



HAL
open science

Par choix ou par défaut. L'essai des minerais au four à moufle, du XVe au XXIe siècle

Joseph Gauthier, Florian Téreygeol

► To cite this version:

Joseph Gauthier, Florian Téreygeol. Par choix ou par défaut. L'essai des minerais au four à moufle, du XVe au XXIe siècle. *Artefact : techniques, histoire et sciences humaines*, 2024, 21, pp.291-311. 10.4000/12o3v . hal-04789164

HAL Id: hal-04789164

<https://hal.science/hal-04789164v1>

Submitted on 19 Nov 2024

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License



Artefact

Techniques, histoire et sciences humaines

21 | 2024

**Les savoirs sur la Chine, entre terrain et bibliothèques
(XVI^e-XIX^e siècle)**

Par choix ou par défaut

L'essai des minerais au four à moufle, du xv^e au xxi^e siècle

Choice or Constraint. Muffle Furnace Assaying, 15th-21st Centuries

Joseph Gauthier et Florian Téreygeol



Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/artefact/16201>

DOI : 10.4000/12o3v

ISSN : 2606-9245

Éditeur :

Presses universitaires de Strasbourg, Association Artefact. Techniques histoire et sciences humaines

Édition imprimée

Date de publication : 11 novembre 2024

Pagination : 291-311

ISBN : 979-10-344-0246-5

ISSN : 2273-0753

Référence électronique

Joseph Gauthier et Florian Téreygeol, « Par choix ou par défaut », *Artefact* [En ligne], 21 | 2024, mis en ligne le 11 novembre 2024, consulté le 13 novembre 2024. URL : <http://journals.openedition.org/artefact/16201> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/12o3v>



Le texte seul est utilisable sous licence CC BY-NC-ND 4.0. Les autres éléments (illustrations, fichiers annexes importés) sont « Tous droits réservés », sauf mention contraire.

Par choix ou par défaut

L'essai des minerais au four à moufle,
du xv^e au xxi^e siècle

Joseph Gauthier, Florian Téreygeol

Résumé

L'essai des minerais a joué plusieurs rôles dans l'économie de la production minière, notamment à partir de la fin de la période médiévale. C'est à cette époque qu'ont été développées des techniques d'analyse opérant sur quelques grammes de minerai dans un four à moufle. Représentatif et reproductible, cet essai par voie sèche était utile à la gestion des chantiers miniers, au commerce des minerais, à l'optimisation des procédés métallurgiques tout en permettant le contrôle de la production. Les modes opératoires de l'essai au four à moufle, perfectionnés au cours du xvi^e siècle notamment par Lazarus Ercker, ont été pratiqués sans grands changements jusqu'au xix^e siècle et le sont encore de nos jours. Une concurrence avec d'autres techniques, développées pour la voie humide du xvii^e au xix^e siècle et pour la spectrométrie de masse au xx^e siècle, n'a jamais fait disparaître l'essai par voie sèche. Il a même été préféré à tout autre procédé jusqu'au milieu du xix^e siècle.

291

Mots-clés

mines, métallurgie, analyse chimique, science moderne, histoire, économie

” Joseph Gauthier, Florian Téreygeol, «Par choix ou par défaut. L'essai des minerais au four à moufle, du xv^e au xxi^e siècle», *Artefact*, n° 21, 2024, p. 291-311.

Choice or Constraint. Muffle Furnace Assaying, 15th-21st Centuries

Abstract

Assay of ores played several roles in the history of mining production, particularly from the late medieval period onwards. At this time, laboratory techniques of analysis were developed. Then, assays were operated on a few grams of ore into a muffle furnace. Thanks to its representativeness and reproducibility, dry ore assaying methods were useful for mining management, ore trade and optimisation of metallurgical processes. Furthermore, it allowed a rigorous control of the production. Muffle furnace assay was improved all along the 16th century, especially by Lazarus Ercker. No real change was done in the process up to the 19th century. It is still used today, yet other methods exist. Wet processes were elaborated between the 17th and the 19th centuries, and mass spectrometry came in the 20th century. But they never totally replaced dry assaying techniques, which was even the first choice until the mid-19th century.

292

Keywords

mines, metallurgy, chemical analysis, modern science, history, economy

Essayer le minerai n'est pas un acte indispensable, techniquement parlant, pour produire du métal. L'opération relève de l'anticipation et du contrôle, ce qui lui donne une importance particulière. Le domaine a été le théâtre, au cours du bas Moyen Âge, du développement de pratiques métallurgiques de laboratoire extrêmement précises. Réalisé au centre de l'exploitation minière, l'essai des minerais au four à moufle a été largement diffusé grâce à l'écrit, en particulier dans le premier livre imprimé traitant de métallurgie : le *Probierebüchlein*¹. Ce dernier a servi de modèle à de nombreux écrits traitant des essais entre le début du xvi^e siècle et la fin du xix^e siècle, depuis Zacharias Lochner et Samuel Zimmermann

1. La première édition connue d'un *Probierebüchlein*, anonyme, daterait de 1524 selon Sisco, Smith 1949 (de 1518 selon Darmstaedter, 1926; de 1510 selon Hoover, Hoover, 1986 [1912]). La traduction anglaise de Sisco et Smith est fondée sur la version éditée par Heinrich Steyner à Augsburg en 1534, éclairée par d'autres tirages du xvi^e siècle.

jusqu'à Nicolas-Louis Vauquelin et Carl A. M. Balling². Cette longue tradition de littérature technique témoigne de l'utilisation des mêmes modes opératoires quatre siècles après leur mise au point. Les pratiques d'essayeurs des mines de Potosí dont il est question en conclusion montrent que l'essai par voie sèche est toujours pratiqué de nos jours, selon le même protocole que celui établi au xvi^e siècle. Ce n'est pourtant pas faute de disposer d'autres solutions pour tester les minerais, développées surtout à partir du xviii^e siècle. L'amalgame, l'attaque acide, le chalumeau, la spectrométrie de masse sont autant de techniques d'analyse qui sont venues concurrencer l'essai au four à moufle, mais qui ne l'ont jamais remplacé au plus proche des filons. Les objectifs de l'essai du minerai et les conditions économiques et sociales dans lesquels il est opéré peuvent expliquer cette pérennité, qui étonne au regard des nombreuses évolutions techniques qu'ont connues les procédés métallurgiques industriels. Vu principalement au travers des sources imprimées germaniques, le laboratoire, pourtant lieu propice à l'exploration et à l'innovation, montre une continuité des modes opératoires qui contraste avec l'usine. Peut-on alors envisager qu'une même technique ait pu satisfaire aux rôles qui étaient les siens dans la gestion des exploitations minières pendant plusieurs siècles? L'essai au four à moufle, pilier de la tenue économique de l'entreprise minière, peut-il être considéré comme un réflexe, assimilable au comportement humain qui privilégierait toujours la rentabilité? Après une période d'évolution rapide et radicale à la fin du Moyen Âge, sa persistance n'est pas tant liée au monde des techniques qu'à ceux de l'économie et des savoirs.

