

Sommaire

Préface (M. Py)	v
V. Serneels <i>La chaîne opératoire de la sidérurgie ancienne</i>	7-44
C. Rovira <i>Les premiers objets de fer en Catalogne (VIIe-VIe s. av. n. ère)</i>	45-55
Th. Janin, N. Chardenon <i>Les premiers objets en fer en Languedoc occidental et en Roussillon (VIIIe-VIe s. av. n. ère) : types, chronologie, origine</i>	56-64
C. Rovira <i>Le travail du fer en Catalogne du VIIe au Ier s. av. n. ère</i>	65-75
Ch. Olive, D. Ugolini <i>Le travail du fer à Béziers (Hérault) pendant l'Age du Fer</i>	76-79
D. Lebeaupin <i>Ateliers de forgerons et témoins dispersés du travail du fer à Lattes (Hérault) (IVe s. av. -Ier s. ap. J.-C.)</i>	80-95
M. Rétif <i>Indices de métallurgie protohistorique du fer à Martigues (B.-du-Rh.)</i>	96-109
Th. Martin, H. Ruffat <i>Un dépôt de lingots de fer du début de La Tène III à Montans (Tarn)</i>	110-115
B. et P. Pauc <i>Quelques sites de réduction du minerai de fer dans les Corbières (Aude)</i>	116-128
M. Passelac, contrib. de L. Chabal et J.-C. Leblanc <i>Installations pour le travail du fer dans le vicus Eburomagus (Bram, Aude)</i>	129-141
J.-Cl. Bessac, R. Bonnaud <i>Sidérurgie antique dans le Bois des Lens (Gard)</i>	142-149
O. Ginouvez, L. Vidal <i>La forge antique de St-Jean d'Aureilhan à Béziers (Hérault)</i>	150-152
L. Vidal <i>Un dépotoir de rejets de forge à Nîmes (Gard), rue Condé</i>	153-154
Cl. Raynaud <i>L'activité métallurgique à Lunel-Viel (Hérault) du Ier au XIe siècle</i>	155-165
Ch. Pellecuer, contrib. de M. Feugère <i>Le travail du fer dans la villa des Près-Bas à Loupian (Hérault)</i>	166-174
L. Buffat, H. Petitot <i>Une activité métallurgique tardo-antique sur l'établissement de Mayran (Saint-Victor-La-Coste, Gard)</i>	175-180
O. Ginouvez, H. Pomarèdes, M. Feugère <i>Le travail du fer sur la villa de la Domergue à Sauvian (Hérault)</i>	181-185
J. Kotarba, J.-Cl. Leblanc <i>L'habitat et l'atelier métallurgique du site des Coudoumines III à Caramany (Pyrénées- Orientales)</i>	186-209
O. Maufras, L. Fabre, coll. de G. Colomer et Z. Sekraoui <i>Une forge tardive (fin IVe - Ve s.) sur le site de La Ramière (Roquemaure, Gard)</i>	210-221
J.-Ma. Pérez-Suñé, V. Revilla Calvo, J. Gómez Sánchez, J. Simón Arias, M. Marsal Astort, F. Plana Llevat <i>Función de la siderurgia en la Cataluña romana</i>	222-250
Conclusion M. Feugère, V. Serneels <i>Production, commerce et utilisation du fer entre l'Ebre et le Rhône : premiers éléments de réflexion</i>	251-262

La chaîne opératoire de la sidérurgie ancienne

V. Serneels*

Introduction : l'homme et le fer

Depuis la fin du Néolithique et surtout au cours de l'Age du Bronze, l'homme a progressivement maîtrisé les techniques de production et d'élaboration de plusieurs métaux : le cuivre et ses alliages, l'or et l'argent. L'étain et le plomb sont principalement utilisés comme éléments d'alliage (Tylecote 1987).

La découverte, puis la généralisation de l'utilisation d'un nouveau métal, le fer, est un événement de portée historique majeure. Le fer, en raison de ses propriétés physiques, est particulièrement bien adapté à la fabrication des outils agricoles et artisanaux ainsi que des armes. Il favorise donc la productivité et confère aussi une efficacité accrue aux armées. Pour cette raison, le fer jouera, rapidement et pour longtemps, un rôle important tant sur le plan économique que militaire (Rostoker et Bronson 1990).

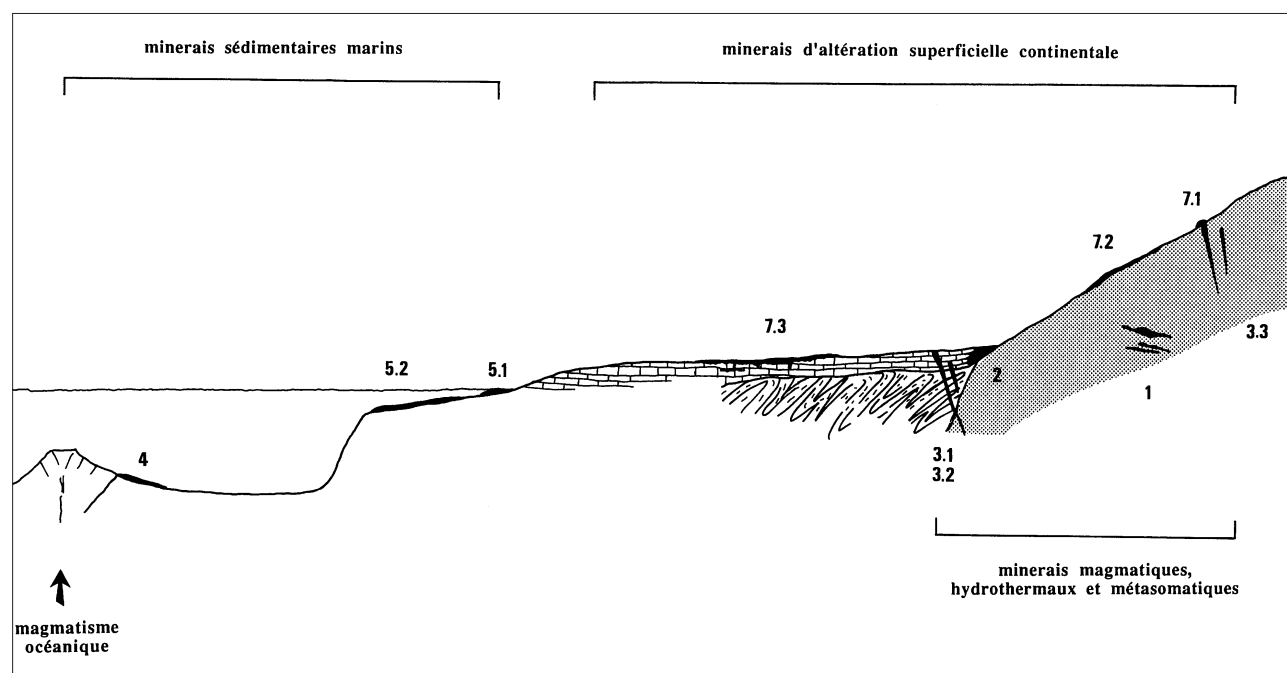
Lorsque le fer apparaît dans une aire géographique donnée, il est en général réservé à des usages de prestige et à des objets précieux. C'est dans un second temps seulement que se généralisent les armes et les outils. Cette diffusion du métal est sans doute le reflet d'une maîtrise accrue des techniques de production et de transformation. Enfin, certaines sociétés ont été capables de produire du fer sur une très grande échelle et donc de l'utiliser pour les usages les plus variés, en particulier dans le domaine de la construction domestique et monumentale ainsi que pour les transports. L'introduction de quelques objets prestigieux ne constitue pas un changement majeur mais la généralisation de l'utilisation du fer modifie profondément le contexte socio-économique général. En plus de cette incidence sur la vie quotidienne, la grande disponi-

bilité des minerais de fer par rapport aux autres métaux, modifie la carte des échanges.

On situe généralement l'origine de la métallurgie du fer en Anatolie où l'on trouve de rares objets en fer produits à partir de minerais dans des contextes datant de la fin du III^e millénaire avant JC (Waldbaum 1980). Il faut attendre les derniers siècles du II^e millénaire avant JC pour voir le nouveau métal prendre une place importante dans l'ensemble du Proche-Orient et atteindre la Grèce. A cette période seuls de rares objets parviennent en Europe centrale. Ensuite, le fer gagne les Balkans et les côtes de la Méditerranée occidentale. Au Nord des Alpes, vers 800 avant J.-C., les objets en fer ne sont plus totalement isolés. L'emploi de ce métal ne se généralise en Europe occidentale qu'au cours des siècles suivants (Pleiner 1980).

En Europe occidentale, au cours du Moyen Age, la production du fer va connaître une mutation essentielle. Alors que pendant plus d'un millénaire, du fer ou de l'acier relativement pauvre en carbone a été produit à l'état solide, une nouvelle technique va se développer. Le haut fourneau travaille à des températures plus élevées et pendant des durées plus longues permettant de produire à l'état liquide un alliage riche en carbone, la fonte. Ce produit doit ensuite être décarburé par affinage pour obtenir un métal forgeable. Cette profonde modification technique s'accompagne d'une augmentation considérable du volume de la production et d'une diversification des produits. Parallèlement, les investissements plus importants et le recours systématique à l'énergie hydraulique lient plus étroitement qu'auparavant l'industrie sidérurgique aux financiers et aux propriétaires. Cette nouvelle méthode permet aussi de traiter avec succès des minerais relativement pauvres.

* Centre d'Analyse Minérale, Université de Lausanne.



Type	Remarque	Exemple classique
1	Magmatiques	lentilles de magnétite / ilménite associées aux magmas basiques
2	Métasomatiques de contact	masses de magnétite ± hématite associées aux pegmatites
3.1	Hydrothermaux	filons à sidérite
3.2		filons à hématite
3.3		filons à sulfures
4	Volcano-sédimentaires ophéolitiques	hématite, etc stratifiée associée aux gabbros
5.1	Sédimentaires marins	oolithes ferrugineuses
5.2		placiers marins de magnétite
6	Sédimentaires continentaux	massifs et tourbières
7.1	Altération superficielle continentale	chaussées de fer sur filons sulfatés
7.2		lentilles par roches basiques
7.3		lentilles sur roches sédimentaires et karst
8	Métamorphiques réchauffées	stratifiés profondément
9	Impluviaux	processus complexes
10	Météorites	fer natif et météorite

Fig. 1 — a) Schéma métallogénique des principaux types de minerais de fer. b) Classification des minerais de fer, minéraux et gisement type (Zitzmann 1977).

Ce n'est qu'avec le XVI^e siècle que viendra la généralisation du haut fourneau et en bien des régions la vieille méthode perdurera longtemps encore. Les XVII^e et XVIII^e siècles voient s'accomplir des perfectionnements importants dans le travail du métal avec la mécanisation de certaines opérations : fenderie, laminoir, tréfilerie et plus tard l'introduction du four à puddler permettant de produire de l'acier en grandes quantités. A la même période, l'introduction du coke comme combustible apporte une solution au manque de combustible végétal devenu chronique dans certaines régions. Enfin, de nombreux perfectionnements sont apportés au cours des XIX^e et XX^e siècles avec en particulier la découverte du convertisseur pour transformer la fonte en acier à l'état liquide et le développement des aciers spéciaux.

Dans les autres régions du monde, les Amériques, l'Afrique, les différentes parties de l'Asie, l'histoire du fer est bien différente mais souvent tout aussi complexe.

1 Le matériau

1.1 Le fer dans la nature

Le fer est un des éléments chimiques les plus abondants dans les minéraux de la croûte terrestre (7%, soit environ 10.000 fois plus que le cuivre). Les roches qui contiennent des minéraux ferri-fères en quantité importante peuvent être considérées comme des minerais si elles sont techniquement et économiquement exploitables.

Cette notion de minerai varie donc au cours du temps en fonction du contexte technique mais aussi économique. La répartition géographique des minerais est inégale mais, en Europe, à quelques exceptions près, dans un rayon de 50 à 100 km autour d'un point quelconque, il existe des ressources potentiellement exploitables à l'échelle de l'industrie ancienne (Zitzmann 1977).

Les minerais qui ont été utilisés par le passé sont fort variés (fig. 1). Les météorites contenant du fer natif et du nickel ont sans doute fourni les tout premiers objets (Craddock 1995, 106-109). De nombreux gisements sont formés par des veines et des filons d'origine hydrothermale. Ils contiennent généralement de l'hématite ou de la sidérite avec une gangue de quartz, de calcite ou de barytine. Dans ces conditions, se forment également des veines ou des amas riches en minéraux sulfurés (pyrite). Si ces matériaux riches en soufre posent des problèmes métallurgiques, par contre, l'altération superficielle par les eaux de pluie provoque la formation d'accumulations de minéraux oxydés, les chapeaux de fer. Les minerais oolithiques sont des sédiments marins de faible profondeur et formés à proximité du continent. Ces gisements sédimentaires possèdent généralement une assez faible teneur mais une grande extension.

En milieu continental, l'altération de surface, en particulier en climat chaud et humide provoque le lessivage des roches et la formation de latérites avec des concrétions pisolithiques d'hématite et de goéthite. Les minerais de fer des tourbières et des marais, nombreux en Europe du Nord, se forment par précipitation du fer dissous dans les eaux d'infiltration. Enfin, la magnétite disséminée dans les roches peut être dégagée par l'érosion et redéposée dans les rivières et en bord de mer (placers).

Tous ces types de minerai ont été exploités par l'homme au cours des périodes anciennes. A chaque fois, il a fallu élaborer des techniques spécifiques, tenant compte des ressources et des savoir-faire locaux pour extraire et préparer le minerai ainsi que pour fabriquer le métal.

1.2 Les métaux ferreux

Les alliages de fer et de carbone sont traditionnellement groupés en trois catégories (De Leiris 1971, Higgins 1993, figs. 2 et 3). Le domaine de composition des alliages entièrement ferritiques, le fer «pur», est très restreint (moins de 0,02 % C). Le point de fusion de ces matériaux est très élevé et la dureté assez faible. Entre 0,02 % et 2 % de carbone, se trouve le domaine des aciers. Les températures de fusion croissent en fonction du pourcentage de carbone. Aux basses températures, l'austénite se décompose en deux phases, la ferrite et la cémentite qui est un carbure de fer (Fe_3C). Ces deux composants peuvent former un agrégat lamellaire eutectoïde, la perlite, contenant 0,8 % de carbone. Au-dessous de cette limite, l'acier sera constitué de perlite et de ferrite (acier hypoeutectoïde), au-delà, de perlite et de cémentite (acier hypereutectoïde). Les aciers présentent une caractéristique très

importante : s'ils subissent un refroidissement rapide, ils peuvent conserver des constituants hors d'équilibre comme la martensite, extrêmement dure. La dureté de l'acier sera donc à la fois fonction de la quantité de carbone présente et des traitements thermiques appliqués au métal. Au-delà de 2 % de carbone, on trouve le domaine des fontes dont le point de fusion minimum se trouve vers 1150°C. Les fontes sont toujours dures et donc cassantes. La présence d'autres éléments, en particulier le phosphore et le soufre, modifie profondément les propriétés de l'alliage et cela de manière très complexe.

Aux périodes anciennes, en Europe, l'homme travaille toute une gamme d'alliages relativement pauvres en carbone mais pouvant contenir des quantités variables d'autres impuretés. Dans certains cas au moins, les propriétés spécifiques de ces matériaux ont été clairement identifiées et mises à profit. L'utilisation de la fonte reste très mal attestée avant le Moyen Âge bien que quelques éléments fassent penser que cet alliage n'est pas totalement inconnu.

2 La chaîne opératoire de la sidérurgie

2.1 Approche technologique

Fondamentalement, toute métallurgie est une transformation de la matière : le minerai, substance naturelle extraite du sol, est transformé, par étapes successives, en un objet en métal fonctionnel (GSAF 1997). La notion de chaîne opératoire métallurgique recouvre les différentes étapes de travail qui seront caractérisées par des modifications de la matière provoquées par des gestes techniques. C'est un modèle général qui admet évidemment d'innombrables adaptations aux différents cas.

On peut distinguer cinq grandes étapes dans la chaîne opératoire sidérurgique (fig. 4). Il faut d'abord extraire le minerai du sous-sol. Ce monde de la mine est très complexe et l'homme a développé un grand nombre de solutions techniques aux problèmes comme l'abattage, l'exhaure et la ventilation. Cependant, lors de l'extraction, les minerais de fer ne posent pas de problème particulier par rapport aux autres minerais métalliques. Au contraire, ils sont souvent relativement meubles et superficiels ce qui rend l'exploitation assez simple (Bailly-Maître 1993, Ford et Willies 1994, Craddock 1995).

Ensuite, le minerai abattu doit être préparé et enrichi. Ce but est atteint, le plus souvent, par une combinaison de traitements mécaniques (tri, concassage et lavage), et thermiques (chauffage). Pour le fer, ces techniques d'enrichissement du minerai sont en général plus simples ou comparables à celles utilisées pour les autres minerais métalliques.

