

Zeitschrift: Cahiers d'archéologie romande
Herausgeber: Bibliothèque Historique Vaudoise
Band: 54 (1992)

Artikel: L'établissement sidérurgique de Montcherand
Autor: Abetel, Emmanuel / Klausener, Max / Serneels, Vincent
Kapitel: III: Les bas-fourneaux
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-835416>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 06.05.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

CHAPITRE III

LES BAS-FOURNEAUX

La comparaison des structures mises au jour avec des éléments déjà existants ou répertoriés dans les typologies disponibles est un passage obligé de tout travail archéologique, et dans ce contexte deux approches auraient été envisageables, à partir des classifications mises en place par P.-L. PELET.

1. Propositions de typologies¹

Une première typologie (P.-L. PELET, 1974, p. 805 et 1976, p. 710, fig. 2) répertorie sept types de cuves en Europe (fig. 23):

1. *creusée en marmite* (dès la période de Hallstatt),
2. *en entonnoir* (creusée ou bâtie, cette variante de 1. aurait permis la production d'éponges plus denses),
3. *tubulaire* (haute plus de 2 m, tirage naturel: parfois inclinée pour faciliter la circulation d'air),
4. *à panse élargie* (permettant une meilleure conservation de la chaleur),
5. *conique* (provoquant une réverbération de la chaleur tout comme le type suivant),
6. *en forme de coupole*,
7. *en double cône* (dont la forme, facilitant le chargement et permettant la formation d'éponges plus denses, sera reprise dans les hauts-fourneaux modernes).

¹ Concernant la typologie des bas-fourneaux, en plus des articles de P.-L. PELET, il convient de consulter H. CLEERE (1972). Cet article fait une distinction majeure entre les bas-fourneaux de nos régions et ceux d'Europe centrale – à scorie «piégée» – où l'éponge se forme dans une cavité placée sous l'installation: celle-ci sera complètement détruite lors du prélèvement de la masse ferreuse produite au cours du processus sidérurgique. Les bas-fourneaux de ce type sont décrits par R. PLEINER (1965) et K. BIELENIN (1974).

Toutes ces installations appliquent la méthode *directe* qui produit du fer faiblement carburé; elles se différencient du *haut-fourneau* moderne dans lequel on procède par

Relevant les difficultés qu'il y avait à exploiter une telle typologie, P.-L. PELET (1982b, pp. 208-211) préféra un autre classement dont il avait déjà déterminé les lignes conductrices en 1973² et qui porte sur les *caractéristiques fondamentales* du bas-fourneau: la situation la plus favorable serait celle où elles ont toutes leur valeur optimale; P.-L. PELET (1982b) explique comment, en raison aussi de l'impossibilité de lier le progrès technique à une chronologie, c'est cette deuxième classification qui est appelée à s'imposer.

- | | |
|---|--------------------|
| 1 | isolation |
| 2 | ventilation |
| 3 | réfraction |
| 4 | forme du fond |
| 5 | porte |
| 6 | nature des tuyères |

Alors que la valeur synthétique de la *classification des formes* ne peut être contestée, il convient de relever qu'en raison des particularismes régionaux – autant culturels que technologiques – un tel regroupement, par ailleurs «diachronique», est difficilement justifiable

méthode indirecte, la *fonte* produite devant ensuite être décarburée afin de donner du fer.

² P.-L. PELET (1973, p. 121), après avoir défini quatre-vingt-onze caractéristiques d'un bas-fourneau, retenait sept points principaux: a) l'isolation, b) la ventilation, c) la hauteur, d) la surface du fond, e) la forme de la cuve, f) la forme du fond, g) la présence d'une porte. Cette typologie, revue une première fois (1977, pp. 174-176), sera ramenée à six points, ne tenant finalement pas compte de la hauteur du bas-fourneau, de la surface de son fond et de la forme de la cuve; interviendront par contre la réfraction et la nature des tuyères.

dans une optique archéologique³: ce sera encore plus le cas si nous évoquons le possible retour à des procédés archaïques lorsqu'une technique de pointe s'avérerait difficilement maîtrisable; toute chronologie des formes des bas-fourneaux étant exclue (P.-L. PELET 1982a, p. 330), leur typologie ne se justifiera que dans un contexte d'histoire des sciences et des techniques. Dans la présentation du site de Montcherand, un classement des bas-fourneaux établi sur des bases aussi précises est de toute façon impossible en raison du mauvais état de conservation des structures qui y ont été découvertes.

Si le classement des *facteurs influençant le fonctionnement* des bas-fourneaux est extrêmement intéressant car, établi selon des critères technologiques, il est applicable à toute installation quelle qu'en soit la forme, à Montcherand les structures fortement endommagées pouvaient difficilement être mises en rapport avec ces données.

L'état fragmentaire des autres installations n'a donné lieu qu'à quelques appréciations concernant la forme de leur fond, tandis que l'absence de renseignements sur l'isolation (1.) et la réfraction (3.) rend bien aléatoire toute considération au sujet du fonctionnement de l'ensemble.

2. Développement technique

Devant les difficultés qu'il y avait à interpréter ces classements, nous avons préféré privilégier la présentation des étapes de l'évolution des bas-fourneaux, en nous limitant à une progression quelque peu schématisée:

une simple cavité dans le sol dans laquelle la fusion du minerai est activée par un soufflet, plus tard protégée par un dôme, l'ensemble étant finalement équipé de tuyères.

Bas-fourneau	IV	III	III'	Va	Vb	Vc	IIa	IIb	I
1. isolation									
2. ventilation			×						×
3. réfraction									
4. forme du fond	(×)		X	(X)	(×)	(×)	(×)	(×)	X
5. porte	(×)		×		(×)	(×)		(×)	×
6. tuyères			×						×

X valeur optimale X valeur intermédiaire x simple présence

Tabl. 7 Facteurs influençant le fonctionnement des bas-fourneaux de Montcherand

Commentaire: pour P.-L. PELET (lettre du 12 août 1989) la réfraction est le facteur principal affectant le fonctionnement d'un bas-fourneau. La forme de la cuve (fig. 23) d'une part, sa hauteur et la surface de son fond d'autre part, n'étant que des composantes destinées à améliorer la réfraction, celle-ci sera représentative de toutes ces données (supra p. 47, n. 2) et s'y substituera comme facteur déterminant.

Le bas-fourneau I peut être confronté à cette classification – tableau 7 –, encore la comparaison se limite-t-elle à quatre des six points: il est muni d'une ventilation (2.), la forme de son fond (4.) est la plus évoluée⁴, il est doté d'une porte (5.), la tuyère (6.) trouvée à proximité a un diamètre acceptable⁵. Le bas-fourneau III' présente lui aussi quatre de ces caractéristiques: vraisemblablement muni d'un dispositif de ventilation (2.), la forme de son fond (4.) est d'un type intermédiaire et il est doté d'une porte (5.), mais aucune mesure n'a pu être faite du fragment de tuyère (6.) qui lui est rattaché.

Une telle retenue nous permet de rester proches du contexte technologique qui était celui

³ Les travaux en cours tendent à prouver que chaque région aura ses particularités, et ceci déjà au niveau de la Suisse. Relevons aussi les difficultés qu'il y a à comparer les descriptions que les générations successives de fouilleurs ont faites de ces structures.

⁴ Dans la mesure où nous pouvions la reconstituer, la forme du fond des bas-fourneaux a donné lieu à d'intéressantes conclusions, suggérant l'établissement d'une typologie à partir de cet élément (infra p. 92 et fig. 49, mais aussi P.-L. PELET, 1973, p. 127, tabl. VIII).

⁵ Supra fig. 10a. Selon P.-L. PELET (1982b, p. 210), les tuyères les plus archaïques ont un diamètre de 5 cm, les plus efficaces de 2,5 cm.

de Montcherand où seules la présence des dômes et l'apparition des tuyères peuvent être attestées à partir des restes archéologiques.

Cette option représente certes une régression par rapport aux classifications extrêmement affinées de P.-L. PELET; mais aussi frustrante soit-elle, elle est pour nous la seule qui pourrait être appliquée à ces installations très endommagées dont même le pourtour de la partie de la cuve subsistant reste des plus approximatifs.

Il est intéressant de relater ici les impressions de A. QUIQUEREZ (1866, p. 37) au sujet des variations qu'il avait relevées dans la constitution des bas-fourneaux, dans ce cas précis de forme élevée et sans tuyères:

« Leur forme intérieure n'est pas plus régulière, passant de celle circulaire à celle ovale, sans autre motif que le défaut de soin de l'ouvrier. Ils vont parfois en s'élargissant un peu de bas en haut, et parfois en sens contraire, mais toujours avec une extrême irrégularité. Nous en avons observé qui offraient, à 25 ou 30 cm au-dessus du creuset, un rétrécissement très sensible de trois côtés, représentant le premier rudiment de l'établissement de nos hauts-fourneaux modernes. Peut-être n'était-ce qu'un caprice de l'ouvrier. »

Il ajoutait plus loin (pp. 50-51):

« ... des réparations partielles et fréquentes, occasionnant chaque fois un rétrécissement de la cuve et une déformation plus ou moins grande, selon l'irrégularité du travail... »,

ou commentait encore (p. 58):

« ... mais l'étude de ces matières offre des variations nombreuses, qu'on peut attribuer à plusieurs causes provenant des matières premières, comme du minerai plus ou moins siliceux, des fondants naturels et accidentels, de la construction et de la marche des fourneaux, et autres causes. »

Le progrès technique paraît difficilement être le résultat de cuissons expérimentales réalisées sur des installations aux formes nouvelles; on peut se demander si ce ne sont pas précisément les constatations auxquelles auraient

donné lieu ces imperfections bien involontaires qui, alliées à la reprise de techniques déjà éprouvées par d'autres artisans, expliqueraient l'évolution vers des formes assurant une meilleure production: songeons à la cuve du bas-fourneau I, le plus récent du site de Montcherand, qui est précisément ovale.

On se souviendra cependant de la durée de vie de toute façon limitée de ces installations: souvent démantelées en cours de fonctionnement, mais de toute manière provisoires en attendant l'échéance représentée par l'épuisement des matières premières, elles étaient conçues différemment que si elles avaient été bâties pour durer.

Dans notre description des trois types de structures les plus marquants nous avons chaque fois rappelé quelques exemples significatifs d'opérations sidérurgiques effectuées sur des installations reconstituées. L'évocation des séries systématiques d'essais auxquelles a procédé P. ANDRIEUX durant la dernière décennie sort des limites de ce travail en raison de leurs finalités particulières⁶.

Le bas-fourneau le plus primitif consiste en un simple trou creusé dans le sol. On y allumait un feu auquel on ajoutait, par quantités successives, le minerai mélangé à du charbon de bois. Au fond de la cuve, au cours d'une combustion activée par des soufflets, se formait peu à peu une éponge composée d'un conglomerat visqueux de métal et de scories.

⁶ Dans sa thèse, P. ANDRIEUX (1990) exploite les résultats obtenus sur une cinquantaine de bas-fourneaux mis en activité à l'Archéodrome de Beaune entre 1982 et 1988, centrant ses conclusions sur l'influence et le comportement de la paroi des installations au cours de l'opération sidérurgique. Des bas-fourneaux à tirage naturel et à ventilation artificielle ont été testés avec une limonite de provenance australienne, dont la teneur en oxyde de fer se situe entre 70 et 80%. Cinq ou six sondes thermiques distantes de 20 à 25 cm le long d'un axe vertical – disposition empruntée à R.F. TYLECOTE (infra p. 52) – et protégées par un tube en céramique contrôlaient l'évolution de la température. Les essais pratiqués sur les bas-fourneaux à tirage naturel confirmèrent l'importance qu'avait leur hauteur. Pour les fours dotés d'un dispositif de ventilation, P. ANDRIEUX n'utilisa que des souffleries manuelles, renonçant à tout mécanisme moderne. Les températures atteintes d'une expérience à l'autre varièrent généralement entre 1100° et 1200°, dépassant 1400° près des tuyères. Le rôle des fondants put être démontré et des tentatives de forgeage ont confirmé la nécessité d'une opération complémentaire de raffinage.

