



HAL
open science

L'évolution des premières métallurgies extractives du cuivre

David Bourgarit, Benoit Mille, Laurent Carozza, Albane Burens-Carozza

► **To cite this version:**

David Bourgarit, Benoit Mille, Laurent Carozza, Albane Burens-Carozza. L'évolution des premières métallurgies extractives du cuivre. Tchené, 2003, pp.7-13. hal-03148458

HAL Id: hal-03148458

<https://hal.science/hal-03148458>

Submitted on 22 Feb 2021

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.

David Bourgarit
Benoît Mille
Laurent Carozza
Albane Burens

L'évolution des premières métallurgies extractives du cuivre

Résumé. L'histoire de la métallurgie extractive débute avec le cuivre. Malgré la rareté des témoignages archéologiques, l'étude des sites d'extraction et notamment des déchets permet depuis peu de caractériser, au moins partiellement, les premiers procédés. Ainsi, on arrive aujourd'hui à documenter ce qui fut une véritable révolution au tout début de cette métallurgie, quand, d'une activité à faible production durant le Chalcolithique et le début de l'âge du Bronze, on passe progressivement à une véritable production de masse vers le milieu et la fin de l'âge du Bronze. Les premiers procédés sont non scorifiants, ils séparent mal le stérile du métal, et conduisent à des pertes importantes de cuivre. Puis, en élevant les températures et/ou les conditions réductrices, et en contrôlant peu à peu la composition de la charge, on optimise la séparation scorie/métal pour aboutir progressivement à des chaînes opératoires quasi continues qui permettent d'augmenter drastiquement les cadences de production. Contrairement à ce que l'on pensait jusqu'à très récemment, ce changement de mode de production n'est pas lié à un changement de type de minerai de cuivre exploité : minerais oxydés et minerais sulfurés ont tous deux été traités dès les premières phases de l'histoire de la métallurgie et continuent de l'être après la « révolution de l'âge du Bronze ».

Mots-clés. Métallurgie extractive, cuivre, archéologie, âge du bronze, Chalcolithique, archéométallurgie.

Abstract. The history of extractive metallurgy begins with copper. In spite of the scarcity of archaeological evidence, the study of extraction or workshops, and in particular of waste, has recently allowed us to characterise, at least partially, the earliest processes. Thus, we can now start to document what was a real revolution at the very beginning of this metallurgy, when the low-output activity of the Chalcolithic and Early Bronze Age gradually moved to mass production towards the middle and end of the Bronze Age. The early processes were none-slagging, they only imperfectly separated the waste from the metal and led to important losses of copper. Then, by raising the temperatures and/or the reducing conditions, and gradually controlling the composition of the charge, slag/metal separation was optimised, progressively attaining almost continuous operating cycles which allowed drastic increases in production rates. Contrary to what was believed until very recently, this change in the method of production was not linked to a change in the type of copper ore being worked: both oxide and sulphide ores were processed from the very early phases of the history of metallurgy, and continued to be so until after the "Bronze Age revolution".

Keywords. Extractive metallurgy, copper, archaeology, Bronze Age, chalcolithic, archaeometallurgy.

7

Introduction

La métallurgie extractive est l'ensemble des procédés métallurgiques qui permettent d'« extraire un métal de son minerai ». La plupart des métaux sont présents à l'état naturel sous forme oxydée. L'extraction consiste donc à faire passer un élément depuis cette forme oxydée (par exemple la malachite $\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$ ou la

chalcopryrite CuFeS_2) à la forme métallique : on parle de réduction.

C'est avec le cuivre que la métallurgie extractive serait née¹ [Mohen, 1990 ; Tylecote, 1992 ; Craddock, 1995] : c'est l'âge du Cuivre ou Chalcolithique, c'est-à-dire vers le début du III^e millénaire avant J.-C. en Europe occidentale (EO). Le deuxième grand pas est franchi lorsque la production d'un autre métal est mise en

David Bourgarit, ingénieur au C2RMF (david.bourgarit@culture.gouv.fr). Benoît Mille, ingénieur au C2RMF (benoit.mille@culture.gouv.fr). Laurent Carozza, ingénieur chargé de recherche, INRAP Grand Est, UMR 8555, Centre d'anthropologie de Toulouse, 39, allée Jules-Guesde, 31000 Toulouse (laurent.carozza@wanadoo.fr). Albane Burens, ingénieur CNRS, UMR 5594, Archéologie, cultures et sociétés, Université de Bourgogne, 6, boulevard Gabriel, 21000 Dijon (Albane.Burens@u-bourgogne.fr).