Le concentré obtenu subit le traitement métallurgique proprement dit au cours duquel on provoque une réaction

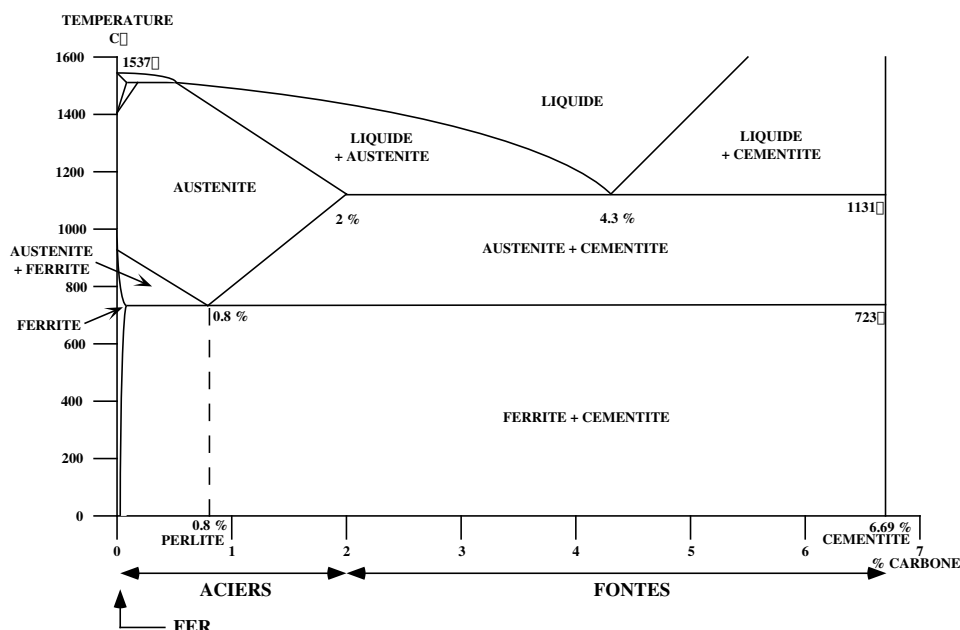


Fig. 2 — Diagramme d'équilibre du système Fe - C. Explications dans le texte.

chimique qui permet au métal de se former. En général, c'est une réaction de réduction. L'opération requiert l'utilisation d'un fourneau et d'un combustible riche en carbone.

Le métal brut ainsi produit est le plus souvent impur. Il faut donc le modifier pour le rendre utilisable. Si l'on a produit un bloc de fer solide, il s'agira principalement d'en chasser les particules non métalliques par martelage. Dans le cas de la production de fonte, il faudra procéder à une décarburation pour fabriquer du fer forgeable.

On procède ensuite au forgeage lui-même. Il permet la mise en forme du métal épuré principalement par déformation plastique à chaud ou à froid. Simultanément, le forgeron modifie dans une certaine mesure les propriétés physiques du métal par des traitements mécaniques et thermiques. Enfin, la plupart des objets en fer complexes demandent des travaux de finition pour devenir fonctionnels. Ceux-ci peuvent porter sur le métal lui-même, polissage et décoration, ou bien sur les parties non métalliques, fixation d'un manche par exemple.

Enfin, au cours de son utilisation, l'objet en fer peut subir de nouvelles opérations métallurgiques en vue de son entretien ou pour le réparer. Le vieux fer peut également être recyclé de différentes manières.

A côté des opérations directement liées à l'obtention des objets en fer, se profile toute une série d'activités complémentaires indispensables à la mise en œuvre de la métallurgie. La principale est sans conteste la fabrication du charbon de bois (Pelet 1983, Duhamel du Monceau 1761).

Les transports jouent un rôle important aussi : les matières premières doivent être amenées sur le lieu de leur traitement et les produits doivent être distribués jusqu'aux consommateurs.

A chaque étape de la chaîne opératoire technique correspondent des matières premières, des installations de traitements, des déchets de production et des produits. Archéologiquement, ceux-ci sont potentiellement identifiables puisqu'ils sont par définition différents à chaque étape. Sur le plan pratique, bien sûr, les distinctions ne sont pas toujours faciles. La conservation des vestiges archéologiques n'est jamais parfaite et certaines différences ne peuvent être mises en évidence qu'en ayant recours à des études de laboratoire approfondies.

2.2 Approche socio-économique

Les vestiges matériels permettent aussi une approche quantitative. D'une manière ou d'une autre, les quantités de déchets sont le reflet de la quantité de matière traitée. Si l'on connaît la technologie, on peut interpréter le volume des déchets en terme de volume d'activité. C'est en particulier vrai pour les vestiges de la réduction du minerai. Pour les déchets produits à la forge et plus encore lors de la finition des objets en fer, les témoins sont nettement moins faciles à appréhender et les méthodes d'étude doivent encore être améliorées.

L'organisation sociale de l'industrie du fer peut être très variée, comme en témoignent les données historiques, ethnographiques et archéologiques. Un large éventail de modèles peut être défini. L'industrie peut être autarcique : au sein d'une communauté restreinte, l'ensemble des membres participent à la fabrication, depuis la matière première naturelle jusqu'aux produits finis qui sont destinés uniquement à leur propre consommation. A l'opposé, chaque étape technique peut être menée à bien par des travailleurs différents, dans des ateliers spécialisés et la production est destinée à un large marché. Des intermédiaires transportent et distribuent matières premières et produits. Une autorité contrôle l'industrie, perçoit éventuellement des taxes et des revenus. Entre ces deux extrêmes prennent place toutes sortes de variantes plus ou moins sophistiquées.

Dans le travail des métaux, certains actes techniques réclament une grande habileté et un savoir-faire particulier. Le plus souvent donc, seuls quelques individus au sein d'un groupe maîtrisent la technique et assurent la production. On peut les appeler des spécialistes. Ceux-ci peuvent être impliqués dans un acte particulier ou maîtriser l'ensemble de la chaîne opératoire. De même, ils peuvent exercer leur art de manière permanente ou seulement

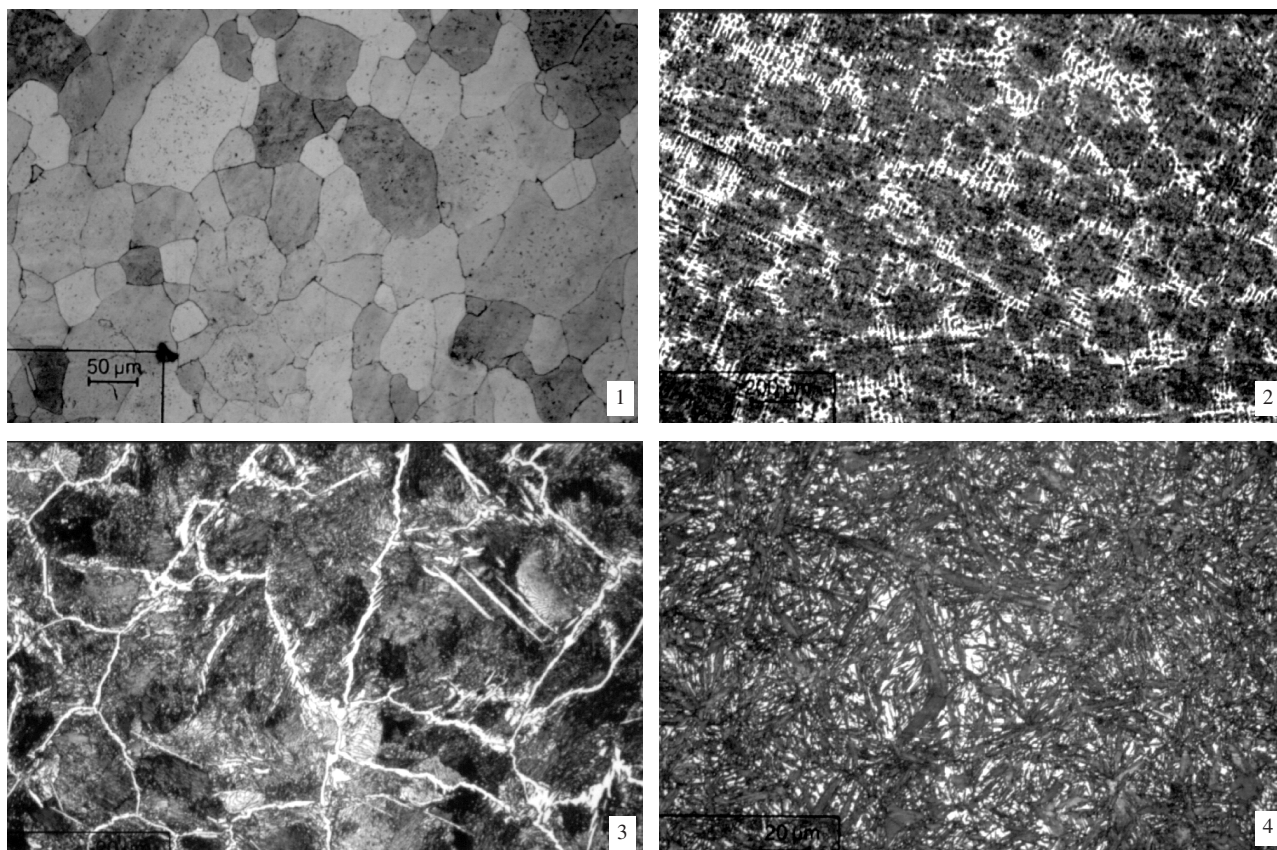


Fig. 3 — Photos de métaux ferreux vus au microscope en lumière réfléchie, après attaque au Nital. - 1. Fer doux pauvre en carbone : ferrite (grains blancs) et inclusions de scorie (sombre). 2. Fonte riche en carbone : perlite et cémentite en agrégats dendritiques et graphite. 3. Acier avec moins de 0,8 % de carbone : perlite (agrégats vermiculaires) et ferrite (aiguilles blanches). 4. Acier trempé : martensite (aiguilles).

comme une activité complémentaire ou saisonnière. Bien des tâches peuvent être réalisées par des travailleurs sans qualification particulière. Par ailleurs, dans certaines sociétés, le niveau technique de la majorité des individus peut être suffisant pour leur permettre d'exécuter des travaux métallurgiques simples.

Certains actes techniques demandent des installations particulières. Il y aura donc des ateliers spécialisés. Les différentes étapes de la chaîne opératoire peuvent être concentrées en un seul lieu ou au contraire réparties dans des ateliers séparés. Par ailleurs, bon nombre d'activités métallurgiques ne demandent que des installations sommaires et peuvent être pratiquées n'importe où. Les lieux de travail peuvent être occupés de manière continue ou intermittente.

L'étude des vestiges métallurgiques permet d'aborder ces questions. En particulier, elle permet de localiser les ateliers et de définir les activités pratiquées en un lieu donné. Dans une certaine mesure, les volumes de déchets informent sur l'importance de l'activité métallurgique.

Malheureusement, les vestiges matériels ne nous parlent que très indirectement des hommes et de leurs statuts mais on ne saurait les oublier pour autant. Derrière les gestes techniques et le savoir-faire, il y a des hommes, artisans et ouvriers, spécialistes hautement qualifiés ou simples hommes de peine. Au-delà des matières premiè-

res, des produits, des installations et parfois même des travailleurs, il y a des propriétaires, des investisseurs et des financiers. Enfin, des autorités sociales, politiques ou militaires contrôlent, encouragent ou modèrent l'industrie.

Pour les périodes anciennes, les sources historiques sont bien indigentes sur ce point quand elles ne sont pas simplement inexistantes. Dans bien des cas, l'étude des vestiges matériels des activités métallurgiques reste donc la seule voie possible.

3 La réduction du minerai

La réduction du minerai est la phase essentielle de la sidérurgie au cours de laquelle on fabrique le métal (Fluzin 1983). La matière première est toujours un minerai ayant subi une transformation préliminaire plus ou moins importante. L'opération permet d'obtenir un produit métallique dont la nature et l'aspect dépendent de la manière dont le travail est accompli. Simultanément, il se forme des déchets caractéristiques de la technique employée.

3.1 La réduction des oxydes de fer

Dans le minerai, le fer se trouve principalement sous forme d'oxydes. Pour obtenir du fer métallique, il faut bri-

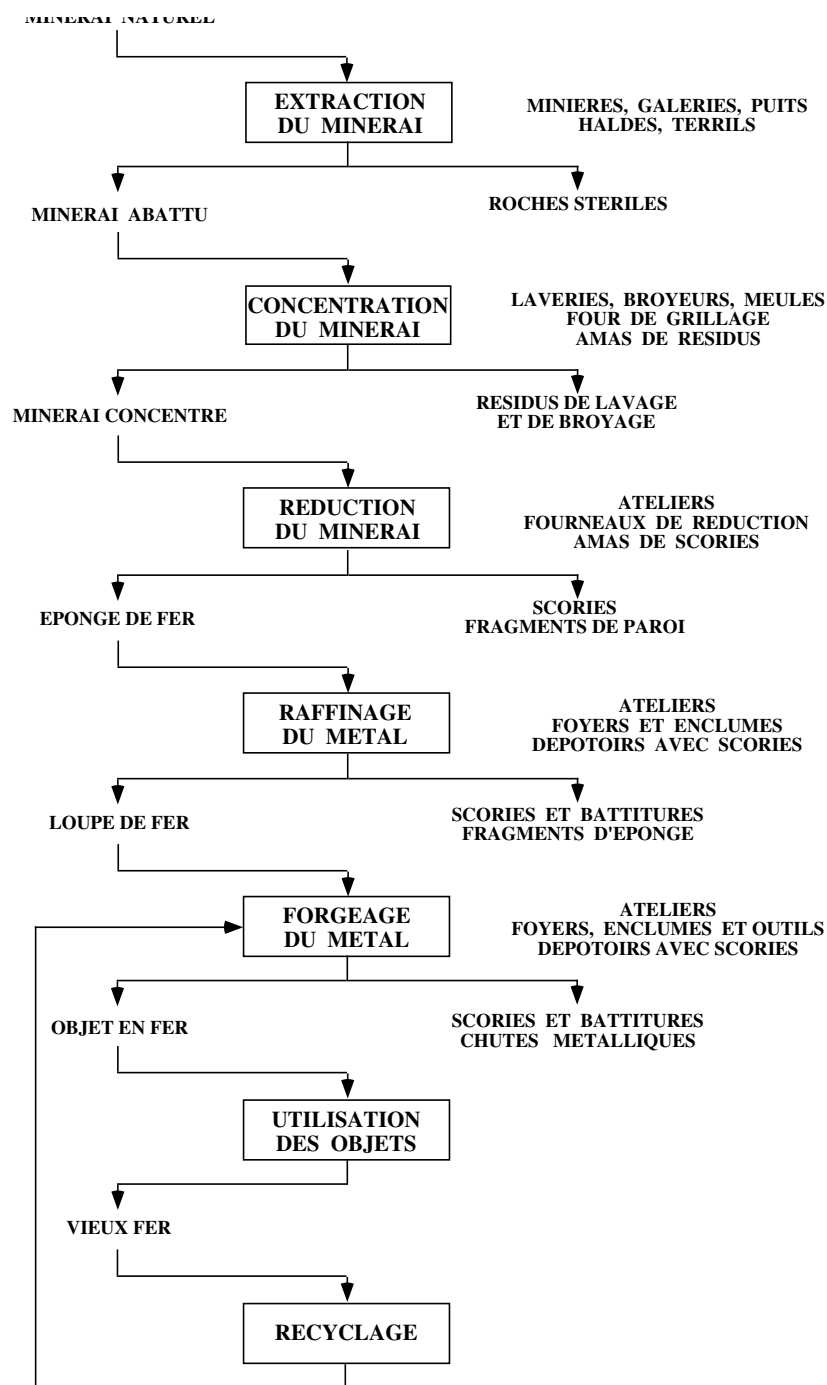


Fig. 4 — Schéma technique de la chaîne opératoire de la sidérurgie (méthode directe de réduction).

re est élevée, que le monoxyde de carbone est abondant et que le temps de contact entre le gaz réducteur et le minerai est long.

La température de réduction est nettement inférieure au point de fusion du fer et c'est donc une réaction qui peut se produire à l'état solide. Celle-ci est progressive. Elle débute à la périphérie des morceaux de minerai et partout où peuvent pénétrer les gaz. Les particules de métal réduit vont lentement croître et entrer en coalescence pour former une structure tridimensionnelle plus ou moins continue.

Cependant, dans le minerai, il y a toujours une certaine proportion de gangue constituée d'autres substances comme la silice (SiO_2), l'alumine (Al_2O_3) et parfois la chaux (CaO). Il faut atteindre des températures supérieures à 1150°C pour provoquer un début de fusion pour un mélange contenant les impuretés de la gangue et une forte proportion d'oxydes de fer. Ce matériau devenu liquide, la scorie, s'écoule par gravité permettant aux particules métalliques de se rassembler plus facilement.

En travaillant plus longtemps et à des températures plus élevées, on provoque une réduction beaucoup plus complète des oxydes de fer ainsi que la diffusion du carbone dans le métal. Dans ces conditions, deux liquides se forment dans le fourneau, une fonte riche en carbone et un laitier, beaucoup plus pauvre en fer que

la scorie. Ils se séparent du fait de la forte différence de densité entre eux.

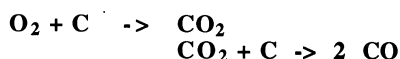
ser les liaisons entre les atomes de fer et d'oxygène. Du point de vue chimique, il se produit une réaction de transfert d'électron que l'on appelle une réduction.

Pour la mettre en œuvre, il faut de l'énergie et un agent réducteur capable de prendre la place du fer pour se combiner avec l'oxygène. Ces deux conditions peuvent être remplies en brûlant du charbon de bois dans un fourneau (fig. 5 et 6). La combustion du charbon dégage du monoxyde de carbone (CO) qui à son tour réagit avec les oxydes de fer (FeO) pour former du fer métallique (Fe) et du gaz carbonique (CO_2). En pratique, cette réaction démarre vers 700°C et devient dominante vers 1000°C . Elle se produit d'autant plus facilement que la température

3.2 Méthodes directe et indirecte de réduction

Il y a donc deux voies principales pour produire des métaux ferreux (fig. 7, 8 et 9). La première permet de fabriquer, à basses températures et avec des temps de réaction relativement courts, des métaux pauvres en carbone formés à l'état solide. La réduction est incomplète et l'on forme une scorie riche en oxydes de fer. La bonne séparation de la scorie est essentielle pour obtenir un produit métallique qui ne soit pas trop difficile à travailler.

