats

1. Fiche d'expérience

Chaque expérience a été numérotée et mémorisée à l'aide de fiches. La fiche est composée de son numéro d'expérience ; date ; heure de début de coupellation (qui ne prend pas en compte le préchauffage des coupelles) ; heure de fin de coupellation ; notes sur la durée ; objectif de l'expérimentation (dans notre cas toujours le même) ; descriptif de la coupelle (forme, taille, si facing et méthode d'application de ce facing) ; toutes les informations sur le métal (nature de l'alliage, teneur) ; masse de plomb théorique (selon Riche et Gélis) et celle expérimentée ; relevé des températures lors de l'expérience (que nous faisons au pistolet thermomètre) ; toutes les infos sur le bouton coupellé (masse, prélèvement) ; une case pour entrer toutes les observations avec l'heure et la masse de plomb ajouté ; ajout de charbon (nous avons uniquement noté quand un sac de charbon était terminé durant la coupellation) ; description de la coupelle à la fin de la coupellation ; description du/des prélèvements ; deux petites cases à cocher pour préciser que les photos ont été réalisées (coupelle ; bouton avant prélèvement). En voici le modèle :

nb : une expérimentation = XP-1 (à n) ; une séquence de cette expérimentation = XP-1-1 (à n)
conserver numéro de séquence pour la coupelle et le bouton ; si prélèvement : noter PRL à la suite

Expérimentations INP - Juillet 2023 - petit four

n° XP	date	heure début	heure fin	notes sur la durée																
Objectifs de l'expérimentation																				
<table border="1"> <tr> <th>type coupelle</th> <th colspan="2">dimensions</th> <th>facing</th> <th colspan="4">caractéristiques couche de cendre d'os (facing)</th> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> circulaire <input type="checkbox"/> rectangulaire</td> <td>Ø : L :</td> <td>Prof : I :</td> <td>oui / non</td> <td><input type="checkbox"/> applicat* digitale ou : <input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/> fine épaisse</td> <td><input type="checkbox"/> pressée non pressée</td> <td></td> </tr> </table>					type coupelle	dimensions		facing	caractéristiques couche de cendre d'os (facing)				<input type="checkbox"/> circulaire <input type="checkbox"/> rectangulaire	Ø : L :	Prof : I :	oui / non	<input type="checkbox"/> applicat* digitale ou : <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> fine épaisse	<input type="checkbox"/> pressée non pressée	
type coupelle	dimensions		facing	caractéristiques couche de cendre d'os (facing)																
<input type="checkbox"/> circulaire <input type="checkbox"/> rectangulaire	Ø : L :	Prof : I :	oui / non	<input type="checkbox"/> applicat* digitale ou : <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> fine épaisse	<input type="checkbox"/> pressée non pressée														
le métal			températures (pistolet)																	
alliage de départ	composition			heure	t C°															
	teneur en Ag			%																
	teneur en Cu / en Pb (entourez)			%																
	masses																			
	masse de l'alliage de départ			g																
	masse de l'argent			g																
ajout de plomb	rapport théorique (Riche & Gélis)																			
	masse théorique de Pb calculée			g																
	rapport expérimenté																			
	masse totale de Pb expérimentée			g																
bouton	masse du bouton			g																
	masse prélevée post-coupellation			g																
	masse du bouton après prélèvement			g																
heure et masse ajout plomb + autres observations (par ex. accidents, pertes, etc.)				ajouts charbon																
description de la coupelle à la fin de l'opération				photo coupelle																
				<input type="checkbox"/> faite																
prélèvements (observations et n°) :				photo bouton avant prélèvement																
				<input type="checkbox"/> faite																

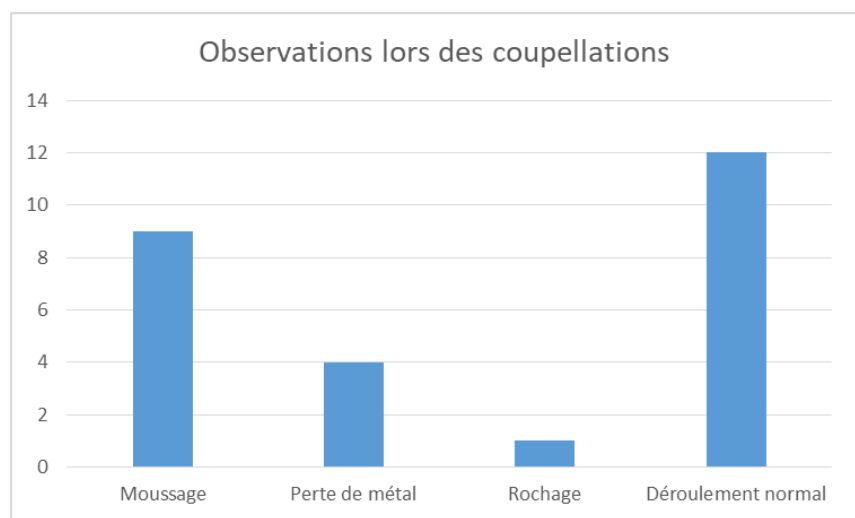
Fig 32 – Fiche vierge

2. Traitement des données

Nous avons retranscrit toutes ces informations dans un tableau Excel (individus/variables) de façon à ce que l'on puisse simplifier le regroupement d'informations et faire des graphiques. Nous avons choisi d'ajouter dans le tableur une colonne "Réussite de la coupellation" (choix : oui ou non). Le terme de réussite a ici le sens de coupellation parfaite, c'est-à-dire qu'il n'y a pas eu de perte de métal, et que le bouton n'est pas mousseux. Nous avons aussi ajouté une colonne pour la spécificité du bouton : normal, moussage, rochage, perte de métal.

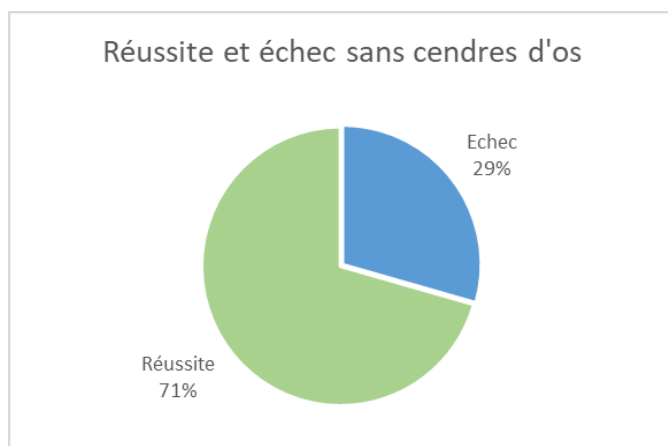
Ainsi, nous avons pu compter le nombre de chaque caractéristique : moussage, rochage, perte de métal ou déroulement normal. Globalement, les coupellations se sont bien déroulées, mais le phénomène de moussage a été relativement fréquent.

Fig 33 - Récapitulatif des observations



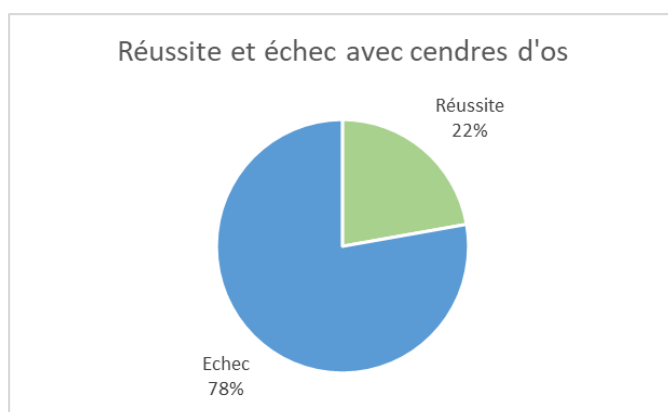
Bien que nous essayions de reproduire les mêmes conditions pour chaque expérience, le résultat a pu varier. Nous allons essayer de déterminer quels facteurs auraient pu créer ces variations.

