



HAL
open science

La métallurgie “ préindustrielle ” du bronze au Nouvel Empire. Archéologie expérimentale

Georges Verly

► **To cite this version:**

Georges Verly. La métallurgie “ préindustrielle ” du bronze au Nouvel Empire. Archéologie expérimentale. Cahier des thèmes transversaux ArScAn, 2008, VIII, pp.92-111. hal-02234412

HAL Id: hal-02234412

<https://hal.science/hal-02234412>

Submitted on 1 Aug 2019

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.

La métallurgie « préindustrielle » du bronze au Nouvel Empire. Archéologie expérimentale

Georges VERLY

(Université Libre de Bruxelles)

I - MÉTALLURGIE PRIMAIRE – EXTRACTIVE – DE PREMIÈRE TRANSFORMATION :

But : partir du minerai (oxydes ou sulfures de cuivre) pour aboutir soit au métal liquide soit à une éponge. Cette étape comporte des opérations d'extraction¹ et de séparation des constituants du minerai. La réduction² des minerais d'oxydes de

1 - Le patriarche Photios de Constantinople (820-891) nous a transmis un texte du Grec Agatharchides (2^e ACN) sur l'exploitation des mines d'or en Nubie (attention, connotation religieuse). « A coté des criminels et des prisonniers de guerre, il y avait des personnes innocentes, des femmes, des vieillards et même des enfants. Ils étaient ligotés aux pieds et aux mains, travaillant jour et nuit jusqu'à l'épuisement. Ils étaient surveillés par des soldats étrangers qui ne comprenaient pas la langue et qui ainsi ne manifestaient aucun tourment face aux plaintes et aux questions. Les prisonniers les plus forts devaient extraire aux pics les blocs de quartz. Les galeries étaient tellement basses que nous ne pouvions que circuler pliés en deux. Il y faisait très sombre et pour garder les mains libres, les mineurs devaient se lier la lampe au front. Sans cesse sous surveillance et sous les coups, ils travaillaient dans une chaleur épouvantable. Les enfants devaient tirer les blocs hors de la mine pour que les vieillards puissent concasser ces blocs en plus petits morceaux. D'autres vieillards et les femmes réduisaient le tout en poussière. Cette poussière était mise dans des poêlons en terre cuite avec un ajout de plomb, de sel, d'un peu d'étain et de son d'orge (?). Le tout brûlait à feu ouvert pendant 5 jours et 5 nuits. Après refroidissement, les lingots d'or en forme d'anneau étaient prêts pour le transport ». Cf. H. Kayser, *Ägyptisches Kunsthandwerk. Ein Handbuch für Sammeer und Liedhaber Braunschweig, Bibliothek für Kunst 4, Band XXVI, 1964, pp. 161-162.*

2 - Réduction de type carbothermique : procédé qui passe par un état liquide ou par une matte faite de Cu dissous dans un laitier (métallothermie : métal-laitier) : $\text{CuO}_{(s)} + \text{C}_{(s)} \rightarrow \text{Cu}_{(s)} + \text{CO}_{(g)}$. Le Cu, contrairement au Fe, se réduit même en milieu peu réducteur. A haute température, les réactions entre phases solides étant très

cuire consiste à dégager le cuivre de sa gangue en unifiant l'O au C, grâce à une atmosphère réductrice³. La réduction des sulfures de cuivre

lentes, la réduction des oxydes, en présence de C, s'effectue en fait toujours par l'intermédiaire d'une phase gazeuse : CO (gaz réducteur) : $\text{CuO}_{(s)} + \text{CO}_{(g)} \rightarrow \text{Cu}_{(s)} + \text{CO}_{2(g)}$. Le CO nécessaire est fourni par la réaction de Boudouard : $\text{CO}_{2(g)} + \text{C}_{(s)} \rightarrow 2 \text{CO}_{(g)}$. La réaction de Boudouard, en régénérant le gaz réducteur CO, permet de maintenir la réduction du Cu. Elle est endothermique, donc le degré de conversion maximum du CO_2 en CO et le pouvoir de régénération du gaz réducteur croissent avec la température. Thermodynamiquement, la réaction de Boudouard est quasi complète au dessus de 900° C. En fait, elle est très lente en dessous de 950-1100° C, température qui dépend de la nature du C. La vitesse de réduction d'un oxyde par le C en dessous de cette température sera la vitesse de réaction de Boudouard, qui commande la vitesse de production de CO réducteur nécessaire. La réduction par carbothermie n'est donc mise en oeuvre qu'à des températures supérieures à 1000° - 1100° C. Cette réaction est aussi valable pour la métallurgie secondaire : fonte. C'est un cap auquel nous sommes confrontés continuellement en archéologie expérimental (indicateur naturel de la montée en température). Comme il y a production de CO, la pression partielle de CO croît si le système est fermé et l'affinité décroît avec le degré d'avancement de cette réaction. Si la transformation est effectuée sous une pression constante, celle-ci se poursuit tant que le gaz produit peut se dégager de la pression ambiante (ce qui rend impossible cette opération les jours de haute pression).

3 - Fig. 2 : Exemple de réduction de malachite (prov. Katanga – RDC) : **1)** couche de charbon de bois pillé au fond du creuset pour réduire l'incrustation du Cu dans la poterie (fig. 3 : Exemple de poterie commune utilisée pour une réduction ; prov. Liberchies époque gallo-romaine) ; **2)** la malachite est broyée, puis recouverte de charbon de bois pour maintenir une atmosphère réductrice ; **3)** la tuyère canalise d'O à la base du creuset (10 minutes pour atteindre 1000°C) nous devons atteindre la température mais pas la maintenir, indicateurs de réussite : flamme verte et creuset blanc (pas de réaction avec du bois vert) ; **4)** obtention de Cu brut.

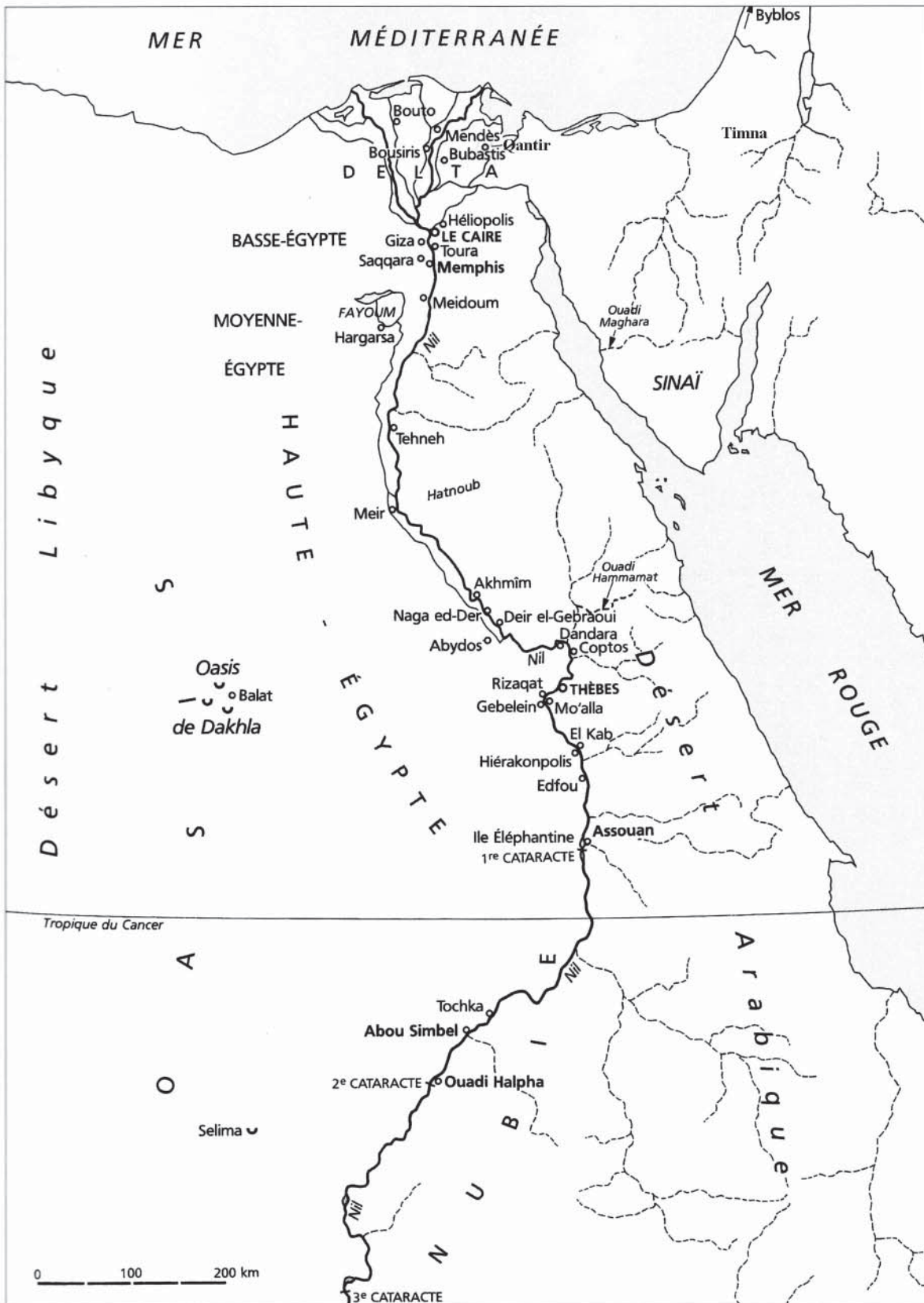


Fig. 1 - Carte Egypte



Fig. 2 - Réduction de malachite

demande une étape intermédiaire. Ils doivent d'abord se transformer en oxydes pour être réduits ; il faut donc une phase intermédiaire de grillage⁴.