Tableau 1. Les grands types de minerais de cuivre

	Familles	Exemple	Formule
Minerais oxydés	oxydes	cuprite	Cu ₂ O
	carbonates	malachite	Cu ₂ CO ₃ (OH) ₂
	sulfates	brochantite	Cu ₄ SO ₄ (OH) ₂
	etc.		
Minerais sulfurés	primaires	chalcoppyrite	CuFeS ₂
	fahlores	tetraédrite	(Cu ± Ag, As, Fe, Zn) ₁₂ Sb ₄ S ₁₃

place, celle du fer, à l'âge du Fer (début du I^{er} millénaire avant J.-C. en EO). Ces deux métallurgies, métallurgie du cuivre et sidérurgie, ont elles-mêmes été le siège chacune d'une révolution technologique majeure, avant la révolution industrielle. La plus connue est celle de la sidérurgie avec le passage du procédé direct au procédé indirect (au cours du Moyen Âge en EO) : c'est notamment l'avènement d'une production à très grande échelle et l'apparition de la fonte [Dillmann et Fluzin, 2003]. Pour le cuivre, la révolution survient vers le milieu de l'âge du Bronze (deuxième moitié du II^e millénaire avant J.-C. en EO), quand débute une véritable production de masse. On assiste alors au remplacement progressif de l'outillage et de l'armement lithiques par des objets métalliques, principalement en bronze (cuivre allié d'étain).

Traditionnellement, ce passage entre les deux modes de production du cuivre est décrit comme étant intimement lié à un changement de type de minerai exploité : pour la première fois commenceraient d'être exploités les minerais sulfurés, bien plus abondants dans l'écorce terrestre et, surtout, réputés plus complexes à traiter (tableau 1). Or, plusieurs travaux récents ont montré que des minerais sulfurés étaient exploités dès la

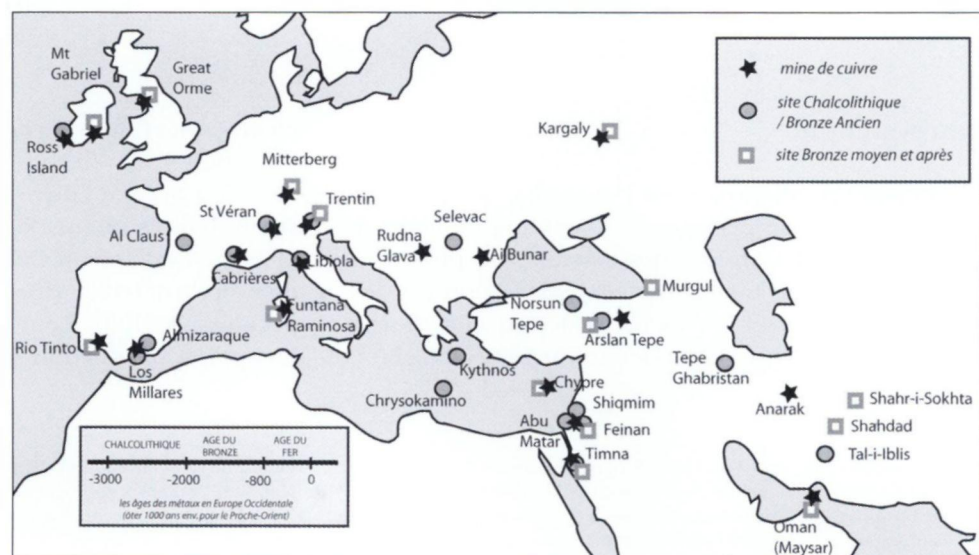
première phase. L'objet de cet article est de faire un point sur l'état des connaissances des premières phases de la métallurgie extractive du cuivre, en montrant quels progrès technologiques ont marqué la « révolution de l'âge du Bronze » et dans quelle mesure ils se font indépendamment du type de minerai traité, oxydé ou sulfuré.

Le chalcolithique ou les débuts : des procédés d'extraction non scorifiants

Les plus vieilles métallurgies extractives du cuivre connues se trouvent au Proche et au Moyen-Orient, et sont antérieures au IV^e millénaire avant J.-C. (figure 1)². En France, les premiers témoignages datent du début du III^e millénaire [Carozza *et al.*, 1999 ; Ambert *et al.*, 2002]. Ces métallurgies présentent une caractéristique commune : elles sont peu productives, génèrent peu de déchets et les pertes de cuivre sont importantes (systématiquement plus de 10 % en masse de cuivre dans les déchets retrouvés). La raison principale est également commune à tous les sites étudiés : le cuivre métallique est mal séparé des produits non désirables ou stériles, principalement les minéraux formant la gangue du minerai (quartz, dolomite, etc.). Les déchets que l'on retrouve sont des agglomérats de minéraux non fondus (quartz), dont la cohésion est assurée par des zones fondues plus ou moins visqueuses mêlant billes de métal, phases de cuivre à l'état oxydé et phases silicatées (figure 2).

Autrement dit, il n'y a pas véritablement formation d'une scorie, c'est-à-dire d'une phase suffisamment fluide pour que le métal, plus dense, se rassemble au-dessous du stérile. On dit alors que les procédés d'extraction sont non scorifiants, ils nécessitent de