Combustion du charbon et formation du monoxyde de carbone :



Réduction des oxydes de fer par le monoxyde de carbone :

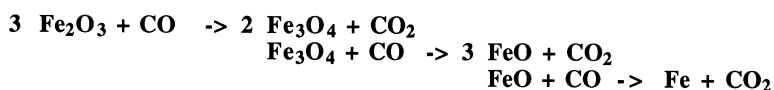


Fig. 5 — Principales réactions chimiques dans le bas fourneau.

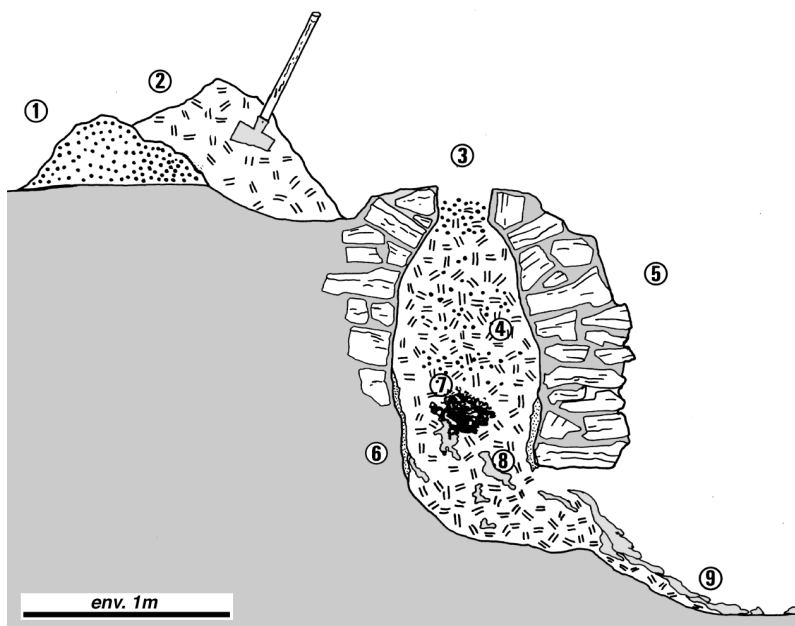


Fig. 6 — Schéma d'un bas fourneau de réduction du minerai de fer. Ce schéma est basé sur les données fournies par les sites du haut Moyen Age dans le Jura suisse (Pelet 1993, Eschenlohr et Serneels 1991).

1. Minerai. 2. Charbon. 3. Gueulard. 4. Cuve remplie de charbon de bois. 5. Manteau externe de la paroi en pierres. 6. Revêtement interne de la paroi en argile très sableuse, subissant localement une fusion partielle. 7. Eponge de fer. 8. Scories internes. 9. Scories coulées externes. La soufflerie n'est pas représentée ici : une tuyère était située dans la paroi latérale du fourneau à environ 40 cm au-dessus du fond de la cuve et une seconde tuyère, probablement amovible, était située plus bas dans la porte frontale. D'autres systèmes de soufflerie sont imaginables.

Méthode	DIRECTE	INDIRECTE
Fourneau	"bas fourneau"	"haut fourneau"
volume	-	+
durée	-	+
température	-	+
Utilisation de fondant	-	+
Produit	"éponge de fer" état solide / pâteux	"gueuse de fonte" état liquide
compacité	-	+
inclusions non métalliques	+	-
teneur en carbone	-	+
teneurs en P, Mn, Si, etc	-	+
traitement	"raffinage"	"affinage"
Déchet	"scorie"	"laitier"
teneur en FeO	+	-
Production	-	+
Investissement	-	+

Fig. 7 — Comparaison entre les méthodes directe et indirecte de réduction du minerai de fer. Les guillemets indiquent que ces termes sont utilisés ici dans un sens restreint qui n'est pas admis par tous les auteurs, voir texte.

C'est la méthode directe de réduction. La seconde voie utilise de plus hautes températures et des durées plus longues. Bien maîtrisée, elle permet une réduction beaucoup plus poussée, ce qui donnera des laitiers pauvres en fer. Le produit métallique est obtenu à l'état liquide, c'est une fonte riche en carbone. C'est la méthode indirecte de réduction. Elle est appelée ainsi parce que la fonte doit être affinée, c'est-à-dire partiellement décarburée, pour être transformée en métal forgeable.

Il semble que la méthode directe fut la seule mise en œuvre en Europe occidentale et dans le bassin méditerranéen jusqu'au Moyen Age. Aucun objet fonctionnel en fonte ne peut être attribué sans ambiguïté à l'une des civilisations de l'Antiquité classique. On connaît par contre des déchets de fonte trouvés sur des ateliers de réduction qui montrent sans doute que de la fonte a pu être produite accidentellement, en particulier pendant le Haut Moyen Age (Pelet 1993, 96-98). Il en va tout autrement en Extrême-Orient où la fonte est produite et utilisée plusieurs siècles avant le début de l'ère chrétienne (Needham 1980, Hua Jue-ming 1993). Il faut souligner que ce n'est pas tant la production de fonte elle-même qui est le changement fondamental mais plutôt la mise au point de procédés permettant l'utilisation judicieuse de cet alliage, c'est-à-dire le moulage et l'affinage.

L'introduction du haut fourneau reste un sujet de discussion. Des sources historiques indiquent le développement d'une métallurgie indirecte vers la fin du XIII^e siècle en Wallonie, en Rhénanie et peut-être en Lombardie. La découverte récente de vestiges de hauts fourneaux des XI^e et XII^e siècles en Suède et en Allemagne rhénane a quelque peu changé la perspective (Magnusson 1988, Knau 1995, Yalçin et Hauptmann 1995).

Le mécanisme qui permet cette innovation n'est pas encore clairement établi. Le développement de l'utilisation de l'énergie hydraulique pour actionner les souffleries permet à celles-ci de devenir plus puissantes. Partant de là, le volume des fourneaux pourra augmenter et des températures supérieures seront atteintes. Cette évolution pourrait ouvrir naturellement la voie à une production plus fréquente de fonte accidentelle. Les efforts des métallurgistes pour utiliser ce nouveau produit ont pu mener à

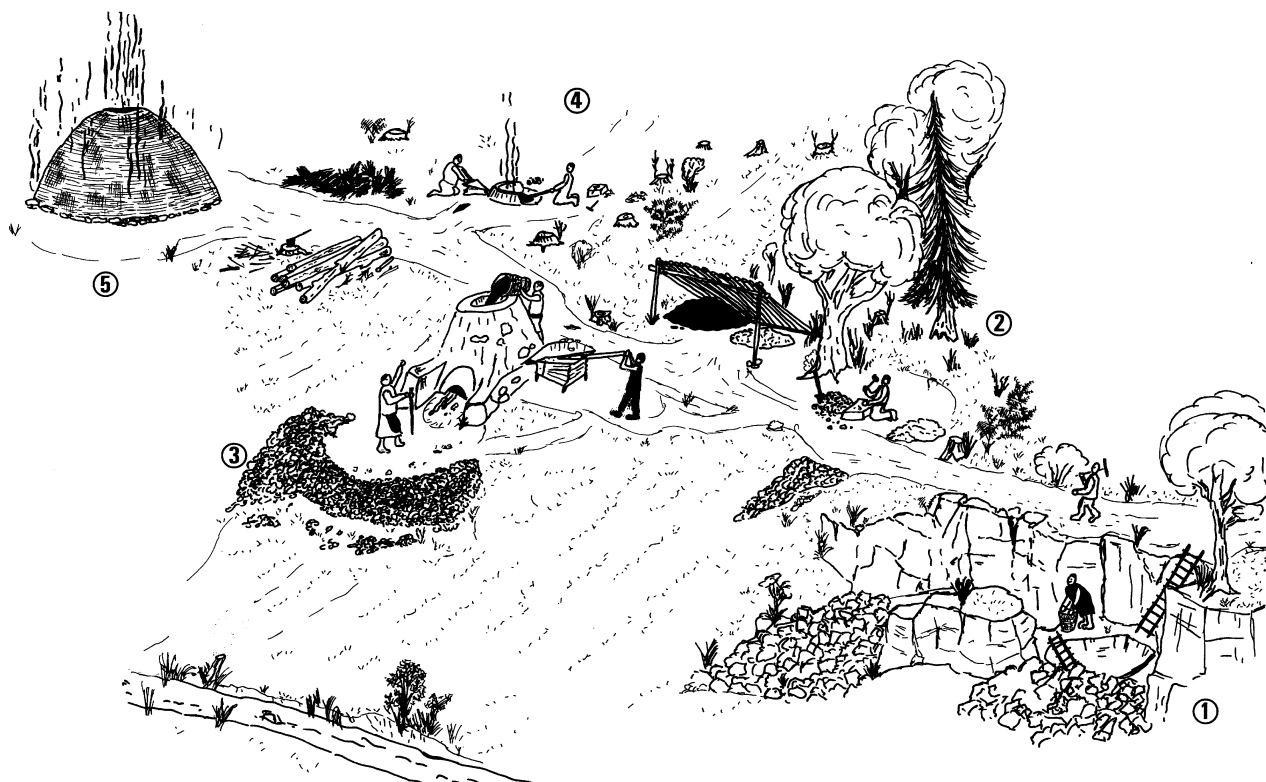


Fig. 8 — Panorama de la chaîne opératoire de la méthode directe de réduction du minerai de fer (bas fourneau). Cette reconstitution graphique est principalement basée sur les données archéologiques fournies par les sites du Haut Moyen Age dans le Jura suisse (Pelet 1993, Eschenlohr et Serneels 1991).

1. Extraction du minerai à ciel ouvert et minières peu profondes. 2. Concassage du minerai et tri. Les minerais argileux sont en général lavés. 3. Réduction du minerai dans un bas fourneau à scories coulées et ventilation artificielle. Les bas fourneaux sont souvent construits sous un abri. 4. Raffinage de l'éponge de fer dans un foyer creusé. Le travail du métal est souvent effectué dans un bâtiment fermé qui n'est pas forcément situé à proximité de l'atelier de réduction. 5. Fabrication du charbon de bois en meule (d'après des exemples plus récents).

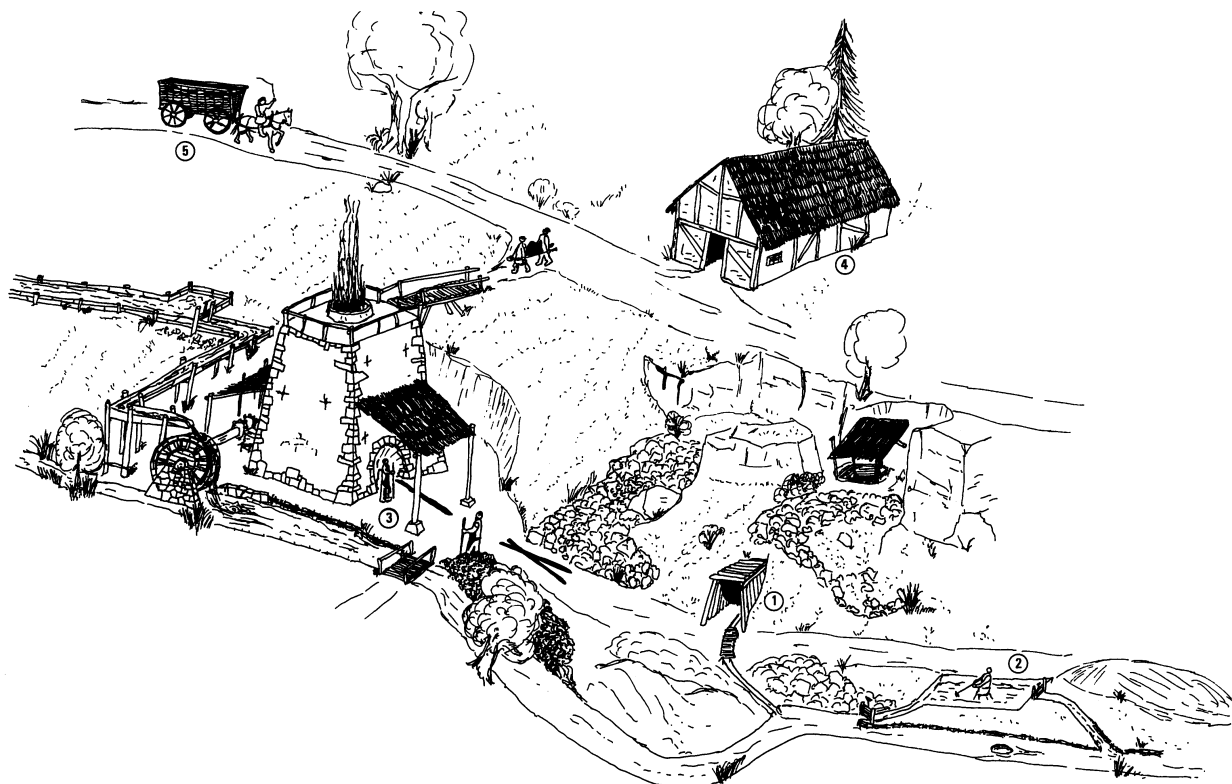


Fig. 9 — Panorama de la chaîne opératoire de la méthode indirecte de réduction du minerai de fer (haut fourneau). Cette reconstitution graphique est principalement inspirée par des peintures des XVIe et XVIIe siècles (Evrard 1955) et quelques données archéologiques.

1. Extraction du minerai en mine souterraine (galerie et puits d'aération). 2. Lavage du minerai. 3. Réduction du minerai dans un haut fourneau primitif dont la soufflerie est activée par la force hydraulique. 4. Halle à charbon. 5. Transport du charbon. L'affinerie n'est pas représentée.

la découverte des procédés d'affinage au foyer. Si ce modèle est relativement satisfaisant, il ne permet pas d'écarter définitivement la piste d'une influence extrême-orientale à une période où des contacts commerciaux ont pu exister entre l'Europe et la Chine.

On suit assez bien la progression du haut fourneau (Belhoste 1986). Les pays rhénans jouent un rôle majeur dans la diffusion du nouveau procédé qui s'implante principalement dans le Nord de l'Europe. Le maintien des procédés traditionnels ne doit cependant pas être occulté. Dans bien des régions, des bas fourneaux continuent à fonctionner en pleine Renaissance (De Boe 1977, Schubert 1957, 146-153). Dans le monde méditerranéen, de Ligurie en Catalogne, les sidérurgistes restent fidèles à la production directe de fer par la méthode catalane et ses diverses variantes (François 1843, Tomas i Morera 1995).

Du point de vue de l'efficacité, ces deux méthodes peuvent être comparées. Le rendement du haut fourneau est bien meilleur, une proportion nettement supérieure du fer présent dans le minerai étant réduite. Cet avantage est en partie contrebalancé par le fait que l'affinage de la fonte engendre une perte en fer importante. La méthode indirecte permet la valorisation de minerais relativement pauvres. La consommation de combustible est plus ou moins comparable, surtout si l'on tient compte des quantités nécessaires pour l'affinage. Par contre, l'utilisation de la houille est possible lors de l'affinage et l'utilisation du coke au haut fourneau, à partir du XVIII^e siècle, change le problème. L'investissement nécessaire pour bâtir et entretenir le haut fourneau est largement supérieur mais la capacité de production de ce dernier est également beaucoup plus grande, en particulier parce qu'il travaille de manière continue pendant plusieurs mois alors que le bas fourneau doit être arrêté à la fin de chaque opération. Pour augmenter la capacité de production par la méthode directe, la seule solution est la multiplication des fourneaux, qui implique le recours à une main d'œuvre plus abondante.

En fait, avantages et inconvénients ne prennent leur sens que dans un contexte socio-économique donné. Qualité des minerais, abondance du combustible, disponibilité de la main-d'œuvre sont autant de facteurs qui influencent la rentabilité globale d'une industrie. Encore faut-il, bien sûr que la demande en produits finis stimule la production ou que des marchés lointains puissent être facilement approvisionnés grâce à un bon réseau de communication. Ceci explique la survivance de la méthode directe dans certaines régions parfois jusqu'à l'aube des Temps Modernes.

4 Les bas fourneaux

La production de fer par la méthode directe de réduction est possible dans des fourneaux de formes très variées et conduits de manières extrêmement diverses. Les exemples fournis par l'ethnographie en Afrique et en Asie, le démontrent sans peine (Celis 1991). Ces exemples démon-

trent aussi qu'une typologie des bas fourneaux n'a de valeur chronologique qu'à l'intérieur d'une région donnée.

Plusieurs tentatives de classement typologique des bas fourneaux ont été faites sur une base descriptive : architecture, matériaux employés, formes de certains éléments comme les tuyères, etc. (Forbes 1950, 388-396, Cleere 1972, Serning 1976, Tylecote 1987). On peut aussi proposer une approche plus technologique qui vise à classer les bas fourneaux en terme d'efficacité (Pelet 1982). La démarche proposée ici vise plus à discuter quelques critères de classification qu'à établir une typologie véritable qui paraît encore prématurée (fig. 10).

Produire du métal par la méthode directe de réduction ne demande pas forcément des installations sophistiquées. Il suffit de mettre en présence des oxydes de fer et du carbone à une température d'environ 1000°C pendant un certain temps. En fait, un simple feu de bois assez violent permet d'obtenir ces conditions minimales mais, tant sur le plan du rendement que de la qualité du produit, le résultat sera extrêmement médiocre.

Une première amélioration consiste à placer le minerai et le combustible dans un volume plus ou moins confiné en aménageant une arrivée d'air pour permettre la combustion. Le milieu sera nettement plus réducteur et les températures plus élevées. Une fosse ouverte munie d'une arrivée d'air à la base ou un fourneau équipé d'un orifice inférieur et d'une cheminée, permettent de remplir cet office.