Fig 34 - Taux de réussite des expériences



Pour débiter, nous nous sommes intéressés au taux de réussite en fonction de la présence ou non de cendre d'os dans la coupelle.

Sur les 17 coupellations réalisées sans cendres d'os, 12 ont été réussies. Tandis que sur les 9 coupellations réalisées avec cendres d'os, seulement 2 ont été réussies.



Nous pouvons donc en déduire que la cendre d'os n'a pas eu forcément un effet positif sur les coupellations lors de nos expériences.

Fig 35 et 36 - Schéma réussite et échec avec et sans cendres d'os

Nous avons cherché à savoir si la pâte céramique utilisée pour la fabrication des coupelles pouvait avoir un impact sur le bon déroulé de la coupellation. Les deux graphiques ci-dessous, révèlent une similitude de résultats, ce qui ne nous permet pas d'établir de corrélation entre la coupellation et la terre utilisée.



Fig 37 et 38 - Taux de réussite des coupellations selon la terre utilisée (blanche ou rouge)

Pour tenter de comprendre le moussage des boutons, nous nous sommes demandé si la cendre d'os pouvait avoir un impact sur ces derniers. Les résultats obtenus ne nous permettent pas de valider d'hypothèse sur cette caractéristique.

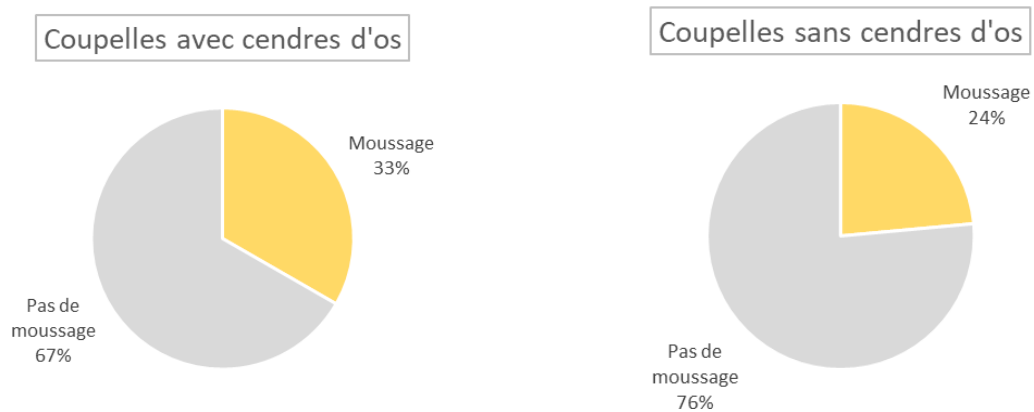


Fig 39 et 40 - Taux de pourcentage de moussage avec ou sans cendres d'os

Les 3 graphiques suivants mettent en relation le moussage d'un bouton avec la masse de la prise, la quantité de plomb ajoutée et la durée de la coupellation. Les résultats obtenus sont très variables et ne montrent pas de corrélation entre ces différents points.

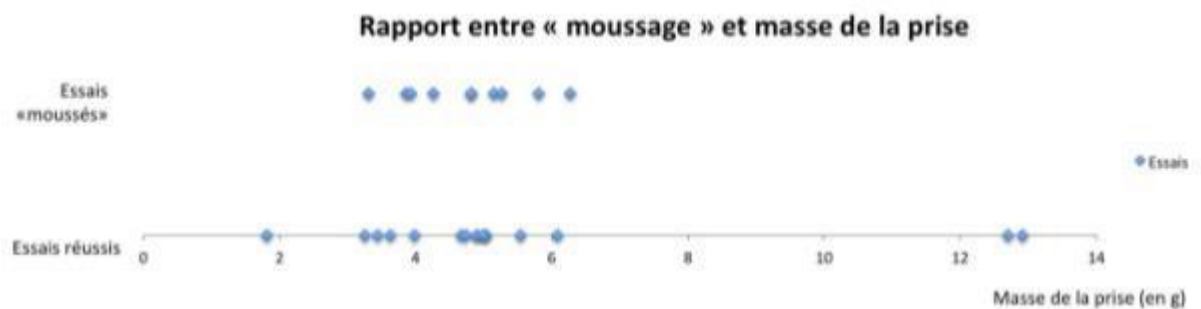


Fig 41 - Diagramme illustrant la relation entre moussage et masse de la prise

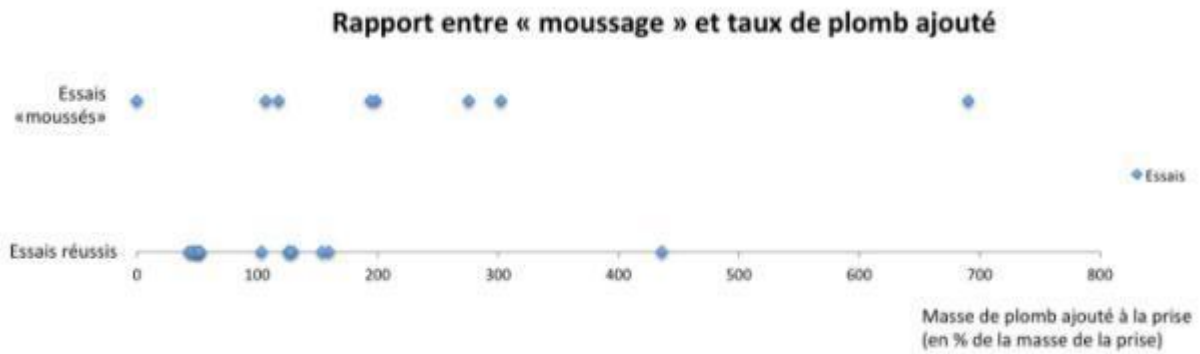


Fig 42 - Diagramme illustrant la relation entre moussage et quantité de plomb ajouté

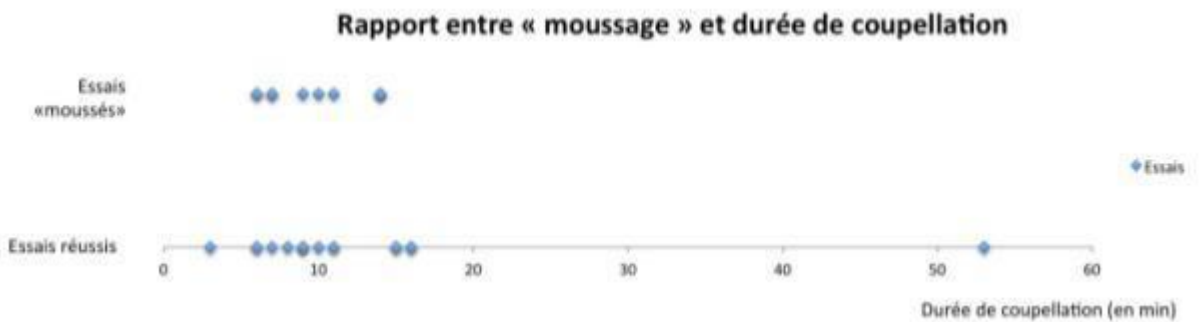


Fig 43 - Diagramme illustrant la relation entre moussage et durée de coupellation