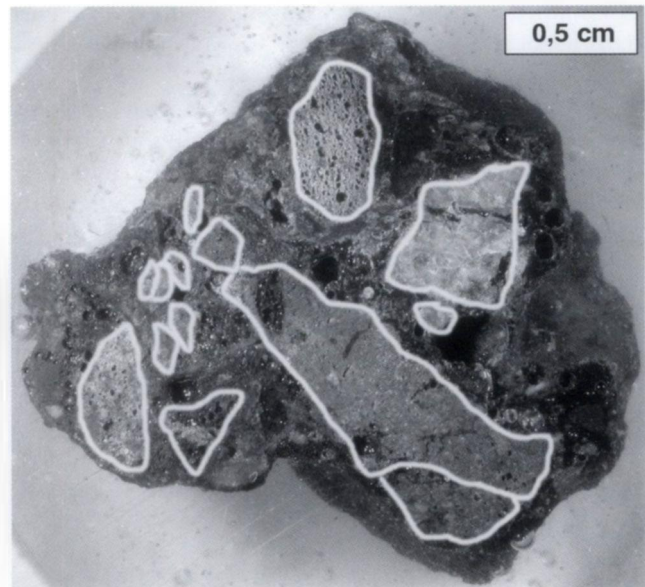
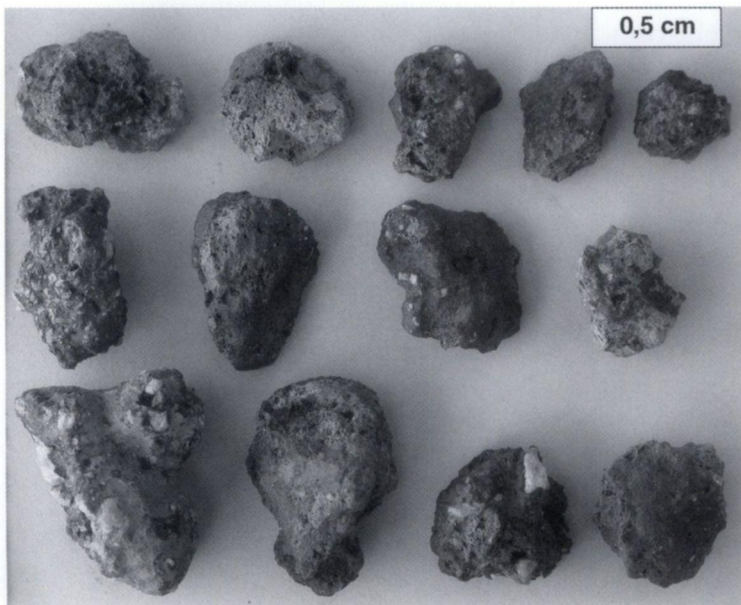
Figure 1. Principaux sites connus, témoins d'une activité de métallurgie extractive du cuivre. Ont été distingués les sites de la première phase (Chalcolithique-début de l'âge du Bronze) et les sites de la phase de production de masse (âge du Bronze et après). Sont indiquées également les principales mines anciennes de cuivre connues.



La production

Figure 2. Faciès typique des scories chalcolithiques, avec l'exemple du site de la Capitelle du Broum (Hérault, France) :

- a) vue générale montrant la petite taille des scories (poids moyen autour de 1 g) ;
- b) vue en coupe à la loupe binoculaire montrant les fragments de quartz et d'argile non fondus (entourés en blanc) agglomérés par une phase passée par un état liquide plus ou moins visqueux (largeur de l'image : environ 2 cm).



9

concasser le produit (la « scorie ») après refroidissement pour en extraire le métal. Cette non-scorification – la viscosité importante du produit obtenu en somme – tient à trois paramètres : une température basse ; des conditions peu réductrices (figure 3) ; une absence de maîtrise des compositions de la charge³. Ces trois paramètres permettent de décrire l'essentiel de la chaîne opératoire telle qu'elle est aujourd'hui connue pour l'ensemble des sites étudiés (pour une synthèse, voir Hauptmann, 2000).

1. L'étude des scories archéologiques et les expérimentations ont montré que les températures atteintes ne dépassaient pas 1 200 °C. Aucun vestige archéolo-

gique ne permet à ce jour de déterminer comment ces températures étaient atteintes, et en particulier si une ventilation forcée était utilisée. Plusieurs modèles tendent à privilégier une ventilation par la force du vent, comme à Feinan (Jordanie) et sur l'île égéenne de Kythnos. La nature du combustible n'a, quant à elle, jamais été clairement déterminée. On suppose que du charbon de bois était utilisé, c'est en effet le seul moyen connu pour obtenir des conditions suffisamment réductrices pour réduire les minerais de type oxyde via le couple CO/CO₂.

2. Les conditions peu réductrices ($p_{O_2} > 10^{-6}$ atm) révélées par toutes les études de scories trahissent la faible hauteur de charbon dans les foyers, et donc des réacteurs ou foyers : on l'estime à une vingtaine de centimètres tout au plus⁴. Les réacteurs sont très mal connus. Cependant, les quelques vestiges et les données révélées par l'analyse des scories permettent de proposer une typologie commune. Ce sont des structures de petite dimension, 30 cm de diamètre au plus. La nature