Pour obtenir un produit métallique plus compact, il faut prévoir un dispositif permettant de séparer la scorie du métal. Pour cela, il faut atteindre des températures supérieures et prévoir un volume destiné à accueillir les scories. La masse métallique doit se former un peu au-dessus du fond du fourneau. C'est la position de l'arrivée d'air qui détermine la position de la zone la plus chaude et donc de la séparation entre métal et scorie. Pour les minerais très riches en oxydes de fer ou très enrichis grâce aux traitements préliminaires, le problème de la séparation de la scorie est secondaire puisqu'il ne s'en forme que très peu. Pour les minerais plus pauvres, la séparation de la scorie est un facteur essentiel.

Deux modes d'évacuation de la scorie ont été développés qui donnent naissance à deux grandes familles de bas fourneaux évolués. Dans le premier cas, les bas fourneaux possèdent une ouverture à la base qui permet de laisser s'écouler les scories vers l'extérieur. Ce sont les bas fourneaux à scories coulées (« tap slag furnace »). A l'opposé, dans l'autre groupe de bas fourneaux, les scories sont séparées verticalement, c'est-à-dire qu'elles s'accumulent dans une fosse creusée à cet effet sous le fourneau. Ce sont les bas fourneaux à scories piégées (« slag pit furnace »). Il n'y a aucune raison de penser que l'une des deux solutions permette d'atteindre une plus grande efficacité.

Les superstructures des bas fourneaux archéologiques sont le plus souvent très mal connues. Très fréquemment, les fourneaux à scories piégées sont représentés avec des superstructures très simples, en forme de cylindre ou de

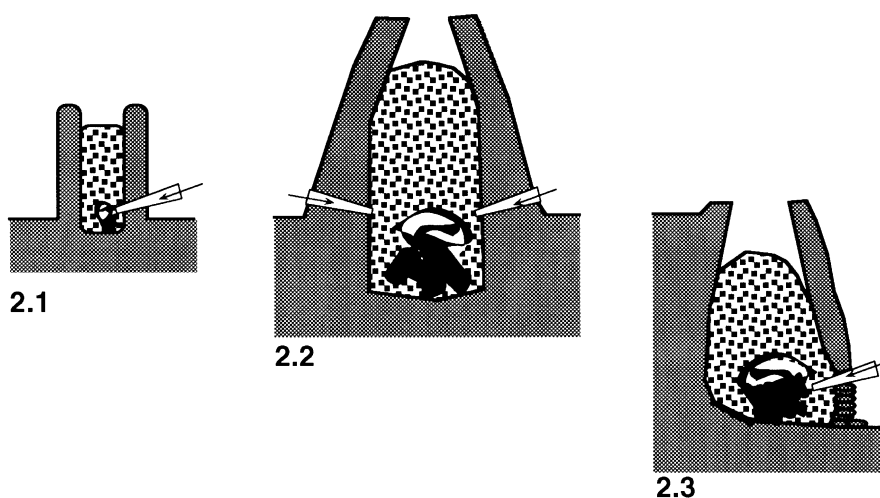
Groupe 1

Fourneaux sans séparation de scorie



Groupe 2

Fourneaux avec séparation verticale de la scorie



Groupe 3

Fourneaux avec séparation et écoulement externe de la scorie

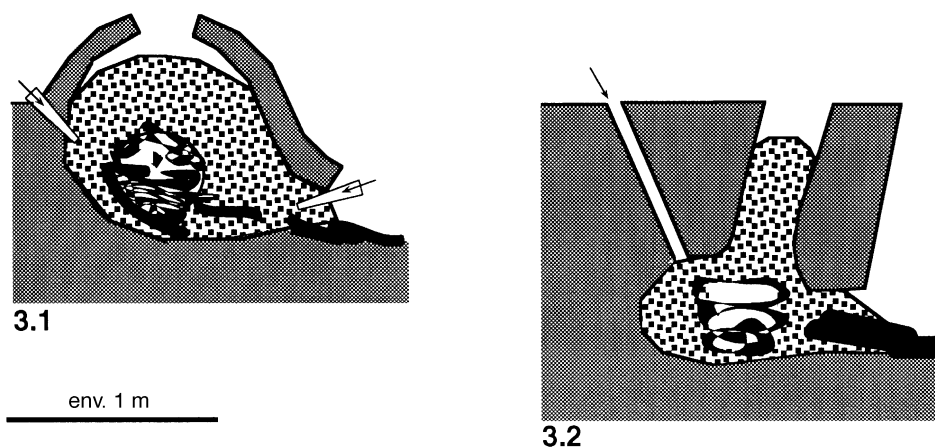


Fig. 10 — Schéma illustrant une classification des bas fourneaux basée sur le mode de séparation entre le fer et de scorie. Les autres critères ne sont pas pris en compte (type et disposition de la ventilation, etc).

Les schémas de bas fourneaux sont inspirés de quelques trouvailles archéologiques et de modèles ethnographiques.

1.1. Foyer en fosse (Afrique centrale contemporaine : Celis 1991). 1.2. Fourneau en entonnoir (Norvège XVIIe - XVIIIe siècles : Espelund 1991). 2.1. Petit fourneau cheminée (Pays de Galles, Age du Fer : Crew 1991). 2.2. Grand fourneau cheminée à utilisation unique (Europe de l'Est et du Nord, Age du Fer - Haut Moyen Age, en particulier : Montagne Sainte Croix - Pologne : Bielenin 1992). 2.3. Fourneau cheminée à utilisations multiples (Europe de l'Est et du Nord, Age du Fer - Haut Moyen Age, en particulier Bohême : Motykova et Pleiner 1987). 3.1. Fourneau cuve à scorie coulée (Europe de l'Ouest, Age du fer - Haut Moyen Age, en particulier Jura Suisse : Eschenlohr et Serneels 1991). 3.2. Fourneau à cuve abritée de l'air (Haut Moyen Age, Zelechovice, Slovaquie : Pleiner 1958b).

		MINE	CONCENTRATION	REDUCTION	RAFFINAGE	FORGE	FINITION
MATIERES PREMIERES							
STERILE		xxx					
	RESIDUS BROUAGE	x	xxx	x			
	RESIDUS LAVAGE		xxx				
MINERAL	NATUREL	xxx	x	x			
	CONCENTRE	x	x	x			
COMBUSTIBLES			x	x	x	x	x
FONDANTS				x			
MATERIAUX ASSOCIES							
PAROI DE FOURNEAU / FOYER				xx	x	x	x
TUYERES				x	x	x	x
DECAPANTS (sable, argile, etc)						x	x
SCORIES							
ARGILO-BABLEUSES				x	x	xx	x
DE REDUCTION	COULEES			xxx	x		
(à tessalite dominante)	NON COULEES			xxx	x		
	INFORMES			xxx	x		
DE POST REDUCTION	INFORMES				x	x	x
(à tessalite dominante)	EN CALOTTE				xxx	xxx	x
BATTURES					x	x	x
METALLS							
EPONGES (fragments)				x	x		
LOUPES / BARRES (fragments)					x		
ESBAUCHES						x	
RATES						x	x
CHUTES						x	x
LIMAILLE							x
INSTALLATIONS							
FOURNEAU			de grillage	de réduction	de raffinage	de éminetation ?	de forge
FOYER			de grillage		de raffinage	de forge	de forge
SUPPORT DE FRAPPE					anciens	anciens	de recuit anciens déballe
OUTILS		marteau, meule poinçonneuse, coin pic, pioche pelle seau, hotte, sac lampe pompes, etc	pelle mortier, broyeur meule tambour, cribble etc	ringard pinces	marteaux pinces	marteaux pinces tranches poinçons	marteaux pinces tranches poinçons cisailles de grappe polissoirs

Fig. 11 — Tableau récapitulatif des assemblages de vestiges caractéristiques des différentes étapes de la chaîne opératoire de la sidérurgie (méthode directe de réduction). Les vestiges miniers ne sont pas détaillés (puits, galeries, etc.).

tronc de cône régulier. Cette interprétation communément admise se base principalement sur une découverte assez ancienne faite en Allemagne sur le site de Scharmbeck (Wegewitz 1957; Weisgerber 1978, 20). Au contraire, les fourneaux à scories coulées sont souvent reconstitués avec une élévation en coupole ou en cloche. Dans ce cas également, les exemples réellement préservés sont peu nombreux. On mentionnera les fourneaux des Bellaires, Vaud CH (Pelet 1993). Quelques trouvailles récentes montrent des superstructures de forme complexe, par exemple, en coupole surmontée d'un entonnoir pour les fourneaux romains des Clérimois, Yonne F (Dunikowski et Cabboi 1995).

L'alimentation en air peut être assurée par des moyens naturels ou artificiels ou encore par une combinaison des deux. De nouveau, l'ethnographie et l'archéologie fournissent des exemples convaincants de toutes sortes de solution. Le tirage naturel peut profiter des vents dominants (Juleff 1996). Il utilise surtout l'aspiration naturelle que provoque une cheminée du simple fait de sa hauteur. La ventilation artificielle est basée sur des dispositifs de soufflerie. Les données archéologiques sont pauvres mais une grande variété de soufflets est connue par l'ethnogra-

phie (Craddock 1995, 180-187). La présence de tuyères ou de conduits dans la paroi donne une indication sur la disposition des arrivées d'air mais ne renseigne pas beaucoup sur la manière dont la ventilation est produite et surtout gérée au cours de l'opération.

Un autre aspect semble pertinent en terme de classification. Certains fourneaux sont des constructions destinées à être utilisées un grand nombre de fois. A défaut d'être soigné, le bâti est au moins solide et régulièrement entretenu. C'est le cas de la plupart des fourneaux à scories coulées. Par contre, pour les fourneaux à scories piégées, deux solutions ont été développées. Certains ne sont utilisés qu'une seule fois, c'est-à-dire que le bloc de scories formé à la base de l'appareil est laissé en place et que l'opération suivante est faite sur un emplacement voisin (Bielenin 1983 et 1992; Hingst 1983). Un autre groupe de bas fourneaux à scorie piégée est muni d'un dispositif d'accès à la partie inférieure de l'appareil ce qui permet de retirer le produit métallique et les scories en fin d'opération (Motykova et Pleiner 1987; Espelund 1995, 20-31).

Identifier les fourneaux qui produisent de l'acier n'est pas chose facile car la carburation du produit doit sans doute autant à la conduite du fourneau (ratio minerai /

combustible, température, ventilation, durée) qu'à son architecture. De plus, il faut s'attendre à un taux de carburation très variable du métal compte tenu de l'hétérogénéité des conditions de réduction à l'intérieur de la cuve. Il y a cependant quelques fourneaux qui semblent montrer un dispositif destiné à créer une zone chaude à l'abri de l'air (Pleiner 1958). Un bloc de métal placé dans cette zone pendant l'opération subira probablement une carburation.

Les découvertes archéologiques faites en Europe permettent de décrire plusieurs dizaines de fourneaux différents. Ils sont cependant répartis de manière trop inégale dans le temps et dans l'espace pour en tirer une histoire générale. Le Premier Age du Fer est particulièrement mal connu. Quelques fosses ont été interprétées comme des bas fourneaux mais ces données doivent être considérées avec beaucoup de prudence (Schubert 1957, 19; Pertlwieser 1970). Les fourneaux du début du Second Age du Fer ne sont guère mieux connus. Par contre, pour les deux derniers siècles de notre ère, les découvertes sont nettement plus nombreuses. On connaît des fourneaux à scories piégées, principalement dans le Nord-Est de l'Europe de la Hongrie à la Scandinavie (Pleiner 1980). En Europe occidentale, les fourneaux à scories coulées semblent largement dominants mais les vestiges sont trop isolés et trop divers pour permettre une classification. Du monde méditerranéen, on ne sait presque rien. A l'époque romaine, la répartition des deux grandes familles de bas fourneaux semble plus ou moins la même, les scories coulées étant la règle générale à l'intérieur des frontières de l'Empire et les scories piégées, dans le monde germanique. Au cours du Haut Moyen Age, l'arrivée des populations germaniques en Europe occidentale se traduit apparemment par l'abandon de leur technologie à de rares exceptions près (Tylecote 1987, 135-6). Au cours du Moyen Age, il semble que les technologies basées sur l'écoulement externe des scories s'imposent plus ou moins partout dans les régions du Nord de l'Europe (Espelund 1995; Voss 1994). La méthode catalane et ses variantes se développent sur la rive Nord de la Méditerranée occidentale.

5 Les scories de réduction et déchets associés

La fouille des ateliers de réduction livre en général des masses considérables de déchets métallurgiques (Serneels 1994). A côté des techniques de laboratoire, il ne faut pas négliger l'observation macroscopique qui, seule, peut être mise en œuvre sur des échantillons vraiment nombreux et permet donc de choisir en connaissance de cause un échantillonnage représentatif.

Une seconde démarche essentielle vise à quantifier les déchets en estimant ou mesurant leur volume après en avoir défini la densité (kg de déchets par m³ de sédiment).

On trouve généralement des témoignages appartenant à plusieurs grandes familles : les matières premières, les déchets de production et les produits (fig. 11).

5.1 Les matières premières

Des morceaux de minerai peuvent être présents sur les sites de réduction. Cependant, on doit s'attendre à la découverte de toute une gamme de substances naturelles riches en fer : concentré prêt à l'emploi mais aussi minerais naturels non traités, stériles rejetés, résidus de lavage et minerais incomplètement réduits. De manière générale, les fragments de minerai sont relativement peu abondants. C'est dans les zones de stockage, de préparation et de chargement du fourneau qu'ils devraient être les plus abondants. Dans les zones de rejets de déchets, on trouvera surtout des stériles et autres résidus inutilisables.

Le combustible est également présent sur le site. La réduction au bois est attestée ethnologiquement mais cette pratique reste apparemment peu répandue (Espelund 1991). Le charbon de bois qui possède un pouvoir calorifique supérieur à celui du bois sec est le combustible typique de la sidérurgie ancienne. L'utilisation du charbon minéral, houille ou anthracite, n'a pas encore été démontrée clairement avant les tentatives qui ont mené à l'invention du coke par Abraham Darby vers 1695. Cette question reste cependant ouverte, en particulier dans les régions où existent de grands gisements de charbon, comme le centre de l'Angleterre (Webster 1955).

Les sources historiques montrent bien que le choix des essences charbonnées pour la métallurgie est fait de manière souvent réfléchie mais les pratiques varient dans le temps et dans l'espace (Pelet 1983, 257-267). Au-delà de la détermination de l'essence, l'étude anthracologique des charbons métallurgiques donne différentes informations sur la pratique du charbonnage et son organisation : l'âge des arbres abattus (taillis ou futaies), les parties utilisées (trunks ou branches), le débitage des pièces, etc.

Les matériaux de construction utilisés pour les fourneaux sont généralement issus de ressources locales. On utilise des pierres liées à la terre pour construire le manteau externe. S'il n'y a pas de contact entre le feu et les éléments lithiques, leur nature n'a guère d'importance. Grès, granites et calcaires ont plus ou moins la même tenue physique. On réutilisera aussi volontiers des scories et des morceaux de brique ou de tuile. Certains fourneaux sont construits uniquement en terre crue. Les parties externes peuvent être renforcées par des bâtis en bois.

Les parois internes de la cuve sont recouvertes d'un revêtement soigneusement appliqué. On utilise pour cela des matériaux argileux. L'impression générale est qu'un soin particulier est apporté à ce travail mais on constate des variations importantes dans la nature des matériaux utilisés.

Les fragments de paroi, plus ou moins transformés par l'impact de chaleur sont fréquemment rejetés avec les autres déchets (fig. 12).

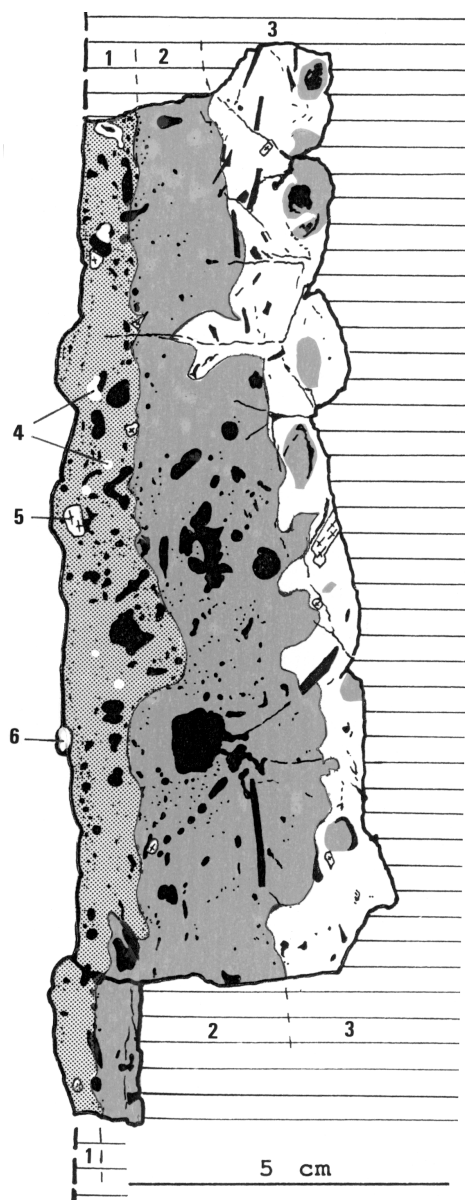


Fig. 12 — Fragment de revêtement interne de la paroi d'un bas fourneau (âge inconnu, Mont Salève, France).

1. Zone scorifiée, complètement fondue, gris verdâtre, forte porosité globuleuse. 2. Zone partiellement fondue, gris noir, porosité importante. 3. Zone cuite, rouge brique, porosité allongée et anguleuse, correspondant à l'empreinte d'éléments végétaux (paille ?). 4. Particule de fer métallique. 5. Fragment de roche siliceuse incomplètement fondu. 6. Particule de fer métallique oxydé (rouille).