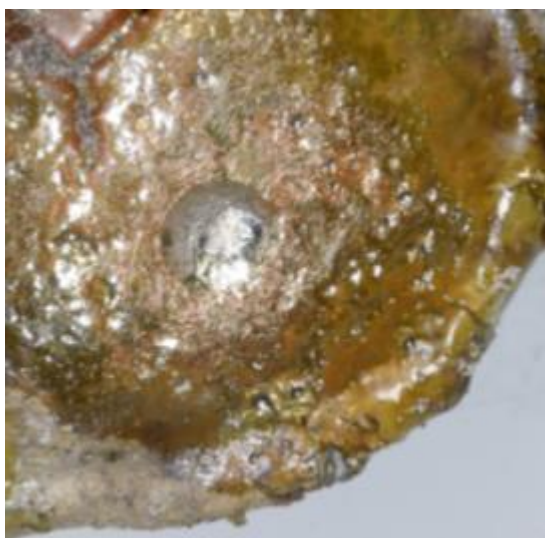
Ainsi, nous n'avons pas pu déterminer quels facteurs auraient pu être à l'origine du phénomène de moussage de bouton.

Pour certaines expériences, nous avons décidé de réitérer le bouton, de façon à l'affiner au maximum. Le choix de la réitération était déterminé par une coupellation qui s'était bien déroulée et un bouton qui était de "bonne qualité", c'est-à-dire bien formé et facile à extraire.

Parfois, un même bouton a été réitéré plusieurs fois. Voici les boutons réitérés :

XP-2023-2	XP-2023-2-1
	XP-2023-2-2
	XP-2023-2-3
	XP-2023-2-4
XP-2023-3	XP-2023-3-1
	XP-2023-3-2
	XP-2023-3-3
XP-2023-4	XP-2023-4-1
	XP-2023-4-2
	XP-2023-4-3
XP-2023-5	XP-2023-5-1
	XP-2023-5-2
XP-2023-6	XP-2023-6-1
	XP-2023-6-2
	XP-2023-6-3

Fig 44 - Boutons réitérés



Lors de l'expérience n°XP-2023-2, nous avons réitéré le bouton trois fois, donc le métal a été coupellé 4 fois. Il s'agit du bouton le plus affiné. Cependant, lors de la dernière coupellation, la coupelle s'est fissurée et du métal s'est échappé au fond du four. Nous avons quand même pu obtenir un petit bouton, que nous voyons sur cette photographie.

Fig 45 - Bouton le plus affiné XP-2023-2-4

Deux expériences différentes ont été réalisées : dans deux creusets de tailles différentes.

L'expérience XP-2023-20-1 était un creuset à la méthode de Théophile, rempli de cendres d'os. La prise était de 12,91g d'alliage et nous avons ajouté 90g de plomb. Le bouton était donc très affiné car nous avons mis la quantité de plomb indiquée par le calcul, de façon à avoir de l'argent pur. Lors de cette expérience, nous avons pu constater un nouveau phénomène, que nous avons appelé le rochage : des protubérances en métal semblaient sortir du bouton.



Fig 46 - Creuset à la Théophile, XP-2023-20-1

Fig 47 - Détail du bouton ayant roché, XP-2023-20-1



L'expérience 2023-21-1 était un petit creuset rempli de cendre d'os.

La prise d'essai était de 12,7 g d'alliage et nous avons pu ajouter seulement 30 g de plomb, car le creuset s'est fissuré et le métal s'est échappé. La coupellation a dû être interrompue.

Fig 48 - Creuset, XP-2023-21-1

3. Quelques aléas

a. Les fissures

Lors de nos cinq jours de manipulation, nous avons rencontré quelques difficultés. La première et la plus fréquente était que les coupelles se fissuraient ou cassaient lorsque nous les mettions dans le four. Nous avons pu émettre quelques hypothèses sur la cause de ce problème : soit les coupelles n'étaient pas totalement sèches (certaines avaient été réalisées quelques jours/heures avant les expériences), soit elles avaient un défaut de fabrication ou bien la différence de température entre la coupelle et le four était trop importante. Pour y remédier, nous faisons sécher les coupelles dans le four de l'école avec le programme séchage (montée progressive de la chaleur jusqu'à 200°C de façon à faire évaporer toute l'eau contenue dans la terre). Ensuite, nous avons mis en place un four de préchauffage, comme précédemment expliqué. Malgré nos efforts, certaines fissuraient quand même lors de la montée en chaleur. Notre méthode n'était alors pas très concluante.



Fig 49-Coupelle fissurée sans perte de matière XP-2023-1-1



Fig 50-Coupelle fissurée avec perte de la prise XP-2023-10-1

b. Moussage ? Rochage ?

Lors de nos 26 essais, 9 ont présenté un curieux faciès lors du refroidissement. Une sorte de cristallisation qui se produit en à peine une seconde dès que la température descend, une fois réchauffée cette curieuse structure reprend l'aspect du bouton dont elle a germé. Il est à relever que ce phénomène est moins récurrent lors d'un refroidissement plus lent, mais il n'a pas toujours été évité par cette intervention.



Fig 51 et 52 - Moussage d'un bouton en cours et détail XP-2023-3-1

Cette image (fig. 51 et 52) capture ici l'instant où le bouton commence à « mousser », s'opacifier et devenir très clair avant de « cristalliser » dans l'oxyde encore liquide à pâteux. On note que lors de cet essai le refroidissement de cette coupelle s'est fait très rapidement et sans être recouvert.



Fig 53 et 54 - Boutons ayant moussés (XP-2023-1-1 et XP-2023-11-1)

Deux exemples de boutons ayant « moussés » gris clair mat, avec une structure s'apparentant à une cristallisation de toute la masse d'alliage AgPb (s'il reste effectivement du plomb après l'essai). Cette formation « en choux fleur » est relativement cohérente et cohésive.



Fig 55 et 56 - Boutons ayant moussés (XP-2023-6-2 et XP-2023-4-3)

Parfois, cette formation étonnante peut ne toucher qu'une partie du bouton (image de gauche) et prendre une apparence plus ou moins claire, cela est probablement dû à la quantité d'oxyde absorbé dans la microstructure lors de cette cristallisation.

Aussi, lors d'un essai nous avons assisté à la croissance de colonnes de plusieurs millimètres au-dessus du bouton (image de droite, le point ocre étant un charbon consumé)

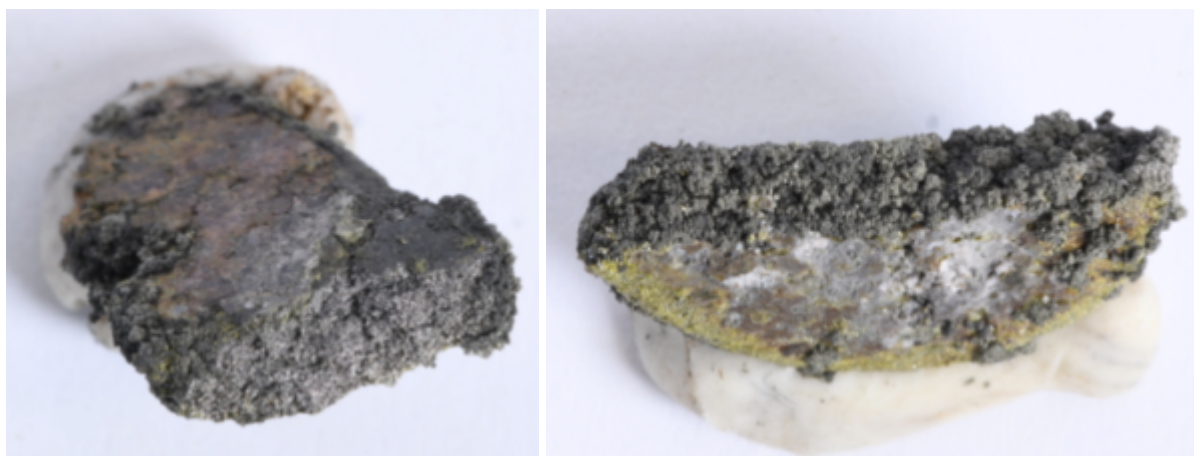


Fig 57 et 58 - Bouton ayant moussé pendant le recuit (N° XP non identifié)