Les rôles de l'essai des minerais

Tel les *indicia* de Bermannus guidant de manière sûre le mineur d'Agricola dans son repérage des gisements³, l'essai du minerai permet d'anticiper au mieux le devenir de l'exploitation. C'est un test, un premier traitement de la ressource qui accompagne toute découverte. Il passe d'abord par l'observation visuelle puis, parfois, par une analyse plus poussée qui tente de mieux caractériser la matière⁴. Plusieurs termes désignent l'essai dans

2. Lochner, 1565; Zimmermann, 1573; Vauquelin, 1799; Balling, 1879.

3. Blay, Halleux, 1998 («Savoirs techniques», p. 801-811); Halleux, Yans (éd. et trad.), 1990, p. 28-29 (édition originale Agricola, *Bermannus, sive de re metallica*, 1530).

4. Cette première observation systématique est bien illustrée par les miniatures du *Lapidario* d'Alphonse le Sage dans la seconde moitié du xiii^e siècle.

les textes médiévaux. Le plus courant est celui d'épreuve : *probare* en latin, *probar* en espagnol, *probieren* en allemand, *éprouver* en français. Le mot *essai* est également courant : *essayer* en français, *ensayar* en espagnol, *saggiare* ou *assaggiare* en italien. Les termes *examinatio*, *mostra*, ou *experimentum* sont plus rarement employés ; le dernier pouvant être interprété de différentes manières. Du constat de l'efficacité d'un procédé, quelle qu'en soit l'origine, à la volonté de vérifier qu'une opération a bien été comprise, l'*experimentum* couvre un large panel de comportements et de pensées de l'artisan face à la transformation de la matière⁵. En ce qui concerne le domaine de l'essai, l'expérience correspond *a minima* à un passage au feu du minerai, afin d'en avoir « congnoissance et expérience », démarche qui s'oppose à une simple estimation empirique fondée sur l'« apparence⁶ ». Elle peut aller jusqu'à signifier une véritable pratique expérimentale, au sens que lui donne la science classique⁷, soit une expérience paramétrée et reproductible qui ne se limite plus à un constat, une vérification par la preuve. Dans tous les cas, l'essai est un acte intentionnel au cours duquel le métallurgiste observe le comportement du minerai au feu et calcule le rapport pondéral entre la charge et le produit obtenu. C'est une analyse minérale qualitative et quantitative. La démarche est le plus souvent destinée à rechercher l'argent, bien que le cuivre et le plomb fassent aussi l'objet d'essais.

L'analyse du contexte économique et politique d'opérations d'essai de minerai recensées dans divers fonds d'archives européens a permis de proposer quatre fonctions pour la période bas Moyen Âge-Renaissance⁸. En premier lieu, c'est un calcul de rentabilité : une première fonte sur un gisement récemment découvert permet de voir si le minerai peut être fondu et si la teneur en métal est suffisante pour couvrir les frais engagés. L'essai fonde la décision de mettre en exploitation ou oriente la conduite de chantiers en cours. L'opération procure aux entrepreneurs une donnée économique fiable à partir de laquelle ils peuvent élaborer leur stratégie d'investissement.

5. Halleux, 2009, p. 128-139.

6. Dauvet, *Journal*, f° 271 : « on tirera la mine dudit fillon qui a apparence d'estre bonne. Et icelle mine tirée, recuite et affinée par le maistre fondeur et affineur les saura et aura en congnoissance et experience si elle est et sera prouffitable ou non. »

7. Blay, Halleux, 1998 (« Introduction », p. 1-x ; « Expérience », p. 511-523).

8. Gauthier, 2012.

Cet essai, au Moyen Âge, est souvent réalisé à grande échelle, en procédant à une première fonte à la manière de celles qui pourraient suivre. Cet événement laisse transparaître une autre utilité de cette opération qui est d'affirmer la propriété du gisement. L'épreuve est réalisée sous l'œil de témoins, représentants du prince, dont la présence sert à affirmer les droits régaliens du seigneur propriétaire sur l'exploitation des gisements polymétalliques. L'essai a ici une valeur démonstrative. La représentation des autorités est assurée, dès le XIII^e siècle dans les cités toscanes et à partir de la fin du XV^e siècle dans les districts miniers germaniques, par le biais de l'assermentation de l'essayeur, qui est officier des mines⁹.

Avec le développement des techniques à petite échelle à partir du XIII^e siècle, l'analyse qui se fait désormais sur quelques grammes de minerai remplit de nouveaux objectifs. Elle est l'occasion pour l'essayeur de contrôler le bon fonctionnement d'une opération, voire d'améliorer un procédé métallurgique. C'est un essai à but technique, véritable travail de recherche mené par un artisan dont les plus remarquables exemples sont donnés par Lazarus Ercker, maître essayeur des empereurs Maximilien II et Rodolphe II¹⁰.

Cette analyse, réalisée en laboratoire, précise et rapide à mettre en œuvre, joue également un rôle central dans les transactions internes à l'entreprise minière : elle est destinée à fixer le prix d'une livraison de minerai à la fonderie. Cet objectif commercial est à vrai dire la principale raison d'être de l'essai dans les districts miniers modernes. Il modifie complètement les relations entre les acteurs de la production. La fiabilité des essais à petite échelle a en effet participé à un mouvement de rationalisation des rapports au sein des exploitations minières. L'innovation a contribué à un mouvement de séparation des tâches entre extraction minière et traitement métallurgique, en jouant le rôle de charnière entre ces deux grandes phases de la chaîne opératoire. Le mineur peut désormais être payé immédiatement, sans attendre que son minerai soit fondu ; le fondeur peut stocker des minerais et ainsi les associer entre eux afin d'optimiser la rentabilité des fontes. L'essai des minerais constitue ainsi, au XVI^e siècle, le véritable pivot des entreprises minières.

9. Gauthier, 2018a; 2018b.

10. Ercker, 1574. Le traité de Lazarus Ercker est le seul ouvrage pouvant être lié à la tradition des *Probierbüchlein* construit selon une approche systématique comparable à celle conduite par Georgius Agricola. Il est d'autant plus intéressant qu'Ercker était essayeur et décrit donc sa pratique sans intermédiaire. Son étude est en cela bien plus riche que celle du livre VII du *De re metallica*, consacré aux essais. Pour une biographie de Lazarus Ercker, voir Beierlein, 1955.