Les dispositifs de soufflerie sont généralement fabriqués avec des matières périssables telles que le bois et le cuir. Seuls quelques éléments de fixation, clous et ferrures peuvent subsister mais dans la plupart des cas, on peut penser que les soufflets sont récupérés avant l'abandon du site. La tuyère, c'est-à-dire la pièce qui conduit l'air du soufflet à travers la paroi jusque dans la cuve du fourneau, est généralement fabriquée dans un matériau qui se conserve mieux. Les tuyères anciennes sont généralement en argile réfractaire (fig. 13). Aux périodes récentes, on utilise des tuyères métalliques.

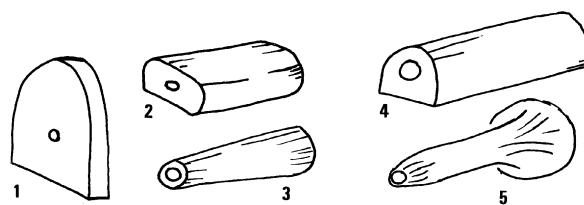


Fig. 13 — Exemples de tuyères à conduit unique. La longueur, rarement connue avec certitude pour les exemples archéologiques, varie de 10 à 40 cm. Les diamètres sont généralement compris entre 2 et 6 cm.

1. Tuyère en plaque : Espe, Sealand, Danemark, 1^{er} s. av.- 1^{er} s. ap. JC (Voss, 1989). 2. Tuyère en brique quadrangulaire : Orech, Tchéquie, époque romaine (Motykova et Pleiner 1987). 3. Tuyère cylindrique ou conique : Rőjtökmuszaj, Hongrie, époque slave (Gömöri 1987). 4. Tuyère à section ogivale : Boécourt, Jura, Suisse, époque mérovingienne (Eschenlohr et Serneels 1991). 5. Tuyère en entonnoir : Nambingué, Côte d'Ivoire, époque contemporaine (Celis 1991).

5.2 Les déchets métallurgiques

La grande masse du mobilier découvert sur les ateliers de réduction est constitué par des scories résultant de la fusion partielle du minerai. L'étude morphologique de ces objets est un moyen efficace pour comprendre la dynamique du fourneau (Serneels 1993, fig. 14 et 15). Une des principales difficultés vient de la fragmentation importante que subit ce type de matériel en raison du refroidissement très rapide.

Les scories qui se sont écoulées à l'extérieur du fourneau vont se refroidir en position plus ou moins horizontale. Si elles s'écoulent sur une surface aménagée, fosse ou rigole, elles en prennent l'empreinte. La surface inférieure est en contact avec le sol et sera caractérisée par des empreintes de petits cailloux ou de charbons. La surface supérieure refroidit au contact de l'air et les structures de flux restent bien visibles. Le flux s'exprime soit par la formation de cordons soit de rides perpendiculaires à l'écoulement. Les accumulations de cordons expriment un écoulement plus ou moins continu de petites quantités de scorie. Si les cordons ne sont pas soudés les uns aux autres, c'est que les écoulements successifs sont séparés par un temps suffisant pour le refroidissement. Dans le cas contraire, les arrivées de scorie se succèdent plus rapidement. Dans certains cas, la scorie forme une grande plaque de plusieurs kilos ou dizaines de kilos, formée par un écoulement unique et massif. On peut ainsi opposer des processus d'écoulement continu et discontinu.

Les scories qui se forment à l'intérieur du fourneau se refroidissent dans une position plus ou moins verticale (Weisgerber 1978, Bielenin 1992). Elles s'insinuent entre les charbons ou les morceaux de bois disposés dans la partie inférieure de la cuve. Elles peuvent parfois s'accrocher aux parois ou prendre la forme du fond du fourneau. Les écoulements prendront fréquemment la forme de cordons mais ne comportent pas de surface inférieure caractéristique. Dans certains fourneaux, les scories piégées forment des blocs de plusieurs dizaines de kilos. La partie inférieure du bloc est constituée par des écoulements sta-

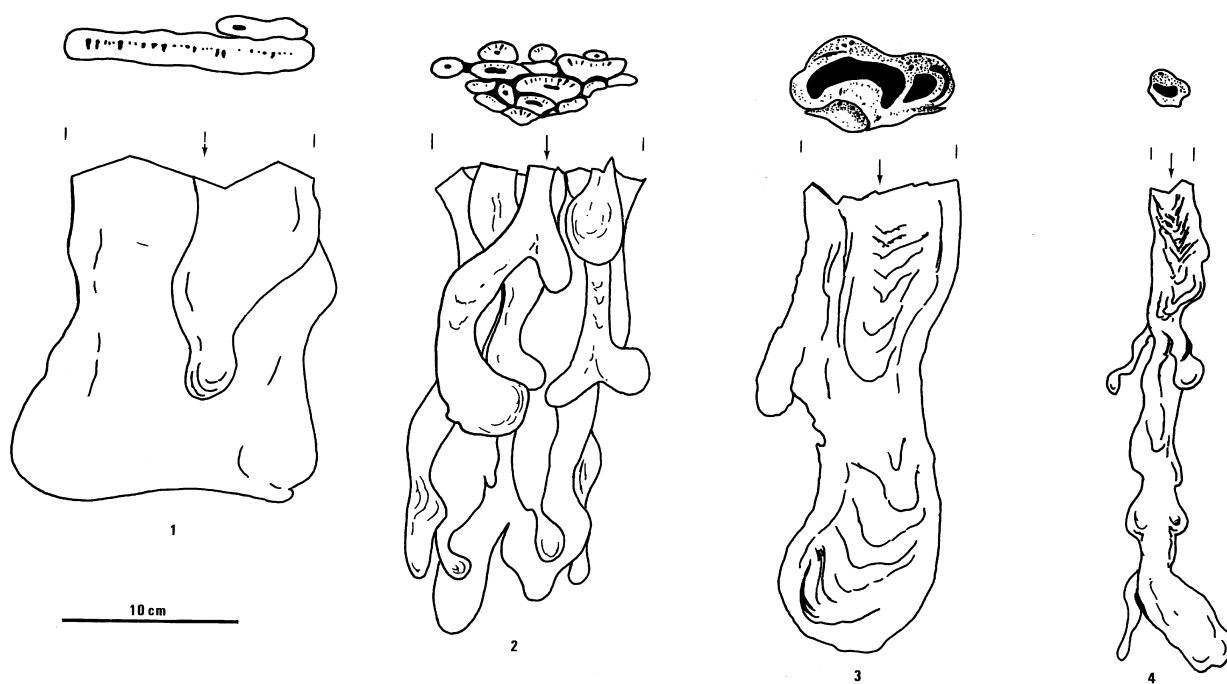


Fig. 14 — Quelques exemples de fragments de scories coulées d'aspect varié.

1. Coulée en plaque, scorie grise dense (époque romaine ?, Froidchapelle, Belgique). 2. Coulée en cordons superposés moulée dans une rigole, scorie grise dense (époque romaine, Bardown, Angleterre). 3. Coulée en gros cordon unique, scorie noire vitreuse riche en bulles (âge inconnu, Mont Salève, France). 4. Coulée en cordon digité, forte inclinaison, scorie noire vitreuse riche en bulles (Haut Moyen Age, Les Bellaires, Suisse).

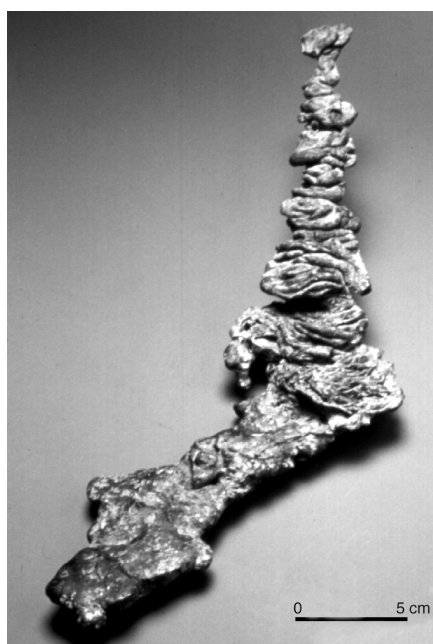


Fig. 15 — Coulure de scorie provenant de la dernière coulée du bas fourneau 2 de Boécourt-Les Bouillies Jura, Suisse (Eschenlohr et Sermeels 1991). La partie supérieure de la pièce montre un écoulement turbulent selon une forte pente et montrant une viscosité élevée du liquide. La partie inférieure montre un écoulement presque horizontal et régulier témoignant d'une faible viscosité. Ph. B. Migy.

lactiques de longueur inégale. La surface supérieure présente l'aspect d'un liquide figé en position horizontale. On y observe parfois des traces d'arrachement du bloc de métal.

Les surfaces des scories cristallisées sont généralement gris sombre avec des reflets métalliques. Les corps vitreux possèdent des couleurs plus variées : noir, jaune ou même vert et bleu. Lorsque les scories sont riches en fer métal-

lique ou en wüstite, la rouille envahit certaines surfaces et provoque la fixation de minéraux argileux, donnant un aspect terreux.

Les scories peuvent contenir des proportions très variables de bulles. Celles-ci ne sont pas en relation avec l'existence d'une soufflerie plus ou moins forte mais expriment un phénomène de dégazage du liquide (Shafer et Zare 1991). En refroidissant, la scorie laisse s'échapper les gaz dissous qu'elle contient. Si la scorie est encore très fluide au moment où ce dégazage se produit, les gaz forment des bulles qui grossissent par coalescence dans le liquide et finalement s'échappent en atteignant la surface. Si la viscosité de la scorie augmente à cause du refroidissement, les bulles resteront prisonnières. Dans une scorie chaude, c'est-à-dire se trouvant à une température bien au-dessus de son point de fusion, le dégazage se fera sans difficulté pour laisser une masse solide compacte et dense. Dans le cas contraire, les bulles seront beaucoup plus nombreuses.

Les scories sont généralement constituées de cristaux qui se forment très rapidement au cours du refroidissement. Souvent, l'orientation des grains est liée au gradient des températures. La cristallisation étant très rapide, les minéraux présentent des formes incomplètes caractéristiques.

Les principaux minéraux que l'on rencontre sont la fayalite, un silicate de fer et la wüstite, un oxyde de fer (fig. 16). Dans le détail, beaucoup d'autres minéraux ont été décrits. Dans la plupart des scories, une partie de la matière n'a pas cristallisé et forme un verre. Cette fraction

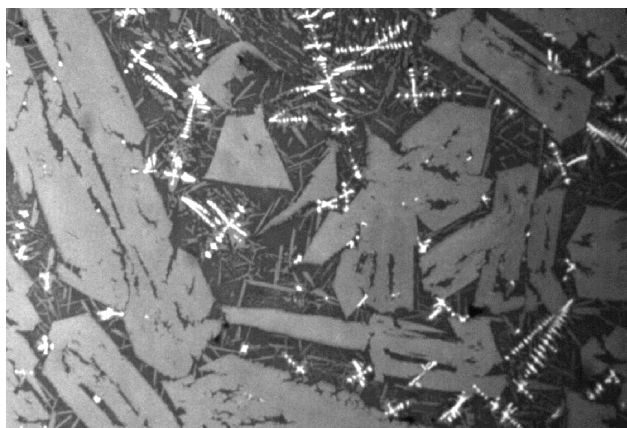


Fig. 16 — Scorie de réduction (Haut Moyen Age, Mont Chemin, Valais, Suisse). Photo prise au microscope en lumière réfléchie. La fayalite apparaît en grandes lattes présentant des lacunes de croissances orientées (gris moyen). La wüstite cristallise en dendrites (blanc). De rares cristaux de spinel (hercynite) possèdent des formes trapues équidimensionnelles (gris moyen). Les nombreuses petites lattes possèdent des compositions chimiques proches des minéraux de la famille de la rhönite (gris moyen). On observe un verre interstitiel (gris sombre). Photo B. Beck.

vitreuse se forme d'autant plus facilement que la composition chimique globale est pauvre en fer.

Les études minéralogiques permettent de décrire les différents minéraux et de comprendre la dynamique de leur cristallisation. Elles fournissent des informations sur les conditions physiques dans lesquelles fonctionnent les fourneaux.

La composition chimique des scories est liée à la nature du minerai traité et de sa gangue ainsi qu'aux autres constituants pouvant participer à sa formation (fondant, paroi, cendre) et aux conditions physiques de fonctionnement. Les comparaisons entre analyses de minerais, scories et autres matériaux associés permettent de vérifier leur compatibilité. Avec les bilans chimiques, on peut calculer le rendement et la production de l'opération (Serneels 1995a). C'est une donnée essentielle pour estimer la production de fer sur un site donné en fonction du volume de scories présentes (Eschenlohr et Serneels 1991, 99-106). Les analyses chimiques permettent aussi des comparaisons entre différentes technologies (Leroy 1997).

La quantité de scorie produite au cours d'une opération de réduction est évidemment variable. Elle dépend de trois facteurs principaux : la capacité du fourneau (quantité de minerai utilisé), la nature du minerai (teneur en fer) et l'efficacité du processus (quantité de fer réduit).

Avec un minerai idéal, ne contenant que de l'oxyde de fer et une réduction parfaitement efficace, en principe, aucune scorie ne devrait se former. Tous les minerais naturels contiennent au moins quelques pour-cent d'impuretés, principalement de la silice. Celle-ci devra être combinée avec des oxydes de fer pour former un liquide à bas point de fusion. La proportion d'oxyde de fer correspond à environ deux ou trois fois le poids de la silice, en fonc-

tion de la température et de l'atmosphère régnant dans le fourneau. En traitant des minerais riches, on fabrique donc beaucoup moins de scorie qu'avec de plus pauvres. La teneur en oxydes de fer est liée à de nombreux facteurs, en particulier, à la présence d'éléments pouvant se combiner avec la silice, comme le calcium, mais aussi aux conditions de réduction dans le fourneau.

5.3 Les produits métalliques

Lorsque l'on découvre du métal dans le contexte d'un atelier de réduction, l'interprétation est toujours délicate. Objets et outils ont pu être fabriqués sur place aussi bien qu'à l'extérieur. Les pièces ne portant pas de trace de travail peuvent être des déchets volontairement rejetés ou des produits perdus par erreur.

Archéologiquement, le produit brut du bas fourneau, l'éponge de fer, est mal connu (Hegedus 1962; Osann 1971; Blomgren et Tholander 1985; Unglik 1993). Les sources historiques se limitent à des mentions et ne donnent pas de descriptions précises. Des données de comparaisons sont fournies par l'archéologie expérimentale mais celles-ci doivent être considérées avec une certaine prudence (Straube 1989). Enfin, le matériel ethnographique apporte d'autres informations (Serneels *et al.* 1997).

Comme on peut logiquement s'y attendre, les différentes techniques, les différents minerais et les différents bas fourneaux donnent des produits qui varient beaucoup dans leurs poids, leurs structures internes et leurs natures. Le point commun essentiel de la plupart des exemples décrits dans la littérature est que l'éponge est hétérogène à l'échelle macroscopique (fig. 17). Cette hétérogénéité se manifeste de plusieurs manières. Le métal, qui est toujours resté à l'état solide, ne forme pas une masse compacte mais possède une forme irrégulière et une structure vacuolaire. Les espaces interstitiels peuvent être vides ou remplis de matériaux non métalliques, principalement de la scorie ou des charbons de bois. Le degré de compacité du métal est très variable. Dans certains cas, il n'y a guère que quelques pour-cent de vides et de petites inclusions de scorie, dans d'autres, des nodules centimétriques et des particules de fer plus fines sont dispersés dans une masse de scorie où des filaments métalliques entremêlés autour de charbons forment un écheveau compliqué. Souvent, l'éponge est constituée par une partie inférieure consolidée entourée et surtout surmontée par une zone où le métal est plus dispersé.

Par ailleurs, dans le métal, la teneur en carbone et, le cas échéant, en phosphore peut varier de place en place. On peut observer, à quelques centimètres de distance, des zones ferritiques et de l'acier eutectoïde. Ces variations reflètent à la fois l'hétérogénéité de la charge et celle des conditions plus ou moins réductrices dans les différentes parties du fourneau. La structure microscopique du métal peut varier considérablement d'un endroit à l'autre mais on observe fréquemment la formation de ferrite aciculaire

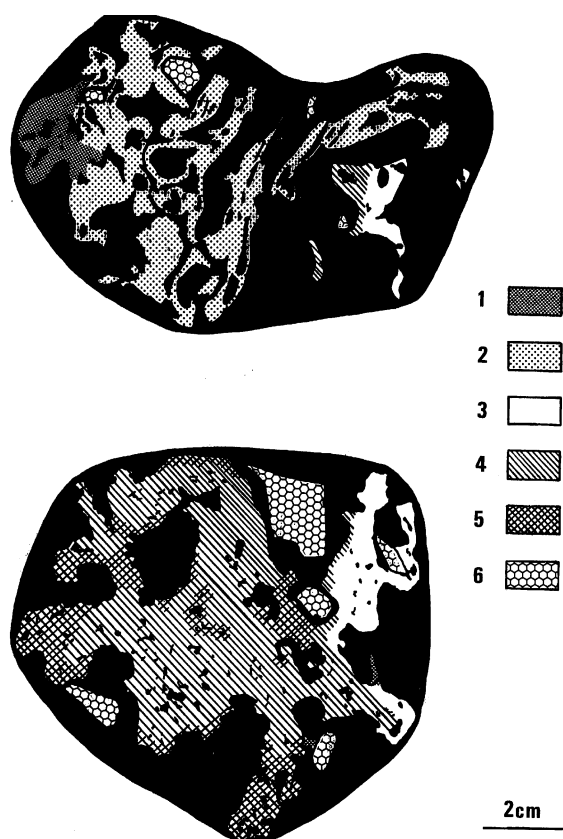


Fig. 17 — Schéma de la structure interne de deux échantillons d'une éponge de fer de 69 kg produite en 1995 par des métallurgistes travaillant avec les méthodes traditionnelles à Arindingi au Mali (Huysecom 1996, Serneels et al 1997).