Sur un des essais remis en forme pour être prélevé et re-coupellé, ces cristallisations sont apparues au cours du recuit (aux alentours de 600-800°C) après un laminage, au point d'éclater le bouton en trois fragments. La photo de gauche montre une fissure en train de s'ouvrir à cause de la croissance de ces cristaux, celle de droite l'un des plans de casse du bouton après recuit. Après cette opération, le bouton est friable comme du sucre et les excroissances grises, pulvérulentes.

Mais alors qu'est-il arrivé à ces boutons pour bourgeonner ainsi ? Difficile à expliquer... Nombre de sources ne présentent ni photos ni gravures lorsqu'elles parlent de phénomènes analogues appelés « Argentum Pustulum » ou « Rochage » (dont l'une des traductions anglaises est Cauliflowering littéralement « Chou-fleur-age »).

Voici donc ce que l'on peut trouver dans la littérature à ce sujet :

- Riche et Gélis (*l'art de l'essayeur*, 1888)

L'essai qui a eu trop de plomb, même bien soigné, roche, et en général quand un bouton a fortement roché, on peut en conclure que le rochage n'est pas dû à un manque de soins; l'essai a eu trop de plomb. Le rochage a lieu, en effet, quand l'argent est très affiné ; tous les métaux sont enlevés, l'oxygène se dissout avec une grande énergie. Ainsi, un essai d'or pur in quarté roche, lorsqu'on n'y ajoute pas de cuivre. C'est le cuivre qui empêche le rochage; l'oxygène, au lieu de se dégager, se porte sur le fond de la coupelle et y forme une tache noire d'oxyde de cuivre ; aussi, dans l'essai d'or fin ajoute-t-on toujours 20mg de cuivre.

(...)

Le rochage est difficile à éviter dans les essais d'argent fin. Si on n'y ajoute pas du cuivre comme dans l'essai d'or, c'est qu'en soignant bien l'essai, en ne forçant pas la dose de plomb, on rend le rochage peu intense si on ne l'évite pas tout à fait. Comme on ne bat pas au marteau l'essai d'argent, ainsi que l'essai d'or, on n'a pas à craindre de détacher l'argent du bouton roché.

(...)

L'essai, qui a eu trop chaud, roche. Le bouton se détache mal, il n'est pas sphérique comme s'il avait eu trop de plomb.

- Bugbee (*A textbook of Fire Assaying*, 1922)

La coupelle chaude fait fondre la croûte extérieure d'argent solide et provoque la solidification par le bas. Si cette précaution n'est pas prise, les perles peuvent "germer" ou "cracher". L'action est provoquée par l'échappement soudain de l'oxygène qui est dissous dans l'argent fondu et expulsé lorsque la bille se solidifie. Si on laisse la perle se solidifier rapidement, une croûte d'argent solide se forme à l'extérieur, et comme la partie centrale se solidifie cette croûte est violemment rompue par l'oxygène expulsé, donnant une excroissance en forme de chou-fleur et causant la projection de particules d'argent. En conséquence, les résultats obtenus à partir de billes germées ne sont pas fiables. Les perles contenant un tiers ou plus d'or ne germeront pas même si elles sont rapidement retirées du mouffle. La germination serait une preuve de la pureté de l'argent.

La perle d'argent doit apparaître lisse et brillante sur la surface supérieure, et doit être de couleur blanc argenté et sphérique ou de forme hémisphérique, selon sa taille. Il devrait adhérer légèrement à la coupelle et apparaître givré sur la surface inférieure. Si la perle est lisse sur le fond et n'adhère pas à la coupelle, elle indique la température de finition. Une telle perle contiendra toujours du plomb. S'il a des radicelles qui s'étendent dans les fissures de la cupule, les résultats doivent également être considérés comme peu fiables, car une partie de l'argent peut être perdue dans la cupule.

Ces propos semblent relativement mieux correspondre au phénomène rencontré lors de l'expérience XP-2023-20-1, comme nous l'avons vu précédemment.

Aussi, cette source²⁵ évoque non seulement le phénomène de rochage, mais également un autre appelé « Gel », résultat selon l'auteur d'une température de coupellation trop faible et la formation d'oxyde de plomb à la surface du bouton. Certaines sources²⁶ évoquent la présence de gaz phosphorés lors de la réaction: peut-être une piste à creuser ?

Toujours est-il que ces explications ne semblent pas décrire exactement le même phénomène que nous avons observé et encore moins répondre à notre question. Le seul phénomène analogue que nous avons pu trouver est tiré d'un manuel de soudeur illustrant le rochage à l'envers d'une soudure sur un métal inconnu²⁷.



Fig 59 - Rochage d'une soudure



Une hypothèse n'a dans nos lectures cependant pas été soulevée, celle que le matériau à incriminer ne soit pas l'argent mais le plomb. En effet, celui-ci est placé dans des conditions de températures et d'oxydation telles que des réactions observables dans d'autres contextes du type pourraient être favorisées.

Comme élément de comparaison, ce nodule de plomb affiné produit par électrolyse, bien que les conditions soient très différentes on peut observer le même type de structures que sur nos essais.

Fig 60 - Plomb formé par électrodéposition

²⁵ Bushett, 1905

²⁶ Bugbee, 1922 ; Bushett, 1905

²⁷ <https://www.rocdacier.com/le-rochage/>

c. Conditions climatiques

Les conditions climatiques nous ont été plutôt favorables tout le long de la semaine, sans chaleur extrême. Cependant, le matin du quatrième jour, il y a eu une forte pluie qui nous a empêché de travailler. Nous avons dû installer une grande bâche pour nous protéger mais cela a fait perdre du temps pour récupérer le matériel et nous n'avons pu commencer à manipuler qu'en début d'après-midi. Nous avons donc profité de ce moment pour ranger le matériel, faire des photos, traiter les données... Cette grande bâche de couleur bleue était suspendue au-dessus du foyer, ce qui nous créait une zone d'ombre favorable à la prise de vue mais en revanche, la bâche se reflétait dans les coupelles en donnant une couleur bleutée à nos photographies.

Aussi, le dernier jour étant beaucoup plus ensoleillé, nous avons mis en place une sorte de paravent de façon à créer de la pénombre pour que le rendu des photographies soit plus satisfaisant.