On a retrouvé de ces bas-fourneaux notamment en Norique; l'exemple classique est celui des deux foyers juxtaposés du Preisenhof bei Hüttenberg en Carinthie (W. SCHMID, 1932, p. 16(182)).

Le plus grand, de 65 cm environ de profondeur et de 1m60 de diamètre, paraît avoir servi au grillage car il ne contenait pas de scorie adhérente. L'autre, de 95 cm de profondeur et de 1m25 de diamètre, était le bas-fourneau; il contenait encore sa masse de fer en partie réduit, entourée de scories. Certains bas-fourneaux de ce type avaient un diamètre et une profondeur de 15 cm seulement (tabl. 8).

Le sol et les parois de ces deux structures étaient constitués de plusieurs couches d'argile mêlée de quartz atteignant une trentaine de centimètres d'épaisseur. Des fragments des parois calcinées remplissaient le bas-fourneau; à l'origine elles devaient donc dépasser, *au moins légèrement*, le niveau du sol. Les deux foyers étaient réunis par un pavage qui se continuait jusqu'à un tas de scories trouvé un peu plus loin. Ce pavage au mortier de chaux et un fragment de chapiteau trouvé à proximité auraient prouvé que cette installation, aussi primitive fût-elle, remontait à l'époque romaine. Bien qu'aucun fragment de tuyère ne paraisse avoir été retrouvé, un dispositif de ventilation était indispensable à la réussite de l'opération de réduction⁷.

Si J. SADZOT (1956, pp. 567 et 569, tabl. 1 et 2) fournit des valeurs chiffrées concernant les résultats obtenus lors d'opérations de réduction effectuées dans de simples cuves munies d'une tuyère, en raison de leur valeur historiographique nous mentionnerons plutôt les premiers essais remontant à 1877: G. WURMBRAND (1877, p. 152) tenta une opération de réduction à partir d'une cuve chargée de couches alternées de charbon de bois et de minerai. Après 26 heures, près de 6 kg de fer s'étaient formés, dont la teneur en carbone permettait d'obtenir de bons résultats au forgeage et desquels il aurait même réussi à tirer divers objets; malheureusement, il ne consigna aucune autre donnée dans son rapport⁸.

La deuxième catégorie de bas-fourneaux se caractérise par sa forme élevée, un dôme – mais dans certains cas il conviendrait plutôt de parler de cheminée – surmontant le foyer. Ce type de bas-fourneau est présent en Gaule dès l'époque celtique et jusqu'à l'époque romaine.

Dans nos régions, la hauteur peut aller jusqu'à 2m50 et le diamètre atteindre 90 cm. En Europe centrale, comme le relève aussi P.-L. PELLET (1974, p. 794), ces installations paraissent avoir eu de plus faibles dimensions⁹, hauteur et diamètre descendant jusqu'à 60-70, respectivement 25-30 cm: il est vrai que le principe de fonctionnement y est quelque peu différent¹⁰.

D'après A. QUIQUEREZ (1866, pp. 35-36) qui étudia ces installations dans le Jura bernois, on commençait par creuser à flanc de coteau une fosse d'un diamètre triple de celui du futur foyer; on damait au fond de l'argile puis on construisait tout autour une paroi du même matériau. Le sommet était couronné de pierres brutes. Le tout constituait une sorte de cône tronqué, entouré de terre et de pierres sous un revêtement de pierres sèches (H. FEHLMANN, 1932, pp. 24-25). Il n'y avait pas trace de soufflerie et cependant le tirage avait été assez énergique pour que la face opposée à l'entrée de l'air se soit trouvée scoriacée; un tirage favorable était assuré par les structures hautes, l'air chaud montant alors dans le conduit au lieu de se disperser aussitôt et créant ainsi un courant d'aspiration. Les restes de ces bas-fourneaux sont toujours très ruinés car une fois la fusion terminée, les ouvriers devaient les détruire au moins en partie pour extraire l'éponge qui s'était formée au fond.

Un bas-fourneau de ce modèle fut reconstitué à Siegen, près de Düsseldorf par J.W. GILLES (1958): au cours des essais il obtint une

⁷ Voir à ce sujet les expérimentations relatées par J. SADZOT (1956, p. 568).

⁸ Par ces expériences couronnées de succès, il confirmait l'existence de ce type de bas-fourneaux, qu'un examen critique des rapports de fouilles les mentionnant aurait pu ramener à des installations dont la destruction du dôme avait échappé aux archéologues.

Valeurs en cm	D	H	P	Source
Simple cuve ou excavation				
Křepice	30-40		50	R. PLEINER, 1965, p. 21
Dolní Počernice	25-30		55-60	ibid. p. 22, fig. 2.2
Chýně I	20-30	50	22-25	ibid. p. 21
Bas-fourneau avec dôme (sans ventilation)				
Prague Podbaba VII	30-35	85-90		R. PLEINER, 1965, p. 22, fig. 2.10
Netrěba-Církvice	30-35	60-70		ibid. fig. 2.11
Bas-fourneau avec ventilation				
Loděnice	25-30	70		R. PLEINER, 1965, p. 22, fig. 2.9

Dimensions des divers types de bas-fourneaux d'Europe centrale
D = diamètre H = hauteur P = profondeur dans le sol

¹⁰ Supra p. 47, n. 1.

température de 1420°, réussissant à produire un métal contenant 91,2% de fer et 0,09% de carbone (p. 1691, tabl. 2): la qualité des morceaux de fer obtenus par martelage de l'éponge, était très irrégulière.

Après un préchauffage du bas-fourneau la fusion avait duré 30 heures et fourni, par martelage d'une masse de 128,5 kg, 17,3 kg d'éléments métalliques qu'il aurait fallu forger en un lingot unique¹¹.

Si les résultats obtenus étaient quelconques, il convient toutefois d'insister sur l'absence de toute ventilation artificielle, ce qui explique en partie la durée excessive de cette opération et serait un indice supplémentaire quant à la présence presque obligée de soufflets.

Le bas-fourneau était équipé de quatre thermomètres et d'un dispositif de prélèvement des gaz. Après y avoir brûlé 300 kg de charbon de bois destinés à l'assécher, le bas-fourneau fut chargé à 76 reprises par jets de 2 kg de minerai (pour un total de 152 kg), alternés avec 77 fournées de 2,7 kg de charbon de bois. Le minerai provenait de trois différents sites des environs, et avait été réduit en morceaux de moins de 30 mm. L'expérience montra qu'il convenait d'augmenter la proportion de fer des couches successives en utilisant des morceaux de minerai toujours plus petits. Peu à peu, la partie arrière de la cuve s'incrusta de scories, tandis que les expérimentateurs avaient la possibilité de régler le tirage de l'installation en modifiant l'ouverture inférieure non seulement en dimensions, mais aussi en la déplaçant dans le sens de la hauteur du bas-fourneau; la température la plus élevée fut obtenue exactement en face de l'orifice.

Le perfectionnement suivant consista à adapter une soufflerie à l'adduction d'air ménagée dans le bas de la cuve, rendant ainsi le travail indépendant du vent: dans nos régions, certains auteurs feraient remonter au 2^e s. av. J.-C. l'application à la métallurgie du fer de cette technique connue dès la plus haute Antiquité (infra p. 54).

Ces bas-fourneaux, généralement plus bas que le type précédent, peuvent encore avoir jusqu'à 2m de haut et 1m30 de diamètre, bien qu'on en trouve déjà d'un diamètre de 25-30 cm pour 70 cm de haut; la chape est constituée de pierres garnies d'une forte couche d'argile. Une porte, scellée avec de l'argile pendant la cuisson, permet d'extraire l'éponge sans trop

endommager la cuve. A la base, un ou plusieurs canaux sont ménagés pour l'adduction de l'air; par un bon vent, on laissait ouvert le canal le mieux exposé, ou aussi le dessus de la porte; lorsque le vent était trop faible, au moyen de buses en terre cuite dont on retrouve souvent les restes, on adaptait une soufflerie à l'appareil.

Dans ce cas, les premiers essais de fusion convenablement documentés paraissent avoir été effectués en 1962 par E. PLOECKINGER et alii. (1964) à partir de bas-fourneaux reconstruits sur le modèle de ceux découverts par W. SCHMID (1932, p. 39(205)); deux structures, l'une haute de 1m50 et d'un diamètre de 75 cm, l'autre aux dimensions de 1m et 45 cm, pour des volumes de 0,55 et 0,13 m³, équipées toutes deux d'une tuyère, furent mises à feu. Le minerai fut chargé après un préchauffage de 9h1/2 suivi d'une ventilation de 1 heure: une pointe de température de 1420° fut atteinte dans le plus grand des bas-fourneaux; à plusieurs reprises les tuyères avaient dû être débouchées.

Les expérimentateurs (ibid. p. 22) insistaient sur les différences notables de température à l'intérieur de la cuve et sur la nécessité d'indications précises sur l'endroit où serait faite la mesure¹²: alors que dans les parties hautes des bas-fourneaux on atteignait 700°, c'est au niveau de la tuyère, située 10 cm plus haut que le fond du foyer, qu'au bout de 15 heures on arriva à la température de 1420°: il convient de relever qu'à 20 cm du fond les températures étaient toujours plus élevées d'une centaine de degrés, mais aucune mesure ne fut faite à ce moment-là.

Pour l'ensemble de l'opération, 375 kg (155 kg) de charbon de bois et 75 kg (45 kg) de minerai furent nécessaires (ibid. p. 21): aucune donnée n'est par contre rapportée sur les quantités produites, les auteurs s'étant fixé pour seul objectif d'obtenir de l'acier.

Après avoir été laissés refroidir durant trois jours, les bas-fourneaux furent démantelés, car c'était la seule manière d'en récupérer le contenu: si la répartition des produits de l'opération sidérurgique dans le bas-fourneau reste difficile à reconstituer à la lecture du rapport scien-

¹¹ Le forgeage de deux masses de particules de fer de 500 g chacune produisit un morceau de 340 g.

¹² «... einzelne Schriftumsangaben vorsichtig beurteilt werden müssen und nur unter Berücksichtigung der genauen Angabe der Messstelle aussagekräftig sind.»

tifique, on constate que, contrairement à ce qu'on serait tenté de penser, le fer ne forma pas un bloc homogène mais se solidifia en différents points du foyer, pris dans des scories dont la nature variait selon des conditions de fusion propres à chaque secteur de la cuve; par endroit le fer apparaissait en fines strates, presque pur de toute inclusion, ailleurs il avait la forme de grains pouvant contenir de la cimentite d'une teneur théorique de 6,67% de carbone; d'autres petites coulées, descendues plus bas que la tuyère, avaient une composition proche de celle de l'acier¹³.

Tandis que les strates étaient faites de lamelles de quelques dixièmes jusqu'à 10 mm d'épaisseur, les grains pouvaient atteindre un diamètre de 20 mm. Dans l'axe du courant de ventilation des buses on trouva des blocs de scories d'un diamètre de près de 25 cm («*zusammengefrittete Kuchen vor den Blasdüsen*») contenant à la fois des strates de fer et des grains aux teneurs plus élevées en carbone, avec des traces de cimentite.