A. Fragment provenant de la périphérie de l'éponge : La texture est fortement vacuolaire et le contenu en scorie est d'environ 50 %. Dans la majeure partie de la pièce, le métal est ferritique et dispersé dans une matrice de scorie. B. Fragment de la partie centrale de l'éponge : la texture est vacuolaire mais le contenu en scorie est inférieur à 1%. La plus grande partie du métal est de l'acier eutectoïde.

1. Scorie (< 10 % métal, ferrite < 0.02 % C). 2. Scorie et métal dispersé (10 - 80 % métal, ferrite, < 0.02 % C). 3. Acier hypoeutectoïde (ferrite + perlite, < 0.8 % C). 4. Acier eutectoïde (perlite, environ 0.8 % C). 5. Acier hypereutectoïde (perlite + cémentite, 0.8 à 1.2 % C).

disposée en faisceaux parallèles dans des directions particulières (structure de Widmanstätten, fig.18). Cette forme de cristallisation reflète un refroidissement rapide à partir de très hautes températures sans déformation plastique.

Macroscopiquement, l'éponge de fer se présente en général comme une masse informe hérissée d'une multitude d'excroissances acérées à laquelle adhèrent des charbons et de la scorie. Les pièces archéologiques sont évidemment couvertes de rouille qui masque souvent ces reliefs. La densité apparente est toujours nettement inférieure à celle du métal compact en raison des porosités et des inclusions.

Parmi les quelques pièces de fer archéologiques qui ont été interprétées comme des éponges, certaines ne pèsent que quelques centaines de grammes, mais peut-être ne s'agit-il que de fragments. Des pièces d'époque romaine atteignent la dizaine de kilos. Mais les exemples sont

beaucoup trop peu nombreux et ne peuvent pas être considérés comme représentatifs. A la fin du Moyen Age, les sources historiques mentionnent des éponges de 80 kilos et plus (Tylecote 1987). Les fourneaux catalans produisent des masses encore plus importantes (François 1843).

6 L'atelier de réduction

Le bas fourneau lui-même est intégré à un espace de travail (fig. 6) qui comporte un accès permettant le chargement et une zone de défournement. Le cas échéant, des emplacements sont réservés aux souffleries et aux ouvriers qui les manipulent. L'ensemble de ces activités peut se trouver en plein air mais, en particulier dans les régions qui souffrent d'un climat rigoureux, des protections sont souhaitables. Des toitures légères abritent souvent ces structures. Il y a par contre peu d'exemples qui laissent penser que de véritables bâtiments sont édifiés au-dessus des fourneaux. Lorsque les installations deviendront plus importantes, en particulier avec la mise en place de roues hydrauliques, le fourneau sera plus fréquemment installé dans un véritable bâtiment.

Les matières premières, charbon et minerai, sont stockées à proximité. Le stockage du charbon doit impérativement se faire à l'abri de l'humidité. Le combustible et le minerai peuvent être préparés sur place et dans ce cas, on trouvera les vestiges correspondant aux installations nécessaires. Enfin, les déchets sont rejetés à la périphérie des zones de travail. Des espaces peuvent être prévus pour emmagasiner les produits et les matériaux recyclables.

La main-d'œuvre nécessaire à la conduite d'un bas fourneau est très variable. Le chargement des matières premières peut être effectué par une seule personne qui surveillera en même temps la bonne marche de l'opération. Le cas échéant, la soufflerie occupera au moins une autre personne. Dans le cas de l'utilisation intensive de



Fig. 18 — Eponge de fer du Mali, voir figure 17 (Serneels et al. 1997). Photo prise au microscope en lumière réfléchie. Le métal est principalement constitué de perlite (aspect d'agrégat vermiculaire). On observe de grands cristaux aciculaires de ferrite orientés parallèlement les uns aux autres et selon des directions particulières (proche de la texture de Widmanstätten) qui indiquent un refroidissement rapide depuis une haute température et l'absence de déformation mécanique.

gros fourneaux à soufflerie multiple, on peut envisager des équipes de 5 ou 6 ouvriers. Un atelier où fonctionnent plusieurs batteries de fourneaux peut réclamer le travail de quelques dizaines de travailleurs pour les seules activités de réduction.

Le plus souvent, pour minimiser les problèmes de transport, l'atelier de réduction s'installe à proximité immédiate de la source de minerai mais ce n'est pas une règle absolue. Le combustible utilisé pour la réduction est, en poids, au moins égal au minerai et, en volume, bien supérieur. Dans certaines circonstances, il sera préférable de placer l'atelier à proximité des forêts. Avec l'introduction de la roue hydraulique pour activer les soufflets, il devient nécessaire de s'implanter le long d'un cours d'eau. Enfin, il est important aussi de tenir compte de la structure de la propriété dans un contexte socio-économique donné. Ces activités sont polluantes, bruyantes et parfois considérées comme dangereuses. Il ne sera pas toujours permis aux artisans de s'installer où bon leur semble comme en témoignent certaines réglementations urbaines du Moyen Âge. Dans le monde rural, les choses ne sont pas forcément plus simples. Trop près des villages, les métallurgistes privent les habitants de leurs ressources en bois (Pelet 1988). Au Moyen Âge, le long des rivières, la compétition entre les usines est parfois intense et les droits d'eau sont généralement détenus par les seigneurs, clercs ou laïcs, qui décident en fonction de leurs intérêts propres. Enfin, dans certaines sociétés ritualisées de l'Afrique Noire, la pratique de la réduction revêt un aspect sacré qui implique son isolement. Le choix de l'emplacement de l'atelier découle de raisons techniques et économiques mais aussi sociales et parfois religieuses.

Dans la plupart des cas, les ateliers de réduction du minerai de fer sont des sites spécialisés qui ne livrent presque pas de traces d'activités domestiques ou d'habitat. Plus rarement, la réduction est intégrée à un habitat. C'est le cas en particulier de certains habitats groupés médiévaux à vocation mixte, artisanale et agricole (Serneels 1995b; Voss 1995; Groenewoudt et van Nie 1995). Des vestiges de bâtiments divers et parfois de bains ont été découverts en liaison avec quelques grands ateliers de l'époque romaine (Domergue 1993; Cleere et Crossley 1985, 70-74). Une relation entre des ateliers de réduction et de grands domaines agricoles de l'époque romaine a été maintes fois proposée (Mangin *et al.* 1992, 194). Ces maigres éléments montrent qu'il existe des cas de figures différents mais ne permettent pas d'élaborer un modèle et d'en décrire l'évolution. L'organisation sociale de la production aux différentes époques demeure très mal connue.

7 Le travail du métal

Les produits métalliques issus de la réduction sont de nature variée. Le traitement de la gueuse de fonte est évidemment différent de celui de l'éponge de fer ou d'acier fabriquée dans un bas fourneau. Par contre, les techniques de la forge à proprement parler, qui permettent de fabri-

quer des objets fonctionnels à partir d'un métal prêt à l'emploi, ne dépendent pas ou presque de la manière dont ce métal a été produit.

L'utilisation de la fonte ne concerne pas les périodes les plus anciennes de l'histoire européenne et pour cette raison, les aspects techniques et historiques ne seront pas abordés. La fonte peut être directement moulée à l'état liquide pour fabriquer les objets les plus divers : chaudrons, chenets, plaque de foyer ou boulet de canon. La fonte peut également être affinée, c'est-à-dire décarburée partiellement, pour fabriquer un métal forgeable.

7.1 Le travail du fer et de l'acier

Le travail du fer à la forge vise un double objectif. D'une part, le forgeron donne une forme au métal et d'autre part, il en modifie les propriétés physiques. Le travail à la forge offre une vaste gamme de possibilités et l'artisan capable sait les mettre à profit. Cependant, dans ce cas également, il faut garder à l'esprit les contraintes économiques qui pèsent sur la réalisation d'une pièce. Pour un objet de luxe, la mise en œuvre de techniques sophistiquées, gourmandes en temps, en combustible et en métal n'est pas impensable. Au contraire, pour une production de masse, des méthodes simples et bon marché seront toujours privilégiées. On ne s'étonnera donc pas de trouver des objets en fer de qualité supérieure à toutes les époques; par contre, la véritable mesure de l'habileté des artisans sera mieux exprimée par les objets d'usage courant.

7.1.1 La mise en forme

La mise en forme des métaux ferreux à l'état solide se fait principalement par déformation plastique, c'est-à-dire, une déformation qui, une fois acquise, reste permanente. La quantité de déformation que l'on peut appliquer à un alliage donné est étroitement liée à sa composition chimique, à la température de travail et à la quantité de déformation qu'il a déjà subi. De manière générale, le fer pur peut être facilement déformé alors que la présence d'éléments d'alliage diminue cette capacité. De même, à hautes températures, le matériau sera plus déformable qu'à basses températures. On peut donc définir pour chaque composition, une gamme de températures correspondant aux conditions optimales de déformation. Sous une contrainte trop importante, des fissures apparaissent qui peuvent aboutir à une véritable fracture. La présence de discontinuités dans la structure du métal, en particulier d'inclusions non métalliques ou de lacunes, favorise ce phénomène.

Pour le guider dans son travail, le forgeron utilise comme indice principal la couleur du métal chauffé qui change en fonction de la température du rouge au blanc. L'expérience lui enseigne aussi à sentir la réaction du métal au coup de marteau qu'il vient de donner et à estimer si le métal est encore en état d'être déformé.

C'est généralement par martelage sur l'enclume que le forgeron déforme le métal. Selon leur force, leur vitesse et leur direction, les coups de marteau auront des effets dif-

férents. Tout un vocabulaire rend compte des différentes actions. Étirer une barre consiste à l'allonger en diminuant l'épaisseur sans changer la largeur. Aplatir correspond à l'action de diminuer la section en augmentant les autres directions. Refouler est le travail qui consiste à frapper l'extrémité d'une barre de manière à augmenter sa section en diminuant la longueur. On parle d'épaulement lorsque le but est de modifier le profil d'une pièce. On utilise souvent des supports de frappe spéciaux pour ce travail. Enfin, on peut percer ou fendre en déformant le métal avec un outil perforant (poinçon) ou tranchant (tranche). Le travail des pièces annulaires se fait au moyen d'un mandrin, support de frappe de forme conique dont la taille est fonction de celle de la pièce à travailler. Le métal peut aussi être courbé et même torsadé.

Le forgeron découpe également le métal ce qui lui permet de diminuer le volume de la pièce. Certaines perforations se font aussi par découpage. Enfin, on peut enlever de la matière par abrasion.

Toutes ces actions peuvent être menées à bien, à chaud ou à froid, en fonction de l'intensité de la déformation appliquée, de la section de la pièce et de la nature du métal.

Les assemblages se font de plusieurs manières. La technique principale est celle de la soudure. En amenant deux pièces chauffées à la bonne température l'une au contact de l'autre et en appliquant quelques coups de marteau, on peut les réunir de manière définitive. Le procédé est simple mais demande une certaine habileté. La soudure est facilitée lorsque les surfaces en contact sont planes et propres. D'autre part, les températures de soudure varient en fonction de la nature de l'alliage. Lorsque l'on cherche à réunir des matériaux nettement différents l'un de l'autre, l'intervalle de températures commun peut être très étroit.

Une autre technique, la brasure, consiste à assembler deux pièces au moyen d'un métal à bas point de fusion comme l'étain. Cette méthode est principalement utilisée pour des pièces décorées.

Bien des assemblages sont également réalisés à l'aide de rivets. Les deux pièces à réunir sont préalablement percées et une tige est introduite dans les trous. Les deux extrémités de la tige sont ensuite déformées par écrasement.

7.1.2 La modification des propriétés physiques

Au niveau de la structure du métal, le martelage a pour principal effet de provoquer une diminution de la taille des grains, ce qui engendre un durcissement du métal. À l'opposé, le chauffage du métal a pour conséquence la recristallisation des grains dont la taille augmente. Ces chauffages, qui portent le nom de recuit, permettent au forgeron de restaurer les propriétés du métal. En alternant chauffages et martelages, le forgeron pourra mener à bien une déformation très importante. Le martelage à froid augmentera la dureté du métal.

Dans le cas du traitement thermique des aciers, la situation est plus complexe. Chauffés à haute température, les aciers acquièrent une texture constituée de grains d'austénite dans lesquels le carbone est en solution. Au cours d'un refroidissement lent, ce constituant devient instable et se transforme en ferrite et cémentite sous la forme d'agrégat eutectoïde de perlite. Dans le cas d'un refroidissement très rapide, une trempe, la transformation de l'austénite en perlite peut n'être que partielle ou même ne pas avoir lieu du tout. Il se forme, à basse température, un constituant hors d'équilibre très dur, la martensite. En fait, une grande variété de structures peut être obtenue en modulant la vitesse de refroidissement. La présence d'éléments d'alliage autres que le carbone, comme le phosphore ou le manganèse, joue aussi un rôle très important. La trempe est obtenue en plongeant le métal chaud dans un bain liquide, en général de l'eau.

L'acier peut acquérir par la trempe une dureté telle qu'il en devient très cassant. Pour modérer cet inconvénient, il peut être réchauffé et maintenu à température moyenne pendant un certain temps. Ce procédé, le revenu, permet de diminuer la quantité de martensite. Diverses transformations sont possibles en fonction de la température de revenu, de la durée de l'opération et de la vitesse du refroidissement final.

Les cycles de chauffages et martelages et surtout le traitement thermique final jouent donc un rôle capital pour donner au métal ses propriétés physiques. La maîtrise de ces techniques est l'indicateur le plus fiable de l'habileté des artisans. Des exemples très précoces montrent que certains d'entre eux ont dominé ces traitements avant même que le fer ne devienne un métal courant (Davis *et al.* 1985). En même temps, bien des objets plus récents montrent une maîtrise incomplète de ces techniques. À l'heure actuelle, il reste impossible de donner une image à grande échelle de la maîtrise de ces pratiques dans les différentes cultures. Quelques éléments encore incertains semblent indiquer que les forgerons de l'Âge du Fer en Europe non méditerranéenne ne les dominent pas complètement (Pleiner 1980; 1993a). Elles semblent par contre beaucoup mieux maîtrisées au Moyen Âge (Pleiner 1993b; Ottaway 1992).

7.1.3 Le contrôle de la composition chimique

Dans une certaine mesure également, le forgeron peut modifier la composition chimique du métal au cours de son travail. Principalement, à chaud et au contact de l'air, le carbone présent subit une oxydation. Cette décarburation est presque inévitable. À l'opposé, le forgeron peut également essayer d'enrichir la surface du métal en carbone. En posant la pièce de métal dans le charbon et à haute température, il peut provoquer une cémentation superficielle. Il faut cependant souligner que cette diffusion du carbone est très lente, de l'ordre de quelques millimètres au maximum pour une durée de plusieurs heures à 1000°C. C'est donc faisable dans un foyer de forge mais

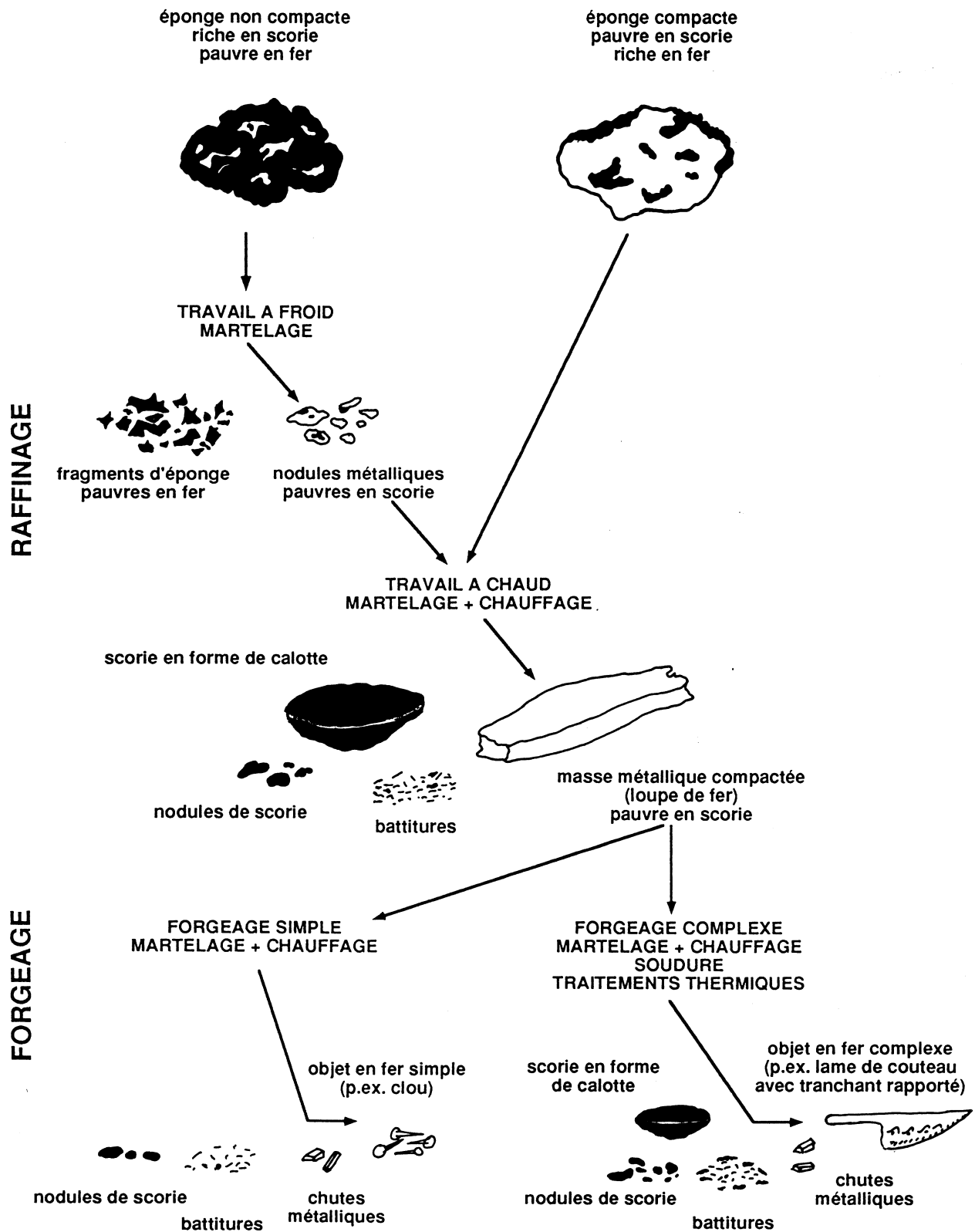


Fig. 19 — Schéma illustrant différentes étapes du travail du fer (matières premières, technique de travail, déchets). Au stade du raffinage, l'état physique de l'éponge, riche ou pauvre en scorie, influence beaucoup la technique à mettre en oeuvre et donc les déchets produits. Au stade du forgeage, la nature de l'objet que l'on cherche à fabriquer devient un paramètre déterminant pour le choix des techniques mises en oeuvre.

c'est un processus lent et qui implique une forte consommation de combustible.