Exemple 1 : Bas-fourneau, Ouest du massif de Timna, période ramesside⁵

Le bas-fourneau⁶ était rempli d'un conglomérat de boulettes de minerais et de charbons. Sous cette première couche, une formation de scories s'était opérée ; dans celle-ci, le métal avait commencé à s'infiltrer, atteignant même le fond du four. Ces boulettes sont en fait du minerai de cuivre passé entre le pilon et le mortier. Les lingots devaient atteindre les 7 kg. Les fours étaient creusés dans une zone sablonneuse rouge, empiétant légèrement sur la couche de grès rouge sous-jacente. Ils avaient l'apparence de cylindres de 60 cm de diamètre et de hauteur. La cavité fonctionnelle n'était en réalité que de 45 cm de diamètre pour 40 cm de profondeur. Le bord

supérieur du four présentait un trottoir de pierre⁷ tandis que l'intérieur du foyer était enduit d'un mortier d'argile. La couche de scories présente dans le four était haute de 15 cm. La paroi du four opposée à celle traversée par la tuyère est bloquée par un mur d'argile, dont la base peut être percée. Cette face était accessible au moyen d'un couloir descendant, contenant un noyau circulaire de scories ; celles-ci, en coulant sur le sol sableux fortement bombé en son centre, prennent la forme d'un cercle percé. Ce couloir était bordé par 2 murs de pierre de 80 cm de long. L'unique tuyère arrivait dans le foyer selon un angle de 70°. Son diamètre était de 10 cm et le nombre de soufflets qui pouvaient s'y raccorder était de 2 au maximum.

II - MÉTALLURGIE SECONDAIRE :

Elle consiste en un traitement du métal liquide, obtenu soit directement lors de la première étape, soit par refusion du cuivre ou de bronzes recyclés. Elle comporte plusieurs étapes successives ou combinées : la mise à la nuance (addition des éléments constitutifs de l'alliage : Sn), l'affinage (purification : élimination des éléments nocifs restant dans le métal liquide = dégazage), la coulée et la solidification (soit sous forme de lingots, soit directement sous forme de produits semi-finis ou finis). Le charbon de bois provenait d'essences locales : le *pistacia khinjuk*, l'acacia, l'amandier, les noyaux de dattes et al.⁸

Photos personnelles

4 - Opération nécessaire uniquement pour les sulfures. Les sulfures de Cu subissent, lors de procédés pyrométallurgiques, une opération de grillage (677°C) par l'oxygène gazeux qui transforme partiellement ou en totalité les sulfures en oxydes, permettant par la suite une réduction des oxydes : $2/3 \text{CuS}_{(s)} + \text{O}_{2(g)} \rightarrow 2/3 \text{CuO}_{(s)} + 2/3 \text{SO}_{(g)}$. Cette opération est directement proportionnelle à la pression partielle de l'O et de SO_2 , à la température et au milieu réducteur. En présence d'excès d'O, il y a formation de sulfate de Cu.

5 - ± 1320-1098 ACN

6 - Fig. 4 : Four de réduction de l'époque Ramesside (Four IV). Cf. B. Rothenberg, *The Ancient Metallurgy of Copper (archaeology-experiment-theory)*. Researches in the Arabah 1959-1984, vol. 2, London, 1990, p. 37, fig 52.

7 - La pierre est de la dolomite, pierre locale qui résiste bien aux hautes températures.

8 - Fig. 5 : Fonte de bronze dans un four à l'huile d'olive, découverte récente par le CNR - Directrice de mission Maria Rosaria Belgiorno, Chypre, site Pyrgos-Mavroraky, 2000 ACN.



Fig. 3 - Poterie commune pour réduction



Fig. 4 - Four de réduction



Fig. 5 - Fonte à l'huile d'olive

Plusieurs types de production ont coexisté au NE en fonction de l'importance de la production souhaitée⁹, ayant un impact sur le type de four et les techniques de coulée. Il existe deux procédés de création d'artefacts : les moules (composés d'une ou plusieurs pièces) ou la cire perdue. Toutes deux permettent la fabrication en petite ou grande quantité, d'un poids allant du gramme à la tonne. Cette production et l'organisation anthropique (administration + multitude d'artisans) qui en découlent, nous amène à parler de métallurgie préindustrielle.

Excursus : Expérimentation d'un four de fonte de l'AE¹⁰

Le professeur Dr. Andreas Hauptmann pose l'évolution technologique des fours, non pas

Précurseur, ce site est composé de divers ateliers pour de multiples formes de production. C'est un bel exemple de ce concept de préindustrialisation, notamment métallurgique. Activités : presse à huile, grand dépôt avec 10 pithoi pouvant stocker jusqu'à 5000 litres d'huile (utilisation de cette dernière en cosmétique, en médecine, en cuisine, pour les textiles et comme combustible). Les analyses gaz chromatographiques et l'archéologie expérimentale ont bien confirmé l'utilisation de l'huile comme combustible. Expérimentation menée par Angelo Bartoli – Directeur de C.A.E. Antiquitates, aide de Louis Baumans, Hugues Paridans, Georges Verly et al. Archéosite d'Aubechies. Photos personnelles

9 - Production limitée : conservation d'une typologie de l'AE et du ME pour les fours et les creusets, mais avec des soufflets « type casserole » / Production de masse : nouvelle typologie de fours, de creusets et de soufflets.

10 - Fig. 6 : Fonte de Cu dans un four de l'AE (2400-2200 ACN). Photos personnelles

en fonction de l'apprentissage des réactions de cuisson des terres, mais en fonction d'expérience de fusion du Pb. Les potiers mettent au point le four fermé qui permet une augmentation constante¹¹ de la température. *Problème* : ils obtiennent une température de 1100° C, qui ne permet ni la fusion du Cu ni son utilisation en glasis (formation d'amalgames de scories inutilisables). C'est la réduction à feu ouvert du Pb¹², qui va permettre aux sédentaires d'effectuer ce saut technologique. Ils comprennent que seul l'augmentation d'O permet la fusion du minerai de Cu broyé. *Solution* : ils inventent les tuyères. Mais cette augmentation possède son propre paradoxe puisque le minerai ne peut pas être en contact direct avec l'O. Ils trouveront la parade en couvrant le Cu d'un lit de charbon de bois. Cette solution dégage du monoxyde de C qui rend possible la séparation du Cu de leur gangue. La réduction se manifeste par des gouttelettes qui perlent de la gangue. *Avantages* : le Cu est mou mais très approprié au travail du bois¹³. Des nouveaux métiers voient le jour : ébénisterie, bijouterie, bref autant de métiers que de formes possibles.

11 - Ce type de four est très utile pour la réduction. Mais, nous verrons que cette augmentation n'est pas aussi constante qu'annoncée.

12 - Température de fusion du Pb : 327°C.

13 - Ce métal peut être mis en forme pour en obtenir des fonctions nouvelles et complexes. Fonctions qui sont impossibles par les plans de clivage du silex. Les coins sont ainsi réalisables ainsi que les tenons et mortaises. Le Cu a montré clairement son avantage technologique par rapport au silex, malgré sa difficulté d'obtention par fusion.