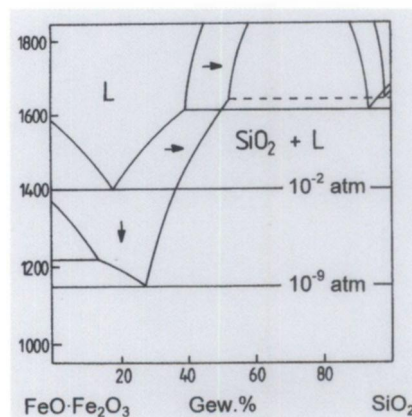


Figure 3. Diagramme de phases à l'équilibre du système Fe_3O_4/SiO_2 , montrant l'influence de la pression partielle d'oxygène p_{O_2} sur la température de formation d'un composé eutectique entre oxyde de fer et quartz : à haute pression, la scorie se liquéfie à 1 400 °C, alors que, dans des conditions plus réductrices (10^{-9} atm), 1 150 °C suffisent pour former la fayalite Fe_2SiO_4 (un autre système est parfois rencontré en métallurgie du cuivre, qui voit intervenir le manganèse et la téphroite Mn_2SiO_4). [D'après Hauptmann, 2000.]

des matériaux constitutifs varie du simple trou creusé dans le sol avec ou sans pavage lithique, à des vases en céramique.

3. Les compositions chimiques des scories très loin des eutectiques montrent sans conteste qu'au Châlcolithique, la composition de la charge n'était pas maîtrisée, notamment par l'ajout de fondant. La préparation de la charge se résumait à trier le minerai, c'est-à-dire à le débarrasser au maximum de sa gangue. Cet enrichissement se faisait mécaniquement, par concassage sur des « meules » rudimentaires (*cf.* les galets à cupule du Sud de la France).

10

L'âge du bronze et la production de masse : la scorification

Outre par la mise en circulation d'importantes quantités de métal, le changement des échelles de production transparait également sur les sites mêmes d'extraction, à travers les montagnes de scories (les « haldes ») qui font leur apparition. À titre de comparaison, le site chalcolithique de la Capitelle (Hérault) a livré à ce jour moins de 1 kg de scories⁵. Ce phénomène met bien en avant l'acteur principal de cette révolution métallurgique : la scorie et la mise au point d'un procédé scorifiant. Appa-

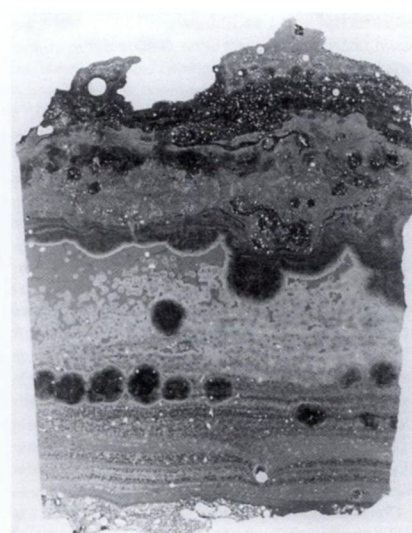
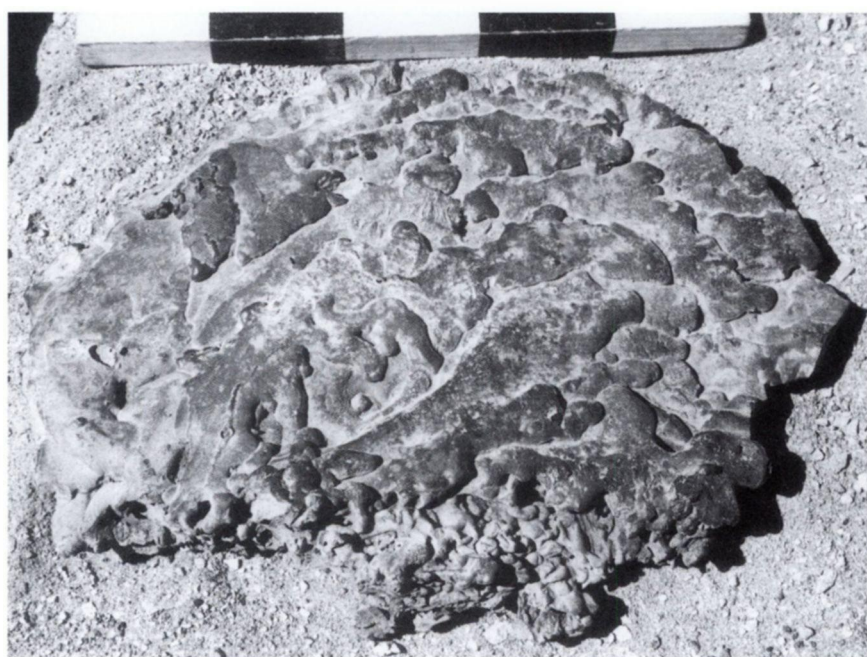
raissent alors des réacteurs pyrométallurgiques plus élaborés, qui autorisent des procédés quasi continus avec production d'une scorie suffisamment fluide pour pouvoir être évacuée au fur et à mesure de la réduction (figure 4). Ces réacteurs, que l'on peut dorénavant qualifier de fours, vont permettre l'optimisation des deux paramètres température et conditions oxydo-réductrices. Indépendamment du four, le troisième paramètre, composition de la charge, fera lui aussi l'objet d'améliorations sensibles, quoique plus progressives.

1. Les températures se situent maintenant entre 1 200 et 1 300 °C, grâce à la maîtrise de la ventilation forcée dont témoignent les nombreux embouts de tuyères céramiques systématiquement trouvés. On ne connaît cependant pas précisément les procédés employés ; le modèle le plus couramment imaginé est celui de soufflets en peau.