Les trois premiers rôles de l'essai des minerais – prospectif, démonstratif et technique – sont pleinement valables jusqu'au xvii^e siècle. Au xviii^e siècle, les nouveaux cadres institutionnels des sciences naturelles, comme la naissance en France de l'administration centralisée des mines à partir des années 1740, modifient la donne. Si la démonstration n'est plus de mise, les droits sur les ressources minières étant garantis par d'autres dispositifs, celui prospectif continue à jouer un grand rôle, mais n'est plus que rarement réalisé sur les sites miniers. Il est l'œuvre de savants qui, dans des laboratoires académiques, ne parlent bientôt plus d'essai ni d'épreuve, mais de docimasia¹¹. La collecte d'échantillons sert autant l'économie minière que les efforts de classification du règne minéral.

L'essai des minerais au four à moufle

La notion d'essai par voie sèche n'est apparue qu'au xviii^e siècle, par opposition à l'essai par voie humide, qui consiste à mettre la prise en solution¹². Plusieurs modes opératoires correspondent à cette voie sèche. Ce fut d'abord une fonte test, faite à une échelle plus ou moins proche de celle de production – soit sur plusieurs quintaux de minerai. L'essai ne devint un domaine technique à part entière qu'à partir du moment où s'engagea la miniaturisation du procédé de fonte. Cette évolution aboutit en effet à une distinction franche avec la métallurgie de production en termes d'acteurs, de compétences, d'outils, de temporalité des opérations voire de localisation de l'activité.

Le travail à petite échelle a été développé très certainement en Italie et en Saxe entre le xiii^e et le xv^e siècle : il se fait d'abord au creuset, sur une centaine de grammes de minerai. C'est la pratique standard à Iglésias (Sardaigne) au xiv^e siècle et à Falset (Catalogne) au xv^e siècle¹³. La miniaturisation de l'analyse a pourtant été poussée plus avant dans les districts miniers germaniques. Plusieurs formes de creusets ayant servi à fondre

11. Entrée de l'*Encyclopédie* en 1751, la docimasia est définie comme suit dans la 4^e édition du *Dictionnaire de l'Académie française* (1762) : « L'art d'essayer en petit les mines, pour savoir les métaux qu'elles contiennent. Elle diffère de la Métallurgie qui s'occupe du travail des mines en grand. » Le terme « essai » reste utilisé dans les actes de la pratique, même par les inspecteurs et ingénieurs de mines.

12. Voir la contribution de Téreygeol, Gauthier, Absi, dans ce même volume.

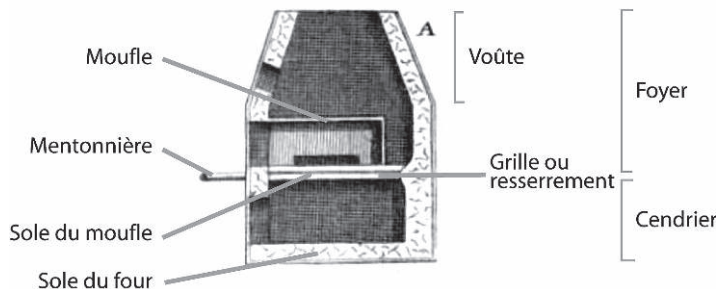
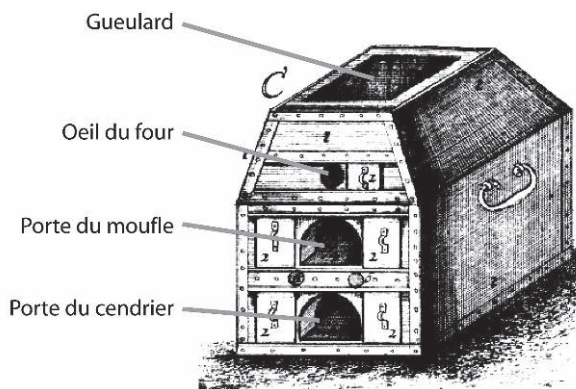
13. Gauthier, 2018a.

du minerai ont été retrouvées à Freiberg (Saxe), dont certains datent du XIII^e siècle¹⁴. Mais ce ne semble être qu'au XV^e siècle que la pratique de l'essai des minerais au scorificatoire dans un four à moufle se développe réellement. Ce mode opératoire est courant au XVI^e siècle, comme en témoignent la documentation écrite ainsi que quelques corpus de mobilier archéologique¹⁵. Des livres de recettes en partie consacrés aux essais, hérités des compilations manuscrites médiévales, sont parmi les premiers livres imprimés ayant pour sujet la technique. Les *Probierbüchlein* ont ensuite été revus, corrigés et réimprimés pendant plusieurs siècles. Mais l'art de l'analyse minérale trouve rapidement son apogée avec la publication à Prague en 1574 du *Traité d'essai des minerais* par Lazarus Erker. L'art de l'essai des minerais au four à moufle, développé et parfait en un petit siècle, ne connaît ensuite aucune évolution majeure jusqu'à nos jours.

Le moufle est une voûte formant une chambre de chauffe, ce qui permet au contenant, couramment appelé creuset, de ne pas être en contact avec le combustible. Dans un bas foyer, ou un bas fourneau, le minerai est en contact direct avec le charbon. Dans les essais au creuset, encore très courants notamment pour les minerais de cuivre au XVI^e siècle, le contenant est placé au milieu des charbons dans des foyers de type foyer de forge. La structure du four à moufle, ou four d'essai, consiste en une colonne, de section carrée ou circulaire, composée d'un cendrier à la base, séparé de la chambre de chauffe par une grille (Fig. 1). Le moufle se situe au cœur de la partie haute. Deux portes percent la colonne : une au bas pour descendre et régler le tirage, et une à mi-hauteur qui donne sur la chambre de chauffe. Le sommet de la colonne est ouvert pour permettre l'alimentation en charbon et l'évacuation des fumées. D'autres percements plus petits, éventuellement équipés de systèmes de fermeture coulissants, peuvent permettre d'affiner la régulation du tirage et de l'atmosphère régnant dans le moufle. Ce dernier est un demi-cylindre en céramique ouvert sur le devant et fermé à l'arrière, posé sur une tablette d'argile. Il peut être percé de trous sur ses parois afin d'optimiser les flux d'air chaud. Cette chambre de chauffe permet d'opérer dans une atmosphère contrôlée et protégée des projections du foyer. L'observation y est également grandement améliorée, tout comme la précision des manipulations.

14. Dallmann, Gühne, 1993 ; Richter, 1994.

15. Osten, 1998 ; Gauthier, Fluck, 2010 ; Gauthier, 2023.



298

Fig. 1. – Schéma du four à moufle

D'après Christophe André Schlutter, Jean Hellot (éd.), *De la fonte des mines, des fonderies, &c. Tome premier qui traite des essais des mines et des métaux...*, Paris, Pissot, 1750, planche I.