Conclusion

Cette semaine nous a permis une première approche de la rigueur scientifique, du relevé de données et de l'exploitation de celles-ci. Nous avons obtenu des résultats prometteurs, cependant nous avons également rencontré des difficultés, tout d'abord avec le bris fréquents de nos coupelles. Il serait nécessaire d'essayer d'utiliser différents argiles et dégraissants, ainsi que d'autres méthodes de séchage et cuisson, afin de déterminer si le problème provient de la composition de la terre ou bien de la méthode de cuisson. De plus, les coupelles ont été réalisées durant la même semaine que les expérimentations, peut-être faudrait-il les laisser sécher plus longtemps avant de les utiliser. On peut aussi envisager de les cuire avant de les utiliser pour éviter ces casses trop fréquentes. Cependant, nous serons toujours limités, car il est impossible d'obtenir exactement la même terre que celle retrouvée en fouilles. Nous avons également rencontré le phénomène de "moussage" évoqué précédemment, qui nous est arrivé à plusieurs reprises, sans que nous ayons trouvé d'explications formelles.

Nous avons donc à plusieurs reprises soit perdu le bouton d'argent, soit subi ce phénomène de "moussage", ce qui a eu pour conséquence une perte relativement importante de matière. On peut aisément imaginer qu'une telle perte n'était pas envisageable pour un orfèvre, par conséquent il semblerait que la technique utilisée puisse encore être améliorée afin de minimiser cette perte de métal.

Il est également pertinent de noter qu'il s'agit de techniques que nous ne maîtrisons pas et qui devaient se perfectionner au fil des années chez les artisans, il est donc impossible de se rendre compte d'un véritable rendement sur la durée de notre expérience. Notre vision est également partielle, car nous testons uniquement une partie de la chaîne opératoire, en effet, nous ne réalisons pas toutes les étapes préliminaires comme l'extraction et la transformation du minerai.

Nous avons tout de même constaté que notre four était fonctionnel, sans que cela prouve que c'était cette méthode qui était utilisée, cela reste envisageable. Il serait pertinent de poursuivre nos recherches, par exemple en ethnoarchéologie pour éventuellement trouver des exemples actuels se rapprochant de notre four.

Cette expérience nous a permis de travailler en équipe, et nous avons su nous répartir les différents rôles de manière assez équitable.

Ce fut une expérience enrichissante, nous permettant de découvrir des techniques anciennes. De plus, nos deux spécialités, céramique et métal, se sont retrouvées mêlées.

Remerciements

Nous remercions Mr. Nicolas Thomas et Mme. Lise Saussus pour leurs enseignements précieux. Merci d'avoir pris le temps de nous faire découvrir cette technique ancienne et d'avoir partagé avec nous leurs connaissances.

Nous remercions également l'INP et nos professeures, Mme. Martine Bailly et Mme. Marie-Anne Loeper-Attia d'avoir permis l'organisation de cette semaine d'archéologie expérimentale, qui nous a permis une première approche de la recherche scientifique, qui nous sera utile pour les projets futurs, tant au sein de l'INP que dans notre vie professionnelle.



Bibliographie

Agricola G., *De Re Metalica*. 1561.

<https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/btv1b2100086m.item>

Benoît P., Thomas N., *Les fours dans les artisanats du feu autres que céramiques du Ve au XIIe siècle dans l'espace européen*. Dans THUILLIER F., LOUIS É., dir., *Tourner autour du pot... Les ateliers de potiers médiévaux du Ve au XIIe siècle dans l'espace européen*, Actes du colloque de Douai octobre 2010, Caen, Presses universitaires de Caen, 2015, p. 559-567.

https://www.researchgate.net/publication/312918626_BENOIT_P_THOMAS_N_Les_fours_dans_les_artisanats_du_feu_autres_que_ceramiques_du_Ve_au_XIIe_siecle_dans_l'espace_europeen_dans_THUILLIER_F_LOUIS_E_dir_Tourner_autour_du_pot_Les_ateliers_de_potiers_medie

Biringuccio V., *La Pyrotechnie*, 1572.

<https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k52139s/f8.item>

Bushett Evans W., *L'essai des minerais par voie ignée*, article n°669.8. *Le mois minier et métallurgique* n°13, 1905.

[https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k5567262t/f19.item.r=\(prOx:%20%22rochage%22%203%20%22argent%22\).zoom](https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k5567262t/f19.item.r=(prOx:%20%22rochage%22%203%20%22argent%22).zoom)

Calmels L., *La précision des essais d'argent remise en question. Les papiers d'Arcet à la Monnaie de Paris*. *Revue Numismatique*, 2002, Tome 158, p. 5-14.

https://www.persee.fr/doc/numi_0484-8942_2002_num_6_158_1432

E. Conophagos C., *Le Laurium antique : et la technique grecque de la production de l'argent*. Ekdotike Hellados, 1980

Archaeometry: proceedings of the 25th international symposium, p. 271-289, 1989

E. Bugbee E., *A Textbook of fire assaying*. John Wiley & sons, 1922.

<https://ia800308.us.archive.org/35/items/textbookoffireas00bugbrich/textbookoffireas00bugbrich.pdf>

Gay-Lussac J.L., *Instruction sur l'essai des matières d'argent par la voie humide*, Imprimerie royale, 1832.

<https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k90270j/f7.item.texteImage>

Gowland W., *Remains of a Roman Silver Refinery at Silchester*, p. 113-124.

<https://zenodo.org/record/1832230>

Hanusse C., Leenhardt M., Meyer-Rodrigues N., Vallauri L., *L'apparition des glaçures plombifères et stannifères : exemples français*. Actes du VIe Congrès international d'Archéologie Médiévale, 1998. p. 242-248.

https://www.persee.fr/doc/acsam_0000-0000_1998_act_6_1_1154

Jaquet D., Baptiste N., *Expérimenter le maniement des armes à la fin du Moyen Age*. Itinera n°39. Schwabe, 2016.

https://boris.unibe.ch/135367/1/9783796540622_5009.pdf

Pernicka E., Rehren T., Schmitt-Strecker S., *Late Uruk silver production by cupellation at Habuba Kabira, Syria*. Metallurgica Antiqua, 1998

https://www.researchgate.net/profile/Ernst-Pernicka/publication/44159973_Late_Uruk_silver_production_by_cupellation_at_Habuba_Kabira_Syria/links/09e4151040d0baf761000000/Late-Uruk-silver-production-by-cupellation-at-Habuba-Kabira-Syria.pdf

Riche A., Gélis E., *L'art de l'essayeur*, 1888.

<https://play.google.com/books/reader?id=4S4LAQAAIAAJ&pg=GBS.PA26&hl=fr>

Théophilus, *Essai sur divers arts*, Editions paleo, 2000.

Thomas N., Moureau S., *Understanding Texts with the Help of Experimentation: The Example of Cupellation in Arabic Scientific Literature*. Ambix, Vol. 63 No. 2, 2016, p. 98–117.

<https://hal-inrap.archives-ouvertes.fr/hal-01766840/document>

Thomas N., Saussus L., *Un atelier d'orfèvre autour de l'an mil, Travail du cuivre, de l'argent et du fer à Oostvleteren (Flandre occidentale, Belgique)*. Presses Universitaires de Louvain, 2019.