La tentative de R.F. TYLECOTE et alii. (1973) mérite aussi d'être signalée: un bas-fourneau en briques d'alumine haut de 1m80 et de 30 cm de diamètre fut construit sur le modèle d'une installation fouillée à Ashwicken: le diamètre extérieur était de 1m jusqu'à une hauteur de 1m14, puis se réduisait à 60 cm. Après quatre fusions effectuées en plein air le bas-fourneau fut transféré dans un laboratoire et fonctionna encore 28 fois. Six orifices espacés d'environ 12 cm étaient placés verticalement pour recevoir les sondes destinées aux mesures de température et de pression. La porte du bas-fourneau, dotée d'une tuyère une fois l'opération lancée, avait 38 cm de haut pour une largeur de 23 cm.

Des fusions spécifiques furent faites pour évaluer les diverses variables, dont la hauteur de la charge dans le bas-fourneau et les dimensions du minerai, une partie duquel avait été grillée avant l'opération. Plusieurs dimensions du charbon de bois furent essayées: d'abord des morceaux durs allant jusqu'à 10 cm, puis un mélange de morceaux tendres et durs, tamisés entre 2,5 et 8 cm. Les morceaux de minerai – de la sidérose (FeCO₃) – ne devaient pas dépasser 12 mm, leur dimension influençant la fluidité des scories et le début de l'opération de réduction. Le préchauffage de l'installation était réalisé artificiellement par projection

d'air chaud. En cours de fonctionnement la température était de 1300° à l'intérieur du four et atteignit 1600° à proximité de la tuyère.

Le combustible et le minerai furent mélangés en proportions variables au cours des diverses fusions, les adjonctions en cours d'opération se faisant de façon à ce que la hauteur de la charge reste constante à l'intérieur de la cuve. Durant les essais, diverses valeurs furent données au rapport charbon/minerai qui passa de 2:1 à 1:4; ce dernier dosage, s'il donnait naissance à des scories s'écoulant facilement, conduisait à une augmentation du fer contenu dans celles-ci, avec comme corollaire une diminution de la teneur en carbone de l'éponge, qui passa de 1,8 à 0,03% (R.F. TYLECOTE et alii., 1973, p. 43, tabl. 5).

Des précisions étaient fournies concernant le moment où on devrait extraire l'éponge, qu'il s'agisse de la nécessité de la laisser se développer suffisamment ou du bruit produit par l'air insufflé dans la masse incandescente lorsque les dimensions de l'éponge tendraient à obturer la tuyère. Le résultat paraît avoir été une éponge homogène, dont R.F. TYLECOTE (ibid. p. 46) donne les dimensions dans son tableau 9¹⁴. De l'acier – 0,3 à 0,8% C – fut aussi obtenu, mais la forte présence de scories dans l'éponge nécessitait des traitements complémentaires.

G. SPERL (1986) a lui aussi tenté de travailler avec un bas-fourneau du type dit «norique» (*norischer Bauart*): après un préchauffage par un feu de bois d'une durée d'une heure, l'installation était chargée avec du charbon de bois en petits morceaux de 20/50 mm et continuait de chauffer durant deux heures; une fois fermé, l'orifice inférieur servait de support à une buse de ventilation. Le minerai et le combustible étaient chargés en proportions identiques, avec parfois des fournées comportant exclusivement du charbon de bois: une heure plus tard l'éponge se formait au niveau de la tuyère; le bas-fourneau était encore rechargé durant deux à trois heures¹⁵, puis était ouvert après

¹³ La découverte de coulures de fonte – que l'on peut définir comme un acier à la teneur en carbone trop élevée – est relativement fréquente lors de la fouille de bas-fourneaux, ainsi par exemple à Prins-Bois II (P.-L. PELET, 1973, p. 112).

¹⁴ La fusion n° 27 fournit par exemple une éponge de 6,5 kg à partir de 22,7 kg de minerai.

¹⁵ Cette valeur n'est pas spécifiée par G. SPERL (1986) mais nous a été précisée par P.-L. PELET (lettre du 12 août 1989) qui participa à cette tentative de reconstitution. Le recours à un dispositif de ventilation mécanique n'influença que minimement la durée de l'opération.

Valeurs en cm	D	H	P	Source
Simple cuve ou excavation cylindrique				
	15-150			P.-L. PELET, 1973, p. 125
Hüttenberg	125		95	W. SCHMID, 1932, p. 16(182)
Jura	90		30-40	A. QUIQUEREZ, 1866, p. 35, pl. 1
Bas-fourneau avec dôme et sans ventilation				
Montagne Noire	30-40	200		C. DOMERGUE et alii., 1982, p. 228, fig. 12
Siegerland	60-90	150		R. PLEINER, 1965, p. 16
Jura	45-48	230-250		A. QUIQUEREZ, 1866, p. 36
Bas-fourneau avec ventilation				
		120-150		P.-L. PELET, 1973, p. 124, tabl. V
Feisterweise I	100	200		W. SCHMID, 1932, p. 39(205)
Jura-Favergeatte	55	200		A. QUIQUEREZ, 1866, p. 49, pl. 4
Prins-Bois XIII	80			P.-L. PELET, 1960, p. 64, fig. 7
Hüttenberg	100-130	160-190		W. SCHMID, 1932, p. 17(183)
Ashwicken-Norfolk	30	150		R.F. TYLECOTE, 1987, p. 171, fig. 5.16
Engsbachofen	130	100		P. WEIERSHAUSEN, 1939, p. 9, fig. 2
Montcherand I	60-140	(125)		
Montcherand III'	50-90			

Tabl. 8 Dimensions des divers types de bas-fourneaux selon la littérature

D = diamètre H = hauteur P = profondeur dans le sol

s'être refroidi d'une demi-heure à une heure: des scories avaient dû être évacuées presque toutes les heures. S'il indique qu'il dut recourir à 50 kg de minerai, G. SPERL (ibid. p. 32) ne fournit aucune autre donnée chiffrée concernant son expérience qui au total dut durer environ sept heures. Dans son bilan (pp. 33-34), parmi les divers points évoqués, il mettait l'accent sur l'importance de la soufflerie.

Les interventions archéologiques récentes, ainsi que les tentatives de reconstitution de traitements sidérurgiques qui s'appuient sur des programmes d'analyses toujours plus complexes, tendraient à confirmer une prépondérance des installations dotées d'un dôme équipé de tuyères, les deux autres variantes n'étant d'ailleurs citées de nos jours encore qu'à partir de rapports de fouilles anciens¹⁶: une bonne réfraction et le recours à une ventilation ne se sont-ils pas avérés indispensables dans la plupart des opérations de réduction recréées ces dernières années?

Une telle interprétation s'appuierait sur la présence de tuyères presque chaque fois qu'un bas-fourneau est retrouvé en bon état: cette

situation reste exceptionnelle puisque dans l'Antiquité ces composantes étaient généralement récupérées des installations dont on interrompait l'exploitation, ce qui expliquerait aussi le mauvais état dans lequel sont retrouvées ces structures.

Il faut aussi remarquer que les dispositifs décrits comme un simple trou dans le sol remontent souvent au siècle passé et que ces témoignages sont rapportés par des ethnologues: il n'est pas hasardeux de dire qu'une sensibilité humaine plus que technique, propre à ces chercheurs, pouvait les amener à négliger l'un ou l'autre détail dans la relation de ce qu'ils avaient vu, comme la présence d'un dispositif de ventilation ou la nature d'un minerai pour le traitement duquel aurait pu suffire un bas-fourneau sans dôme. Ces éléments peuvent induire les chercheurs en erreur au moment où ils définissent une structure à partir des éléments manquant à celle-ci.

¹⁶ Supra p. 50 et tabl. 8, ou la date de découverte des structures signalées par R. PLEINER, 1965, p. 61, fig. 15 et R.F. TYLECOTE, 1987, p. 157, fig. 5.6.

2.1. La ventilation des bas-fourneaux

Les fragments de tuyères découverts à Montcherand à proximité des bas-fourneaux I et III¹⁷ confirment que, tout au moins pour ces deux installations, on eut recours à une ventilation artificielle: l'application de ce procédé représente pour l'Antiquité le progrès technique le plus important avec éventuellement l'utilisation des fondants pour abaisser le point de fusion.

Un apport d'air étant nécessaire pour atteindre une température suffisante, le perfectionnement consiste à ouvrir un ou plusieurs orifices vers la base du bas-fourneau: associés à une superstructure élevée assurant un tirage favorable, ils auraient produit une circulation optimale de l'air: un aménagement particulier contribuait à exploiter la direction du vent en le rabattant vers les orifices à l'aide de panneaux mobiles adaptables. L'apport d'air devait toutefois être savamment dosé afin que l'excès n'en oxyde pas le métal au cours de sa réduction. En l'absence de soufflets, il était possible de régler l'aération du bas-fourneau en fermant plus ou moins la porte: pour cela, il suffisait d'un peu d'argile ou de quelques pelletées de menu charbon (A. QUIQUEREZ, 1871, p. 78).

S'ils semblent inconnus en Europe, les soufflets en peau placés sur une coquille de céramique sont déjà attestés sur le bas-relief d'une stèle funéraire thébaine de l'époque de Thoutmosis IV, vers 1425 avant notre ère (fig. 24) et les outres en peau destinées au transport du vin, fréquemment reproduites sur les vases attiques du 5e s. av. J.-C., confirment par ailleurs l'usage de ce matériau¹⁷. Au siècle passé, les forgerons nomades d'une ethnie tamoule que J. PERCY (1864, p. 261) plaçait au Bengale – il s'agit de tribus que L. BECK (1891², p. 238) situait dans l'Etat du Mysore – utilisaient un système de ventilation adapté à un foyer, creusé en terre, de 15 cm de diamètre qui reposait sur le même principe (fig. 25): comme dans nos contrées, les migrations de ces peuplades étaient dictées par les disponibilités en minerai ou en bois de charbonnage; ce type de bas-fourneau subsistera jusqu'au 19e s. chez les nomades des steppes tels les Tatars Kouznetski, Tartares forgerons précisément... (L. BECK 1891², pp. 285-286).

A l'époque romaine, comme sur la stèle d'Aquileia représentant un atelier de forgeron

(Museo Archeologico di Aquileia, inv. 156), feront leur apparition les soufflets à volant, au pourtour en forme de coeur et avec les côtés en cuir (P.-L. PELET, 1983, p. 332) dont le principe de fonctionnement est celui connu de nos jours.

Une fois la ventilation artificielle adoptée, d'autres progrès techniques seront encore possibles; nous songeons par exemple à la modification de l'angulation des tuyères¹⁸: l'inclinaison donnée à la buse durant la construction du bas-fourneau fixera le point de la cuve où l'apport accru d'oxygène produira la température la plus élevée¹⁹.

Améliorations de détails techniques réalisées dès l'Antiquité ou innovations majeures dont la mise au point et l'application à la soufflerie seront plus longues à trouver: connue dans nos régions dès le 5e s. de notre ère (Vie des pères du Jura 57, 6), la roue à eau sera utilisée en métallurgie dès le 8e s. pour actionner les meules à aiguiser (P.-L. PELET, 1978, p. 54). A Pise, on la mentionne en 1185 (ibid. p. 49) pour entraîner le martinet servant à façonner les éponges. La soufflerie hydraulique, attestée dès 1226 en Valteline, tardera à s'imposer, essentiellement en raison des difficultés à contrôler la puissance de soufflets qui, en prise directe avec le cours d'eau voisin, risquaient de produire de la fonte, un alliage que l'on ne parvenait pas à forger.