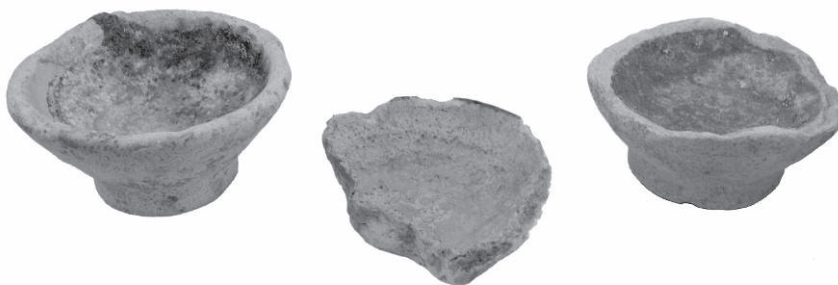


Fig. 2. – Scorificatoires du xvi^e siècle découverts à Sainte-Marie-aux-Mines

Photographie Joseph Gauthier, 2023.

Si la documentation écrite est riche de renseignements sur les fours à moufle utilisés dans l'industrie minière du ^{xvi}^e siècle, le mobilier archéologique afférent est rare. Plusieurs exemplaires de mouffles des ^{xvi}^e et ^{xvii}^e siècles, complets ou fragmentaires, sont connus dans l'espace de la province minière germanique¹⁶, notamment à Oberstockstall (Autriche) et à Banská Štiavnica (Slovaquie)¹⁷. En Forêt Noire, un fragment de moufle a été mis au jour lors d'un sondage à Muggenbrunn dans les années 1990¹⁸. Cas unique, un four complet de la seconde moitié du ^{xvi}^e siècle est conservé dans les Collections nationales de Dresde. Fait d'argile, comme la plupart des fours d'essai de l'époque moderne, il présente la particularité d'être recouvert de plaques de fer finement décorées.

Dans ce type de four, le moufle ne permet pas de travailler au creuset, contenant trop haut pour y prendre place. Un nouveau type de céramique métallurgique fait donc son apparition avec le four à moufle, le scorificatoire, dont la forme est originale et typique du travail des minerais à petite échelle. Il s'agit d'une petite coupe en argile à fond épais et largement ouverte. Tournée, plus rarement moulée, la pièce est faite d'une argile fine parfois glaçurée, afin de protéger l'argile cuite du plomb en fusion qui interagit trop avec la silice. Sur le plan archéologique, très peu de scorificatoires sont connus à ce jour. Des collections importantes existent dans les districts miniers des Carpates, du Tyrol ou d'Erzgebirge. En France, pour le ^{xvi}^e siècle, l'unique corpus existant provient des fouilles réalisées à Sainte-Marie-aux-Mines¹⁹. Les sept pièces qui le composent ne permettent pas de dresser une réelle typologie, mais l'on retient une contenance moyenne d'environ 15 ml (volume moyen du bain de 5 ml) pour une hauteur moyenne de 24 mm et un diamètre moyen à l'ouverture de 53 mm (Fig. 2). L'étude menée sur plus de 150 scorificatoires mis au jour lors des fouilles du Kammerhof à Banská Štiavnica montre un faciès différent, mais proche, avec une contenance moyenne du bain de 9,10 ml (volume moyen total de 18,4 ml) pour une hauteur moyenne de 31 mm et un diamètre moyen à l'ouverture de 48 mm²⁰. L'homogénéité du groupe et sa datation large (^{xvi}^e-^{xvii}^e siècles) n'autorisent pas, à ce stade, l'ébauche d'une chrono-typologie.

16. Des fragments de moufle du ^{xiv}^e siècle ont récemment été identifiés dans les Pyrénées ariégeoises mais ne semblent pas avoir fait partie d'un four tel que nous l'avons décrit (Maqueda *et al.*, à paraître).

17. Osten, 1998 ; Gauthier, Fluck, 2010.

18. Goldenberg, Otto, Steuer, 1996, p. 114-122.

19. Gauthier, 2023.

20. Gauthier, 2012, p. 307-325.

Tout l'intérêt du couple four à moufle/scorificateur réside dans la possibilité de réaliser en une même opération un processus d'oxydation et de réduction du minerai. La forme ouverte du contenant est conçue pour offrir une surface de contact maximale avec l'atmosphère de la chambre de chauffe. Une partie de l'art de l'essayeur consiste donc à contrôler la présence d'oxygène à l'intérieur du moufle. Pour une galène (sulfure de plomb argentifère), il convient d'abord de travailler sous atmosphère oxydante, afin de se débarrasser du soufre présent dans le minerai. C'est ce que l'on appelle, en métallurgie extractive, le grillage. Dans un second temps, une atmosphère réductrice permet de priver le bain de l'oxygène préalablement capté et d'arriver à un état métallique. C'est l'étape de réduction qui, à l'échelle de la production, est réalisée dans un four spécifique parfois appelé four à manche. Le four d'essai permet donc de combiner en une seule opération ce qui d'ordinaire se déroule en deux temps²¹.

300

La prise constitue la charge de minerai sur laquelle l'essai est réalisé et sert de base au calcul de rendement en métal réalisé à la fin de l'opération. Durant l'époque moderne, cette prise est généralement d'un quintal fictif, soit 3,8 g. La prise est le résultat d'une opération sensible : l'échantillonnage ou prélèvement. Cette étape est liée à une question plus technique qui est celle de la préparation des minerais. Sans rentrer dans le détail des modes opératoires, il faut avoir à l'esprit une règle de base, relativement simple : aucune modification de la qualité de l'échantillon ne doit intervenir afin d'obtenir un résultat extrapolable à la totalité du lot prélevé. Seule la calibration change, et ce vraisemblablement pour des raisons techniques : l'essai au scorificateur ne peut se faire que sur un minerai réduit en poudre. Les cas d'enrichissement²² sont rares, du fait de l'obligation d'essayer le minerai dans l'état auquel il est vendu. Dans la plupart des cas, les échantillons sont prélevés après préparation et ne sont pas enrichis après échantillonnage, la part de stérile étant au contraire volontairement conservée.

De la même manière, il ne peut être fait état ici de la diversité des traitements métallurgiques qui varient en fonction de la qualité des minerais essayés. L'essayeur doit savoir observer les matériaux à analyser, afin de définir le protocole à mettre en œuvre. Une fois la prise constituée,

21. Gauthier, 2013 ; Mercier-Bion, Téreygeol, 2016.

22. L'enrichissement d'un minerai consiste à éliminer les parties stériles qu'il contient.

précisément pesée, elle peut ainsi subir plusieurs passages au feu, avec addition de fondants ou de flux tels que le plomb, le salpêtre, le verre ou le borax. L'étape ultime est généralement la coupellation, qui permet d'obtenir le bouton du métal précieux recherché²³. L'opération est menée à l'aide du même four à moufle dans une coupelle de cendres. La pesée du bouton d'argent produit permet d'établir le rapport entre masse de la prise et masse du produit, et donc de déterminer la teneur du minerai essayé.