Thomas N., Téreygeol F., *La coupellation*. Pour la science, n°309, 2003

https://www.researchgate.net/profile/Nicolas-Thomas-2/publication/233726126_La_coupellation/links/0912f50aca97ea1acb000000/La-coupellation.pdf

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

https://www.persee.fr/doc/arsci_0399-1237_2003_num_27_1_1053

Thomas N., *Prendre de l'acier pour de l'or. Imaginaire et procédés métallurgiques du Moyen Âge au xviii^e siècle*. Hypothèses 2006. p.175-186

<https://www.cairn.info/revue-hypotheses-2006-1-page-175.htm>

Sitographie :

(par ordre d'apparition, vérifiés le 18/10/2023)

<https://www.911metallurgist.com/blog/inquartation>

<https://www.orobel.biz/info/32790#:~:text=L'affinage%20de%20l'or%20par%20C%203%A9mentation%20avec%20le%20sel.&text=Avec%20le%20chauffage%20l'argent,or%20ne%20devrait%20pas%20fondre>

<https://www.universalis.fr/encyclopedie/essais-or-et-argent/>

Annexe

Annexe 1- tableau des données sur toutes les expérimentations

Nom de l'expérimentation	Date	heure début	heure fin	durée (mn)	type coupelle	diamètre (mm)	profondeur (mm)	longueur (mm)
XP-2023-1-1	20/6/2023	13h55	14h09	14	Circulaire	45	10	
XP-2023-2-1	20/6/2023	14h26	14h32	6	Circulaire	30	9	
XP-2023-2-2	20/6/2023	14h58	15h05	7	Circulaire	35	10	
XP-2023-2-3	22/6/2023	15h10	15h16	6	Circulaire	38	10	
XP-2023-2-4	23/6/2023	12h01	12h16	15	Circulaire	55	10	
XP-2023-3-1	20/6/2023	15h25	15h31	6	Circulaire	40	15	

Nom de l'expérimentation	largeur (mm)	facing	application	épaisseur couche	pressage	alliage de départ	masse de départ (g)	masse argent (g)
XP-2023-1-1		non				Ag 90 Cu10	6,27	5,64
XP-2023-2-1		non				Ag 90 Cu10	5,03	4,53
XP-2023-2-2		non				réitération	3,25	
XP-2023-2-3		non				réitération	3,86	
XP-2023-2-4		non				réitération	1,81	
XP-2023-3-1		non				Ag 90 Cu10	4,82	4,34

Nom de l'expérimentation	masse cuivre (g)	masse théorique de plomb (g)	masse de Pb expérimentée (g)	masse du bouton (g)	masse prélevée post coupellation (g)	masse du bouton après prélèvement (g)
XP-2023-1-1	0,63	43,89	10			
XP-2023-2-1	0,5	35,21	10	4,44	1,17	3,25
XP-2023-2-2			5	4,21	0,34	3,86
XP-2023-2-3			5	1,92	0,11	1,81
XP-2023-2-4			12,5			
XP-2023-3-1	0,48	33,74	5	5,21 (5,14 après laminage)	0,47	4,67

Nom de l'expérimentation	observations	Températures
XP-2023-1-1	14h04: 5g de plomb 14h05: liquide, 5g de plomb 14h09: arrêt avec oxyde autour pour ne pas perdre la coupelle, le métal a formé un cristal gris en moussant (rochage ?)	13h59: 1000° 14h02: 1000/1100° 14h07: 900°
XP-2023-2-1	14h27: métal pâteux 14h29: 5g de plomb 14h30: métal liquide, 5g de plomb 14h32: fissure dans la coupelle, arrêt	14h31: 1000°
XP-2023-2-2	première coupelle fissurée 15h: métal liquide 15h01: 5g de plomb, redevient solide 15h03: oxyde	14h54: 130° 15h04: 800°
XP-2023-2-3	14h50: préchauffe coupelle 15h10: mise de la prise 15h12: métal liquide, 5g de plomb 15h13: oxydation 15h15: mousseux 15h16: liquide puis mousseux, ralentissement soufflerie	15h03: 400° 15h05: 450-500°
XP-2023-2-4	11h50: préchauffe coupelle 12h01: mise de la prise 12h04: métal pâteux 12h05: 2,5g de plomb, métal liquide 12h06: 2,5g de plomb 12h11: 5g de plomb 12h13: fissure coupelle, le métal commence à passer à travers, la coupelle est penchée manuellement 12h14: 2,5g de plomb 12h16: réduction soufflerie 12h17: arrêt, bouton dans la coupelle et métal sur le sol du four	
XP-2023-3-1	15h28: 5g de plomb 15h31: métal mousse	15h19: 400° 15h22: 600° 15h22: 700° 15h23: 800°

Nom de l'expérimentation	description coupelle	réussite	observations bouton
XP-2023-1-1	recouverte d'oxyde à l'intérieur et presque entièrement à l'extérieur, noire, fissurée, percée. le métal est gris, cristallisé, des billes d'argent et du charbon sont emprisonnés dans la glaçure	non	moussage
XP-2023-2-1	coupelle presque entièrement recouverte d'oxyde à l'intérieur et à l'extérieur, noire, fissurée. le bouton a pu être récupéré pour une deuxième séquence d'expérimentation	oui	RAS
XP-2023-2-2	recouverte presque entièrement de glaçure verte/noire à l'intérieur et à peine à l'extérieur, fissurée. bouton d'argent recouvert d'oxyde et présence d'une auréole autour d'environ 3cm	oui	RAS
XP-2023-2-3	complètement glaçurée, beau bouton, petits charbons dans la glaçure	oui	RAS
XP-2023-2-4	3 fissures dans la coupelle, glaçure jaune-verte, petit bouton, le reste est au fond du four	non	RAS
XP-2023-3-1	recouverte d'oxyde, noire, métal cristallisé, charbon dans l'oxyde	oui	moussage

Nom de l'expérimentation	Date	heure début	heure fin	durée (mn)	type coupelle	diamètre (mm)	profondeur (mm)	longueur (mm)
XP-2023-3-2	22/6/2023	16h12	16h22	10	Circulaire	43	14	
XP-2023-3-3	23/6/2023	14h37	14h46	9	Circulaire	57	8	
XP-2023-4-1	20/6/2023	15h46	15h55	9	Circulaire	45	15	
XP-2023-4-2	22/6/2023	16h35	16h41	6	Circulaire	48	10	
XP-2023-4-3	23/6/2023	15h02	15h12	10	Circulaire	58	11	
XP-2023-5-1	20/6/2023	16h23	16h30	7	Circulaire	28	12	

Nom de l'expérimentation	largeur (mm)	facing	application	épaisseur couche	pressage	alliage de départ	masse de départ (g)	masse argent (g)
XP-2023-3-2		non				réitération	4,67	
XP-2023-3-3		non				réitération	3,63	
XP-2023-4-1		non				Ag 90 Cu10	4,26	3,84
XP-2023-4-2		non				réitération	3,98	
XP-2023-4-3		non				réitération	3,31	
XP-2023-5-1		non				Ag 90 Cu10	5,81	5,23

Nom de l'expérimentation	masse cuivre (g)	masse théorique de plomb (g)	masse de Pb expérimentée (g)	masse du bouton (g)	masse prélevée post coupellation (g)	masse du bouton après prélèvement (g)
XP-2023-3-2			5	3,92	0,29	3,63
XP-2023-3-3			10			
XP-2023-4-1	0,42	29,82	5	4,43	0,27	3,98
XP-2023-4-2			5	3,56	0,25	3,31
XP-2023-4-3			10			
XP-2023-5-1	0,58	40,67	2,5	5,95	0,59	5,15