Aux XVII^e et XVIII^e siècles, cette technique a été optimisée en utilisant de véritables fourneaux de cémentation. Les lames de métal sont disposées à l'intérieur de caisses métalliques en présence de poudre de charbon de bois. Les caisses sont ensuite placées dans un fourneau et chauffées. L'atmosphère confinée des caisses est très réductrice et le chauffage peut être assuré avec un combustible quelconque, comme de la houille par exemple, sans risque pour le métal.

7.2 Le travail de l'éponge de fer

Pour obtenir un métal forgeable, il faut compacter l'éponge et la purger autant que possible des inclusions non métalliques. C'est l'opération de raffinage ou forge de purification (Serneels 1995c). Le travail de l'éponge de fer est en quelque sorte un cas particulier du travail du fer. La différence essentielle est dans la nature hétérogène de la matière première qui demande une adaptation de la part de l'artisan. C'est par ailleurs une étape du travail qui laisse des déchets spécifiques, potentiellement identifiables. Compte tenu de la diversité des techniques de réduction au bas fourneau, on doit s'attendre à une diversité des produits bruts (fig. 17 et 19). Les principales différences seront dans la nature du métal (fer, acier ou mélange), dans la quantité de matière non métallique présente (scories, charbons) et dans la compacité du métal (pourcentage de vide).

Dans le cas d'une masse métallique assez compacte et pauvre en scories, un simple martelage à chaud va permettre de refermer la porosité en soudant le métal à lui-même. Les inclusions de scories, peu nombreuses, seront divisées et étirées sous le marteau. On parviendra donc très vite à un produit forgeable et la technique ne présente dans ce cas pas de particularité.

Pour une masse métallique relativement compacte mais riche en inclusions de scorie, le travail devra être plus délicat. Soumise à un martelage violent à basse température, la pièce se briserait en raison de la présence de la scorie. À plus haute température, la scorie refondue pourra s'écouler d'elle-même ou être expulsée par un martelage délicat.

En présence d'une quantité importante de scorie et d'une pièce de métal assez compacte, on pourra procéder à un nettoyage de la pièce par martelage à froid. La scorie va se casser alors que le métal va se déformer un peu. Une fois les parties métalliques isolées, le raffinage peut continuer à chaud.

Si les particules métalliques sont dispersées dans une grande masse de scorie, la solution peut être de concasser l'éponge à froid pour en extraire les particules métalliques plus tenaces. Ces petits fragments de métal sont ensuite placés dans le foyer et soudés les uns aux autres à chaud. Si les particules sont très petites, elles peuvent être emballées dans un tissu ou enrobées d'argile pour les maintenir

en contact jusqu'à ce que la soudure s'amorce. Tout l'art de l'artisan sera de retirer ce paquet du foyer et de l'amener sur l'enclume sans le désagréger. On peut aussi empiler les fragments sur une barre de fer qui sera ensuite posée en équilibre dans le foyer. Les petits morceaux sont, au fur et à mesure, soudés à la barre.

D'une manière ou d'une autre, ce travail aboutit à la production d'un bloc de métal suffisamment compact et purifié, qu'on peut appeler la loupe. Plus le travail de martelage sera prolongé, plus la quantité de scorie diminuera, de même que la taille des inclusions. Le martelage régularise aussi la forme du bloc.

Ce bloc peut n'être qu'un stade intermédiaire et la fabrication de l'objet peut suivre immédiatement ce travail initial sans qu'il y ait de véritable interruption. La loupe peut également être stockée ou commercialisée sans qu'il y ait une mise en forme particulière. Enfin, l'artisan peut également donner à la loupe une forme particulière pour en faire un lingot, c'est-à-dire une pièce de matière première élaborée destinée au stockage et à la commercialisation. Dans ce cas, on cherche en général à obtenir une forme pratique, c'est-à-dire relativement facile à exécuter et à manipuler. Cette forme doit également être reconnaissable pour les consommateurs et peut même témoigner de la qualité de la matière première. Pour cela, on peut par exemple exécuter une soudure ou travailler une extrémité de la masse (Crew 1994). Les lingots doivent aussi témoigner d'une certaine standardisation de la masse de métal.

7.3 Les travaux de finition

Une fois la partie métallique d'un objet mise en forme et, le cas échéant, après qu'un traitement thermique adéquat lui ait été appliqué, il reste, pour obtenir un objet fonctionnel à procéder aux finitions. Bien sûr, les objets les plus simples comme les clous par exemple, échappent à cette étape. À l'opposé, pour les objets richement décorés, la phase des finitions est celle qui représente la plus grande partie du travail et parfois, de la valeur ajoutée.

Les armes et de nombreux outils possèdent des tranchants qui, après la mise en forme par forgeage, doivent être affûtés. Ce travail est fait par abrasion de matière jusqu'à obtention de l'épaisseur voulue. Les outils utilisés pour ce travail sont généralement en pierre.

Le fer brut de forge est noirâtre et terne. Le polissage lui confère un bel aspect gris bleuté et très brillant. Le polissage est obtenu en frottant la surface avec des matériaux durs au grain de plus en plus fin de manière à supprimer les irrégularités de surface. En général, on commence avec des grès à grain grossier puis des pierres à grain fin et pour finir des matières organiques : bois, cuirs ou tissus.

Beaucoup d'objets en fer subissent au moins un polissage grossier. Ce traitement n'est pas indispensable d'un point de vue fonctionnel mais il améliore considérablement l'aspect esthétique et peut faciliter l'entretien.

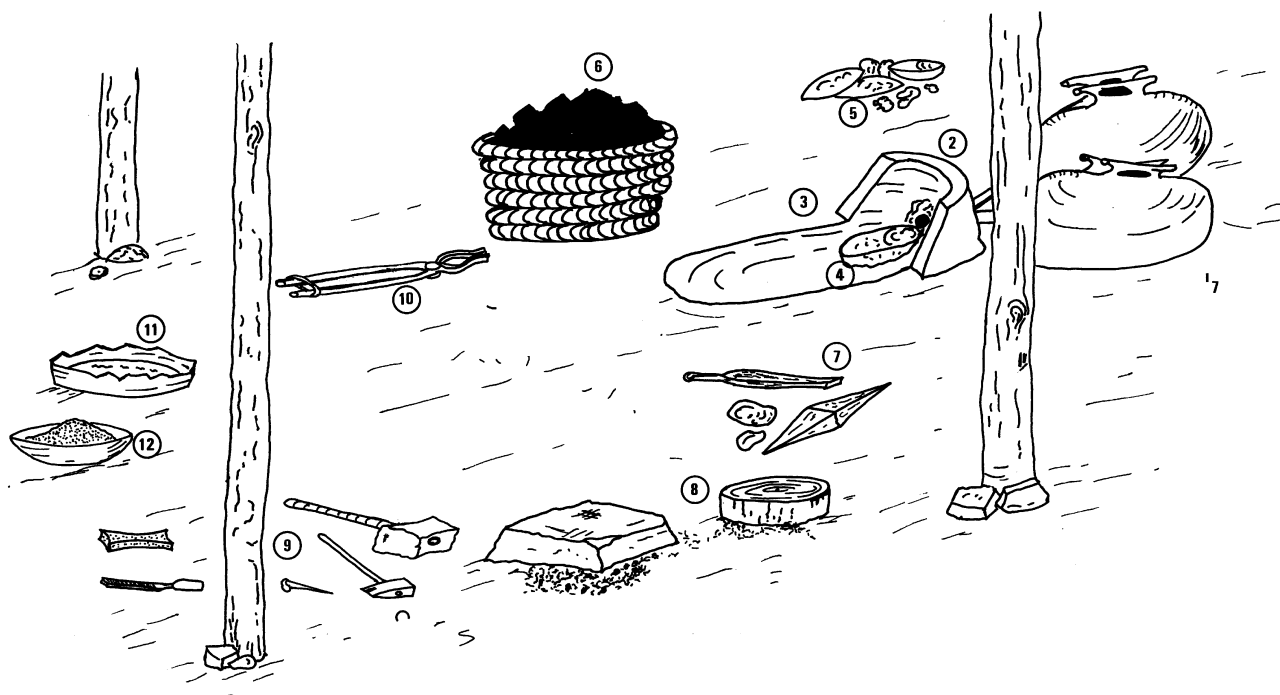


Fig. 20 — Schéma d'un foyer de forge et des structures annexes. Cette reconstitution graphique est basée sur diverses trouvailles archéologiques, principalement d'époque romaine, faites sur le territoire des Gaules.

1. Soufflets. 2. Muret de protection. 3. Foyer de forge. 4. Scorie en forme de calotte en place sous le trou de la soufflerie. 5. Dépotoir de scories. 6. Réserve de charbon. 7. Pièces de métal. 8. Enclume en pierre, billot en bois et battitures. 9. Outils : marteau, tranche, poinçon, lime, pierre à aiguiser. 10. Pinces. 11. Vase enterré, réemployé comme baquet de trempe. 12. Réserve de sable pour la soudure ou le polissage.

De nombreux traitements n'ont qu'un but esthétique : gravure, ciselure, repoussé, etc. Les traitements de surface peuvent aussi modifier la couleur du métal, par oxydation à chaud ou par attaque à l'aide d'acides. Cette dernière technique est particulièrement adaptée aux métaux ferreux car, en fonction de leur composition chimique, ils résistent de manière différente à l'action des acides. Les variations au sein de la pièce sont ainsi mises en évidence. Les célèbres aciers damassés européens sont constitués de barres de nature différente soudées ensemble puis déformées, souvent par torsion, afin d'engendrer un décor plus ou moins régulier. Le compactage d'une éponge de fer hétérogène provoque un effet similaire mais plus irrégulier.

Une technique spécifique de décoration fréquemment appliquée aux objets en fer est le damasquinage. Ce procédé consiste à incruster à la surface de la pièce de fer des fils de métaux non ferreux tels que l'or, l'argent ou les alliages à base de cuivre. La surface est ensuite polie de manière à mettre en évidence ces tracés colorés. Il est également possible de recouvrir le fer de feuilles métalliques (or, argent) ou en le trempant dans un bain de métal fondu (étain).

L'assemblage des parties en fer avec d'autres matériaux est aussi une part importante de la fabrication des objets. Les poignées et manches sont généralement réalisés en bois, os, corne ou cuir. Des pièces de fixation, bagues, colliers ou rivets sont souvent faites en métaux non ferreux, le plus souvent des alliages à base de cuivre.

Même des objets assez simples peuvent ainsi associer plusieurs matières différentes, par exemple, un couteau à lame de fer possédant un manche en os fixé avec des rivets de bronze. La réalisation de la lame en fer est le travail propre au forgeron mais dans bien des cas, c'est le même artisan qui, dans le même atelier, procède à la réalisation de tout l'objet. C'est même souvent lui qui réalise la gaine en cuir.

8 Les outils et les installations

Le travail du fer demande une installation assez complexe dont les divers éléments sont complémentaires (fig. 20). Ils ne sont isolés ici que pour faciliter la description. Le foyer et sa soufflerie sont associés intimement à l'enclume et au marteau. Les pinces sont indispensables. A cet équipement de base, s'ajoute une panoplie plus ou moins sophistiquée d'outils et d'installations supplémentaires. Enfin, il existe des productions spécifiques qui nécessitent des dispositifs particuliers (fil, chaîne, etc).

Le foyer est la pièce maîtresse de l'atelier (fig. 21 et 22). Pour effectuer certains travaux de forge, l'artisan a besoin de chauffer le métal à des températures supérieures à 1000°C. Pour cette raison, son foyer est équipé d'une soufflerie. Tous les types de soufflets à main peuvent être utilisés, en particulier pour le travail de petites pièces pour lesquelles il suffit d'obtenir une zone chaude de taille limitée. La force hydraulique a été mise en œuvre, en particulier pour les affineries et les ateliers traitant de grands

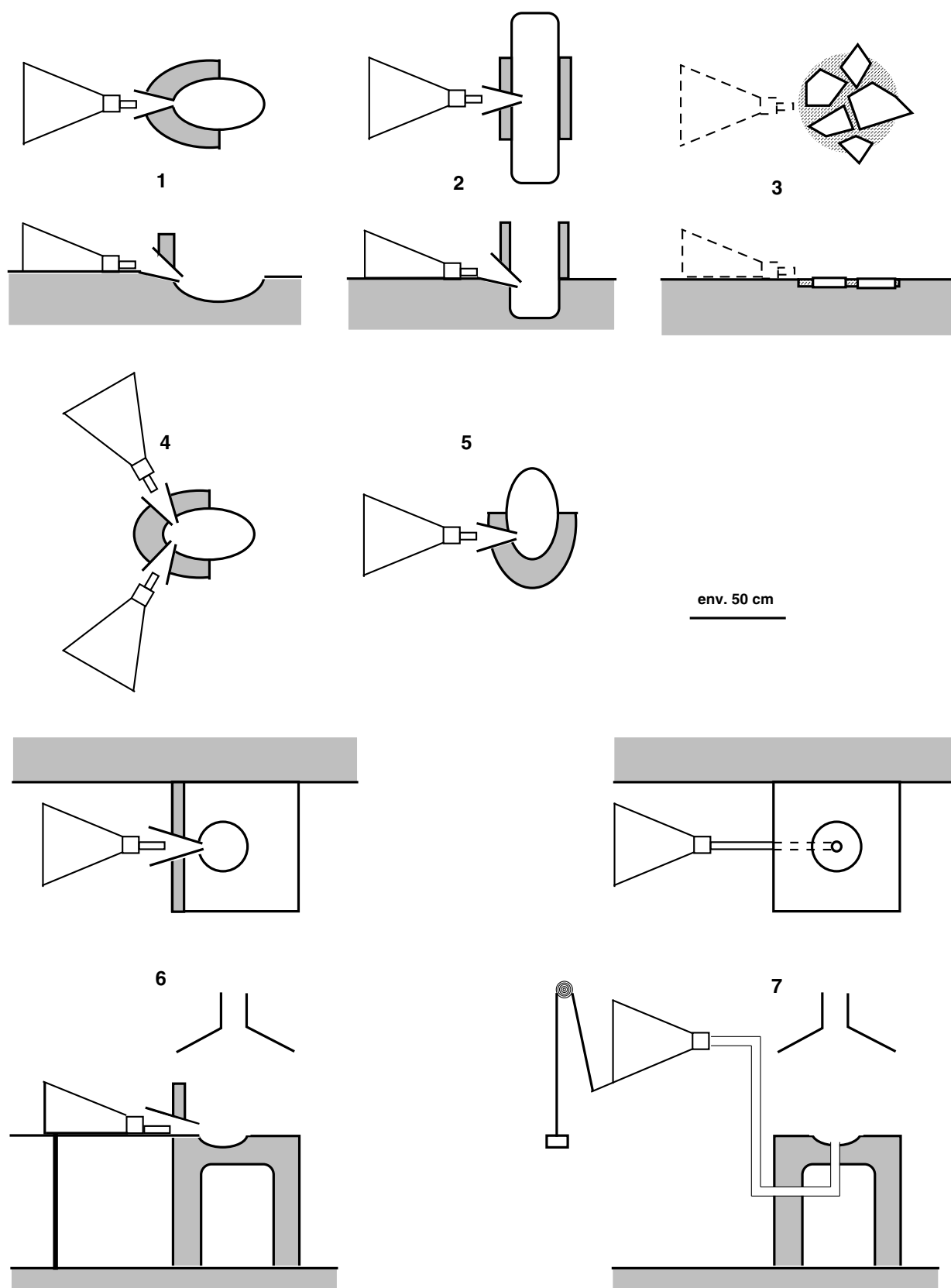


Fig. 21 — Schéma illustrant différents foyers pour le travail du métal.

1. Foyer creusé en cuvette avec soufflerie arrière. 2. Foyer creusé en fosse quadrangulaire avec soufflerie latérale. 3. Foyer plat posé sur le sol, avec ou sans soufflerie. 4. Foyer creusé en cuvette avec double soufflerie. 5. Foyer creusé en cuvette avec soufflerie latérale. 6. Foyer sur table avec soufflerie latérale (Moyen Âge - XIXe siècle). 7. Foyer sur table avec soufflerie verticale (contemporain).



Fig. 22 — Foyer de forge creusé en fosse quadrangulaire, époque romaine, Avenches / Derrière-la-Tour, Suisse. Fouille J. Morel. La position exacte de la soufflerie n'est pas démontrée (probablement à l'arrière). Devant le foyer se trouve une zone d'épandage de déchets et de charbons. Une scorie occupait le fond du foyer à l'arrière.

volumes de métal mais elle n'a jamais été généralisée pour les forges de village, même au XX^e siècle.