Une structure découverte par M. JOOS²⁰ sur les hauts de Lajoux JU et datée par la céramique indique toutefois qu'encore vers 1400 des bas-fourneaux auraient fonctionné sans tuyère grâce, il est vrai, à un aménagement particulier de leur cuve.

2.2. Les bas-fourneaux de Montcherand

L'absence complète de pierres à l'extérieur des foyers (fig. 26) s'explique par une récupération ou une élimination systématique: pour les agriculteurs il est important de dégager les champs de tout obstacle susceptible d'être

¹⁷ In *Illiade* 18, v. 470, la forge utilisée par Héphestos pour confectionner les armes d'Achille aurait disposé de vingt soufflets.

¹⁸ P.-L. PELET (1973, p. 30) signale ainsi des tuyères formant un angle de 45° avec la paroi de la cuve.

¹⁹ Concernant l'angle de ventilation, nous renvoyons le lecteur aux propositions de P.-L. PELET (à paraître).

²⁰ M. STEINER, (1979, p. 181).

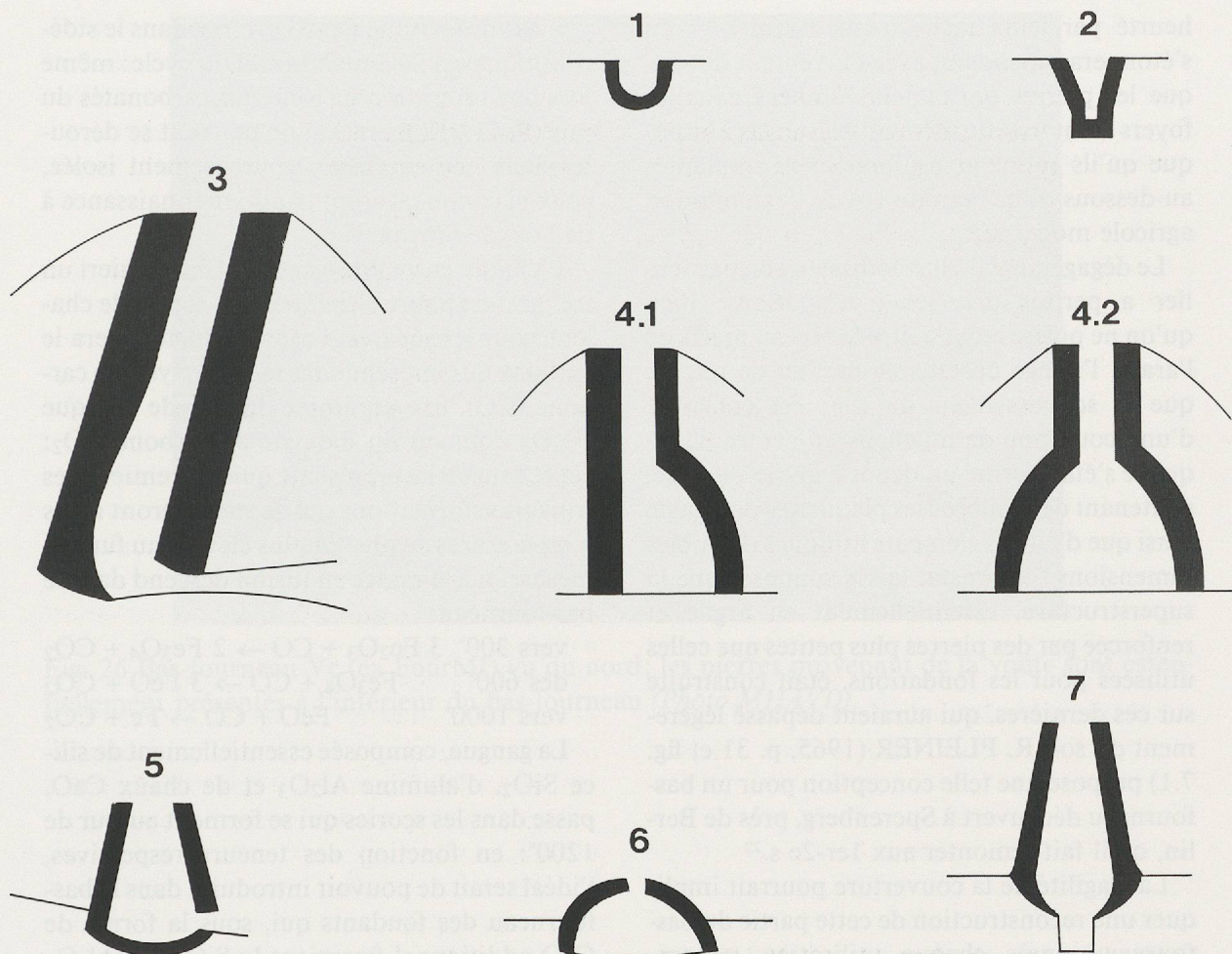


Fig. 23 Formes de cuves selon la typologie de P.-L. PELET (1982b, p.211, fig. 4).

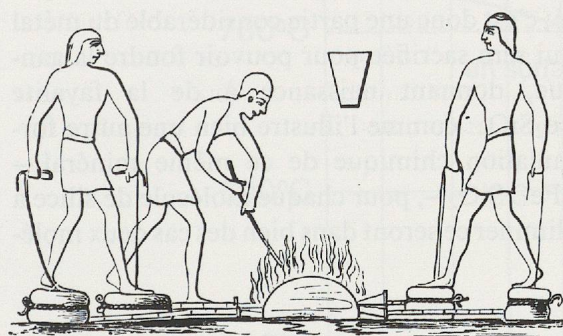


Fig. 24 Artisans activant des soufflets en peau montés sur une coquille. Stèle funéraire - Egypte. Tiré de L. BECK (1891², p.75, fig. 13).

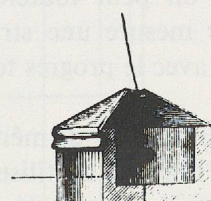


Fig. 9. Vertical section of one of the bellows

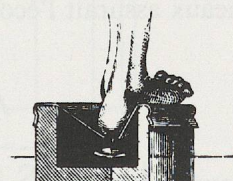


Fig. 10. Section of one of the bellows, showing the action of the heel in depressing the skin and closing the opening in its centre.

Fig. 25 Soufflets en peau montés sur une coquille. Principe de fonctionnement - Bengale. Tiré de J. PERCY (1864, p. 263, fig. 9 et 10).

heurté par leurs instruments aratoires²¹; on s'étonnera cependant, avec l'inventeur du site, que les pierres qui étaient tombées dans les foyers aient tout de même subsisté: ceci implique qu'ils restaient profondément implantés au-dessous du niveau du sol de l'exploitation agricole moderne.

Le dégagement du bas-fourneau I en particulier a permis diverses constatations: bien qu'on ne puisse reconnaître le niveau précis de l'arase, l'image observable permet de relever que le soubassement du four est constitué d'une couronne de moellons au centre de laquelle s'était formé un dépôt d'argile rubéfiée, contenant de nombreuses plaquettes de schiste ainsi que d'autres éléments lithiques de faibles dimensions: ce constat laisse supposer que la superstructure, essentiellement en argile et renforcée par des pierres plus petites que celles utilisées pour les fondations, était construite sur ces dernières, qui auraient dépassé légèrement du sol: R. PLEINER (1965, p. 31 et fig. 7.1) propose une telle conception pour un bas-fourneau découvert à Sperenberg, près de Berlin, qu'il fait remonter aux 1^{er}-2^e s.²²

La fragilité de la couverture pourrait impliquer une reconstruction de cette partie du bas-fourneau après chaque utilisation en employant les mêmes pierres qui, en quelque sorte, avaient fait leurs preuves: ceci contribuerait aussi à expliquer leur nombre relativement réduit, mais suffisant au vu des volumes reconstitués par M. KLAUSENER (tabl. 1): si l'on songe que le four I est le plus évolué de l'ensemble, on peut toutefois se demander dans quelle mesure une structure légère est compatible avec le progrès technique qu'il représente.

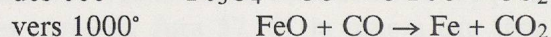
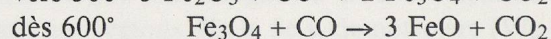
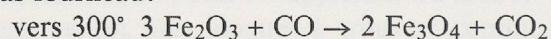
La permanence sur de mêmes fondations se justifie par l'intérêt d'utiliser un sol que les précédentes opérations sidérurgiques auraient ainsi stabilisé et asséché²³, la forte densité de scories de la terrasse sur laquelle étaient les bas-fourneaux assurait l'écoulement des eaux de pluie.

3. Fonctionnement

Avant de décrire le processus sidérurgique antique, nous essayerons de présenter très succinctement le chimisme de l'opération métallurgique.

L'oxyde ferrique Fe_2O_3 présent dans le sidérolithique est l'élément initial du cycle: même lors de l'utilisation de minerais carbonatés du type FeCO_3 , l'opération ne pouvant se dérouler dans une enceinte rigoureusement isolée, ceux-ci commenceront par donner naissance à de l'oxyde ferrique²⁴.

L'affinité entre l'oxygène et le fer requiert un très grand apport d'énergie sous forme de chaleur pour les séparer: l'agent réducteur sera le carbone qui, présent dans le monoxyde de carbone (CO), fixe un atome de l'oxyde ferrique Fe_2O_3 donnant du dioxyde de carbone CO_2 : cet échange²⁵ ne représente que la première des trois transformations qui se succéderont à des températures de plus en plus élevées au fur et à mesure que la masse en fusion descend dans le bas-fourneau:



La gangue, composée essentiellement de silice SiO_2 , d'alumine Al_2O_3 et de chaux CaO , passe dans les scories qui se forment autour de 1200° : en fonction des teneurs respectives, l'idéal serait de pouvoir introduire dans le bas-fourneau des fondants qui, sous la forme de CaO additionnel fixeraient le SiO_2 et l' Al_2O_3 avant que ceux-ci ne précipitent avec l'oxyde de fer: s'il a été possible de le prouver à Montcherand (voir pp. 40 et 76), le recours à de tels additifs ne peut être généralisé dans l'Antiquité; c'est donc une partie considérable du métal qui sera sacrifiée pour pouvoir fondre la gangue, donnant naissance à de la fayalite Fe_2SiO_4 : comme l'illustre bien une autre formulation chimique de ce même minéral – $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ –, pour chaque molécule de silice à éliminer ce seront dans bien des cas deux molé-

²¹ A. Montcherand, l'agriculteur qui exploitait la parcelle sur laquelle se trouvaient les bas-fourneaux indiqua précisément que quelques années plus tôt le terrain avait été retourné jusqu'à une profondeur de 40 cm, afin d'éliminer tout obstacle à la charrue.

²² L'examen de ces restes archéologiques pourrait fort bien faire songer à une couverture bâtie sur un volume central de combustible et de minerai qui aurait précédemment été mis en place en niveaux successifs à l'intérieur de la couronne de moellons; la phase initiale de l'opération de fusion aurait contribué à sécher la superstructure, mais le succès d'une telle démarche paraît bien aléatoire.

²³ P.-L. PELET (1960, p. 61) précisait pour Prins-Bois I: «*Le fond (...) ne doit ni laisser passer l'humidité ni céder sous le poids de la construction...*»

²⁴ Comme l'ont confirmé les expériences de G. SPERL, le FeCO_3 est difficile à réduire: à l'inverse, il pourrait donner plus facilement naissance à de l'acier.