L'essayeur au XVI^e siècle dispose par conséquent d'un équipement qui lui permet de travailler sur de très petites quantités de matière. Une grande question traverse le traité de Lazarus Ercker publié à Prague en 1574 : l'essai doit-il avoir pour but de révéler la teneur exacte en métal contenu dans le minerai ? L'essayeur saxon expose une technique d'essai par coupellation directe du minerai qui permet de connaître « la teneur exacte et totale [en argent]²⁴ ». Il n'en a pas moins conscience que l'objectif principal est d'obtenir des résultats comparables entre eux. À défaut de donner le titre exact d'un minerai, l'essayeur doit privilégier la méthode capable de produire les résultats les plus proches de ceux obtenus en production : « si l'essai est fait correctement, [le résultat de la fonte en grand] correspondra à ce qui a été trouvé à l'essai²⁵. » Comparable à une démarche de science expérimentale, l'essai pratiqué au sein des entreprises minières modernes suit un protocole précis destiné à assurer la représentativité et la reproductibilité de l'analyse.

Les autres options : voie humide et chalumeau

Les traités techniques consacrés aux essais aux XVI^e et XVII^e siècles et plus largement à la métallurgie au XVIII^e siècle ne laissent aucun doute : en matière de métallurgie extractive, et plus encore en matière d'essai, la voie sèche occupe de loin la plus grande place. La voie humide est pourtant présente de longue date dans les laboratoires de métallurgie. Les alchimistes l'ont beaucoup utilisée principalement pour la séparation de l'or et de l'argent. Le *Probierbüchlein*, premier livre de métallurgie imprimé, ne

23. Guirado, Téreygeol, Peyrat, 2010.

24. Ercker, 1574, f° 16v° : « den rechten vöiligen [Silber] halt. »

25. *Ibid.*, f° 99v° : « man probir nur recht, so wirt sichs ausbringen der prob nach recht finden. »

traite pas que de la voie sèche : l'essai à la pierre de touche et les méthodes de séparation des métaux par voie humide y sont exposés. On les retrouve par la suite dans la plupart des traités relatifs aux essais.

En ce qui concerne les minerais, Vannoccio Biringuccio mentionne le traitement au mercure au début de son chapitre sur les essais, mais s'en détourne très rapidement²⁶. Le deuxième *Probierebüchlein* signé a paru en 1573, de la main de Samuel Zimmermann. Son ouvrage se distingue des nombreux petits livres des essais copiés les uns sur les autres, malgré quelques traces textuelles empruntées à des éditions antérieures²⁷. L'essai des minerais y est abordé de manière assez poussée, avec la description, pour la première fois, de méthodes par voie humide²⁸. L'année suivante, Lazarus Ercker donne une manière d'essayer les minerais d'or en passant par une étape d'amalgame²⁹.

Álvaro Alonso Barba, qui expose pour la première fois au xvii^e siècle les méthodes d'amalgame des minerais en usage en Amérique du Sud, livre un intéressant aperçu des opinions sur cette technique : « Les bons artistes [...] ne se fient pas à l'épreuve du vif-argent, qui est fort trompeuse, et n'en jugent point non plus par le rapport des yeux³⁰. » Alors qu'elles étaient balbutiantes au xvi^e siècle, les techniques d'extraction par amalgame au mercure ont été largement développées au siècle suivant, notamment dans les mines du vice-royaume du Pérou où officiait Barba. Son avis quant à la valeur de l'essai par voie humide est néanmoins sans appel, ce qui est d'autant plus notable que la mise en place du processus d'amalgame par les Espagnols a joué un rôle important dans le contrôle politique du territoire inca par les Espagnols, au-delà de sa valeur technique³¹.

26. Biringuccio, 1540, f^o 45v^o.

27. Sans tenir compte du *Probierebüchlein* manuscrit de Lazarus Ercker de 1556 (Beierlein, Winkelmann, 1968), l'ouvrage de Samuel Zimmermann (Augsburg, 1573) est le premier à se détacher franchement de la tradition initiée par le *Probierebüchlein* publié à Magdeburg en 1524. Le seul écrit signé qui le précède est celui de Zacharias Lochner (Nürnberg, 1565) qui se distingue peu des éditions anonymes connues par ailleurs : dix parues entre 1524 et 1564 à Magdeburg, Strasbourg, Augsburg ou Nürnberg; trois parues entre 1574 et 1608 à Frankfurt (Sisco, Smith, 1949, p. 163-178). Trois autres livres des essais signés sont connus pour le xvi^e siècle : Ercker, 1574; Schreittmann, 1578; Fachs, 1595 (Gauthier, 2012, p. 224-233).

28. Zimmermann, 1573, p. 59-65 et suiv. (*Prob mit Wasser*, qui s'oppose à *Prob mit* ou *im fewr*).

29. Ercker, 1574, f^o 47v^o-48.

30. Barba, Lenglet du Fresnoy (trad.), 1751 [1640], p. 292.

31. Téreygeol, Cruz, 2021.

En Europe, la voie humide reste extrêmement rare au XVIII^e siècle pour ce qui est de l'essai des minerais, comme en témoigne le traité de Christoph Andreas Schlüter³². Elle trouve par contre sa place dans les laboratoires de chimie minérale, notamment dans celui de l'École des Mines. Les nombreux essais de minerais rapportés dans le *Journal des mines* puis dans les *Annales des mines* en témoignent, même si la concurrence entre la voie sèche et l'utilisation des acides, notamment en ce qui concerne les minerais de plomb argentifère, reste vive. L'essai mené par Jean-Baptiste Fournet en 1826, discuté par Pierre Berthier, en est un bon exemple³³. Fervent partisan de la voie sèche, Berthier affirme quelques années plus tard : « La scorification s'applique à toutes les matières argentifères sans exception, et c'est en même temps le moyen d'essai le plus exact³⁴. »

L'essai au chalumeau peut être considéré comme une autre solution, apparue tardivement, applicable aux minerais. Le principe est de fondre un échantillon, plus léger encore que les prises mises en jeu dans la scorification, placé sur un charbon, sous chaleur très vive. Pratique courante au XIX^e siècle³⁵, développée grâce aux appareils à gaz, on peut en voir les rudiments dans les traités du XVI^e siècle. Agricola et Ercker présentent tous deux une technique de réduction du minerai d'étain positionné dans un trou creusé dans un morceau de charbon, recouvert d'un second charbon. Cet ensemble est ensuite fondu, soit directement dans le foyer de la forge, soit dans un creuset quand un peu de flux noir³⁶ est ajouté à la prise. On devine que la cassitérite, un oxyde d'étain, se prête particulièrement à cette technique métallurgique. Celle-ci ne se retrouve ni chez Schindler ni chez Schlüter. Pratiqué dans les laboratoires académiques d'analyse minérale, l'essai au chalumeau ne semble pas avoir concurrencé l'usage du four à moufle dans les centres miniers.