Nom de l'expérimentation	observations	Températures
XP-2023-3-2	15h23: préchauffe, coupelle fissurée 15h36: préchauffe, nouvelle coupelle 15h55: coupelle fissurée 15h56: préchauffage de 4 coupelles 16h14: 2,5g de plomb 16h15: métal liquide, bouillone 16h16: 2,5g e plomb 16h20: ralentissement ventilation	15h33: 500° (coupelle fissurée) 15h48: 400° 15h50: 550° 15h53: 500 (coupelle fissurée) 16h01: 450° 16h04: 500° 16h08: 400° 16h11: 600°
XP-2023-3-3	14h25: préchauffage de coupelle depuis 10-15mn 14h37: mise de la prise 14h39: métal pateux, 5g de plomb, métal liquide 14h42: 5g de plomb 14h46: métal solide, ralentissement de la soufflerie 14h47: arrêt	14h30: 480°
XP-2023-4-1	15h49: 5g de plomb 15h52: métal mousse, se cristallise et redevient liquide 15h53: métal se cristallise 15h54: liquide puis solidifié et recouvert par l'oxyde	15h42: 200° 15h44: 600° 15h54: 950°
XP-2023-4-2	16h27: approche progressive de la coupelle pour préchauffage 16h35: début couellation 16h37: alliage liquide 16h38: 2,5g de plomb, bouillonnement 16h39: 2,5g de plomb 16h41: à peine figé et de nouveau liquide 16h42: bouton sous l'oxyde, arrêt progressif	16h34: 650°
XP-2023-4-3	coupelle déjà préchauffée pendant l'expérimentation précédente (3-3) 15h02: mise de la prise 15h05: 5g de plomb, métal liquide 15h07: 5g de plomb 15h10: métal mousse 15h11: liquide, bouton noyé 15h12: arrêt	15h: 450° 15h02: 650° 15h07: 800°
XP-2023-5-1	16h25: 2,5g de plomb 16h27: on arrête de souffler, le bouton semble noyé sous l'oxyde 16h28: métal mousse, l'oxyde est liquide mais le métal est solide, présence d'une bille d'argent dans l'oxyde. le métal alterne entre solide et liquide 16h30: arrêt	

Nom de l'expérimentation	description coupelle	réussite	observations bouton
XP-2023-3-2	coupelle couverte d'oxyde noir à l'intérieur et un peu à l'extérieur, fissurée	oui	RAS
XP-2023-3-3	terre blanche ??	oui	RAS
XP-2023-4-1	recouverte d'oxyde, noire, métal noyé sous l'oxyde, un peu recristallisé gris	oui	RAS
XP-2023-4-2	coupelle en terre blanche, quasiment recouverte de glaçure verdâtre, bouton noyé sous l'oxyde	oui	RAS
XP-2023-4-3	presque entièrement recouverte d'oxydes jaunes	oui	RAS
XP-2023-5-1	noire d'oxyde, métal noyé sous l'oxyde	oui	RAS

Nom de l'expérimentation	Date	heure début	heure fin	durée (mn)	type coupelle	diamètre (mm)	profondeur (mm)	longueur (mm)
XP-2023-5-2	22/6/2023	16h59	17h13	14	Circulaire	61	10	
XP-2023-6-1	20/6/2023	16h46	16h55	9	Circulaire	48	14	
XP-2023-6-2	21/6/2023	14h05	14h19	14	Circulaire	45	10	
XP-2023-6-3	23/6/2023	15h29	15h40	11	Circulaire	48	13	
XP-2023-7-1	21/6/2023	11h08	11h19	11	Circulaire	45	12	
XP-2023-8-1	21/6/2023	11h34	11h37	3	Circulaire	43	6	
XP-2023-8-1bis	21/6/2023	11h45	12h00	15	Circulaire	45	12	

Nom de l'expérimentation	largeur (mm)	facing	application	épaisseur couche	pressage	alliage de départ	masse de départ (g)	masse argent (g)
XP-2023-5-2		non				réitération	5,15	
XP-2023-6-1		non				Ag 90 Cu10	4,74	4,27
XP-2023-6-2		non				réitération	3,93	
XP-2023-6-3		non				réitération	3,44	
XP-2023-7-1		oui	digitale	fine	pressée	Ag 90 Cu10	5,26	4,73
XP-2023-8-1		oui	digitale	fine	non pressée	Ag 90 Cu10	4,9	4,41
XP-2023-8-1bis		oui	digitale	fine	peu pressée	Ag 90 Cu10	4,9	4,41

Nom de l'expérimentation	masse cuivre (g)	masse théorique de plomb (g)	masse de Pb expérimentée (g)	masse du bouton (g)	masse prélevée post coupellation (g)	masse du bouton après prélèvement (g)
XP-2023-5-2			10			
XP-2023-6-1	0,47	33,18	2,5	4,08	0,14	3,93
XP-2023-6-2			5	3,85	0,41	3,44
XP-2023-6-3			15			
XP-2023-7-1	0,53	36,82	2,5			
XP-2023-8-1	0,49	34,3	0			
XP-2023-8-1bis	0,49	34,3	2,5			

Nom de l'expérimentation	observations	Températures
XP-2023-5-2	15h46: préchauffage de la coupelle 16h59: mise de la prise 17h01: 2,5g de plomb 17h03: 2,5g de plomb 17h05: 2,5g de plomb 17h07: 2,5g de plomb 17h11: métal mousseux 17h12: redevenu liquide et ralentissement progressif de la soufflerie 17h13: arrêt, laissé sous les charbons 17h20: à 700°. cnotinue à légèrement mousser	16h56: 430°
XP-2023-6-1	16h49: 2,5g de plomb 16h55: on retire la coupelle d'un coup	
XP-2023-6-2	14h08: coupelle rouge 14h09: presque liquide, 2,5g de plomb 14h11: liquide 14h15: 2,5g de plomb 14h19: figé, arrêt 14h20: métal mousse	14h17: 1100° 14h19: 900° 14h20: 700°
XP-2023-6-3	15h29: mise de l'alliage 15h30: pateux 15h31: 5g de plomb, métal liquide 15h33: oxydation 15h34: 5g de plomb 15h36: 5g de plomb 15h37: moins liquide, bouillonne de nouveau 15h40: ralentissement soufflerie, se fige	
XP-2023-7-1	11h: préchauffe 11h08: métal dans la coupelle 11h12: métal pateux 11h13: 2,5g de plomb 11h15: solidification en moussant, redevient pâteux après ajout de charbon 11h19: arrêt	11h06: 350°
XP-2023-8-1	11h28: préchauffe coupelle 11h31: pose de la prise 11h37: alliage pâteux grosse fissure sur la coupelle, métal pateux, réutilisé pour XP-2023-8-1bis	
XP-2023-8-1bis	11h41: préchauffe avec alliage 11h45: couverture, démarrage coupellaton 11h51: alliage pâteux 11h52: 2,5g de plomb 11h58: diminution de l'aération 12h: arrêt	

Nom de l'expérimentation	description coupelle	réussite	observations bouton
XP-2023-5-2	coupelle en terre blanche, couverte d'oxyde, verte à l'intérieur et presque pas à l'extérieur, charbon emprisonnés dans l'oxyde. le bouton a partiellement roché, après découpe de la coupelle, des bulles sont visibles dans la couche d'oxyde	non	moussage
XP-2023-6-1	presque totalement recouverte d'oxyde, bouton noyé dans l'oxyde	oui	RAS
XP-2023-6-2	coupelle quasiment entièrement glaçurée, glaçure verdâtre, début de fissure de la coupelle, bouton a commencé à mousser	non	moussage
XP-2023-6-3	??	oui	RAS
XP-2023-7-1	fissure sur un côté, métal n'a pas coulé, glaçure à l'intérieur, bouton noyé dans l'oxyde et a moussé	non	moussage
XP-2023-8-1	grosse fissure sur le rayon de la coupelle, métal juste ramollit	non	RAS
XP-2023-8-1bis	coupelle glaçurée sur toute la surface, bouton recouvert d'oxyde	oui	RAS