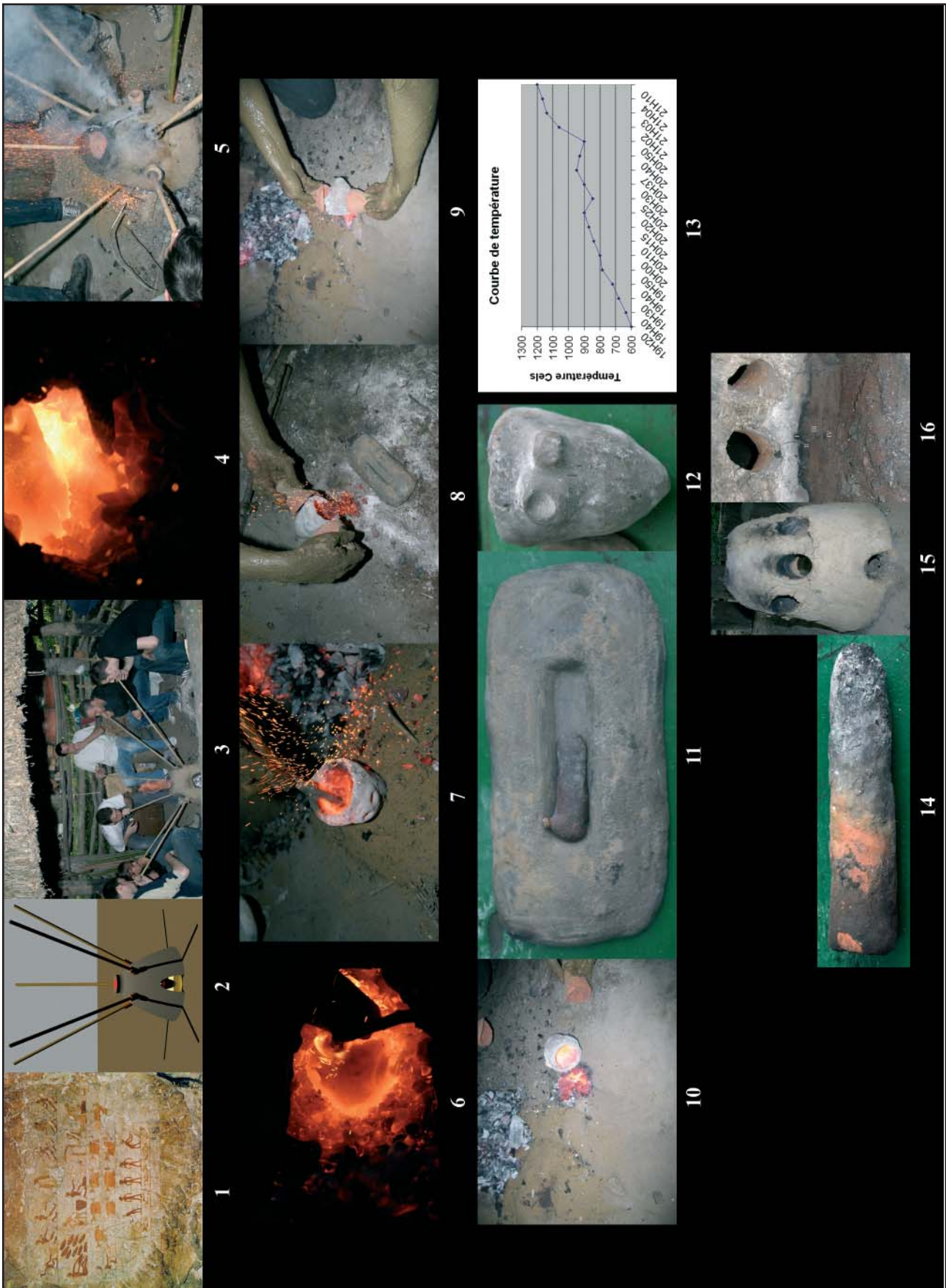


Fig. 6 : Fonte de Cu dans un four de l'AE (2400-2200 ACN). Photos personnelles

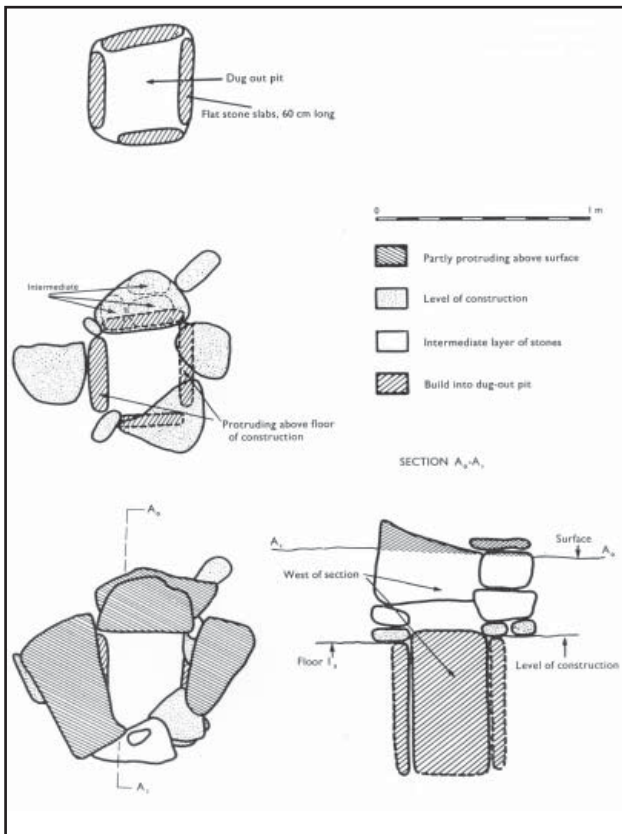


Fig. 7 : Plan et section d'un four de fonte

Il a pu montrer, par la chronologie des artefacts retrouvés, l'évolution technologique. Ces sédentaires ont d'abord martelé à froid du Cu natif¹⁴. Mais cette technique n'a pu perdurer dans le temps vu sa trop faible quantité. Puis, la région du Fenan voit apparaître un nouveau mode social. En effet, le Cu réduit et coulé devient signe indicateur de richesse. Cette valeur est intrinsèque à la difficulté et à la longueur du travail pour l'obtenir et contrairement au blé, il peut être accumulé. Ce distingue trois classes sociales : les riches, les ordinaires et les pauvres. Cette différence est, actuellement, visible grâce aux rituels d'enterrement¹⁵. La ville d'Hujayrai Al-Ghuzlan est représentative de la spécialisation de ces sédentaires. C'est une ville industrielle qui invente les fours de réduction à vent. Placés

14 - Tête de massue découverte à Tchanazan (Turquie) ± -5000 ACN.

15 - Chalcolithique récent : société de Varna avec ses 300 tombes (7500m², en dessous de Durankulag) ± -4000 ACN.

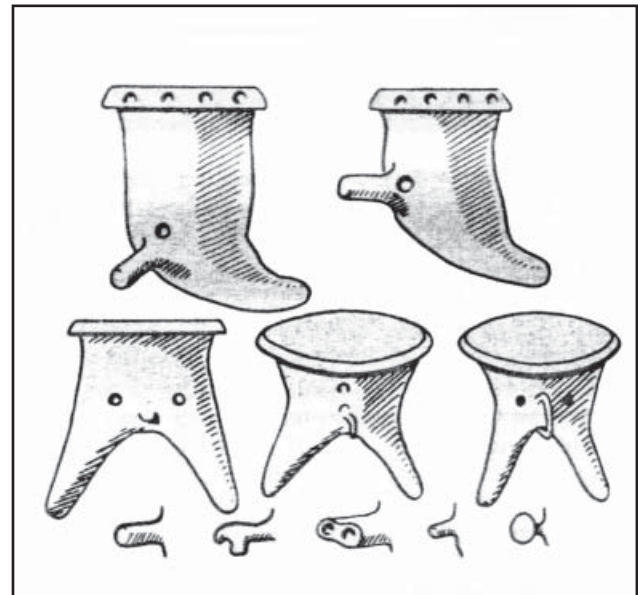


Fig. 8 : Creusets du NE trouvés à Deir el Medineh

à flanc de falaise et imprégnés des vents violents provenant du désert, ils ont produits 200.000 T de scories. Ces fours sont à usage unique, mais atteignent la fusion rapidement et sans trop d'effort. Tout dépend de la période de l'année pour avoir des vents dominants et constants. Apparaissent, ensuite grâce aux élites et surtout aux échanges commerciaux, les premières formes d'écriture, sous forme de bulle d'argile. Très rapidement les voies commerciales ont dues être sécurisées et ont demandées de nouvelles spécialisations : l'armée et ses armements. Naissance de l'état avec sa première administration et sa première armée, les artisans y forment une catégorie sociale salariée, ils dépendent d'une élite au pouvoir. Arslan Tepe détient les deux grandes étapes suivantes : le Cu arsénié¹⁶ et l'alliage¹⁷ de métaux. Le Cu cause la transformation du rôle du roi de prêtre en seigneur de guerre et du palais en citadelle.

Description du four et des artefacts

Exc.1 Les creusets

16 - Une épée de cuivre arsénié est façonnée avec des incrustations en Ag (± -3000 ACN). L'arsénite de Cu est importé du Caucase.

17 - Une coupe est fait d'alliage d'Ag et de Cu. La pièce est ensuite plongée dans des acides de fruits pour dissoudre le Cu de surface et ne garder que l'éclat argenté.



Fig. 9 : Détail du travail de l'or dans la tombe de Mereruka, 6^e dynastie, Sakkara

Les creusets sont coniques. De 1 à 1,5 cm de diamètre à la base, ils s'élargissent pour atteindre un diamètre interne maximal de 5 cm. Hauts de 10 cm, leur contenance n'excède pas les 30 cm³. La lèvre est épaisse de 1.5 cm. De part¹⁸ et d'autre¹⁹, nous avons reproduit le système de

18 - Un renforcement de deux demi-sphères.

19 - Un renforcement d'une demi-sphère et l'excroissance d'un

fixation en positif.

Exc.1.1 Après utilisation

12) Entièrement recuits, la surface interne, en présence d'une atmosphère réductrice, est lisse et noire. La surface externe, exposée à une corrosion

carré d'1.5 cm de côté.



Fig. 10 : Un des foyers retrouvés dans l'enceinte du temple funéraire de Séthi I, époque Lagide ; à l'avant-plan le moule retrouvé in situ

due à la suroxygénation, est vitrifiée.

Exc.2 Les poignées

Elles reprennent, en négatif, les témoins du creuset. C'est système mobile qui assure au couleuse une prise en main sûre. Ce sont des cylindres de 8.5 cm de long pour un diamètre de 5 cm. La surface de préhension est concave (7 cm de côté).

Exc.2.1 Après utilisation

Elles n'ont pas eu de cuisson secondaire et conserve leur couleur orange.

Exc.3 Les tuyères

Légèrement coniques, elles sont longues de 19.5 cm. Le gicleur ne fait qu'1.5 cm de diamètre pour une embouchure de 3 cm. L'épaisseur moyenne de la paroi est de 1.2 cm.

Exc.3.1 Après utilisation

14) Comme toutes les poteries, elles ont très bien résistées au choc thermique. Il y a, sur les 3 premiers centimètres, une vitrification de couleur noire. La cuisson secondaire se poursuit sur les 7 cm suivants mais sans vitrification (cette section grise est en partie protégée par l'orifice). La dernière partie est neutre de toutes traces. Si l'intérieur du conduit est noir, ce n'est pas du à un recuit mais à la suie de la combustion des cannes.

Exc.4 Les bambous

Ils sont tous longs de 130 cm pour un diamètre interne d'1 cm. Il faut 250 cm de diamètre pour installer le foyer avec ses souffleurs de part²⁰ et d'autre.

Exc.5 Le moule

Moule monovalve en bronze pour un burin de 8 cm de long, 1.5 cm de large et 0.8 cm de haut.

Exc.6 Archéologie expérimentale

1) Scène de la TT 405. Cf. M. Saleh, *Three Old-Kingdom Tombs at Thebes. II The Tomb of Khenty no. 405, AV 14*, Mainz am Rhein, 1977, plate A. **2)** Première interprétation du four, où toutes les pipes étaient à la même hauteur. En conclusion, les pipes doivent être de la base à l'embouchure du creuset. **3)** Au rythme de 7 souffleurs pendant 2 heures, nous sommes parvenus à faire fondre 1300 gr de Cu. Une flamme sort du sommet du four sans discontinuité²¹. La respiration du foyer est régulière. Les souffleurs commencent à se coordonner. Nous sommes persuadés d'une plus grande efficacité des pipes, si nous soufflons de façon brève, homogène et fréquentative. Par cette

20 - Il faut 110 cm entre la base du foyer et la position assise du souffleur.

21 - La flamme perdure même pendant l'inspiration des artisans. Cette autre balise indique une température avoisinant les 1100°C. Il est assez facile avec l'habitude d'échelonner à l'œil les divers paliers de température.