32. Schlüter, 1738.

33. Fournet, Berthier, 1826.

34. Berthier, 1834, t. 2, p. 833.

35. La première référence en la matière est l'ouvrage du chimiste suédois Berzelius (Stockholm 1820; Paris 1821). Pour une application uniquement dans le domaine métallurgique, voir Berthier, 1834.

36. Mélange de tartre, de salpêtre et de charbon.

En guise de coda : l'essai de vérification

Si l'on poursuit notre observation des pratiques de chimie minérale en cette première moitié de XIX^e siècle, le manuel de métallurgie générale de Wilhelm August Lampadius apporte une nouvelle perspective qui prend le contre-pied de ce que nous avons constaté jusqu'alors³⁷. Le professeur de la *Bergakademie* de Freiberg y propose une classification originale des essais en fonction de leur but³⁸. Il distingue les « essais sous le rapport commercial » et les « essais de traitement », ainsi que les « essais analytiques » et les « essais de vérification ». Bien que ces catégories soient définies « dans la plus grande étendue de la science des essais », Lampadius les applique tous à l'exploitation minière et, dans ce cadre, aux minerais.

Les deux premières correspondent en tous points à l'essai commercial et à l'essai technique exposés ci-dessus. L'essai analytique est par contre chose improbable dans un contexte d'exploitation minière avant la fin du XVIII^e siècle. Il ambitionne de « connaître toutes les parties constituantes d'un minerai ou du produit de l'art » et de les retrouver après transformation de la matière par la métallurgie. C'est, selon Lampadius, « la véritable clef de la théorie des procédés métallurgiques³⁹ ». On devine une analyse qualitative et quantitative, sinon élémentaire, qui se veut du moins exhaustive. Cette démarche n'est pas décelable dans les écrits des essayeurs et autres métallurgistes travaillant dans les mines aux XVI^e, XVII^e et XVIII^e siècles. On saisit ici le passage du laboratoire d'essai sur le terrain de l'exploitation minière, à celui du chimiste ou du docimasiste, dans un laboratoire scientifique – un parcours, soit dit en passant, emblématique de la carrière du chimiste allemand, passé d'un poste de chimiste dans l'industrie du fer à celui de professeur à la *Bergakademie* de Freiberg.

L'essai de vérification consiste, quant à lui, à évaluer avec une « précision extrême » la perte liée aux procédés métallurgiques en grand par des essais qui visent à produire la totalité du métal contenu dans une matière, pour ce qui nous concerne dans un minerai. Lampadius estime que ces essais ne peuvent se faire que par voie humide⁴⁰. Nous avons pourtant

37. Lampadius, 1827 ; traduction française : Lampadius, Arrault, 1840.

38. Lampadius, Arrault, 1840, p. 17-21.

39. *Ibid.*, p. 20.

40. *Ibid.*, p. 19 ; p. 309-312.

trouvé les premiers indices d'une telle démarche dans les traités du XVI^e siècle, notamment chez Ercker qui, nous l'avons évoqué, décrivait des techniques permettant d'approcher au mieux la teneur réelle d'un minerai. Le maître essayeur n'insistait pas – à regret? – sur ce procédé pour des raisons techniques, et surtout parce qu'il n'avait aucun intérêt dans la démarche, principalement commerciale, de l'essai. La volonté de perfectionner les techniques de production comprend très certainement des comparaisons entre les rendements des opérations à petite et à grande échelle. Les sources imprimées n'offrent qu'un seul exemple de remise en cause d'une méthode de fonte en grand, chez Ercker, à propos du traitement d'un minerai d'étain⁴¹. On ne sait si les essais qui ont mené à cette conclusion ont été faits à dessein ou non. Mais il ne s'agit pas vraiment d'une démarche similaire à la vérification, au contrôle de qualité évoqué par Lampadius. Ce contrôle existe par contre dès le XVI^e siècle sur le produit fini, les lingots d'argent, et même avant dans les ateliers monétaires, où c'est le travail principal de l'essayeur.

La voie sèche a ainsi été de loin le principal moyen d'essayer les minerais tout au long de l'histoire minière médiévale et moderne. L'essai au four à moufle constitue une véritable technologie de pointe dès la fin du Moyen Âge puis pendant plusieurs siècles. Même au sein des laboratoires de docimasia du XIX^e siècle, où la voie humide prenait de plus en plus de place, scorification et coupellation sont restées les voies de l'essai *ordinaire*⁴². La voie sèche n'a vraiment été remplacée qu'au XX^e siècle par les méthodes d'analyse spectrométrique. Mais l'usage du four à moufle pour essayer les minerais perdure néanmoins, et autrement que lors des approches d'archéologie expérimentale. À Potosí, en Bolivie, là où le Cerro Rico est toujours exploité à plus de 4 000 m d'altitude, les essayeurs ne testent les minerais d'argent que par voie sèche⁴³. L'équipement a évolué, mais le matériel de base reste le même (scorificatoire en céramique, plaque de coulée, pinces...). Le changement principal tient à l'utilisation d'un four à gaz ou électrique, qui facilite la gestion de la température. Mais la chaîne opératoire est globalement identique à celle décrite par Lazarus Ercker dans la seconde moitié du XVI^e siècle (Fig. 3 et 4).

41. Ercker, 1574, f°128v°-129r°.

42. Lampadius, Arrault, 1840, p. 309.

43. Voir la contribution de Téreygeol, Gauthier, Absi, dans ce même volume.

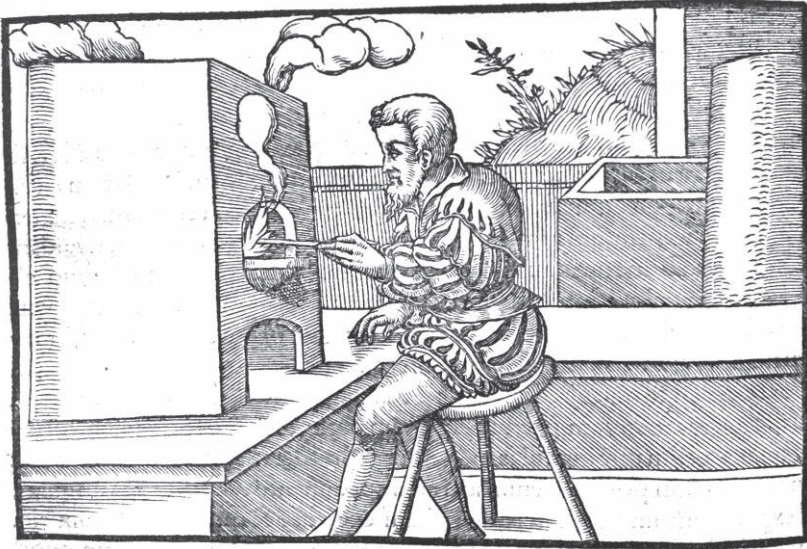


Fig. 3. – Essayeur au travail devant un four à moufle de section carrée

Georgius Agricola, *De re metallica. Libri XII*, Bâle,
Hieronymus Froben & Nicolaus Episcopus, 1556, p. 223.