²⁵ Le monoxyde de carbone devrait être dosé de façon à correspondre très exactement à la quantité d'oxygène qu'il s'agit de fixer à partir de l'oxyde ferrique, malheureusement il aura une affinité encore plus grande avec l'oxygène de l'air.



Fig. 26 Bas-fourneau Vc (ex FourMI) vu du nord: les pierres provenant de la voûte sont essentiellement présentes à l'intérieur du bas-fourneau (Photo MHA VD).

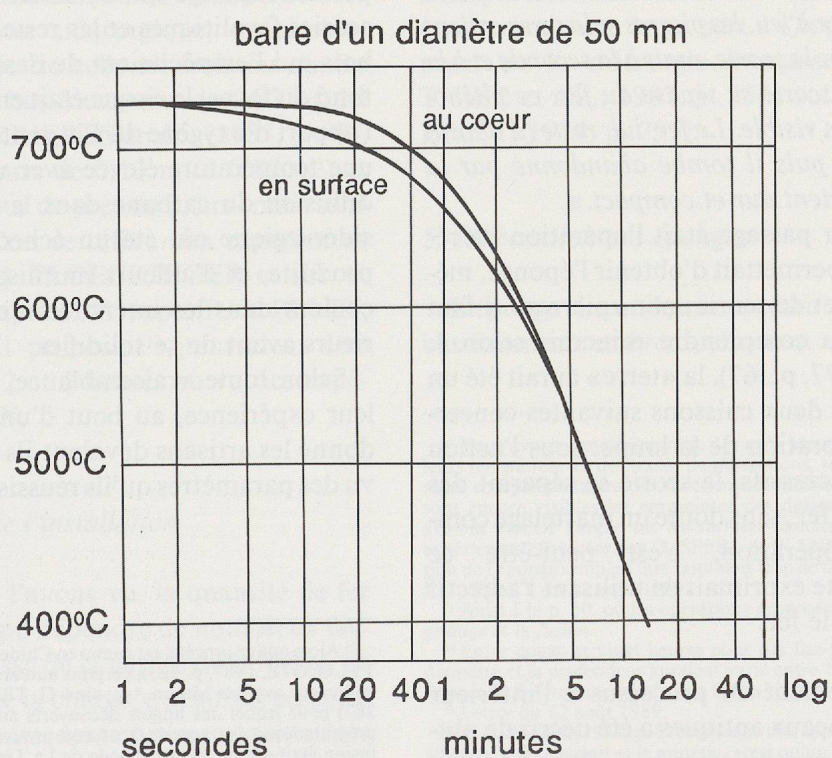


Fig. 27 Courbe de refroidissement pour un Acier 1040 de la norme américaine ASM (0,37-0,44% C, 0,6-0,9% Mn, <0,04% P, <0,05% S). Tiré de *Metals Handbook. Vol. 2: Heat Treating, Cleaning and Finishing*, Metal Park, 1964⁸, p.11.

cules d'oxyde de fer qui seront utilisées, car à des températures aussi basses que 1200° c'est à cette condition que la gangue pourra être fixée.

Même s'il avait été possible d'approcher le point de fusion du fer à 1536°, on n'aurait pu obtenir le métal directement, le combustible nécessaire pour atteindre une telle température laissant une quantité trop élevée de carbone dissous dans le métal²⁶.

A défaut d'une soufflerie suffisante, l'apport de 2% de carbone permettrait certes d'abaisser le point de fusion du fer jusqu'à près de 1147°²⁷, mais ce matériau – la teneur de 2% est proche de celle de la fonte de première fusion (2,5 à 4,5% de C) produite par les hauts-fourneaux modernes – n'est utilisable que sous certaines conditions, qui n'ont pu être réalisées qu'occasionnellement dans l'Antiquité (infra p. 64).

Etrangement, c'est un auteur antique, apparemment bien éloigné des problèmes de métallurgie, qui nous a laissé la description la plus complète de l'opération de traitement du minerai de fer: parlant des maladies de la vessie, HIPPOCRATE (Maladies 4, 55) décrivait sommairement la manière dont le fer était obtenu: *«C'est ainsi que le fer provient des pierres et de la terre brûlées ensemble. Lors de la première mise à feu, les pierres et la terre collent ensemble avec la scorie, mais à la seconde et à la troisième la scorie se sépare du fer: ce phénomène est bien visible. Le fer, lui, reste (d'abord) dans le feu; puis il tombe abandonné par la scorie, et devient dur et compact.»*

Le premier passage était l'opération de réduction qui permettait d'obtenir l'éponge, mélange de fer et de scorie; par «pierres» il faut bien entendu comprendre minerai; selon J. RAMIN (1977, p. 167), la «terre» aurait été un fondant. Les deux cuissons suivantes concernaient l'élaboration de la loupe: sous l'action de recuits successifs, la scorie se séparait des fragments de fer; sans doute un martelage complétait-il l'opération, c'est peut-être ce qu'Hippocrate exprimait en utilisant l'adjectif πυχρός pour le fer.

Le déroulement du processus à l'intérieur des bas-fourneaux antiques a été décrit de plusieurs manières; diverses considérations ont ainsi été faites par H. CLEERE (1976, pp. 134-135) sur le fonctionnement pratique de ces installations²⁸.

Le cycle commençait par un préchauffage du bas-fourneau d'au moins une demi-journée afin d'éviter de trop grands écarts de température au début du processus sidérurgique proprement dit²⁹. Un fois le bas-fourneau chargé et l'opération lancée, par leur poids propre les morceaux de minerai descendaient dans la cuve, occupant la place libérée au fur et à mesure de la réduction de la masse incandescente, s'approchant ainsi des zones de fortes températures et des courants de gaz à proximité des tuyères. A partir de 700°, des globules de fer commençaient à coalescer, en formant peu à peu une masse visqueuse tandis qu'apparaissaient les premières scories, pauvres en fer; sous l'effet de la chaleur, une partie de l'oxyde de fer, se combinant avec la silice, précipitait en fayalite, descendant jusque sous le niveau des tuyères, dans une zone moins chaude: les scories de ce type, plus lourdes et riches en fer, ne pouvaient pas être traitées une seconde fois avec les moyens de l'époque, les températures réalisables étant trop basses. Les expériences pratiques que nous avons signalées semblent indiquer que les éponges s'obtenaient en rechargeant à plusieurs reprises une première masse incandescente.

Il était important d'extraire au moment opportun l'éponge qui se serait déposée sur les scories fayalitiques et les restes de charbon de bois qui l'empêchaient de descendre jusqu'au fond du foyer; le risque était en effet grand que l'apport d'oxygène dû à la ventilation produise une température élevée avec une plus grande diffusion du carbone dans le fer: l'opération sidérurgique eût été un échec, la fonte ainsi produite, et d'ailleurs inutilisable à l'époque, coulant dans les interstices des niveaux inférieurs avant de se solidifier.

Selon toute vraisemblance, en fonction de leur expérience, au bout d'un laps de temps donné les artisans devaient-ils admettre qu'au vu des paramètres qu'ils réussissaient à contrô-

²⁶ Alors que ce procédé est connu en Chine au 5e s. av. J.-C. (R.F. TYLECOTE, 1987, p. 325), certains auteurs attestent des coulées en Europe avant le Moyen Âge: ainsi G. TRONQUART (1987, p. 287) pour lequel des lingots découverts au camp de la Bure ne présentant pas de traces de façonnage prouveraient que le point de fusion était atteint dès la période de La Tène!!!

²⁷ A peine 60° de plus que la température de fusion du cuivre, réalisée dès la plus haute Antiquité.

²⁸ L'exemple choisi par H. CLEERE est celui d'une installation dotée d'une ventilation artificielle.

²⁹ Lors des expériences effectuées par G. SPERL et P. ANDRIEUX cette durée était sensiblement réduite.

ler – durée de l'opération, nature des scories en fonction de la charge, etc –, le processus sidérurgique était terminé.

A ce stade, selon H. CLEERE (1976, p. 136), l'éponge était extraite soit par l'orifice supérieur du bas-fourneau, soit par la porte qu'il aurait fallu enfoncer avec plus ou moins de dégâts à l'installation: mais même dans ce cas des bas-fourneaux purent être réutilisés, ainsi à Holbeanwood certains d'entre eux auraient-ils fonctionné de vingt à trente fois: pour H. FEHLMANN (1932, p. 25) une partie de la paroi était souvent arrachée avec l'éponge au cours de son extraction, situation proche de celle que l'on peut restituer pour l'échantillon Mo4 de Montcherand³⁰.

C'est par le prélèvement de l'éponge que se termine le cycle connu et attesté de l'opération métallurgique: souvent, les traitements qui suivent ne seront plus que pressentis, exception faite, peut-être, du recuit qu'indique par endroits la présence d'un bas-foyer³¹ dans lequel, somme toute, c'est une opération semblable à la précédente qui aurait été répétée.

Bien que le cycle de fonctionnement qui nous est ici proposé paraisse complet, divers éléments restent incertains, qu'il s'agisse des chargements de minerai ou de charbon de bois durant l'opération sidérurgique, ou simplement de la durée de celle-ci: trois ou quatre heures pour des bas-fourneaux de 0,03 à 0,18 m³ selon C. FORRIERES et alii. (1987, p. 98), entre quinze (fours de 0,13 m³ à 0,55 m³) et trente heures (four de près de 0,5 m³ mais sans ventilation) si l'on se réfère aux expériences respectives de G. PLOECKINGER et alii. et J.W. GILLES (supra p. 51); pour P.-L. PELET, les valeurs qu'il proposait³² pourraient être ramenées entre 2 et 3 heures au vu des expériences récentes³³.

4. Rendement de l'installation

Comme nous l'avons vu, la quantité de fer produite aurait pu dépendre de nombreux facteurs: qu'il s'agisse de la nature du minerai, de la préparation de la charge, qui aurait pu comporter des fondants, des températures atteintes en fonction de la puissance de la soufflerie ou, bien entendu, des dimensions du bas-fourneau; de telles données conduisent aux interprétations les plus larges concernant le rende-

ment de l'installation. Ainsi H. FEHLMANN (1932, p. 25) estimait qu'un bas-fourneau de 0,4 m³ pouvait produire 9 kg de fer, tandis que P.-L. PELET (1976, p. 710) proposait, selon les dimensions, la production d'éponges d'un poids oscillant entre 3,5 et 20 kg dont il aurait fallu encore extraire les particules de fer³⁴. L'impossibilité technique de traiter de grandes quantités de minerai au cours d'une même opération sidérurgique explique la présence de plusieurs installations sur un même site.

Le rendement était des plus médiocres, puisque ce n'est souvent que le quart du métal contenu dans le minerai qui était utilisé. H. FEHLMANN (1932, p. 25) signale des scories contenant jusqu'à 43% de fer; c'est ainsi qu'au siècle passé en France, ces déchets qui étaient restés en grandes quantités près des exploitations antiques constituèrent un excellent filon; le ferrier primitif du Domaine des Forges, sur la crête de la Montagne Noire, a été évalué à 3'000'000 tonnes de scories³⁵ pour une exploitation qui, déjà en cours en 20 av. J.-C. sur le site des Martys, se serait poursuivie jusqu'en 275-280 ap. J.-C.³⁶. Dans la Nièvre et le Berry, les ferriers antiques avaient de telles dimensions, que jusqu'en 1968 ces scories étaient transportées en Lorraine où elles contribuaient encore pour une large part à l'approvisionnement de la sidérurgie française (A. BOUTHIER et alii., 1987, p. 254; voir aussi P.-L. PELET, 1974, p. 795).