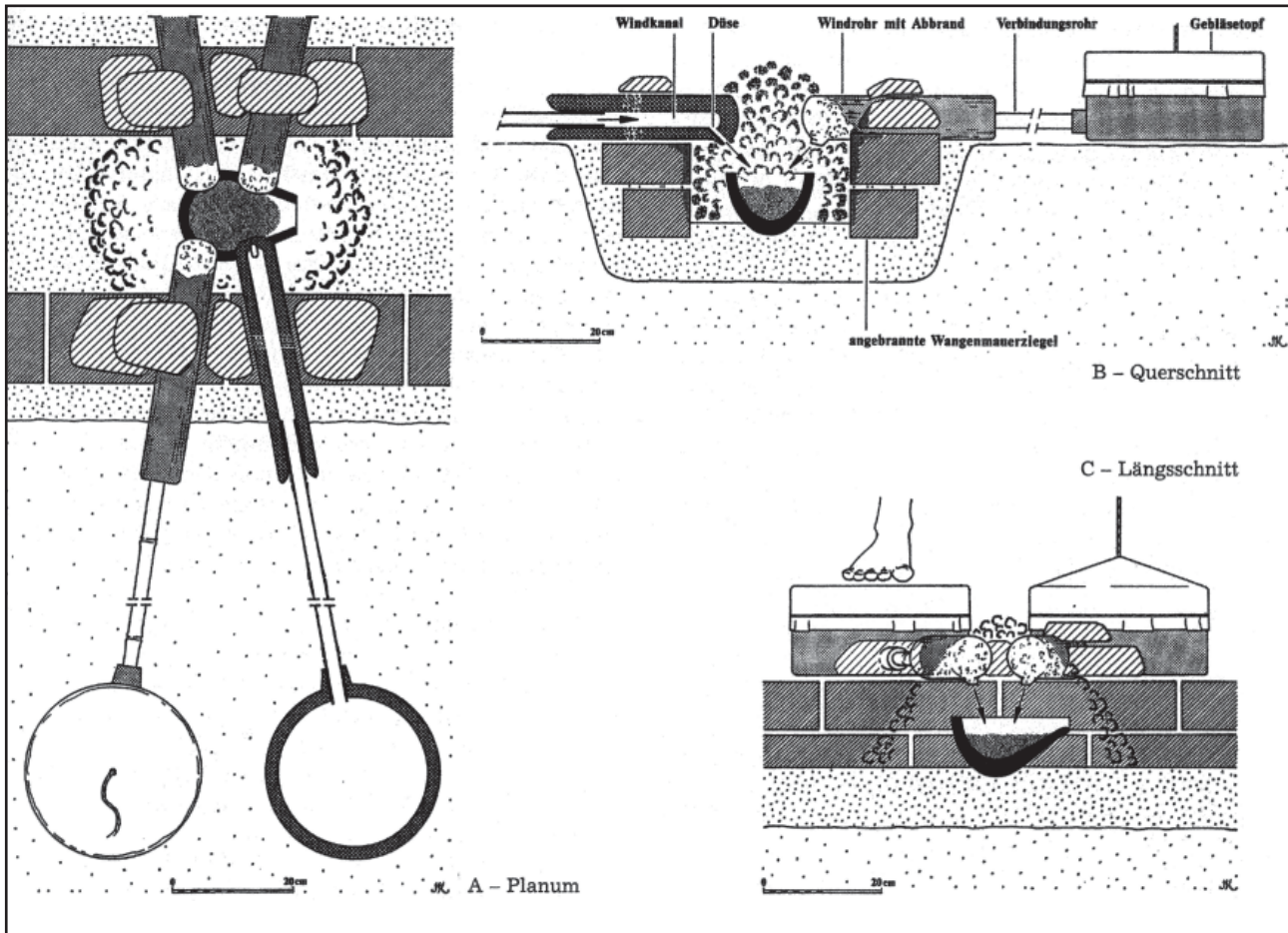


Fig. 11 : Dessins du foyer, Thèbes

méthode, nous parvenons à 1090°C à l'intérieur du creuset. **4)** Vues internes, le creuset est blanc. **5)** Le Cu est à 1160°C. Une flamme verte²² sort de l'orifice nadiral. Les lingots, encore visible en surface, métamisent. Leurs surfaces s'écoulent, au fur et à mesure, dans le laitier. **6)** Nous extrayons le creuset au moyen de deux bâtons verts²³. **7)** La forme conique du creuset demande et garantit sa stabilité dans une structure mobile²⁴. Elle requière également une étape intermédiaire avant la coulée. Le creuset est disposé dans un lit conique de sable, à proximité du foyer. **8)** C'est à cet endroit, et seulement à ce moment là, qu'il est possible de le prendre entre les deux « pinces » en terre cuite. A l'instar des représentations de l'AE, nous tenons,

22 - Elle est le résultat de l'oxydation du Cu.

23 - Cette phase n'est pas facile vu le peu de largeur qu'offre l'entrée du four. Les bâtons assurent une résistance confortable à la chaleur.

24 - Comme du sable.

entre les mains²⁵ et le creuset, deux supports amovibles que nous avons reconstitués en terre cuite. Ces deux maniques²⁶ isolent parfaitement le couleur de la chaleur. Ce système présente un inconvénient majeur. En cas de rupture de l'argile, le Cu s'incruste dans votre peau. Il faut donc parfaitement connaître les limites mécaniques de la terre que vous utilisez, ainsi que la fréquence de réutilisation d'un creuset lors d'une même journée de coulée. Cette technique de prise en main fonctionne parfaitement pour ce type de petit creuset. Nous n'avons pas osé expérimenter

25 - Le corps est couvert de boue. Nous avons déjà fait la démonstration et la présence historique de ce revêtement : G. Verly, Archéologie expérimentale égyptienne : *nouvelle lecture des scènes de métallurgie des Tombes Thébaines privées* in Deuxièmes rencontres doctorales Orient Express, actes du colloque du 5-7 février 2004, Paris, 2004, p. 157-169.

26 - Elles complètent l'appareil isothermique en boue du couleux.

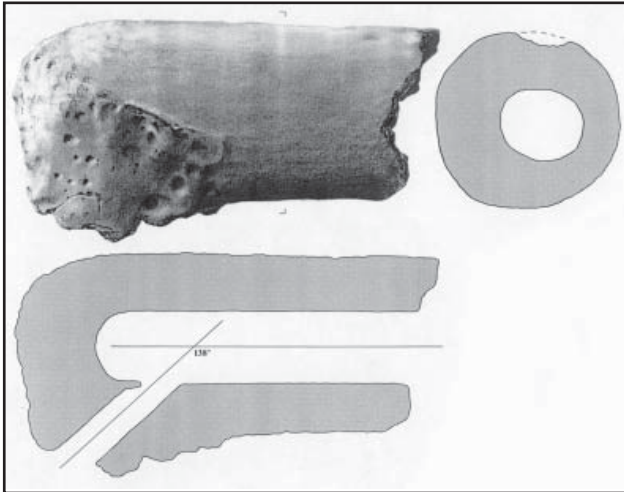


Fig. 12 : Tête de tuyère fortement endommagée par le feu

les creusets plus volumineux du NE²⁷. **9)** La prise du creuset assurée, nous vidons le creuset. Un autre couleur, en face, retient le laitier grâce à un morceau de bambou évidé dans lequel il souffle. **11)** En théorie, la densité du Cu étant plus élevée que celle du laitier, elle devrait faire remonter les crasses à la surface du moule²⁸. Mais, le Cu pâteux emprisonne des petits conglomérats de laitier tombés dans le moule. **10)** De fait, le Cu au contact de l'O₂ s'oxyde et coule très difficilement au point de faire une éponge²⁹ au bec du creuset. **13)** Courbe de température³⁰ : le cap difficile à franchir se situe comme toujours et pour tous types de four au alentour des 950°C (cfr réaction de Boudouard). **15)** et **16)** La fouille du foyer a permis d'analyser sa structure et démontrer la présence des 5 strates.³¹ Les strates sont plus

27 - Cfr Silvio Curto. Il existe divers types de creuset au NE, ceux de l'AE en plus volumineux et les semi-ovoïdes qui se manipulent avec deux longs bâtons verts.

28 - Cette remarque n'est bien entendu valable que pour un moule ouvert.

29 - Cet opération est d'autant délicate que nous travaillons avec de très petite quantité.

30 - Elle a été établie lors du troisième essai. Cette courbe étalon est révélatrice. Deux éléments doivent être réunis : un four chaud (le fait de vaincre l'inertie du four ne doit pas être comptabilisé) et une montée en température en synchronisant l'action des souffleurs de pipe.

31 - G. Verly, Le Traitement du bronze en Egypte au Nouvel Empire : Archéologie expérimentale d'un four de fonte et Interprétations dans les tombes thébaines privées, Bruxelles,

basses que le niveau du creuset, c'est dû au cône formé par le charbon.³²

Exc. 7 Conclusion

Ce type de four est particulièrement efficace. Nous avons, pour les 4 essais, atteint les 1200°C avec une masse de 5 kg de charbon. Ce particularisme est dû à sa physionomie en cloche complétée par l'appel d'air³³ et le lit de sable³⁴. Il est très rentable et révèle les conditions économiques de l'AE. Ces petites expéditions sont le reflet d'un pouvoir qui s'installe, où le nombre d'experts devait être réduit, vu le manque de tradition du travail des métaux. Les caravanes se rendaient aux exploitations minières qui n'étaient exploitées qu'à la saison des vents dominants. Nous pensons que l'exploitation se faisait en fonction d'un calendrier météorologique puisque les fours, toujours reconstruits au même emplacement à front de colline, permettent la captation des courants venteux. Ce type de four est très utile dans un pays pauvre en bois. Beaucoup d'essences de bois tendre ont été reconnues et n'ont qu'un faible pouvoir calorifique. Dans ces régions désertiques, le choix de ce four est un atout. Mais, il montre aussi que l'approvisionnement et donc le pouvoir ne permettent pas de faire mieux³⁵. Cette situation va être bouleversée au NE. Nous avons là des fours ouverts de 20 m de long consommant

2002, p. 20.

32 - Cfr 3.2 Les murs de joue : Strate I : ± 4 cm d'épaisseur. Strate II : ± 1 cm d'épaisseur. Strate III : ± 4.5 cm d'épaisseur. Strate IV : ± 1 cm d'épaisseur. Strate V : ± 0.5 cm d'épaisseur.