Fig. 4. – Essayeur de Potosí devant un four électrique contenant des scorificateurs

Photographie Florian Téreygeol, Potosí (Bolivie), mars 2003.

Alors que l'usage systématique du four à moufle pour essayer les minerais pouvait s'expliquer par une absence de choix réel jusqu'à la fin du XVIII^e siècle, sa persistance jusqu'à nos jours n'est pas si évidente. Le coût des équipements spectrométriques explique aisément le non-recours à cette méthode. Mais cela n'est pas valable pour la voie humide, employée pour les minerais d'étain par les essayeurs de Potosí. Il faut ici considérer, comme au XIX^e siècle, la nécessité de correspondance entre le résultat de l'essai et celui de la production. L'objectif de l'essayeur en contexte minier n'est pas de connaître la teneur exacte du minerai en argent, tant que les processus de production ne sont pas en mesure d'extraire la totalité du précieux. On retrouve là l'impératif de représentativité bien mis en avant dans les sources du XVI^e siècle. Les modifications du résultat de l'essai en fonction des intérêts du vendeur et de l'acheteur relativisent certes cette explication. Étudier le coût d'une analyse par voie sèche et celui d'une analyse par voie humide donnerait peut-être une autre clé pour comprendre cette pérennité.

Celle-ci ne tient plus qu'à un fil, en cette première moitié de XXI^e siècle. Si le cas de Potosí est emblématique et peut certainement trouver des équivalents, l'essai par voie sèche semble, sous toute réserve, relever de l'exception. Si l'essai des minerais par voie sèche a perduré en Europe jusqu'à la fin du XIX^e siècle, il est particulièrement difficile de quantifier sa pratique à l'échelle mondiale aujourd'hui. Faut-il considérer que ce domaine particulier de la chimie métallurgique a pu se constituer, durer puis être restreint dans son cadre géographique d'origine tout en survivant dans des lieux isolés? Le constat d'une pérennité exceptionnelle de ces techniques conduit ainsi, inmanquablement, à s'interroger sur les moments de rupture qui ont mis fin à leur pratique, à leur apprentissage, à leur transmission.

Sources

AGRICOLA Georgius, *De re metallica*, Bâle, Hieronymus Froben & Nicolaus Episcopus, 1556.

AGRICOLA Georgius, *De re metallica. Libri XII*, Bâle, Froben, 1556.

BALLING Carl Albert Max, *Die Probirkunde. Anleitung zur Vornahme docimastischer Untersuchungen der Berg- und Hüttenproducte*, Braunschweig, Friedrich Vieweg und Sohn, 1879.

BARBA Álvaro Alonso, LENGLET DU FRESNOY Nicolas (trad.), *Métallurgie ou l'art de tirer & de purifier les métaux* [Madrid, 1640], Paris, 1751.

BERTHIER Pierre, *Traité des essais par la voie sèche : ou des propriétés, de la composition et de l'essai des substances métalliques et des combustibles*, 2 t., Paris, Thomine, 1834.

BERZELIUS Jöns Jacob, FRESNEL Fulgence (trad.), *De l'emploi du chalumeau dans les analyses chimiques et les déterminations minéralogiques* [Stockholm, 1820], Paris, Méquignon-Marvis, 1821.

BIRINGUCCIO Vannocio, *De la pirotehnia*, Venezia, 1540.

DAUVET Jean, MOLLAT Michel (éd.), *Les Affaires de Jacques Cœur. Journal du procureur Dauvet*, 2 t., Paris, Armand Colin (Affaires et Gens d'affaires), 1952-1953.

ERCKER Lazarus, *Probierbüchlein*, éd. BEIERLEIN Paul Reinhard, WINKELMANN Heinrich, *Lazarus Ercker. Drei Schriften*, Bochum, 1968.

ERCKER Lazarus, *Beschreibung Allerfürnemisten Mineralischen Ertzt unnd Berckwercks arten...*, Prag, Georgen Schwartz, 1574.

FACHS Modestin, *Probier Büchlein, Darinne Gründlicher bericht vormeldet, wie man alle Metall, und derselben zugehörnden Metallischen Ertzen...*, Leipzig, Henning Grosse, 1595.

FOURNET Jean-Baptiste, BERTHIER Pierre, «Essai du minerai de plomb argentifère de Bobenthal, régence de Spire (Bavière); suivi de remarques par M. Berthier», dans *Annales des mines*, série 1, vol. 13, 1826, p. 331-334.

LAMPADIUS Guillaume Auguste, ARRAULT Guy-Adolphe (trad.), *Manuel de métallurgie générale*, t. 1, Paris, Carillan-Goeury et Dalmont, 1840.

LAMPADIUS Wilhelm August, *Grundriss einer allgemeinen Hüttenkunde. Zum Gebrauche bei Vorlesungen und zum Selbstunterricht*, Göttingen, Dieterichschen Buchhandlung, 1827.

LOCHNER Zacharias, *Probier Büchlein Auff alle Metall, so die Ertzt vnd Bergkwerck des hochloblichen Teütschen Landts geben...*, Augsburg, Mattheus Francke, 1565.

SCHLÜTER Christoph Andreas, *Gründlicher Unterricht von Hütte-Werken... Nebst einem vollständigem Probier-Buch...*, Braunschweig, Friedrich Wilhelm Meyer, 1738.

SCHLUTTER Christophe André, HELLOT Jean (éd.), *De la fonte des mines, des fonderies, &c. Tome premier qui traite des essais des mines et des métaux...*, Paris, Pissot, 1750.

SCHREITTMANN Ciriacus, *Probierebüchlin. Fremde und subtile Kunst, vormals im Truck nie gesehen, von Woge und Gewicht, Auch von aller handt Proben, auff Ertz, Golt, Silber...*, Frankfurt, Christian Egenolff, 1578.

VAUQUELIN Nicolas-Louis, *Manuel de l'essayeur*, Paris, Bernard, 1799.

ZIMMERMANN Samuel, *Probierebüch Auff alle Metall, Müntz, Ertzt und Berckwerck, Deßgleichen auff Edel Gestain...*, Augsburg, Michael Manger, 1573.

Littérature secondaire

BEIERLEIN Paul Reinhard, *Lazarus Ercker. Bergmann, Hüttenmann und Münzmeister im 16. Jahrhundert*, Berlin, Akademie-Verlag (Freiberger Forschungshefte D 12), 1955.

BLAY Michel, HALLEUX Robert (dir.), *La Science classique. XVI^e-XVIII^e siècle. Dictionnaire critique*, Paris, Flammarion, 1998.