2. Les conditions plus réductrices permettent d'abaisser fortement les températures des eutectiques, à l'image du système le plus commun, le système Fe_3O_4/SiO_2 (figure 3). Ces conditions plus réductrices sont atteintes grâce à l'élévation des foyers et donc de l'épaisseur de la couche de charbon ; ce dernier reste le combustible en usage. La typologie de foyer la plus courante est celle représentée sur la figure 5, que l'on rencontre aussi bien dans les alpes autrichiennes et italiennes qu'au Proche-Orient. Pour autant, la forme complète reste un sujet de débat, et en particulier la hauteur réelle du four [Doonan, 1999].

3. La maîtrise de la composition de la charge est la clé de voûte des procédés modernes, et l'évolution de la composition des scories avec le temps montre clairement les progrès accomplis. Pour autant, il est loin

Figure 4. Faciès typique des scories « de coulée » de la fin de l'âge du Bronze :
a) vue générale montrant la taille importante (50 cm, 22,5 kg) et l'aspect fluide (Timna, âge du Fer, d'après Rothenberg, 1990) ;
b) vue sur lame mince en lumière transmise au microscope optique montrant la structure totalement fondue avec des écoulements laminaires (largeur 3,5 cm, Feinan, époque romaine, d'après Hauptmann, 2000).



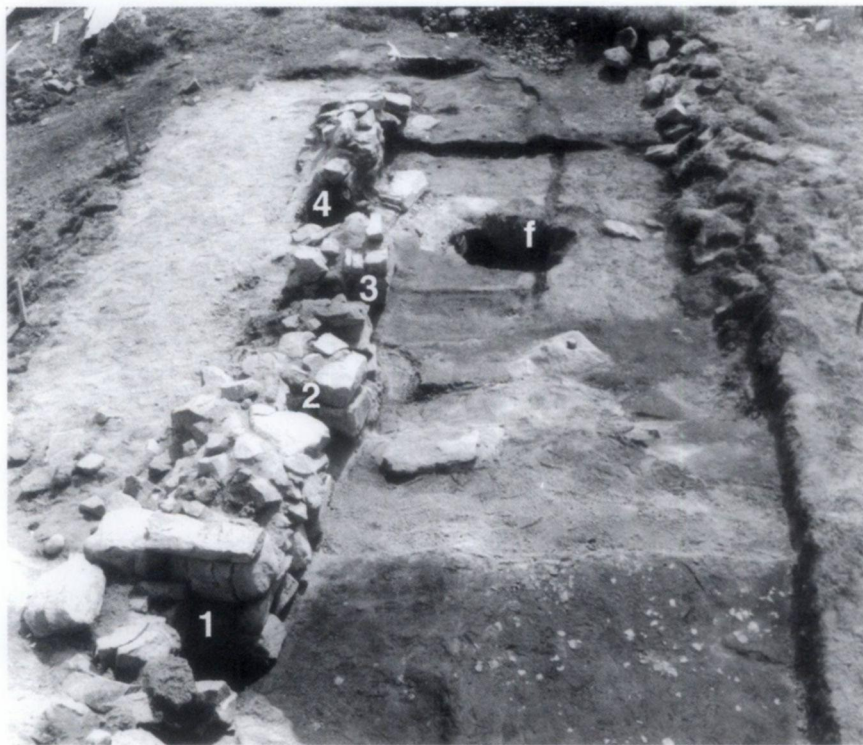


Figure 5. Batterie de quatre fours de réduction de minerai type chalcoppyrite (notés 1 à 4, f = fosse) à Acqua Fredda dans le Trentin, Alpes italiennes, âge du Bronze final (1400-900 avant J.-C.). Pour plus de détails, voir notamment Cierny [1998]. © Deutsches Bergbau Museum, Bochum, Prof. Dr. G. Weisgerber (diamètre de la fosse : environ 1 m).

d'être certain que ces progrès et la naissance du procédé scorifiant aient été simultanés. C'est en tout cas très clair à Feinan (Jordanie), où toutes les phases entre le chalcolithique et la période islamique sont représentées : ce n'est qu'à partir de l'âge du Fer que les compositions des scories se rassemblent autour de valeurs optimales, probablement par l'ajout de fondants [Hauptmann, 2000].

Le cas des sulfures

La question des minerais n'a pas été abordée. Pourtant, comme nous l'avons mentionné en introduction, elle sous-tend le schéma classique qui décrit la « révolution de l'âge du Bronze » comme marquant les premières exploitations des minerais sulfurés. En quoi une telle exploitation aurait-elle dû attendre une révolution technologique ? L'erreur principale vient du fait que les seuls procédés envisagés jusqu'à récemment pour traiter les minerais sulfurés étaient directement inspirés des modèles du Moyen Âge, décrits par Agricola pour le sulfure le plus abondant, la chalcoppyrite CuFeS_2 [Agricola, 1556] : ils sont complexes et donc peu compatibles avec des contextes de métallurgie naissante. La complexité de ce procédé « Agricola » tient à deux choses (figure 6) :

a) une étape préalable à la réduction est nécessaire ; elle consiste à évacuer tout le soufre du minerai : c'est le grillage, réalisé à basse température (400-700 °C)