Nom de l'expérimentation	Date	heure début	heure fin	durée (mn)	type coupelle	diamètre (mm)	profondeur (mm)	longueur (mm)
XP-2023-9-1	21/6/2023	14h38	14h47	9	Circulaire	40	8	
XP-2023-10-1	21/6/2023	15h18	15h26	8	Circulaire	45	9	
XP-2023-11-1	21/6/2023	16h17	16h24	7	Rectangulaire		7	30
XP-2023-12-1	21/6/2023	16h49	17h	11	Rectangulaire		7	29
XP-2023-13-1	22/06/2023	17h29	17h45	16	Circulaire	53 39	9 7	

Nom de l'expérimentation	largeur (mm)	facing	application	épaisseur couche	pressage	alliage de départ	masse de départ (g)	masse argent (g)
XP-2023-9-1		oui	digitale	très fine	étalée	Ag 90 Cu10	5,54	4,99
XP-2023-10-1		oui	digitale	fine	étalée	Ag 90 Cu10	5,02	4,52
XP-2023-11-1	12	oui	digitale	fine	non pressée	Ag 90 Cu10	4,81	4,33
XP-2023-12-1	17	oui	digitale	fine	peu pressée	Ag 90 Cu10	4,99	4,49
XP-2023-13-1		non				Ag 90 Cu10	6,08	5,47

Nom de l'expérimentation	masse cuivre (g)	masse théorique de plomb (g)	masse de Pb expérimentée (g)	masse du bouton (g)	masse prélevée post coupellation (g)	masse du bouton après prélèvement (g)
XP-2023-9-1	0,55	38,78	2,5			
XP-2023-10-1	0,5	35,14	2,5			
XP-2023-11-1	0,48	33,67	2,5			
XP-2023-12-1	0,5	34,93	5			
XP-2023-13-1	0,61		10			

Nom de l'expérimentation	observations	Températures
XP-2023-9-1	14h25: préchauffe coupelle 14h29: coupelle fissurée 14h29: préchauffe coupelle 14h32: coupelle fissurée 14h33: préchauffe coupelle 14h36: chauffe progressive avec la prise 14h38: chauffe du métal 14h39: métal pâteux 14h40: métal liquide, ajout de 2,5g de plomb 14h45: se solidifie un peu 14h46: ralentissement soufflerie 14h47: arrêt	14h37: 890°
XP-2023-10-1	14h54: préchauffe coupelle 14h57: coupelle fissurée, nouvelle coupelle préchauffée 14h03: coupelle fissurée, remplacée 14h06: fissurée et remplacée 15h18: mise de la prise 15h21: métal pâteux 15h22: liquide 15h26: coupelle fissurée, métal a coulé	15h01: 450° 15h14: 600°
XP-2023-11-1	15h40: préchauffe coupelle 15h53: coupelle fissurée, remplacée 15h54: préchauffe 16h16: pose prise 16h17: départ coupellation 16h19: 2,5g de plomb 16h24: arrêt de la ventilation 16h26: mousse	15h54: 220°
XP-2023-12-1	16h34: préchauffe coupelle 16h49: mise prise 16h51: 2,5g de plomb 16h54: 2,5g de plomb 16h58: arrêt de la soufflerie, coupelle laissée sous les charbons pour refroidissement lent 17h07: sortie de la coupelle du feu	
XP-2023-13-1	17h30: coupelle fissurée, poursuite quand même 17h32: transfert de la prise dans une coupelle rouge préchauffée 17h35: 5g de plomb 17h36: liquide 17h38: métal temporairement noyé 17h39: 2,5g de plomb, redevient liquide 17h40: 2,5 de plomb 17h43: ralentissement progressif de la ventilation 17h45: arrêt	17h44: 1100°

Nom de l'expérimentation	description coupelle	réussite	observations bouton
XP-2023-9-1	fissure le long de la coupelle, le métal est accroché en dessous	non	perte du métal
XP-2023-10-1	coupelle glaçurée au centre, a coulé en dessous car fissure, il est collé sous la coupelle, toujours un peu de cendre d'os	non	perte du métal
XP-2023-11-1	coupelle glaçurée, surtout sur un côté, métal mousseux, un charbon fixé dans la glaçure	non	moussage
XP-2023-12-1	glaçure sur presque toute la surface, métal mousseux, petites billes d'argent agglomérées dans le creux de la coupelle et sur les bords	non	moussage
XP-2023-13-1	terre blanche, coupelle supérieure recouverte d'oxyde, une fissure coupelle inférieure; traces d'oxydes, mais pas sur toute la surface, éclatements bouton pris entre les deux coupelles	non	perte du métal

Nom de l'expérimentation	Date	heure début	heure fin	durée (mn)	type coupelle	diamètre (mm)	profondeur (mm)	longueur (mm)
XP-2023-20-1	23/06/2023	10h26	11h19	53	Circulaire		25-30	80
XP-2023-21-1	23/06/2023	16h04	16h20	16	Circulaire	?	?	

Nom de l'expérimentation	largeur (mm)	facing	application	épaisseur couche	pressage	alliage de départ	masse de départ (g)	masse argent (g)
XP-2023-20-1	68	oui	digitale	épaisse	pressée	Ag 90 Cu10	12,91	11,62
XP-2023-21-1		oui	digitale	épaisse	pressée	Ag 90 Cu10	12,7	11,43

Nom de l'expérimentation	masse cuivre (g)	masse théorique de plomb (g)	masse de Pb expérimentée (g)	masse du bouton (g)	masse prélevée post coupellation (g)	masse du bouton après prélèvement (g)
XP-2023-20-1	1,29	90,37	90	11,11		
XP-2023-21-1	1,27	88,9	30			

Nom de l'expérimentation	observations	Températures
XP-2023-20-1	<p>creuset rempli de cendre d'os comprimé selon le protocole de Théophile</p> <p>10h17: préchauffe depuis 10-15mn</p> <p>10h26: mise de la prise</p> <p>10h31: 10g de plomb, oxydation</p> <p>10h33: 10g de plomb</p> <p>10h34: 10g de plomb</p> <p>10h35: 10g de plomb</p> <p>10h37: 10g de plomb</p> <p>10h39: 10g de plomb</p> <p>10h42: 10g de plomb</p> <p>10h44: 10g de plomb</p> <p>10h47: 10g de plomb</p> <p>10h52: on maintient le métal liquide</p> <p>10h54: oxydation, encore liquide</p> <p>11h08: éclair d'argent, argent presque pur</p> <p>11h11: 5g de plomb</p> <p>11h14: ralentissement progressif de la ventilation temporaire</p> <p>11h19: ralentissement progressif de la ventilation, bouton très brillant</p> <p>Il semble que lors de la mise d'un des morceau de plomb nous ayons confondu 5g et 10g, donc le total est de 90g de plomb</p>	<p>10h18: 400-450°</p> <p>10h53: 900°</p>
XP-2023-21-1	<p>petit creuset rempli de cendres</p> <p>16h: préchauffe</p> <p>16h04: mise prise</p> <p>16h10: 10g de plomb, métal liquide</p> <p>16h12: une partie du métal est parti dans un trou, 10g de plomb</p> <p>16h14: 10g de plomb</p> <p>16h16: métal part sur le côté, solide, on essaye de le rendre de nouveau liquide</p> <p>16h20: arrêt</p>	

Nom de l'expérimentation	description coupelle	réussite	observations bouton
XP-2023-20-1	la cendre a absorbé les oxydes, quelques perles d'argent en surface, bouton d'argent bien brillant, a roché à 2 endroits (2 protubérances)	oui	rochage
XP-2023-21-1	terre blanche ??	non	perte du métal