DALLMANN Wolfgang, GÜHNE Arndt, « Archäologische Belege zur Frühzeit des Bergbaus und des Hüttenwesens im Revier Freiberg/Sachsen », dans STEUER Heiko, ZIMMERMANN Ulrich (dir.), *Montanarchäologie in Europa. Berichte zum Internationalen Kolloquium „Frühe Erzgewinnung und Verhüttung in Europa“, Freiburg im Breisgau, octobre 1990*, Sigmaringen, Jan Thorbecke Verlag, 1993, p. 343-352.

DARMSTAEDTER Ernst, *Berg-, Probir- und Kunstbüchlein*, München, Verlag der Münchner Drucke, 1926.

GAUTHIER Joseph, « Un corpus unique en France pour l'archéologie de l'essai des minerais : les scorificatoires de Sainte-Marie-aux-Mines (XVI^e siècle) », dans GAUTHIER Joseph et al. (dir.), *Tagungsband. 24. Internationaler Bergbau- & Montanhistorik- Workshop (Pierres et Terre, n° 39)*, Soultz-Haut-Rhin, Les Éditions du patrimoine minier / ASEPAM, 2023, p. 41-53.

GAUTHIER Joseph, « Innovation technique et rationalisation structurelle dans les centres miniers des cités toscanes et de la couronne d'Aragon. Recherches aux origines de l'entreprise minière moderne (XIII^e-XV^e siècles) », *Mélanges de la Casa de Velázquez*, n° 48-1, 2018a, p. 89-110.

GAUTHIER Joseph, « L'essayeur : personnage central de la production minière au XVI^e siècle », *Cahier de la société d'histoire du Val de Lièpvre*, n° 40, 2018b, p. 33-58.

GAUTHIER Joseph, « L'essai des minerais au XVI^e siècle : réductions expérimentales de galènes au four à moufle », dans TÉREYGEOL Florian (dir.), *Comprendre les savoir-faire métallurgiques antiques et médiévaux*, Paris, Errance, 2013, p. 155-167.

GAUTHIER Joseph, *La Fortune des entreprises minières. Histoire et archéologie de l'essai des minerais par voie sèche en Europe, du haut Moyen Âge au XVIII^e siècle*, thèse d'archéologie industrielle, Mulhouse, Université de Haute-Alsace, 2012.

GAUTHIER Joseph, FLUCK Pierre, « À la recherche de céramiques d'essai des minerais : prospection dans les réserves archéologiques de Banská Štiavnica », *Les Actes du CRESAT*, n° 7, 2010, p. 103-106.

GOLDENBERG Gert, OTTO Jürgen, STEUER Heiko (éd.), *Archäometallurgische Untersuchungen zum Metallhüttenwesen im Schwarzwald*, Sigmaringen, Jan Thorbecke Verlag, 1996.

GUIRADO, Marie-Pierre, TÉREYGEOL, Florian, PEYRAT, François, « Initial Experiments on Silver Refining: How Did a Cupellation Furnace Work in the 16th Century? », *Historical Metallurgy*, vol. 44, n° 2, 2010, p. 126-135.

HALLEUX Robert, *Le Savoir de la main. Savants et artisans dans l'Europe pré-industrielle*, Paris, Armand Colin, 2009.

HALLEUX Robert, « Savoirs techniques », dans BLAY Michel, HALLEUX Robert (dir.), *La Science classique, XVI^e-XVIII^e siècles. Dictionnaire critique*, Paris, Flammarion, 1998, p. 801-811.

HALLEUX Robert, YANS Albert (éd. et trad.), *Georg Agricola. Bermannus (le mineur). Un dialogue sur les mines*, Paris, Les Belles lettres (Science et humanisme), 1990.

HOOVER Herbert Clark, HOOVER Lou Henry, *Georgius Agricola. De re metallica* [London, 1912], New York, Dover Publications, 1986.

MAQUEDA Florence, TÉREYGEOL Florian, FOY Eddy, GÉRAUD Manon, « Muffle: An Innovation around Silver Refining at Castel-Minier, 14th c. », *International Conference Ancient Mining and Metallurgy from Prehistory into the Modern Age, Stříbrná Jihlava, 2022. Acta rerum naturalium*, à paraître.

MERCIER-BION Florence, TÉREYGEOL Florian, « Suivi de la fusion expérimentale de galène de Melle (79) par microspectroscopie Raman », *ArcheoSciences*, n° 40, 2016, p. 137-148, <https://doi.org/10.4000/archeosciences.4813>.

OSTEN Sigrid von, *Das Alchemistenlaboratorium von Oberstockstall: ein Fundkomplex des 16. Jahrhunderts aus Niederösterreich*, Innsbruck, Universitätsverlag Wagner (Monographien zur Frühgeschichte und Mittelalterarchäologie, 6), 1998.

RICHTER Uwe, « Der Freiburger Raum », *Der Anschnitt*, vol. 46, n° 4-5, 1994, p. 118-121.

SISCO Anneliese Grünhaldt, SMITH Cyril Stanley, *Bergwerk- und Probierrbüchlein*, New York, The American Institute of Mining and Metallurgical Engineering, 1949.

TÉREYGEOL Florian, CRUZ Pablo, « La mine d'argent de Potosi : la technique au centre d'une lutte de pouvoir entre les Incas et les Espagnols (XVI^e-XVII^e siècles) », *Patrimoines du Sud* [en ligne], n° 13, 2021, <https://doi.org/10.4000/pds.6164>.

Les auteurs

Joseph Gauthier est historien des techniques et archéologue médiéviste, chargé de recherche au laboratoire Chrono-environnement à Besançon (UMR 6249 Chrono-environnement et UR 3436 CRESAT). Il s'intéresse à la production des métaux en Europe, et plus particulièrement dans le Rhin supérieur. L'activité minière et métallurgique est considérée sous ses aspects techniques, économiques et environnementaux. Auteur d'une thèse sur l'essai des minerais en Europe du haut Moyen Âge au XVIII^e siècle, il dirige, entre autres activités, les fouilles programmées sur le district minier de Sainte-Marie-aux-Mines (Haut-Rhin).

Florian Téreygeol est directeur de recherche au sein du Laboratoire Archéométriaux et prévision de l'altération (UMR 7065 IRAMAT et UMR 3685 NIMBE, LAPA, CEA/CNRS-Université Paris-Saclay). Archéologue de terrain, il développe ses travaux sur les techniques métallurgiques anciennes en s'appuyant sur la démarche expérimentale, les sciences humaines et l'archéométrie. Il dirige notamment la plateforme d'expérimentation des Arts du feu où l'étude des savoir-faire anciens se veut diachronique et ouverte à différentes aires culturelles, permettant des inter-comparaisons fructueuses (<https://iramat.cnrs.fr/nos-equipements/plateforme-experimentale-des-mines-dargent-de-melle/>).