33 - L'air circule de la porte au sommet. Ceci prouve l'importance d'un vent naturel.

34 - A la fouille nous avons constaté que l'argile cuite sur une épaisseur de 2.4 cm et se vitrifie en surface alors que le sable ne change pas d'état et calcine/roussi que sur 1 cm.

35 - Restons prudent car nous possédons quelques exemples d'artefacts monumentaux en Cu (coulés et martelés). Notamment, les statues en cuivre pur, martelé et fondu, du Pharaon Pépi I et de son fils Mérené (VI^e dynastie : 2420-2280 ACN), trouvées à Hiérakonpolis (Musée du Caire). Cf. Eckmann Chr. et Shafik S., Die beiden Kupferstatuen des Pepi I. aus dem tempel von Hierakonpolis in Ägypten, Mainz, 2002. Cf. Ziegler Chr., Annibaldi C. et al., Les pharaons, Palazzo Grassi, Milano, 2002.

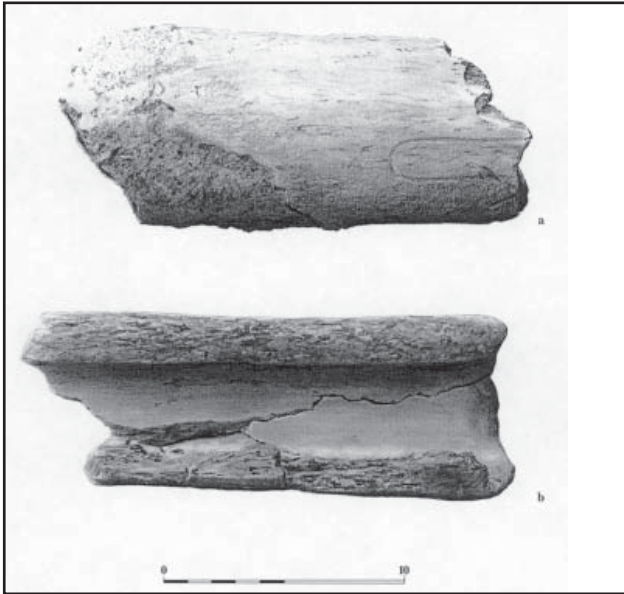


Fig. 13 - Corps de tuyère Qantir

des centaines de kg de charbon. Ces fours du NE ont, d'ailleurs, accomplis une révolution technologiques. Puisque enfermés dans les murs des temples, le système de ventilation à pied se suffit à lui-même. Nous retrouvons, dès le début, l'esprit d'uniformisation par des reconstructions de fours et des poteries toujours identiques : « à la chaîne ». Il a fallu, dès le départ, créer des moules pour les creusets et pour les poignées. En effet, ils ne pouvaient pas monter à la main le creuset et adapter individuellement les poignées. L'archéologie expérimentale permet également une réinterprétation complète de l'iconographie³⁶ (v. not. 41 et 61).

Exemple 2 : Four de fonte – production limitée, Ouest du massif de Timna, période ramesside

Les fours de fonte, pour une production locale restreinte, étaient de forme carrée de 40 cm de largeur pour une profondeur de 80 cm³⁷. Chaque

36 - Réinterprétation et première classification de l'iconographie égyptienne dans Verly G. 2004. Archéologie expérimentale égyptienne : nouvelle lecture des scènes de métallurgie des Tombes Thébaines privées dans : Actes des Deuxièmes Rencontres Doctorales, Orient-Express (5-7 février 2004), Paris.

37 - Fig. 7 : Plan et section d'un four de fonte. Cf. B. Rothenberg,

paroi était recouverte d'une plaque en pierre qui rejoignait le trottoir en pierre du bord supérieur. Ce four était rempli de charbon de bois. Les tuyères en argile avaient leur extrémité vitrifiée avec quelques inclusions de scories et de charbons. Les creusets³⁸ retrouvés présentaient la même typologie que ceux de l'AE³⁹ et du ME⁴⁰. Seules les céramiques, grâce à une cuisson primaire « type grès », résistent aux pressions mécaniques du métal en fusion et à la cuisson secondaire.

Pour des petites productions journalières d'outils, les égyptiens n'ont pas vu la nécessité de changer la typologie de leur four de fonte provenant de l'AE et ME. Seul le soufflet à pied, amélioration notable⁴¹, a fait son apparition au NE. Par contre, pour une production de masse, ils ont mis au point une révolution : les « batteries de fonte ».

Timna. Valley of the Biblical Copper Mines, 1972, p. 79.

38 - Fig. 8 : Creusets du NE trouvés à Deir el Medineh. Cf. B. Bruyère, Les fouilles de Deir el Medineh, tome I, Le Caire, 1937-39, p. 216.

39 - Fig. 9 : Détail du travail de l'or dans la tombe de Mereruka, 6^e dynastie, Sakkara. Cf. J. Riederer, Archäologie und Chemie. Einblicke in die Vergangenheit, Berlin, Sept. 1987- Jan. 1988, p. 85. Cf. M. Gutgesell, Arbeiter und Pharaonen Wirtschafts- und Sozialgeschichte in Alten Ägypten, Hildesheim, 1989. **Attention** beaucoup d'erreurs ont été écrites à propos de cette scène, cfr Excursus. Un couleux courbé a retiré du foyer grâce à une pince en bois le creuset. Puis il pose la pointe du creuset dans le sable, expliquant ainsi cette typologie particulière. Il peut ensuite le saisir entre ses mains au moyen de deux maniques. La personne accroupie en face souffle dans une sarbacane afin de repousser le laitier au fond du creuset, permettant au couleux de renverser le creuset dans un moule plat. La feuille coulée sera ensuite martelée sur une pierre plate.

40 - Les creusets de la fin du NE trouvés à Deir el Medineh servaient à la production d'outils pour le travail de la pierre. Ils sont soit simples, soit couplés. La forme simple rappelle un « bonnet phrygien » inversé (d'une capacité de 3316 gr), tandis que la forme couplée ressemble à une molaire. Leur paroi est épaisse de ± 1.5 cm. Ils ont une hauteur de ± 18 cm, pour un diamètre variant entre 10 et 15 cm. Les creusets de l'AE et du ME sont plus petits et destinés à la coulée du Cu.

41 - Importation technologique d'Orient. L'Égypte rentabilise ces technologies importées et n'innove que rarement.

Exemple 3 : Four de fonte – production préindustrielle, Qantir, période ramesside

3.1 - LES BATTERIES DE FONTE

Les 4 installations⁴², d'une profondeur de ± 0.3 m, d'une largeur de 0.65 m et d'une longueur de 15 m, ont des murs conservés jusqu'à une hauteur de 2 assises de briques. La partie supérieure présente la strate II, de coloration orange due à une cuisson secondaire⁴³. Ces murs de joue sont bâtis, sans fondation maçonnée, sur une sole de sable, au fond du fossé. Il s'agit de 2 murs parallèles d'une longueur limitée. Aux extrémités du fossé, les murs aboutissent à une légère pente. Ce sable⁴⁴ anthropique est vide d'artéfacts. L'horizon de travail recevait le complexe des soufflets⁴⁵. Les tuyères reposent sur les murs de joue, parfois dans de petits évidements. Deux parties peuvent être distinguées : le canal proprement dit et le gicleur qui traverse la paroi de la partie proximale de la tuyère. Ce percement s'est fait suivant un angle prédéfini de 135°. ⁴⁶ La

42 - Fig. 10 : Un des foyers retrouvés dans l'enceinte du temple funéraire de Séthi I, époque Lagide ; à l'avant-plan le moule retrouvé in situ. Cf. B. Scheel, *Egyptian Metalworking and Tools*, *Shire Egyptology*, 1989, p. 29.

43 - Même si nous employons le terme « cuisson », il ne faut pas oublier que les briques ont été placées crues. Elles ne cuisent que lors de l'utilisation du four.

44 - Le sable est un excellent isolant thermique d'où sa présence anthropique dans la sole des fours. Nous n'avons que 2 cm de radiation de chaleur en profondeur.

45 - Fig. 11 : Dessins du foyer, Thèbes. Cf. E. B. Pusch, *Divergierende Verfahren der Metallverarbeitung in Theben und Qantir? Ägypten und Levante 4*, Wien, 1994, p. 153, abb. 1. **Attention**, le creuset posé sur le sable est une interprétation erronée. Il doit être à hauteur de la strate III, maintenu par un support.

46 - Fig. 12 : Tête de tuyère fortement endommagée par le feu. Elle présente de nombreuses incrustations de scories et de perles de bronze. Qantir, QI-c/4.5, Strate B/3, FZ 84/1147.2. Cf. E. B. Pusch, *Metallverarbeitende Werkstätten der Frühen Ramessidenzeit in Qantir-Piramesse/Nord, Ägypten und Levante 1*, 1989, Wien, p. 87, abb. 5. Fig. 13 : Qantir, QI-a/5, Strate B/3. A : FZ 87/341.1 : Tête de tuyère avec un effritement diagonal et un estampillage représentant un ovale. B : FZ 87/341.2 : Partie terminale d'une tuyère, échelle $\frac{2}{3}$. Cf. E. B. Pusch,

longueur du gicleur représente 1/3 de la longueur du canal. Dans ces tuyères étaient placés des bambous qui finalisaient la jonction avec les soufflets en « casserole ». Les tuyères reposent sur les murs de joue, les gicleurs pointant vers le bas du foyer.

Le charbon⁴⁷ venait tout recouvrir, y compris les têtes des tuyères. Les soufflets étaient activés par un mouvement alternatif des pieds. Chaque creuset recevait 4 tuyères⁴⁸ et était ainsi alimenté par un apport d'air sous pression constant. C'est un complexe d'aération mobile où les tuyères sont installées après avoir placé le creuset. Pour reprendre aisément le creuset, il suffit d'enlever les tuyères, ce qui facilite l'emploi des instruments d'extraction⁴⁹ du creuset.