5. Elaboration des éponges

L'éponge incandescente était extraite du bas-fourneau et éventuellement martelée im-

³⁰ Nous avons signalé (supra p. 18) qu'à Montcherand les fouilleurs ont pu relever des traces de réparations, sous forme de glaissages complémentaires des revêtements intérieurs des cuves, où sont encore visibles les empreintes des doigts des artisans qui avaient modelé l'argile sur les surfaces endommagées. Lors des expériences effectuées par G. SPERL et P. ANDRIEUX l'extraction de l'éponge semble s'être faite sans trop de difficultés (lettre de P.-L. PELET du 12 août 1989).

³¹ Ainsi à la p. 50, où les opérations proposées sont toutefois le grillage et la fusion.

³² Entre douze et vingt heures pour des bas-fourneaux dont le diamètre et la profondeur auraient varié entre 15 et 50 cm, ce qui donnerait des volumes de 0,01 à 0,4 m³ (1974, p. 793).

³³ Lettre du 12 août 1989.

³⁴ P.-L. PELET (1974, p. 810) indique un rapport de poids de 1 à 10 entre le fer produit et le minerai, ainsi qu'un volume de 1 m³ de scories par tonne de minerai; l'ensemble de ces valeurs, mais il s'agit ici d'estimations, sera tout naturellement lié à la teneur en fer du matériau traité...

³⁵ C. DOMERGUE et F. TOLLON, 1975b, p. 101.

³⁶ C. DOMERGUE, T. MARTIN et P. SILLIERES, 1975a, pp. 138-139.

médiatement au bénéfice de sa viscosité, encore favorable durant un bref laps de temps³⁷. Les découvertes faites à Montcherand indiquent toutefois que le martelage des éponges de ce site n'avait lieu que durant une phase successive: le fer spongieux était transformé en une masse compacte qui, au terme du cycle sidérurgique, contenait au moins 98% de métal pur.

Les conditions thermiques jouaient un rôle capital au cours de cette opération dont le but ne se limite pas à éliminer les scories. Le martelage à chaud contribuait à réunir les fragments de fer présents dans l'éponge: la compression des divers éléments produisait une cristallisation commune des mailles immédiatement voisines et dans la situation optimale où leurs bords avaient été chauffés jusqu'au point de fusion, par *soudage* les morceaux de fer se seraient réunis en un tout homogène.

Travaillant à l'aide d'une microsonde I. KEESMANN (1985, p. 356) a réussi à déterminer des différences entre les températures atteintes et en ce qui concerne les traitements mécaniques subis. Si, vu la précarité des installations sidérurgiques antiques les températures ne nous paraissent pas avoir été significatives d'une opération particulière, la confirmation d'un traitement mécanique – obtenue par des analyses répétées sur un grand nombre d'échantillons – est d'un extrême intérêt, car elle confirme l'existence d'une opération de martelage des éponges encore incandescentes³⁸.

L'explication de cette phase s'avère particulièrement laborieuse; encore dans un passé récent le soudage par forgeage restait un procédé empirique; l'ensemble des données recueillies ne permet qu'une certitude, le recours à des températures élevées...: car au-dessous de 1000° un acier avec 0,25% de carbone n'est plus forgeable – cette température est de 850° pour un acier à 1,5% de carbone –, et ce n'est qu'à partir de 1300° que le fer prend la couleur dite du *blanc soudant*³⁹.

Dans de telles conditions, le facteur temps prenait aussi une importance considérable⁴⁰: en effet, si aux températures inférieures à 750° les vitesses de refroidissement baissent considérablement, pour les valeurs plus élevées les métallurgistes ont renoncé à les reporter sur des courbes (fig. 27).

6. La deuxième cuisson des éponges

A l'encontre des propositions de I. KEESMANN (1985) et de M. BARTUSKA et R. PLEINER (1968), l'existence d'un deuxième traitement thermique de l'éponge à peine libérée de ses scories, exécuté sur le site de l'extraction, reste difficile à prouver, même s'il fait peu de doutes. Comme nous l'avons vu, les fours groupés mis au jour à Bellaires (supra p. 20) permettent de proposer une deuxième opération, mais le fait que l'installation n'ait pu être formellement interprétée rend hasardeuse la description de cette partie du cycle: les éponges pouvaient-elles être recuites dans le même foyer? subissaient-elles un traitement intermédiaire avant de supporter une nouvelle cuisson?

7. La fabrication des loupes

En la réchauffant à nouveau dans un *bas-foyer* on pouvait naturellement faire subir à l'éponge plusieurs martelages pour éliminer les scories qui «*suintaient à la surface de la masse ferreuse*»⁴¹. Ce traitement, qui conduisait à la formation de la loupe, aurait pu se dérouler sur les sites d'utilisation⁴².

La mise en forme d'une loupe de bonnes dimensions à partir de l'éponge, puis la fabrication d'un lingot, pouvaient se faire par plusieurs frappeurs travaillant en même temps. R. THOUVENIN (1984, p. 369) propose de don-

³⁷ Pour P. ANDRIEUX (communication orale) l'éponge pouvait être jetée, encore rouge, dans un bain d'eau qui aurait provoqué l'éclatement des inclusions de scories.

³⁸ «*Dennoch können die chemischen und physikalischen Bedingungen der vorliegenden Schlacke in Verbund mit einer zusätzlichen mechanischen Bearbeitung des eingebrachten Fremdmetalls (...) beigetragen haben. Mechanische Verformung des Metallteiles ist aus der Orientierung der Einschlüsse wahrscheinlich.*»

³⁹ Ainsi peut-on lire dans un ouvrage du début du siècle: «*... les fers (...) se soudent parfaitement et les deux parties réunies peuvent être considérées comme faisant un tout parfait (...). Le bon fer se chauffe au blanc éclatant appelé blanc soudant et variant de 1300 à 1600°...*» (G. MARIN-DARBEL, 1923, p. 207).

⁴⁰ Des sources médiévales pourraient d'ailleurs confirmer l'existence d'une opération de longue durée, ainsi la légende nordique citée par E. SALIN (1957, p. 275, n° 250): «*Wieland se rendit alors à sa forge, se mit au travail et fit en sept jours une épée.*» (Thidreks-saga, 103). Ce texte du milieu du 13e s. aurait ses origines à la fin de l'Antiquité; le récit laisse clairement entendre qu'il s'agit de la fabrication complète de l'arme à partir de petits fragments de fer, mais rien n'exclut, par exemple, un minutieux travail de damasquinerie!

⁴¹ Pour R. THOUVENIN (1984, p. 368), un martelage entrepris à ce stade aurait présenté le risque de repousser ces éléments à l'intérieur du métal et le recours à un maillet en bois aurait donc été préférable.

⁴² L'observation méticuleuse des scories – macroscopique, microscopique, minéralogique et chimique – permettra d'en faire la discrimination: c'est sur cette problématique que sont entre autre centrés les travaux de V. SERNEELS.

ner le nom de *cingleurs* aux ouvriers apprêtant les lingots; cette mise en forme aurait été tout aussi complexe que la production de l'éponge: réduit en fragments plats et allongés, dans certains cas le métal était replié plusieurs fois sur lui-même pour être martelé en une masse de fer plus compacte (J.-R. MARECHAL, 1963, p. 141).

Les pièces bi-pyramidales, mais des formes oblongues sont aussi répertoriées, pouvaient alors être livrées prêtes à l'emploi aux forgerons proprement dits: leur forme s'adapterait particulièrement bien aux opérations de corroyage par lesquelles deux éléments métalliques étaient fixés bout à bout par martelage.

Cette forme géométrique était celle qui répondait le mieux aux opérations successives qu'allait subir le morceau de métal: ainsi, lorsqu'on saisissait l'extrémité mince d'un tel lingot avec une pince, sa masse restait libre et pouvait être placée dans le foyer du forgeron: à l'inverse, un lingot de forme compacte aurait été impossible à saisir.

R. THOUVENIN (1984, p. 368) attribuait à ces opérations de forgeage, bien plus qu'aux facilités de transport⁴³, cette forme particulière des lingots qui, lorsqu'ils furent découverts, présentaient de grandes différences de facture et de poids.

Selon divers chercheurs, plusieurs autres traitements pouvaient intervenir: A. MUTZ (1981, p. 128) propose une opération de débitage en deux parties des loupes qui auraient eu une forme de calotte, les morceaux ainsi obtenus servant à la confection de deux saumons distincts en forme de double-pyramide; H. CLEERE (1976, p. 137) n'exclut pas que les métallurgistes romains aient pu prélever le dessus des loupes pour la fabrication d'outils tranchants, encore que lui aussi ne donne pas de précisions sur la technique à laquelle ils auraient eu recours.

8. Le forgeage

Par forgeage nous entendons la réalisation de l'objet fini, dernière étape du cycle de production: dans l'Antiquité déjà elle pouvait se compléter par la trempe de la pièce ainsi façonnée (infra p. 65).

Le forgeage consiste à donner une forme au morceau de fer par martelage, ce qui en modifie la macrostructure, conditionne la redistribution des fibres et le changement de dimensions des grains. La pièce sera chauffée pour faciliter cette opération, mais devra toutefois rester à une température entre 800 et 1150°, au-dessus de laquelle le produit obtenu entrera dans une phase liquide selon sa teneur en carbone: PLIN L'ANCIEN (34, 149) déjà précisait la couleur que devait avoir le fer chauffé lors du forgeage⁴⁴.

Certes, si cette température correspond à celle où le fer – placé dans une atmosphère particulièrement favorable – absorberait le carbone (0,8 à 2%) nécessaire à la formation de la cémentite (Fe_3C)⁴⁵, il conviendra d'insister sur le fait que l'opération de forgeage reste avant tout physique, et que ce n'est qu'accessoirement qu'elle peut avoir modifié la composition chimique de l'objet façonné.

Les archéologues parlent souvent de scories de forge, mais ce n'est pas seulement l'identification qui en est difficile: la nature même de l'opération qui serait à leur origine reste des plus hypothétiques; nous devrions en effet imaginer qu'avant de façonner l'objet qu'il fabriquait, le forgeron aurait purifié une ultime fois son lingot en le martelant, produisant ainsi des battitures: ces scories réduites en menus morceaux se distingueraient du produit du bas-fourneau mais personne n'a vraiment pu en relater la découverte⁴⁶.

Lors d'une de nos visites au *Musée du fer* à Vallorbe nous avons examiné les diverses chutes et scories résultant de l'action d'un forgeron travaillant un morceau de fer brut:

- dans le foyer, des restes de houille dont l'aspect est le même qu'ils n'aient pas été au contact avec le morceau de fer – préchauffage de l'installation – ou que celui-ci ait été plongé dans le feu;
- dans le foyer toujours, des restes de *mâchefer* extrêmement légers, consécutifs à la fusion

⁴³ En recourant à des essais pratiques apparemment concluants, A. MUTZ (1981) a démontré que les saumons de cette forme pouvaient aisément être paquetés pour le transport.

⁴⁴ « *Quand il est rouge il ne se prête pas à être forgé; il faut attendre qu'il commence à passer au blanc.* »

⁴⁵ C'est ce composant qui permettra la trempe de l'acier pour en améliorer les caractéristiques mécaniques.

⁴⁶ Cette opération nous semble d'ailleurs bien peu plausible, et ce n'est qu'en égard aux nombreuses allusions qui y sont faites que nous l'évoquons ici.



Fig. 28 Croûte de mâchefer de forme concave provenant d'un foyer de forge moderne - Musée du Fer de Vallorbe (Photo IAHA).