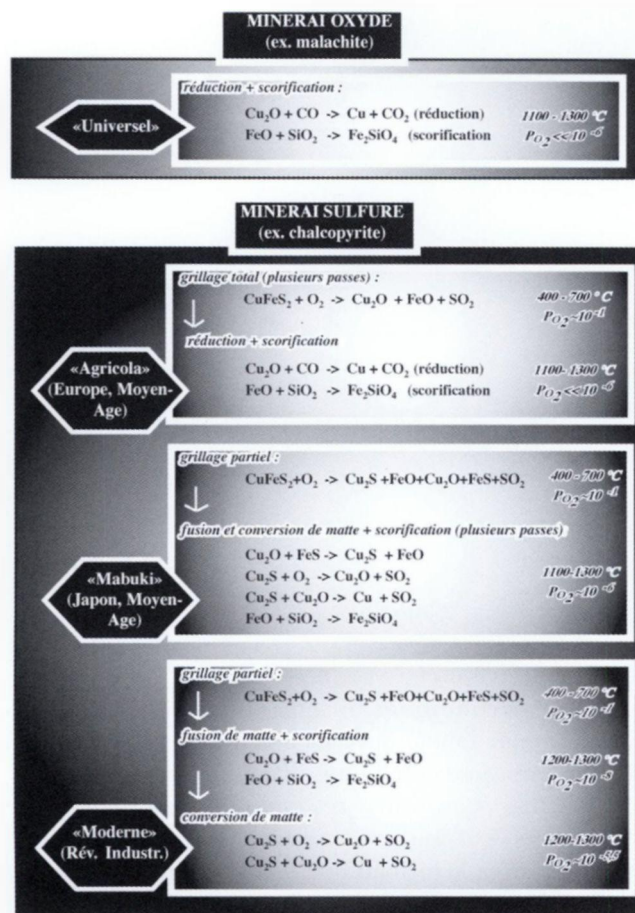
et dans des conditions fortement oxydantes dans des foyers complètement ouverts ; il peut être répété jusqu'à dix fois pour parvenir à un grillage suffisant ;

b) des conditions très réductrices sont ensuite nécessaires, à la fois pour réduire l'oxyde de cuivre et pour optimiser la formation d'une scorie de type fayalite (voir ci-dessus) : des foyers évolués de type bas fourneau étaient alors envisagés.

Ce schéma « sulfures = âge du bronze = procédé avec grillage » était de plus corroboré par les trouvailles archéologiques. En effet, les principaux sites de l'âge du bronze traitant des sulfures ont livré, outre des foyers dits de réduction, des zones s'apparentant à des aires de grillage⁶.

Cependant, depuis les années 1980, un procédé alternatif nettement moins complexe a commencé d'être proposé. D'une part, une étude physico-chimique approfondie des scories archéologiques d'un site du début de l'âge du bronze dans les Alpes autrichiennes (Mitterberg) a montré que l'étape dite de réduction se déroulait dans des conditions relativement peu réductrices [Moesta et Schlick, 1990]. Un procédé de type Mabuki a alors été proposé (figure 6) qui se contente d'un grillage partiel et, pour l'étape haute température, de conditions peu réductrices, donc d'un foyer peu élevé. D'autre part, des premiers travaux expérimentaux ont confirmé la faisabilité d'un tel procédé peu réducteur, où sulfures de cuivre et oxydes de cuivre interagissent pour former du métal [Rostoker *et al.*, 1989]. Des travaux plus récents ont affiné le modèle de Rostoker et

Figure 6. Les différents procédés pyrométallurgiques de réduction de minerais de cuivre, d'après Biswas et Davenport, 1976; Yazawa, 1980; Moesta, 1986 (les équations ne sont pas équilibrées).



montré que le procédé pouvait être réduit à sa plus grande simplicité. On parvient alors à des conditions tout à fait compatibles avec ce que nous avons décrit plus haut des procédés chalcolithiques : basse température, conditions peu réductrices, aucun contrôle de la composition de la charge [Bourgarit et Mille, 2001; Bourgarit *et al.*, à paraître]⁷. De plus, on aboutit alors à une chaîne opératoire qui peut s'affranchir de l'étape de grillage, pourvu que suffisamment d'oxygène soit présent dès le départ dans le système : au minerai sulfuré s'ajoute du minerai oxydé.

Finalement, durant la dernière décennie, il est devenu possible d'envisager un traitement simple des minerais sulfurés qui aurait pu être pratiqué avant la «révolution de l'âge du Bronze». Or, justement, plusieurs études archéologiques et archéométallurgiques des dix dernières années ont montré que des minerais de type sulfuré ont bel et bien été exploités au Chalcolithique, bien avant la «révolution de l'âge du Bronze» : Abu Matar, Ross Island, Cabrières, Selevac et probablement Al Claus (figure 1). Malheureusement, les témoignages chalcolithiques sont encore plus rares que

pour l'âge du Bronze et il est bien difficile de documenter les procédés exacts utilisés : si les seuls vestiges qui nous parviennent –le métal comme les déchets produits– permettent à coup sûr de valider l'hypothèse d'un procédé oxydant sans scorification, ils n'autorisent pas encore à écarter l'hypothèse d'une étape de grillage partiel ni à statuer sur le nombre d'étapes haute température. On espère que la fouille complète de l'atelier métallurgique du site de la Capitelle (Hérault), en documentant l'organisation de l'activité et en particulier l'éventuelle spécificité de tel ou tel foyer pyrométallurgique, permettra d'apporter des réponses plus tranchées.