3.2 - LES MURS DE JOUE

Ces murs de joue sont bâtis demi-briques. Chaque brique standardisée mesure 30 cm de long pour 15 cm de largeur et 8 cm de hauteur. Ces murs montrent des rougissements intenses provoqués par le contact du foyer interne. Si nous parcourons ces murs de bas en haut, nous pouvons établir un système de strates qui correspondent à une certaine oxygénation du feu. Dans la zone inférieure, les briques sont de coloration noire, surmontée d'une zone grise-blanche. Puis nous arrivons à la zone brune-rouge, la plus oxygénée et donc la plus élevée en température, qui se trouvait au niveau de l'emplacement du creuset. Au-delà, nous rencontrons une zone orange,

Metallverarbeitende Werkstätten der Frühen Ramessidenzeit in Qantir-Piramesse/Nord, Ägypten und Levante 1, 1989, Wien, p. 88, abb. 6.

47 - L'essence utilisée est du bois de palmier, selon les analyses.

48 - Fig. 14 : Diverses utilisations possibles du soufflet à pied : A : Possibilité n°1 ; B : Possibilité n°2 et C : Possibilité n°3. Cf. E. B. Pusch, *Divergierende Verfahren der Metallverarbeitung in Theben und Qantir? Ägypten und Levante 4*, Wien, 1994, p. 159, abb. 2.

49 - Ces instruments sont assez mal connus et l'iconographie ne nous présente que 2 bâtons verts souples (le palmier doit très bien convenir) permettant la préhension du creuset (pas encore expérimenté).

bordée de gris-noir, correspondant à la partie proximale des murs de joue. Nous avons donc 5 strates :

Strate I : « zone grise/noire non brûlée », partie supérieure du mur, pas de charbon de bois et pas de suralimentation en oxygène.

Strate II : « zone orange », zone de transition sans charbon de bois, avec un léger marquage du feu par chaleur de radiation.

Strate III : « zone rouge-brune », présence de charbon de bois avec un apport élevé d'oxygène, lieu du plus grand développement de chaleur.

Strate IV : « zone grise-blanche », présence de charbon de bois avec un apport moindre en oxygène, zone de transition vers la zone de combustion lente.

Strate V : « zone noire », partie la plus basse du mur, charbon de bois brûlant lentement.

Après expérimentation, nous avons pu observer sur les murs⁵⁰, de bas en haut, une superposition de 5 strates qui correspondaient chaque fois à une certaine oxygénation du feu. Ces strates sont également présentes dans le contexte archéologique. Ce constat peut se faire à tous les fours retrouvés en fouille ou expérimentés⁵¹.

Nous savons qu'à une température donnée un combustible laisse une trace différenciée sur son environnement. Cette trace varie en fonction du type de combustible et de son emplacement au sein du foyer. Si le nombre et la couleur des strates ont l'air d'être identiques même face à des compositions différentes de terre ; leurs orientations, par contre, changent en fonction de la structure du four. Mais, ce même type de four, exposé à une chaleur différente, réagira autrement et aura donc un nombre (dé)croissant de strates (avec des nuances de couleurs différentes).

50 - Fig. 15 : Four expérimentale du type Qantir, possédant les 5 strates. Photo personnelle.

51 - Fig. 16 : Four expérimentale de type levantin de l'âge du bronze, possédant également les 5 strates. Idem pour le four expérimentale de l'AE, cfr not. 12, Fig. 6. Photo personnelle.

L'idée d'un protocole de fouille à partir de ces strates est de permettre une restitution du four la plus valable possible. En effet, lors des fouilles, les structures, qui se sont effondrées, vont pouvoir être réinterprétées via le développement dans l'espace des strates. La position de celles-ci dépend directement du type de structure. Ainsi, une fouille délicate des bords du foyer pourra immédiatement donner l'otique des recherches (type de matériels susceptibles d'être ressortis, éventuelle structure, épaisseur maximale qui ne doit pas être retirée, position(s) de(s)/la tuyère(s) et donc indirectement du/des soufflet(s), ...).

3.3 - LES CREUSETS⁵²

De la forme d'une carène de navire⁵³, ils sont fabriqués dans une argile locale dégraissée au sable. La sole témoigne de traces sphériques. Les capacités des creusets doivent varier en fonction de chaque programme de fonte. Un creuset moyen de Qantir⁵⁴ fournit 7 poignards de 240 gr ou 36 statuettes de 50 gr. Ce creuset de 250 cm³ équivaut exactement à la mesure égyptienne de 25 dbn (1 dbn = 91 g). Ce choix de ce volume n'est pas innocent car il correspond à une mesure égyptienne standard. De la sorte, les creusets sont façonnés pour contenir toujours ce même volume.

52 - Voir creusets in W. Clement, S. H. Marashi et al., *Persiens Antike Pracht, Bergbau - Handwerk - Archäologie*, band II, DBM, Düsseldorf, 2004, p. 608.

53 - Fig. 17 : Reconstruction d'un creuset par Weisgerber. Qantir, QI-d/02, 03, FZ83/1118 d, Strate B/3. A : Creuset en vue nadirale avec formation de scories et incrustation de perles de métal. B : Creuset en vue latérale avec formation de scories sur le bord ; échelle 2/3. Cf. E. B. Pusch, *Metallverarbeitende Werkstätten der Frühen Ramessidenzeit in Qantir-Piramesse/Nord, Ägypten und Levante 1*, Wien, 1989, p. 89, abb. 7. Les creusets « phrygiens » sont manipulés au moyen de maniques en terre cuite qui épousent ses excroissances. Le couleur, les mains recouvertes d'argile, peut aisément pratiquer l'opération. Par contre les creusets de Qantir, par leurs volumes (souhaités) et par leur rayonnement thermique, ne permettent plus ce procédé. Ainsi les égyptiens inventèrent cette forme pour les appréhender, de plus loin, au moyen de deux bâtons verts souples.

54 - La capacité de production d'un creuset de Qantir est de ± 1.92 kg.

Cela permet d'estimer les pièces qui pourront être ainsi coulées. Pour les maîtres et les scribes, cela représente un autre avantage. Cette mesure standard permet une comptabilité, un contrôle et une gestion du bronze⁵⁵. Dans le cas de grandes coulées, c'est un détail d'importance puisque, à tous moments, les bronziers devaient connaître le volume qui restait à fondre.

La fabrication de ces creusets incombait aux potiers spécialisés du site qui, en plus de la production des tuyères et des soufflets⁵⁶, devaient fabriquer quotidiennement de 20 à 40 creusets par four, probablement à partir d'abaques pour faciliter cette standardisation.

3.4 - LES SOUFFLETS

Ils sont composés de 2 parties, l'une en terre cuite en forme de « casserole »⁵⁷ et l'autre en cuir qui recouvrait entièrement la céramique. Une rainure a été incisée sur la partie supérieure de sa paroi. Elle permettait d'y ficeler la peau de cuir. L'air rentre par une soupape découpée dans le cuir. Il ne peut ressortir que par le bec, à la base du soufflet. La poche de cuir était remontée au moyen d'une ficelle qui y était accrochée et était ensuite compressée par le pied du souffleur. Le souffleur activait toujours 2 soufflets.

55 - Le travail des bronziers, préposés à la fonte des outils de Pharaon, nécessite une grande probité. Ils travaillent pour la fonte/refonte et l'entretien des outils. Bien que la plupart des outils soient la propriété de Pharaon et qu'en conséquence leur distribution aux ouvriers soit soumise à un contrôle très strict au moyen de poids-témoins, les hommes, quand ils ne les employaient pas temporairement pour leur usage personnel, en achetaient ou les faisaient fabriquer par le bronzier. D. Valbelle, Les ouvriers de la tombe. Deir El-Médineh à l'époque ramesside, IFAO, 1985, pp. 128-129 et 250-251. Le terme forgeron est inadéquat.

56 - Toutes les poteries étaient cuites dans des fours attenants au complexe de bronziers.

57 - Fig. 18 : Diverses vues et coupes de ce soufflet du NE. Cf. I. Beit-Arieh, Serâbit el-Khâdim : New Metallurgical and Chronological Aspects, *Levant* 17, 1985, p. 109, fig. 14. Longueur (bec compris) de 45.5 cm, diamètre externe de 36.5 cm pour un diamètre interne de 25 cm.

3.5 - FONCTIONNEMENT

Au vu des quantités produites (au minimum 113.28 kg en 45 minutes par batterie de fonte) et du nombre d'artisans (au minimum 480 personnes pour souffler et couler, plus les artisans des autres corps de métier intervenant dans la métallurgie), nous pensons qu'il serait plus approprié de parler de production industrielle plutôt que de production artisanale (ce qui n'est pas le cas des fours de l'AE et du ME)⁵⁸. C'est une véritable industrie humaine, parfaitement organisée et encadrée qui fonctionnait quotidiennement et qui pouvait atteindre des pointes de production vertigineuses⁵⁹. À côté des installations typiquement métallurgiques, il y avait d'autres ateliers attenants qui devaient s'occuper exclusivement des activités en amont et en aval. En amont, on trouvait l'atelier des charbonniers, des potiers, des tanneurs des sculpteurs sur cire et des mouleurs⁶⁰. La logistique se composait des maîtres et contremaîtres, des scribes⁶¹, des peseurs et des ravitailleurs. En aval, apparaissaient les petits ateliers multifonctionnels⁶² standardisés du raffinage et de la finition des artefacts coulés. Finalement, cette activité devait regrouper à plein

58 - Considérations émises en 2008 par rapport à l'état actuel des fouilles.

59 - Fig. 19 : Scène de la TT 100. Cf. N. De Garis Davies, The Tomb of Rekh-Mi-Ré at Thebes, *The Metropolitan Museum of Art Egyptian Expedition*, vol. II, New York, 1943, plate LII. Les fouilles et la représentation des portes du temple d'Amon à Karnak dans la TT 100 de Rekhmiré sont la preuve que les artisans égyptiens étaient capable de mener des coulées de battant de portes pesant chacune 3.2 T.

60 - Leur nombre est difficilement calculable mais au vu des capacités de production d'un tel four, ce sont certainement des centaines de moules et de potées qui devaient être produits hebdomadairement.