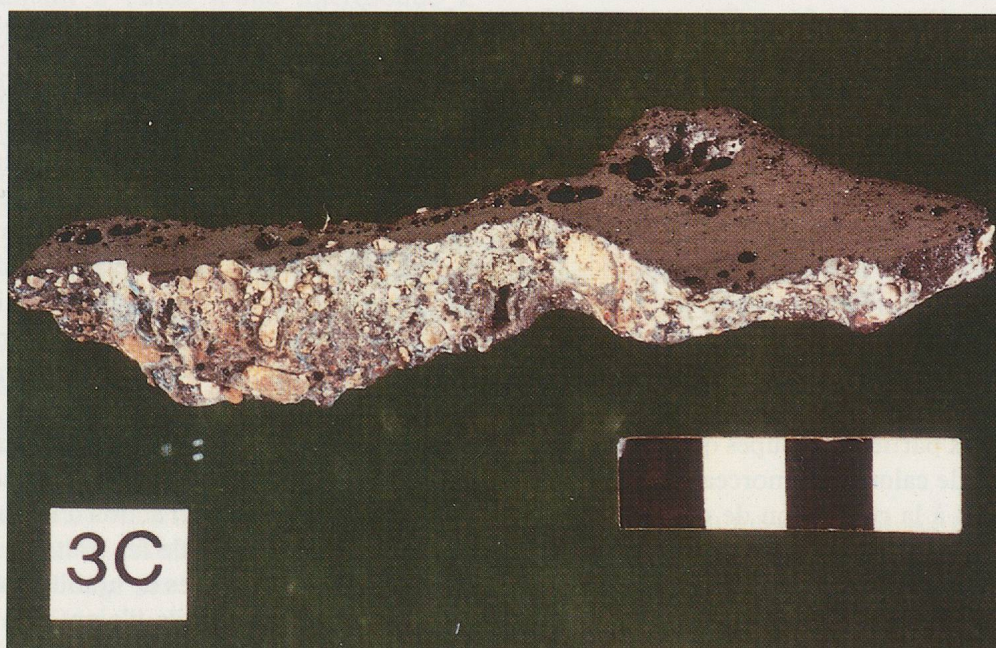


Fig. 29 Scorie concave provenant du bas-fourneau IIb - échantillon n° 3c (Photo IAHA).

et aux réactions chimiques qui se sont produites à la surface du fer;

- autour de la tuyère, une croûte concave de mâchefer (fig. 28) plus lourd que le précédent, mais sans rapport avec les scories antiques de forme approchante il est vrai;
- lors du martelage sur l'enclume se forment de fines lames d'oxyde de fer, appelé *calamine*, épaisses de 1 à 5 dixièmes de millimètre.

Aucun de ces produits ne prête à confusion avec ceux résultant de l'opération sidérurgique; les scories antiques découvertes à l'endroit des ferrières et sur les sites de raffinage ont un aspect tout autre et ne peuvent être attribuées au forgeage même si les installations de traitement du minerai de fer, des éponges ou des loupes font totalement défaut là où elles ont été découvertes: de telles traces étaient bel et bien le résultat d'un deuxième traitement

thermique des éponges à peine ébauchées⁴⁷, et ne correspondaient pas au martelage des lingots pour la confection d'un objet fini. Ces constatations recoupent d'ailleurs les propositions de H. CLEERE (1976, p. 127): «... were major industries producing semi-finished forged iron blooms that there exported for further working.»

Il nous paraît important d'insister sur cet abus de langage: le terme de forgeage ne peut être utilisé pour aucune des opérations d'élaboration de l'éponge ou de la loupe, auraient-elles atteint leur phase ultime.⁴⁸

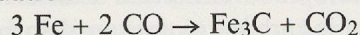
9. Présence d'acier

Tandis que par examen microscopique du grain du métal à partir de sections polies, E. PLOECKINGER et alii. (1964, pp. 38-40) ont démontré la présence d'acier dans des scories, cette même démarche, combinée à des mesures de dureté, permet (O. SCHAABER, 1963) d'en confirmer l'existence dans des outils d'époque romaine: ainsi la pointe d'un ciseau présentait-elle une microdureté de 800 unités Knoop – 1000 unités Vickers – correspondant à un acier contenant 0,45% de carbone.

L'amélioration des propriétés mécaniques très médiocres du fer est étroitement dépendante du dosage du carbone qui permettra l'obtention d'acier. De nos jours, le fer chimiquement pur, qui n'est produit qu'en laboratoire,

est un des éléments constitutifs de l'acier: dans cet alliage, qui à l'origine ne comportait que du fer et du carbone, il joue un rôle de support, les caractéristiques mécaniques des *aciers alliés* étant surtout influencées par des éléments quantitativement mineurs, comme par exemple le nickel et le chrome.

Dans la sidérurgie moderne, l'acier s'obtient par la *décarburation de la fonte*. Le passage du fer en fusion à travers le coke dans la partie inférieure du haut-fourneau, introduit une étape supplémentaire au cycle de production décrit plus haut (supra p. 56), le fer se carburant progressivement par diffusion du carbone selon l'équation



jusqu'à devenir de la fonte dite de première fusion: selon les auteurs consultés, ses teneurs en carbone se situent entre 2,5 et 4,5%. Cette démarche est imposée par la difficulté d'obtenir des températures suffisamment élevées et la fonte ainsi produite devra ensuite être affinée par élimination d'une partie du carbone, cet élément étant ramené entre 0,05 et 1,5%, teneurs caractéristiques de l'acier⁴⁹.

9.1. Propositions concernant la production d'acier dans l'Antiquité

Malgré les nombreuses voies suggérées, la description du processus au cours duquel dans l'Antiquité l'interaction entre le fer et le carbone aurait pu donner naissance à de l'acier reste

⁴⁷ Ainsi les analyses effectuées dans le cadre de nos recherches sur la métallurgie dans le canton de Vaud nous ont permis de démontrer que les scories trouvées sur le site de Lousonna provenaient surtout d'un minerai de la région de Ferreyres (E. ABETEL et V. SERNEELS, 1987, p. 222).

⁴⁸ La présentation des techniques millénaires toujours pratiquées par les artisans japonais – Nancy, juin 1989 – essentiellement pour la fabrication des sabres de samouraïs, a été d'un apport fondamental dans la reconstitution des séquences généralement proposées pour la production des objets en fer antiques.

Ces forgerons travaillent dans un bas-fourneau droit, haut de 1 m20, d'un diamètre intérieur de 30 cm pour un volume inférieur à 0,1 m³, ventilé par 2 tuyères fonctionnant alternativement et situées au niveau du fond du foyer.

1. Le minerai est finement brisé et chargé par couches alternées avec le charbon de bois, des charges additionnelles intervenant au fur et à mesure que le niveau baisse dans le bas-fourneau. Selon l'avancement de cette opération le charbon de bois utilisé aura été plus ou moins carbonisé lors de sa préparation.

Résultat: une éponge peu homogène comportant encore de nombreuses bulles et inclusions. Tous les fragments de fer présents dans les scories obtenues lors du défournement sont récupérés par concassage: l'artisan leur portera un intérêt constant, car ils présentent une plus grande pureté.

2. L'éponge ainsi obtenue est brisée et, tandis que les fragments de fortes dimensions seront traités au cours de l'opération suivante (3.), les petits morceaux sont placés sur du charbon de bois dans le foyer de la forge, ventilé par un soufflet manuel actionnant une tuyère unique, mélangés à ceux provenant des scories; ils seront portés à la température du blanc soudant et réunis en un seul bloc: le marteau n'est pas utilisé pour cette opération de raffinage.

Résultat: une loupe plus homogène que l'éponge.

3. Le divers produits de l'opération sidérurgique, qu'il s'agisse de morceaux de grosses dimensions extraits de l'éponge (1.), ou de la réunion des petits fragments par leur passage dans le foyer de forge (2.), sont rassemblés de façon à ce qu'ils s'imbriquent à la manière d'un puzzle en trois dimensions, formant une masse dont les interstices entre les gros morceaux seraient comblés par des petits fragments aux formes mieux appropriées.

L'ensemble, enduit d'un mélange humide d'argile et de paille brûlée et entouré par une bande de gaze, est déposé délicatement sur une spatule – produit d'un cycle métallurgique antérieur identique à celui-ci –; il est porté jusqu'à la couleur du blanc soudant et martelé en une masse homogène dont la spatule fera partie intégrante.

Résultat: une bande de fer d'un poids d'environ 500 g.

4. Le «saumon» ainsi obtenu est débité en fines lames de 2 cm par 5 cm qui seront ensuite placées sur la partie restante de la spatule par couches successives, chaque niveau formant un angle de près de 90° avec le précédent: cette alternance donnera une plus grande homogénéité au métal, formant en outre un empilement stable. Le tout, enduit comme précédemment du mélange d'argile et de paille, est chauffé puis soudé par martelage au blanc. Maintenu au blanc soudant, la bande de fer sera repliée sur elle-même et martelée de façon à en accroître encore l'homogénéité.

Résultat: un «saumon» prêt à être transformé en outil.

Nous remercions Monsieur Dominique BONNEAU, forgeron au Musée du fer de Vallorbe, de nous avoir commenté l'expérimentation à laquelle il avait participé à Nancy, ainsi que de la relecture qu'il a bien voulu faire de ce passage.

⁴⁹ Formellement, ce n'est donc que lorsque le produit fini contient moins de 0,05% de carbone que l'on parle de fer.

encore des plus aléatoires; si, pour H. CLEERE (1976, p. 137), le fer courait le risque d'être excessivement carburé au contact du charbon de bois, l'excédent de carbone pouvait encore être brûlé au cours de sa lente descente dans le bas-fourneau par l'oxygène insufflé dans les tuyères: à l'inverse, dans certaines situations ce même combustible aurait contribué à protéger le fer d'une oxydation excessive en conservant une valeur acceptable à la carburation superficielle.

L'évolution de ce phénomène dépendra de la durée de la chauffe et de sa température, ainsi que du type de minerai et des conditions de ventilation: une ventilation excessive aurait pu oxyder le carbone avant son absorption par le fer, ce qu'éviterait un soufflage ne pénétrant pas jusqu'au cœur du bas-fourneau; si l'acier ainsi créé s'était enfin refroidi en atmosphère oxydante, le carbone se serait échappé, ne laissant plus que du fer.

Dans l'Antiquité, l'obtention d'acier par *méthode directe*⁵⁰, occasionnellement au moins, ne devrait pas nous surprendre: les teneurs entre 0,05 et 1,5% de carbone qui le caractérisent seraient le fruit de dosages somme toute empiriques des matériaux en présence⁵¹, la seule condition étant le maintien d'une atmosphère réductrice à une température assez élevée durant un laps de temps suffisant pour que le carbone gazeux diffuse dans le fer.

Un autre procédé connu dans l'Antiquité serait comparable à la technique moderne de la *cémentation*⁵²: le fer, était chauffé en présence de carbone – du charbon de bois principalement, J. RAMIN (1977, p. 164) mentionne aussi la corne et l'os... – qu'il absorbait devenant progressivement de l'acier.

Le dosage du carbone dans le fer pourrait aussi avoir été obtenu par l'*action successive du chauffage et du martelage*; pour que le carbone agisse en profondeur, cette opération devait être renouvelée plusieurs fois, mais ne donnerait toutefois de l'acier que dans des conditions d'élaboration tout à fait particulières⁵³.

Selon A. HAUPTMANN (1986, pp. 10-11), des expériences récentes auraient montré que des températures de 1500° pouvaient être atteintes sans difficultés dans des foyers de type antique: le fait serait confirmé par des mesures

faites en Tanzanie dans les bas-fourneaux activés par des souffleries manuelles des peuplades Haya⁵⁴.