Conclusion

On peut schématiser l'histoire des débuts de la métallurgie extractive, en l'occurrence celle du cuivre, comme étant la succession de deux phases. La première phase à faible niveau de production se caractérise par des procédés peu performants. Elle est suivie d'une phase qui débouche sur une production de masse grâce à la mise au point de techniques qui extraient très efficacement le cuivre métallique de son minerai. Les fondements de ce schéma évolutif sont établis depuis relativement longtemps, puisque la seule considération des produits, les objets en cuivre et alliages, permettait d'en tracer les grandes lignes : la masse de métal en circulation à la fin de l'âge du Bronze est sans commune mesure avec celle des tout débuts de la métallurgie. La caractérisation des procédés de la métallurgie extractive du cuivre est nettement plus récente et, on l'a vu, encore très parcellaire. Un des acquis les plus significatifs de ces dernières années nous semble être l'élimination de la nature du minerai comme paramètre attaché à cette évolution : minerais à base de sulfures et minerais oxydés peuvent être réduits par des chaînes opératoires similaires, aussi bien par les premiers procédés non scorifiants que par les techniques plus évoluées qui évacuent le stérile de façon plus ou moins continue.

Cette présentation, en s'attachant à décrire une évolution unique de la métallurgie extractive du cuivre, n'évite pas l'écueil d'une trop grande simplification. Il ne fait aucun doute que la réalité de ces phénomènes, dans l'espace comme dans le temps, est bien plus complexe. D'une part, pour une même période les procédés se déclinent certainement sur un nombre de modes très variés selon la région, à l'instar des quantités très variables de scories retrouvées sur les différents sites chalcolithiques connus ou, bien plus tard, au Moyen Âge, des différentes manières de traiter la chalcoppyrite (procédé Agricola, procédé Mabuki). D'autre part, la «révolution de l'âge du Bronze» a été probablement

très progressive, à l'image de ce que l'on peut observer à Feinan en Jordanie vis-à-vis de l'ajout de fondants. Il faut enfin garder à l'esprit que l'évolution technique n'a aucune raison d'avoir été parfaitement monotone dans le temps; la «quête vers le progrès» est une notion héritée de la révolution industrielle et ne peut être appliquée sans discernement à l'évolution des sociétés anciennes. Car les contingences qui pèsent sur la production métallurgique sont multiples. Une évolution provoquée par un déterminisme naturel sera aisément

décelable, comme par exemple l'affaiblissement de la richesse des minerais qui va conditionner l'abandon de techniques et la mise au point de nouvelles techniques. Mais il faut également tenter d'appréhender l'impact de la structure sociale: que se passe-t-il lorsqu'une société se hiérarchise très fortement? L'identité culturelle d'un groupe peut-elle également se définir par les techniques qu'il maîtrise? Quel sera le poids du symbolisme attaché à ce nouveau matériau si particulier?