61 - Cfr plus haut : la métallurgie induit l'invention des mathématiques et de l'écriture, de la sédentarisation, d'un pouvoir militaire et politique, de la cité, de l'armée et de l'administration.

62 - Ces ateliers possèdent plusieurs fours ronds ou carrés d'un diamètre de 1.4 m et d'une profondeur de ± 24 cm. Nous pensons, tout comme L. Garenne-Marot, qu'ils étaient destinés aux divers travaux de finition des objets produits.

temps \pm 1000 personnes sur un site de \pm 30000 m². Ces « ateliers » sont rattachés à des structures administratives importantes (comme les temples ou les palais).

3.6 - ARCHÉOLOGIE EXPÉRIMENTALE⁶³

Les opérations de coulée s'opèrent de la façon suivante : **1)** nous posons sur la sole en sable un support en 2 parties⁶⁴ ; **2)** nous amenons le charbon ; **3)** dans le lit de braise et sur le support, nous posons le creuset vide ; **4)** les tuyères sont installées dans leur logement (juste au-dessus des creusets) et les soufflets commencent à s'actionner⁶⁵ ; **5)** le creuset, une fois rouge, reçoit sa première masselotte préchauffée⁶⁶ ; **6)** nous rechargeons en charbon régulièrement SANS devoir remonter le creuset au moyen d'une pince pour le replacer à bonne hauteur⁶⁷ ; **7)** le bain de fusion atteint⁶⁸ ; **8)** nous enlevons les tuyères⁶⁹ et dégageons le creuset ; **9)** nous passons les bâtons de part et d'autre du creuset entre les 2 parties du support ; **10)** en tenant fermement les 2 bâtons⁷⁰, nous coulons le bronze dans sa potée. Les coulées se succèdent à 45 minutes d'intervalle.

63 - L'archéologie expérimentale a été pratiquée par Louis Baumans, Hugues Paridans, Georges Verly et al. (Archéosite d'Aubechies).

64 - Nous penchons pour 2 briques semi-circulaires réfractaires. Les « logements » (traces circulaires) dans la sole ne sont probablement rien d'autre que le témoignage de ces 2 briques.

65 - Fig. 20 : Four avec ses tuyères. Fig. 21 : Soufflets égyptiens fonctionnant en alternance. Photos personnelles.

66 - Il faut introduire les métaux suivant l'ordre décroissant de leur point de fusion.

67 - Fig. 22 : Four en cours d'utilisation. Photo personnelle.

68 - Le point de fusion du bronze théorique est de 1083°C, mais la réaction de Boudouard et la freinte nous pousse à atteindre les 1200°C.

69 - Fig. 23 : A l'instar des strates, nous retrouvons les mêmes corrosions que sur les artefacts originaux. Photo personnelle.

70 - Par rapport à la typologie des fours et des creusets, il y a 3 techniques de préhension de creuset : A) four ouvert, creuset lisse : pince en bois et civière en bois ; B) four fermé, creuset avec excroissance : pince en bois et maniques en argile ; C) four ouvert, creuset du NE : hypothèse, deux tiges plates.

Nous sommes capables, à l'instar des égyptiens, de déterminer la fusion : par la couleur rouge-cerise du creuset, par une respiration continue du foyer, par la couleur blanche du charbon, par les fumeroles bleues-vertes du Sn, par les vibrations dans la baguette de dégazage et par l'effet miroir du bronze.

La métallurgie égyptienne fait preuve d'une économie de moyens. En effet, le bronzier avait très peu d'outils à sa disposition (essentiellement des bois verts). Ils n'écumaient pas leur creuset, mais retenait le laitier par un bâton sec ou soufflait au moyen d'une pipe. De plus lors de la coulée, le laitier reste au fond du creuset et se déverse en dernier lieu, remplissant alors l'entonnoir de coulée. Le bronze de la pièce est impeccable.

Le rayonnement de chaleur ne se fait qu'à la verticale et n'entraîne donc que peu de désagréments pour les souffleurs. Lorsqu'il était temps de se saisir du creuset, les Égyptiens se recouvraient de boue qui, au contact de la chaleur, sèche mais, tant qu'elle est humide, protège suffisamment la peau. La surface de la boue cuit, ainsi la peau chauffe mais ne brûle pas. La sensation reste tolérable et permet de rester au-dessus du foyer pendant \pm 20 secondes, suffisant pour cette opération. Les yeux, en revanche, n'ont aucune protection.

Le lendemain, il restait encore 8/10 du charbon dans le foyer.⁷¹ La température était encore de 600°C.

3.7 - CONCLUSION :

A : Production. Nous obtenons une moyenne de 45 minutes entre chaque coulée, première forme de « coulée continue »⁷². Ce type de

71 - Fig. 24 : Four en veille. Photo personnelle.

72 - Les archéologues ont retrouvé, à Qantir, des potées de battants de porte qui mesuraient 110 x 330 x 5 cm (Ces dimensions proviennent de la reconstruction des fragments de potée par Weisgerber. D'autres fragments récupérés ont une capacité d'¼

four présente une spécificité recherchée, celle de la production en masse. Les Égyptiens connaissaient parfaitement les fours à dôme/voûte, mais ces derniers ne permettaient pas de produire assez de bronze en une fois. Ce type de four résulte bien d'une amélioration des fours de l'AE et ce, dans un but bien précis et au dépit d'une consommation plus élevée de charbon. Les fours fermés, consommant moins a priori, ont la désagréable habitude d'avoir une retombée de température lors d'une utilisation prolongée⁷³. Dans ces moments-là, nous pouvons souffler et rajouter autant de charbon que nous le voulons, la température baisse inexorablement et ne nous permet plus de couler. En fait, la paroi ne joue plus son rôle d'isolant. L'argile commence à se vitrifier, une réaction endothermique est enclenchée. Les atomes pour gagner l'Octet deviennent capteurs d'énorme quantité d'énergie calorifique, rendant toute fonte du bronze impossible. Nous venons de constater qu'un four ouvert peut réagir de la même façon, si ses parois ont un pourcentage de vitrification supérieur à 30%.⁷⁴

B : Rentabilité. Nous avons remarqué que pas mal de phases, théoriquement nécessaires, avaient été, suite à leurs observations et leur logique de travail, tout simplement abandonnées. Ce sont véritablement des heures de travail qui sont ainsi économisées. Cette rentabilité se remarque aussi bien dans le nombre d'instruments utilisés (finalement très faible⁷⁵ : ni pince, ni écumoire⁷⁶), le fonctionnement du four (cette pseudo-dépense d'énergie ne témoigne en fait que d'une volonté de maximisation du travail

de m³). Il a fallu 3252.48 kg de bronze (2 x 1181500 cm³). Des portes identiques sont représentées dans la TT 100 de Rekhmiré.

73 - Après environ 4 heures de montée en température, ce qui équivaut à la quatrième coulée.

74 - Il serait intéressant de comparer ce pourcentage aux fouilles.

75 - Ce n'est pas dû à un manque d'ingéniosité des artisans ou au primitivisme de la civilisation puisque les Égyptiens connaissaient la plupart des instruments classiques ; c'est bien plus une **volonté** visant une pratique schématisante.

76 - Instrument remplacé par le dégazage (un simple morceau de bois).

et des quantités fondues), la conception de leurs potées (la matière et le diamètre de ces potées rendent inutiles les événements/les jets secondaires et le sciage pénible de l'unique jet principal est remplacé par un simple coup lorsque le métal est encore chaud) que dans le matériel employé (simplification et uniformisation des creusets : un creuset contient toujours la même quantité de métal ; actuellement, nous connaissons ce phénomène de standardisation mais il n'est pas propre qu'à notre mentalité). Beaucoup d'auteurs envisagent une utilisation unique du creuset : 1 creuset pour 1 seule coulée. L'expérience a montré qu'il était plus juste de considérer qu'un creuset était utilisé pendant toute une journée de travail puis broyé et utilisant comme dégraissant ; ce qui réduit nettement le travail des potiers, le nombre d'enfournements de poteries et donc la consommation en charbon et en argile.

En conclusion, l'Égypte n'innove pas en métallurgie, mais maximise la rentabilité tout en économisant l'effort physique d'une partie de ces ouvriers⁷⁷.

3.8 - MOULES

L'intérieur des moules en argile⁷⁸ sont recouverts de suie, de poussière de charbon de bois, de farine ... Cette pratique permet d'obtenir

77 - Il serait tout à fait anachronique de penser que ce souci de réduire l'effort des ouvriers résulte d'un certain humanisme des Égyptiens, seule la rentabilité en est l'explication. Il semble d'ailleurs que les travaux métallurgiques étaient assez mal considérés en Égypte. « Je n'ai jamais vu un orfèvre qui fut envoyé (pour une mission importante) mais j'ai vu le travailleur de métal à son labeur, à la gueule de son four. Ses doigts sont crevassés comme le crocodile ; il est plus nauséabond que des œufs de poisson. » (Satire des métiers ; traduction dans C. Lalouette, *Textes sacrés et textes profanes de l'ancienne Égypte, des Pharaons et des hommes*, Paris, 1984, pp. 192-196). Voir Christiane Ziegler, *Les trésors de Tanis en l'an 1000 ACN*, Paris, 2001, pp. 76-96. (L'odeur de ces travailleurs n'est pas vraiment étonnante puisqu'ils étaient couverts de boue du Nil (boue limoneuse riche en déjections animales).

78 - Ils existent en diverses matières : pierre volcanique, bronze, stéatite, calcaire, poussière de charbon de bois, plâtre, sable, ...

une meilleure surface de coulée. Ils peuvent être monovalves ou bivalves.

La technique de la fonte à l'argile est plus vieille que celle à la cire perdue ; cependant, elles ne sont jamais entrées en compétition car elles s'adaptent à un travail différent⁷⁹. L'original doit nécessairement être en matériau dur. Lorsque l'artisan désire reproduire plusieurs exemplaires, il doit chaque fois refaire un moule (sauf si ce dernier est en pierre ou en bronze), il est détruit par la coulée. Le moule est un mélange de silice (grains de sables) et d'argile qui servait d'agglutinant. De l'eau était ajoutée pour assurer la liaison entre les grains et donner de la plasticité au mélange.⁸⁰ De la finesse du grain de sable dépendait la fidélité de la reproduction.