Contrairement à l'opinion généralement répandue, un soin particulier apporté aux divers facteurs régissant l'opération métallurgique aurait-il donc permis une véritable coulée? Divers éléments peuvent tout au moins être mentionnés, qui auraient amélioré les conditions de déroulement de la fusion: qu'il s'agisse du choix du minerai, de sa préparation, de la présence de buses qui auraient, qui sait, permis d'insuffler de l'air à un endroit précis du foyer, du régime de fonctionnement du bas-fourneau, de la durée de l'opération et de la température atteinte, E. PLOECKINGER et alii. (1964, p. 36) insistent enfin sur le choix précis du moment où l'artisan, fort de son expérience, aurait sorti l'éponge du foyer.

Pour H. STRAUBE (1986, p. 21), l'exploitation optimale de ces divers éléments a été trop souvent négligée, les chercheurs expliquant l'obtention d'acier dans l'Antiquité, principalement par carburation au cours de la descente du fer dans la cuve, puis lors du martelage successif. Or, par la possibilité de produire des fusions répétées jusqu'à l'obtention d'une teneur en carbone convenable, l'acier aurait été directement produit dans les bas-fourneaux⁵⁵; l'examen microscopique (ibid. p. 25) qui a permis de déceler la présence de lédéburite (4,3% C), confirme que la phase liquide aurait été atteinte lors de l'opération sidérurgique (ibid. p. 24 et fig. 5). H. VETTERS (1967, p. 182) proposait d'y voir une allusion déjà dans les

⁵⁰ P.-L. PELET (à paraître) décrit fort bien les possibilités d'obtenir de l'acier directement dans le bas-fourneau en exploitant sa forme allongée, comme dans le cas de notre structure I.

⁵¹ Ainsi le procédé *Martin* pour la fabrication de l'acier est-il basé sur le mélange de fonte à 3,5% de carbone avec des *riblons*, dont la teneur est d'environ 0,1% C, et qui ne sont rien d'autre que des déchets de fer ou d'acier doux, chutes de cisaille ou de poinçonneuse, copeaux de tournage, etc. Dans ce cas, le procédé est loin d'avoir la rigueur d'une équation chimique...

⁵² Dans la métallurgie moderne la cémentation n'est qu'un traitement *chimique* d'appoint destiné à la fabrication d'aciers aux caractéristiques spéciales; les procédés actuels de cémentation consistent à mettre la pièce à traiter dans une caisse contenant essentiellement du charbon de bois, et placée sur la sole d'un four chauffé à la température de 900°. Mais la décarburation de la fonte reste bel et bien la principale manière de produire de l'acier.

⁵³ R.J. FORBES (1950, p. 398) estimait que ce résultat dut être obtenu bien involontairement: «*This carburizing was probably not achieved intentionally but simply by the repeated heating of the wrought iron bar in charcoal between the hammerings.*»

⁵⁴ Encore, pour que la comparaison soit valable avec nos régions, faudrait-il s'assurer de la hauteur de ces structures qui en Afrique peuvent aller jusqu'à 4 et 5 m (entretien avec P.-L. PELET du 31 janvier 1991).

⁵⁵ La succession de deux étapes distinctes, la réduction dans le bas-fourneau et le raffinage dans le bas-foyer, est ici ignorée.

Météorologiques d'ARISTOTE (4, 6)⁵⁶. De la même manière, la possibilité de porter le fer à l'état liquide aurait pu être déduite de l'Histoire Naturelle de PLINE L'ANCIEN (34, 146): «*Dans la fusion du minerai le fer devient liquide comme de l'eau, puis «en se solidifiant» il se brise en masses spongieuses*»⁵⁷.

De l'acier pourrait avoir été produit en Bohême, hors des limites de l'Empire (H. CLEERE, 1976, p. 138): de nombreuses trouvailles provenant du monde romain faites dans cette région confirmeraient d'étroits rapports économiques liés à l'exportation de ce produit.

Exempts de phosphore, d'arsenic et de soufre, les minerais manganifères du Norique peuvent avoir permis eux aussi la fabrication de l'acier, auquel les Romains auraient donné le nom de fer du Norique (H. VETTERS 1967, p. 185).

9.2. La trempe

On dut bien vite s'apercevoir que la trempe des outils et le recuit successif en amélioraient les propriétés mécaniques (Odyssée 9, vers 391)⁵⁸. La trempe consiste à chauffer l'acier⁵⁹ jusqu'à une couleur déterminée pour le refroidir ensuite brusquement dans un liquide approprié; non seulement PLINE L'ANCIEN indiquait des eaux convenant plus particulièrement à ce type d'opération⁶⁰, mais il connaissait aussi l'existence de la trempe à l'huile (34, 146): «*On a l'habitude d'éteindre dans de l'huile les outils en fer d'assez petite taille, pour éviter que l'action de l'eau ne les rende durs et cassants.*»

Si on se contente de le laisser refroidir lentement, l'acier perd sa couche de cémentite pour laisser la place à une structure fer-graphite, stable à la température normale; mais par trempe dans l'eau ou dans l'huile la cémentite du métal chauffé à blanc sera fixée avant d'avoir atteint le stade de désintégration⁶¹.

Simplement trempé, l'acier, plus dur et qui a perdu sa malléabilité, est toutefois cassant: il s'agit encore de le recuire à une température inférieure à la précédente jusqu'à ce que, sur la surface du métal préalablement polie, apparaisse la couleur correspondant à la température désirée⁶²; on le laissera ensuite refroidir lentement, produisant ainsi une réduction du

grain métallographique; cette opération confèrera à l'acier une certaine souplesse qui le rendra moins brisant.

9.3. Les éléments d'alliage

L'apport d'éléments d'alliage est une technique moderne que les métallurgistes antiques auraient difficilement pu maîtriser⁶³. Cette démarche n'est pas possible par la simple adjonction d'éléments chimiques à l'état pur dans la cuve contenant le fer en fusion: non seulement des proportions précises doivent être respectées, mais même si le point de liquéfaction de l'alliage à réaliser était inférieur à celui du fer, il en restait très proche⁶⁴ et cette température n'était que difficilement atteinte.

Indirectement, les Romains perçurent pourtant l'importance de ces éléments additionnels; ainsi lorsqu'ils donnaient leur préférence au fer du Norique, auquel sa forte teneur en manganèse conférait des caractéristiques mécaniques particulièrement favorables: dans ce cas l'élément d'alliage se trouvait déjà dans le

⁵⁶ «... le fer qu'on travaille fond même jusqu'à devenir liquide et se solidifier à nouveau. C'est ainsi que l'on fait l'acier.»

⁵⁷ «*Mirumque, cum excoquatur uena, aquae modo liquari ferrum, postea in spongeas frangi.*»

⁵⁸ Dans sa traduction (note p. 45), V. BERARD considérait toutefois ce passage (vv. 391-394) comme un «*embellissement de date récente.*»

⁵⁹ La présence du carbone est indispensable pour réaliser la trempe et l'outil devra présenter les teneurs caractéristiques de l'acier: le fer ne se trempe pas dans la mesure où son extrême pureté le différencie précisément de l'acier.

⁶⁰ (34, 144): «*Mais la différence capitale provient de l'eau dans laquelle on plonge à plusieurs reprises le fer incandescent. Cette eau, dont la qualité varie suivant les lieux...*»

⁶¹ La vitesse de refroidissement devient alors plus grande que celle de transformation des macles, et interrompt le cours des phénomènes tel qu'il se serait déroulé lors d'un retour lent à la température ambiante.

⁶² Le terme consacré pour cette opération est celui de *revenu*.

⁶³ A titre d'exemple, citons le laiton dans la catégorie des métaux non-ferreux: existant déjà dans l'Antiquité, cet alliage avait même dans certains cas des caractéristiques identiques à celles des laitons industriels modernes (D. PAUNIER et S. AMSTAD, 1984, p. 12). Le zinc – un de ses deux composants – était inconnu à l'époque et ne put donc être exploité qu'indirectement: il était en effet présent avec le cuivre dans un mélange naturel ayant les caractéristiques d'un véritable minerai aux yeux des anciens (PLINE L'ANCIEN 34, 29, 1); le laiton pourrait aussi avoir été obtenu en fondant le cuivre en présence d'un oxyde de zinc (J. RAMIN, 1977, pp. 182-185).

⁶⁴ La température de fusion de l'alliage n'est fortement abaissée que lorsque l'élément additionnel augmente de façon notable: ainsi, le point de fusion le plus bas, *point eutectique*, de l'alliage fer-carbure (Fe₃C) descend certes à 1143°, mais dans ce cas la solution présente 4,3% de C, nous sommes en présence d'une *fonte blanche*.

fer indépendamment de tout traitement métallurgique⁶⁵.

J.-R. MARECHAL (1963, p. 137) pense même qu'en utilisant de la tourbe comme combustible, celle-ci contenant de l'azote, les artisans de la fin de l'Antiquité auraient procédé à une forme de nitruration, destinant les fers ainsi obtenus et aux caractéristiques mécaniques plus favorables, à la fabrication de socs de charrues, de forces, de têtes de marteaux et d'épées (ibid. p. 142); de nos jours, les aciers sont traités selon ce même principe, mais en les plaçant sous une atmosphère gazeuse.

10. Existence de traitements différenciés

Selon J. RAMIN (1977, p. 164), malgré l'incertitude de tels procédés, dans certains cas les artisans antiques auraient réussi à produire non seulement des aciers *durs* ou *doux*, mais même un métal dont l'«âme» n'était pas cassante et le tranchant dur, pour que l'arme ou l'outil soit efficace: ces objets auraient été réa-

lisés en acier doux, la partie à durcir étant ensuite carbonatée.

Par examen métallographique et mesure consécutive des duretés d'objets remontant au 1^{er} s. de notre ère trouvés sur le site du Magdalensberg, O. SCHAABER (1963) a repéré plusieurs cas de traitements métallurgiques différenciés, ainsi pour des tranchants de couteaux: une opération de trempe ou de cémentation pouvait en effet susciter des variations technologiques de cet ordre (ibid. p. 199).

Dans d'autres cas (ibid. p. 196), c'est une différence dans la concentration des inclusions présentes dans le métal qui distinguait le tranchant du corps de la lame; citant ce même auteur, H. VETTERS (1967, p. 174) donnait ainsi pour acquise l'existence d'outils dont la pointe ou le tranchant étaient soudés dans le corps fait d'un fer plus tendre. Avec prudence O. SCHAABER (1963, p. 201) laissait cependant la réponse définitive en suspens: «*Wie bereits hingewiesen, kann heute noch nicht mit Sicherheit entschieden werden, ob die Schneiden durch partielle Aufkohlung oder durch Anstählen hergestellt worden sind*»⁶⁶.

⁶⁵ Encore de nos jours le manganèse compte parmi les éléments d'alliage utilisés pour la fabrication des aciers spéciaux: d'après la norme DIN 17200, allié au silicium et au carbone, il intervient dans des proportions de 0,8 à 1,4% dans la fabrication des aciers améliorés; l'acier au manganèse, souvent dit «indéformable», en contient de 1,5 à 2%. Il est utilisé pour les aciers à outils (1% C et 1,5 à 2% Mn) et pour les aciers devant résister à l'usure et aux chocs (1 à 1,5% C et 12 à 14% Mn).

⁶⁶ E. SALIN (1957, p. 27) fournit plusieurs exemples de francisques remontant au 5^e s. dans lesquelles le tranchant était rapporté selon le procédé dit de la «gueule de loup».