Références bibliographiques

- Agricola G., 1556. *De re metallica*, traduit par A. France-Lanord, 1987, édité et imprimé par Gérard Klopp S.A., Thionville.
- Ambert P., Coularou C., Cert C., Guendon J.-L., Bourgarit D., Mille B., Dainat D., Houllès N. et Baumes B., 2002. Le plus vieil établissement de métallurgistes de France (III^e millénaire avant J.-C.): Péret (Hérault), *Compte rendu Acad. des sciences*, Pale vol. 1, 67-74.
- Biswas A.K. et Davenport W.G., 1976. Extractive Metallurgy of copper, *Int. Series on Mat. Sci. and Tech.*, Pergamon.
- Bourgarit D., Mille B., Burens A., Carozza L., à paraître. *Smelting of chalcophyrite during chalcolithic times: some have done it in ceramic pots as vase-furnaces*, 33rd Int. Conf. on Archaeometry, 22-26 avril 2002, Amsterdam.
- Bourgarit D. et Mille B., 2001. La transformation en métal de minerais de cuivre à base de sulfures: et pourquoi pas dès le Chalcolithique?, *Revue d'Archéométrie*, 25, 145-155.
- Carozza L., Bourgarit D. et Mille B., 1999. L'habitat et l'atelier de métallurgiste chalcolithique d'Al Claus: analyse et interprétation des témoins d'activité métallurgique, *Archéologie en Languedoc*, n° 21, p. 147-160.
- Ciorny J., Marzatico F., Perini R. et Weisgerber G., 1998. Prehistoric Copper Metallurgy in the Southern Alpine Region, in *L'atelier du bronzier en Europe du XX^e au VIII^e siècle avant notre ère*, eds. Mordant C., Pernot M., Rychner V., Paris, CTHS, tome II, 25-34.
- Craddock P.T., 1995. *Early metal mining and production*, Edinburgh, Edinburgh University Press.
- Dillmann P. et Fluzin P., 2003. «Analyse des matériaux et histoire de la sidérurgie», *Technè* n° 18, p. 20.
- Doonan R.C.P., 1999. Copper production in the Eastern Alps during the Bronze Age: technological change and the unintended consequences of social reorganization, in *Metals in Antiquity*, eds. Young S.M.M., Pollard P.A.M., Budd P., Ixer R.A., BAR international series 792, Oxford: Archaeopress, 72-77.
- Hauptmann A., 2000. Zur frühen Metallurgie des Kupfers in Fenan/Jordanien, *Der Anschnitt*, Beiheft 11, Bochum: Deutsches Bergbau Museum.
- Moesta, H., 1986. Bronze Age Copper Smelting, *Interdisciplinary Science Reviews*, 11, 1, p. 73-87.
- Moesta H. et Schlick G., 1990. The furnace of Mitterberg an oxidizing Bronze Age copper process, *Bulletin of the metals Museum*, 14, p. 5-16.
- Mohen J.P., 1990. *Métallurgie préhistorique. Introduction à la paléométagallurgie*, Paris, Masson.
- Rostoker W., Pigott V.C. et Dvorak J.R., 1989. Direct reduction to copper metal by oxide-sulfide mineral interaction, *Archaeometaterials*, 3, 69-87.
- Rothenberg B., 1990. *The Ancient Metallurgy of Copper*, vol. 2, London, Institute of Archaeology.
- Tylecote R.F., 1992. *A history of metallurgy*, Brookfield, The Institute of Materials.
- Yazawa A., 1980. Distribution of various elements for copper, matte, and slag, *Erzmetall*, 33, 7-8, p. 377-382.
- supplément aux écarts de composition en ajoutant dans la charge certains éléments, les fondants.
4. La hauteur de charbon influe directement sur les conditions d'oxydo-réduction via la quantité de CO au sein du couple CO/CO₂: (1) C+O₂-> CO₂ et (2) CO₂+C-> 2CO. Il est connu en sidérurgie qu'il faut une hauteur minimale de 60 cm pour parvenir à l'équilibre de Boudouard (réaction 2) dans des conditions cinétiques (et notamment de température) standards.
5. L'information quantitative contenue dans les scories est biaisée par le fait qu'au Chalcolithique, déchet (scorie) et métal ne formaient qu'un. Autrement dit, les scories étaient retravaillées (concassage voire réintroduction dans la chaîne opératoire), c'est-à-dire en somme au moins partiellement recyclées. De plus, intervient la notion de richesse de minerai. Ainsi, à Ross Island (Irlande), aucune scorie n'a jamais été retrouvée, alors que plusieurs kilos sont retrouvés au Proche-Orient (Abu Matar, Wadi Fidan 4, etc.) voire des quantités plus importantes à Kythnos (mer Egée) et Chrysokamino (Crète)!
6. Principalement dans les Alpes autrichiennes et italiennes. Les autres grands sites, sur l'île de Chypre (cf. l'*Odyssée* d'Homère) et au sud de la péninsule Ibérique autour du Rio Tinto, n'ont pas encore livré de structures pyrométallurgiques permettant de documenter les chaînes opératoires pratiquées.
7. On constate même que la présence de sulfures dans le minerai aurait finalement tendance à faciliter l'extraction et donc à rendre les minerais à base de sulfures plus faciles d'emploi que leurs homologues oxydés. D'une part, en effet, le départ du soufre est exothermique (bien connu en particulier pour la pyrite FeS₂) et, par conséquent, facilite la montée en température. D'autre part, la coréduction sulfures/oxydes de cuivre ôte tout besoin d'agent réducteur externe et, en particulier, de charbon, c'est-à-dire d'un produit manufacturé.

Notes

- Il est probable que l'extraction du plomb lui ait été contemporaine.
- Des dates bien plus anciennes existent pour certains sites (VI^e millénaire voire encore avant), mais aucune étude archéométagallurgique suffisamment approfondie n'a été conduite pour certifier l'activité de métallurgie extractive.
- La recherche de l'état liquide, c'est enfin et avant tout la recherche d'une composition proche de l'eutectique (typiquement celle de la fayalite Fe₂SiO₄). Or, il est rare que le minerai affiche une telle composition, et les métallurgies efficaces



Figure 1. Exemples de scories de réduction dans la chaîne opératoire directe.
a) Scorie coulée.
b) Fond de four du Val Gabbia VI^e siècle.
© photos P. Fluzin.



I

Jean Plateau

La naissance de l'aluminium

Bracelet (x 0,8). Aluminium ciselé, vermeil, camée en pierre de lave, ca. 1865.
Collection et cliché J. Plateau. Inv. 11923.



Boîte à pilules (x 1,5). Aluminium repoussé et ciselé, vermeil, émail, ca. 1862.
Attribuée à Bédier et Picot.
Collection et cliché J. Plateau. Inv. 11869.



Service à thé (x 0,3). Bronze d'aluminium, ca. 1865. Poinçon de Paul Morin.
Collection et cliché J. Plateau. Inv. 12207.



La production