3.9 - LA TECHNIQUE DE LA CIRE « RÉCUPÉRÉE »⁸¹

1) Le modèle en cire des artefacts est entouré d'une barbotine puis d'une potée en matériau réfractaire. 2) La cire est éliminée par fusion (décirage). Si le décirage⁸² est mal fait, la peau du bronze sera altérée (proportionnellement à la présence de résidus de cire). 3) Le métal est ensuite coulé dans la potée et 4) prend donc la place occupée à l'origine par la cire. 5) La copie en bronze est extraite de la potée par la destruction de cette dernière. 6) L'artéfact sort avec quelques bavures. Les cires à noyau perdu ont leur noyau traversé par des tiges de bronze pour le maintenir.

79 - Cette technique traite essentiellement les pièces en 2 dimensions, voire des objets en 3 dimensions mais de faible relief. Quant aux pièces plus complexes, qui évoluent dans l'espace, seule la technique de la cire perdue donnera un résultat.

80 - Ce moule nécessite un séchage soigneux car si le bronze en fusion rentre en contact avec de l'eau (ou de la cire), il se produira une explosion violente. Ces deux éléments passent de l'état solide/liquide à gazeux.

81 - Fig. 25 : Technique de la cire retrouvée, reproduction d'un artefact étrusque. Photos personnelles.

82 - Décirée à feu ouvert (700° C), le bronzier place en premier l'entonnoir de coulée de la potée face au foyer. L'orifice dégagé, il installe la potée en oblique dans le foyer et déverse régulièrement la cire dans un récipient, d'où technique de la cire « récupérée ».

Ces artefacts sont coulés par prise en charge : le bronze coule directement de l'entonnoir dans la statuette. Cela simplifie grandement la réalisation de la potée. La densité du bronze est suffisante pour chasser l'air de façon homogène au travers des microporosités de la potée. Il est inutile d'installer un système d'évent. Même si la potée se fend pendant la coulée, le couleur compense l'orifice par pose d'argile frais. Nous avons acquis la certitude que le cœur de la potée ne doit pas être rouge mais avoisiner les 200° C pour obtenir un meilleur résultat⁸³.

Exemple 4 : Les fours de décirage en croix, période ramesside⁸⁴

4 fours, complémentaires aux fours de fonte, sont destinés au décirage des potées. Ils sont constitués de briques crues d'argile du Nil fortement dégraissées au sable. L'extension Nord-Sud s'étend sur une longueur de 9 m, tandis que la partie Est-Ouest se prolonge sur x + 7 m. Les 3 canaux Est-Ouest plongent sous le canal Nord-Sud et sont voûtés pour supporter le canal Nord-Sud. Les potées, déposées dans le canal Nord-Sud, sont maintenues à 200° C (après leur décirage) le temps de la coulée.

III - MÉTALLURGIE DE LA MISE EN FORME :

Par transformations thermomécaniques, le bronze atteint à la fois sa forme, sa structure métallurgique, son traitement de surface et donc ses propriétés finales.

Aucune différence dans les techniques d'exécution n'a pu être décelée pour des artefacts de même fonction de provenances variées. En

83 - Fig. 26 : Vue d'une potée, juste après décirage dont le cœur est encore trop chaud. Photo personnelle.

84 - Fig. 27 : Qantir, QI-ax/3, Strate B/3 : Four de décirage en croix, vue en plan du foyer ; échelle 1/50. Cf. E. B. Pusch, Metallverarbeitende Werkstätten der Frühen Ramessidenzeit in Qantir-Piramesse/Nord, *Ägypten und Levante* 1, 1989a, Wien, p. 79, abb. 2.

revanche, entre différentes catégories d'artéfacts, Laurence Garenne-Marot observe des divergences dans la technique de fabrication (théorie remise en doute par l'auteur). Les objets fonctionnels sont durcis par martelage et par alliage avec de l'étain (% différent en fonction de la finalité de l'artéfact). Le martelage permet l'écroutissage du bronze. Il se faisait grâce à un marteau en pierre (qui en fonction de sa forme donnait le résultat escompté) et une enclume en pierre (qui repose sur une âme en bois). L'artisan se sert également d'une pipe en bambou (isolée du foyer par un embout en argile, combinée au charbon : chalumeau) pour effectuer soit une brasure, soit une soudure autogène, soit un émaillage (il est amusant de noter que les pinces qu'ils utilisaient sont encore utilisées par les verriers de Murano-Venise : pucella).

REMERCIEMENTS

Ce travail n'aurait pas été possible sans l'aide de Louis Baumans (bronzier à l'Archéosite d'Aubechies), d'Hugues Paridans (bronzier à l'Archéosite d'Aubechies), de l'Archéosite d'Aubechies et de tous mes amis (Michael Berger, Camille Brasseur, Luciano Calligari, Raphaël Darquenne, Pascal Duchemin, Jean-Jacques Gié, Gilbert Kreutz, Raphaël Lejeune, François et Daniela Schmidt, Steve Sergysels, Nicolas Sterckx, Arnaud Thomas, Laurent Verly, François Zapotoczny, ...) qui ont mis leur expérience à profit.

BIBLIOGRAPHIE

- BEITH-ARIEH I. 1985. Serâbît el-Khâdim: New Metallurgical and Chronological Aspects, *Levant* 17.
- CLEMENT W., HAUPTMANN A., *et al.* 2004. Persiens Antike Pracht. Bergbau – Handwerk – Archäologie, Band I et II, DBM, Düsseldorf - Bochum.
- CURTO S. 1962. Postille circa la Metallurgia Antico-Egizia, *Mitteilungen des Deutschen Archäologischen Instituts Abteilung Kairo, band 18*, Wiesbaden.
- DONADONI ROVERI M. 1990. Museo Egizio, Torino.
- GARENNE-MAROT L. 1984. Le Cuivre en Egypte Pharaonique : Sources et Métallurgie, *Paléorient, vol 10/1*, Paris.
- HODGES H. , 1964. *Artifacts. An Introduction to Early Materials and Technology*, Londres.
- KAYSER H. 1964. Ägyptisches Kunsthandwerk. Ein Handbuch für Sammer und Liebhaber Braunschweig, *Bibliothek für Kunst 4, Band XXVI*.
- MATHIEU B., MEEKS D. ET WISSA M. 2006, L'apport de l'Egypte à l'histoire des techniques . Méthodes, chronologie et comparaisons, *IFAO 142*, Le Caire.
- PHILIBERT J., VIGNES A. *et al.* 2002. Métallurgie . Du minerai au matériau, 2° et 3° cycles . Ecoles d'ingénieurs, Paris.
- PUSCH E. B. 1989. Metallverarbeitende Werkstätten der Frühen Ramessidenzeit in Qantir-Piramesse/Nord, Ägypten und *Levante 1*, Vienne.
- PUSCH E. B. 1994. Divergierende Verfahren der Metallverarbeitung in Theben und Qantir? *Ägypten und Levante 4*, Vienne.
- RIEDERER J. September 1987- Januar 1988. Archäologie und Chemie. Einblicke in die Vergangenheit, Berlin.
- ROTHENBERG B. 1972. *Timna. Valley of the Biblical Copper Mines*.
- ROTHENBERG B. 1990. *The Ancient Metallurgy of Copper (archaeology-experiment-theory). Researches in the Arabah 1959-1984 : vol. 2*, Londres.
- SCHEEL B. 1988. *Metallverarbeitung in Theben, Archäologie in Deutschland, Heft 2*, Stuttgart.
- SCHEEL B. 1988. Fundobjekte einer ptolemäerzeitlichen Metallverarbeitungsstätte in Theben und Vergleichsfunde andere vorderorientalischer Ausgrabungsplätze, *SAK 15*, Hambourg.
- SCHEEL B., 1988. Anmerkungen zur Kupferverhüttung und Kupferraffination im Alten Ägypten, *Discussions in Egyptology 11*, Oxford.
- SCHEEL B. 1989. Egyptian Metalworking and Tools, *Shire Egyptology 13*, Londres.
- TYLECOTE R. F. 1980. *The Coming of the Age of Iron*.

Furnaces, Crucibles, and Slags, New Haven and London.

TYLECOTE R. F. 1981. From Pot Bellows to Tuyeres, *Levant*, vol. XIII.

VERLY G. 2003. Expérimentation de la technique de la cire perdue sur un ex-voto étrusque du 5^e s ACN dans : *Actes du congrès sur la métallurgie des Etrusques et des Celtes (19-21 sept. 2003, Civitella Cesi)*, Università della Tuscia di Viterbo, Firenze.

VERLY G. 2002. Reconstitution d'un four datant du Nouvel Empire égyptien dans : Archéosite d'Aubechies-Beloeil, 42-50. *La métallurgie*, Aubechies.

VERLY G. 2004. Archéologie expérimentale égyptienne : nouvelle lecture des scènes de métallurgie des Tombes Thébaines privées dans : Actes des Deuxièmes Rencontres Doctorales, *Orient-Express (5-7 février 2004)*, Paris.

VERLY G. 2004. Première approche d'un four de bronzier de l'âge du fer dans Actes des XI^e Journées d'Archéologie Expérimentale au Parc Archéologique de Beynac (Pâques 2004, Directeur M. Ch. Chevillot), Beynac.

VERLY G. ET WARMENBOL E. 2004. *Gold pickings and Pixe analysis. More about the Bronze Age gold found in the cave of Han-sur-Lesse*. Namur, Belgium.

WEISGERBER G. 1975. Ägyptische Kupfergewinnung in Timna, Südisrael, Archäologisches Korrespondenzblatt. *Urgeschichte. Römerzeit. Frühmittelalter*, Jahrgang 5.

ZIEGLER CHR., ARNOD D., GRZYMSKI KRZ. *et al.* 1999. *L'Art égyptien au temps des pyramides*, Paris.