Le foyer de forge moderne est disposé sur un bâti, généralement en pierres, ayant la hauteur d'une table. Le fond est généralement constitué par une plaque de fonte recouverte d'une couche de sable qui isole les pierres de la construction. La tuyère est disposée verticalement au centre du foyer, l'air arrivant par le bas. Les fumées sont évacuées par une cheminée. Le foyer sur table est bien connu dans l'iconographie médiévale et les vestiges archéologiques contemporains confirment cette disposition (Chieze et Benoit 1990, Bailly-Maître 1995). La différence majeure avec le foyer moderne est la position horizontale de la soufflerie. A côté de ces installations fixes, on connaît aussi des forges portatives.

Pour les périodes plus anciennes, les fouilles archéologiques révèlent principalement des foyers posés sur le sol ou creusés dans celui-ci (Pigeau 1994, Rageth 1982, Serneels à paraître). Cependant, quelques représentations d'époque romaine indiquent que des foyers sur table ont également existé (monument funéraire de L. Cornelius Atimetus, Rome, Musée du Vatican, Gummerus 1913, n°12 et plaque funéraire de la catacombe Domitilla,

Musée du Latran, Gummerus 1913 n°15). Il faut remarquer que les sources iconographiques proviennent essentiellement du domaine méditerranéen alors que la plus grande partie des vestiges fouillés se trouvent au Nord des Alpes. Il est donc possible qu'à cette période, les deux types d'installations coexistent chronologiquement mais dans des domaines culturels différents. Les vestiges remontant à l'Age du Fer en Europe non méditerranéenne sont également des foyers bas ou creusés (Pernot et al 1993). L'iconographie de la Grèce classique dont l'interprétation reste discutée, témoignent d'installations au sol surmontées par une superstructure en forme de cheminée (Zimmer 1982, Oddy et Swaddling 1985).

L'utilisation de foyers au sol modifie profondément la position de l'artisan. Le forgeron actuel travaille debout alors que son homologue ancien est, au moins fréquemment, assis ou accroupi. Cette position peut paraître inconfortable à première vue. En fait, les forgerons africains et asiatiques travaillent aujourd'hui encore presque tous dans cette posture. C'est surtout pour le travail des grosses pièces que la position debout semble plus souhaitable.

Les foyers de forge anciens sont de simples fosses de combustion circulaires, oblongues ou quadrangulaires. Les dimensions varient de 25 à 100 cm environ et la profondeur est de 10 à 30 cm. Elles peuvent avoir un avant-foyer et un muret de protection, souvent rudimentaire, pour protéger les soufflets. Des superstructures plus complexes peuvent renforcer l'effet de réverbération de la chaleur. Le foyer possède une zone chaude, à proximité immédiate de la tuyère. Il sera donc caractérisé par une asymétrie de l'impact de chaleur et donc de la rubéfaction. La variété des formes de foyers reflète sans doute des traditions techniques mais peut être aussi des activités différentes. En particulier, les foyers circulaires en fosse sont relativement bien adaptés pour le travail des petites pièces. Au contraire, le travail de pièces allongées demande que l'on puisse déplacer ces objets longs dans le foyer rectangulaire. Les dimensions doivent, elles aussi, être adaptées à l'objet que l'on fabrique.

D'autres foyers sont simplement posés sur le sol et matérialisés par une aire fortement rubéfiée et indurée avec des aménagements simples du fond et des bordures avec des tuiles réemployées ou des blocs de pierre brute. A côté de foyers assez simples et souvent difficiles à distinguer des foyers domestiques, on trouve aussi des aires de chauffe aux contours imprécis couvrant parfois plusieurs mètres carrés. Pour ces foyers au sol, il est généralement plus difficile de mettre en évidence la position d'une soufflerie mais il faut souligner que tous les travaux métallurgiques ne demandent pas des températures très élevées et que des foyers sans soufflerie peuvent avoir une fonction métallurgique.

Plusieurs ateliers fouillés ont livré des groupes de foyers qui, d'après leurs formes, semblent avoir des fonctions différentes et qui pourraient être complémentaires (Autun, Lycée Militaire, Serneels à paraître; Rennes, Place Hoche). Ils peuvent intervenir soit à des étapes dif-

férentes de la production d'un même objet (par exemple : chauffe et recuit) ou bien ils servent à des productions variées (par exemple : grosses pièces et petites pièces).

Le martelage nécessite l'utilisation d'un support de frappe auquel on peut donner le nom générique d'enclume (fig. 23). Ce peut être un outil relativement petit et mobile. L'enclume peut également être une structure massive et installée à demeure. De manière générale, la masse du support de frappe doit être en relation avec celle de l'objet à travailler.

L'enclume peut être en pierre, en bois ou en métal. Elle est souvent composite. Toutes sortes d'enclumes en métal sont connues (bronze ou fer). On utilise des surfaces de frappe planes pour étirer et aplanir. Normalement, les arêtes de la table sont arrondies de manière à faciliter le fluage du métal. Les surfaces coniques permettent de travailler des pièces annulaires et de courber les tôles. La bigorne est adaptée au travail des pièces en creux, en particulier pour la chaudronnerie. Les enclumes en métal possèdent souvent une perforation, l'oeil, pour maintenir des pièces accessoires telles que tranchets, poinçons, mandrins, matrices, etc. Certaines enclumes possèdent une forme adaptée à la production d'un type d'objet particulier (cloutière, etc.).

Des pierres de toutes tailles, formes et natures ont été utilisées comme support de frappe. Leur identification passe par l'observation d'impacts thermiques et de traces de percussion ou de frottements sur les surfaces. Un simple billot de bois peut également servir de support de frappe. Il est alors aisé de lui donner une forme appropriée au travail à effectuer comme c'est fréquemment le cas en chaudronnerie.

L'enclume peut être posée sur le sol ou enfoncée dans celui-ci pour améliorer sa stabilité. C'est souvent le cas lorsque l'artisan travaille assis ou accroupi. Dans la forge moderne, l'enclume métallique est généralement fixée sur un billot de bois posé sur le sol. La masse de l'ensemble, qui se chiffre en centaines de kilos, assure par elle-même la stabilité. Pour le travail des grosses pièces ou bien lors de l'emploi d'un marteau hydraulique, il est nécessaire d'installer l'enclume sur une fondation renforcée à l'aide de pierres ou de poutres. Archéologiquement, outre les éventuels aménagements au sol, l'emplacement de l'enclume est marqué par la présence des battitures.

Le forgeron doit pouvoir déplacer le fer chaud depuis le foyer jusqu'à l'enclume et le maintenir fermement pendant qu'il le travaille. Les pinces ou tenailles sont donc un outil indispensable. Le marteau est le symbole du forgeron. Celui-ci dispose aussi de nombreux outils qu'il interpose entre le marteau et la pièce en cours de travail de manière à obtenir une percussion indirecte (tranchet, poinçon, plane, burin, ciseau, etc.). Il en existe de toutes tailles, emmanchés ou non. Le forgeron possède un baquet de trempe, récipient contenant de l'eau et qui se trouve à portée de main.

D'autres outils peuvent être utilisés également mais souvent dans le cadre de travaux plus spécifiques. Les

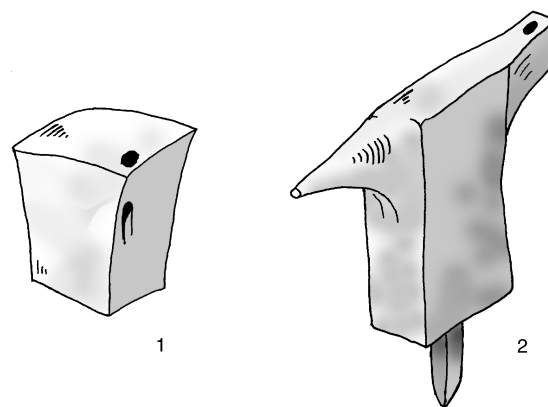


Fig. 23 — Schéma des deux types les plus fréquents d'enclume de forge romaine en fer : 1. Enclume quadrangulaire avec oeil. 2. Enclume avec bigorne.

limes et les pierres à aiguiser et polir sont caractéristiques des travaux de finition (fig. 24). Les cisailles interviennent dans le travail des tôles et des fils. Une filière, plaque de métal massive percée de trous coniques de section de plus en plus faible, sert à étirer des fils.

Pour certains travaux à froid, en particulier lorsqu'il s'agit d'enlever de la matière ou de découper, il est nécessaire de maintenir fermement l'objet. Dans la forge moderne, l'artisan dispose en général d'un étau à vis en métal fixé à un établi. Traditionnellement, on utilise des dispositifs de serrage en bois maintenus par des coins ou des cordes.

De nombreux outils pour le travail des métaux ont été retrouvés lors de fouilles archéologiques. Quelques découvertes ont livré des panoplies élargies, en particulier des tombes de forgerons «germaniques» comme la tombe 10 d'Hérouvillette en France (Decaëns 1971; Henning 1991), mais aussi des cachettes d'outils comme le coffre de Mästermyr en Suède (Arwidsson et Berg 1983). Bien souvent, des outils sont trouvés isolément (Duvauchelle 1990; Gaitzsch 1980; Manning 1976; 1985).

9 Les déchets du travail du métal et matériaux associés

Au cours du forgeage au sens large, de nombreuses circonstances provoquent la perte d'une certaine quantité de métal. Le métal chaud subit une oxydation superficielle au contact de l'air. Ce phénomène a une importance considérable puisque à chaque fois que le forgeron travaille le métal il en perd une partie. Cette perte peut difficilement être chiffrée. Aujourd'hui, on considère que la mise en forme d'une pièce normale à partir d'une barre de métal homogène ne doit pas entraîner une perte supérieure à 10 % de la masse. Travailler un métal hétérogène pour fabriquer un objet complexe doit mener à une perte beaucoup plus élevée. Quelques essais d'archéologie expérimentale fournissent des données (fig. 25). Ce fait a aussi une importance pour le recyclage du fer. Contrairement aux autres métaux qui peuvent être refondus un grand nombre

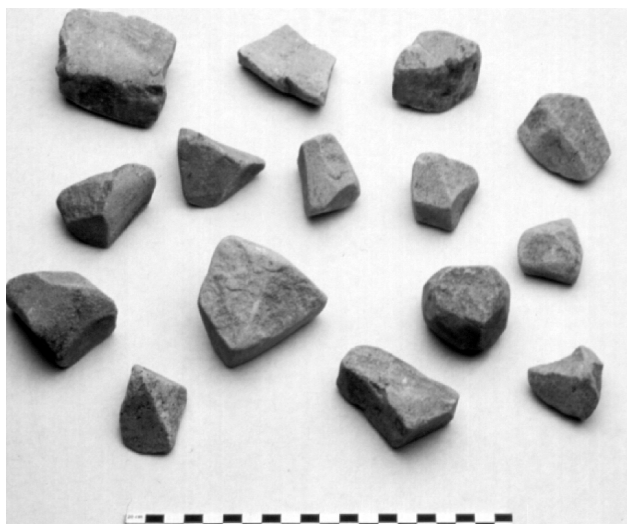


Fig. 24 — Groupe de polissoirs en grès grossier provenant d'un atelier de bronzier du quartier artisanal romain de Autun-Lycée Militaire, France (Chardon-Picault et Ducreux 1993). Des outils similaires ont également été découverts dans les ateliers de travail du fer du même site. Photo : H.N. Loose.

de fois avec une perte très faible, une part importante du fer est perdue chaque fois qu'il est reforgé.

Si les quantités de déchets sont généralement bien moins grandes que pour les vestiges de la réduction, la variété est plus importante et les études approfondies sont plus riches et diverses pour les forges (fig. 11). Les méthodes sont les mêmes : étude macroscopique, analyses chimiques, minéralogiques et métallographiques. La répartition spatiale des rejets par rapport aux structures et aux espaces de travail est plus significative et doit faire l'objet d'une grande attention. L'approche quantitative est importante tant globalement qu'à travers la quantification des différentes catégories de déchets. Enfin, les micro déchets présentent un intérêt particulier et des prélèvements de sédiment sont très utiles.

9.1 Les matières premières

La matière première métallique du forgeron peut être de nature variable. Selon le mode de commercialisation du fer, il arrivera sous forme de produit brut du bas fourneau, de blocs partiellement épurés ou de barres forgées. Normalement, cette matière première entre dans l'atelier pour y être transformée et il est donc rare de la retrouver en l'état.

Dans le cas des éponges de fer brut, on retrouvera les parties périphériques les moins riches qui seront rejetées par le forgeron au cours du travail d'épuration. Ce seront des pièces informes, généralement relativement petites et ayant subi une fragmentation, mélange de scorie et de métal (fig. 26). Ce métal garde des textures typiques de la réduction et ne montre pas d'écrasement important ni de traces de compactage. Dans certains cas, malgré tout, la pièce a pu subir une certaine quantité de déformation mécanique ou de chauffage qui peuvent laisser des indices dans la texture.

Si les barres complètes sont rares dans les ateliers, les fragments de barre, les chutes, sont nettement plus nombreux (Schaltenbrand-Obrecht 1996 pl.72-73, fig. 27). Dans certains cas, lorsque le forgeron confectionne un objet à partir d'une barre, il réserve une petite masse de métal qui lui permet de manipuler la pièce pendant le travail. Après avoir procédé à la mise en forme, il sectionne cet appendice.

Les forges livrent également des combustibles. Pour le travail du métal, on a longtemps utilisé le charbon de bois mais le coke et même la houille sont utilisables. Des fragments de charbon minéral ont été découverts sur des sites de forge d'époque romaine en Angleterre (Webster 1955). Les matériaux de construction du foyer sont souvent présents sous la forme de pierres brûlées ou d'argile scorifiée. La zone chaude de la forge est normalement assez restreinte et en général seule une petite partie de la paroi est réellement indurée, autour de l'arrivée d'air (fig. 28, Curdy *et al.* 1995). Dans certaines forges, on utilise de véritables tuyères (Rageth 1982).

Enfin, dans de nombreuses circonstances, le forgeron utilise des substances variées qu'il projette sur le métal pour éviter la formation d'une croûte d'oxydes de fer superficielle par contact à chaud entre le métal et l'air. Ces substances, appelées décapants ou fondants de soudure, se combinent avec les oxydes de fer pour former une fine pellicule de scorie liquide. Celle-ci, fragile sera ensuite cassée lors du martelage. Ces décapants sont particulièrement importants au moment de la soudure. Pour que celle-ci se réalise dans les meilleures conditions, il est impératif que les deux surfaces métalliques soient propres. Les oxydes doivent donc être enlevés. Une solution est de les fluidifier en formant une scorie à l'aide d'un décapant. Le film de liquide sera évacué sous l'effet de la compression lors du martelage. Traditionnellement, on utilise du sable siliceux. D'autres substances peuvent jouer un rôle comparable : argiles, cendres, etc.

9.2 Les déchets

Les matériaux argilo-sableux qui sont introduits dans le foyer, que ce soit des morceaux de paroi fondue, des décapants ou autres, participent d'une manière ou d'une autre à la formation de matériaux fondus, des scories au sens large. On trouve fréquemment des scories dont la composition est très riche en silice et alumine mais pauvre en fer. Ces scories argilo-sableuses possèdent généralement des surfaces de couleurs claires mollement ondulées. Leur taille va de quelques millimètres de diamètre à la dizaine de centimètres. La structure interne est généralement désordonnée et montre des reliques de matériaux incomplètement fondus. Elles ont des formes de goutte ou de rognon. Assez fréquemment, on observe la présence de morceaux de roche centimétriques dont les surfaces sont fortement modifiées par l'impact thermique. Ils peuvent être isolés ou pris dans un mélange ayant fondu. Ces grains de grande taille s'expliquent mal car ils ne peuvent pas faire partie des décapants et qu'en général, la couche

perte %	Raffinage 1 ^{re} phase		Raffinage 2 ^e phase		Forgeage 1 ^{re} phase		Forgeage 2 ^e phase	
	Eponge	Loupe	Barre courte	Barre longue	Lame			
1) xp24	1780	34%	830	40%	[500]	40%	[298]	
								83%
1) xp27	1700	49%	880	28%	630	18%	516	
								70%
1) xp28	2200	74%	800	44%	430	5%	[408]	
								82%
1) xp30	1950		68%		620	18%	508	
								74%
2)	4700	39%	2870	22%	2240			
								52%
3)	9000			52%			4300	
3)							40	23%
								31
4)					fer moderne		654	22%
								510
4)					fer moderne		643	27%
								470

Fig. 25 — Pertes en fer mesurées au cours de diverses reconstitutions expérimentales de travail du fer. Sources : 1) Crew 1991, 2) Dillmann et al. 1997, 3) Lyngstrøm 1995, 4) Pleiner 1993.

externe des parois de foyer est constituée de matériaux fins. On peut penser que ces cailloux ont été introduit dans le foyer avec le charbon de bois, qu'ils aient été mélangés à celui-ci au cours de sa fabrication ou pendant le stockage sur le sol de l'atelier.

Des scories beaucoup plus riches en fer sont les témoins privilégiés de l'activité de forge. A côté de nombreuses pièces informes, certaines présentent une forme caractéristique en calotte plus ou moins hémisphérique (Bartuska et Pleiner 1968, Westphalen 1989, Hauptmann et Mai 1989, Eschenlohr et Serneels 1991, Serneels 1993, fig. 29 et 30). La taille de ces pièces varie de moins de 5 cm à 30 cm de diamètre. L'épaisseur est généralement comprise entre 1 et 10 cm. Les poids s'échelonnent entre 100 gr et 2 kilos mais des pièces exceptionnelles peuvent atteindre 3 ou même 5 kg. Elles sont souvent légèrement elliptiques. La surface inférieure est toujours convexe et présente souvent des empreintes de charbon de bois, de petits cailloux ou d'argile. Elle est le plus souvent régulière et relativement peu rouillée. La surface supérieure est plane, convexe ou concave. Elle possède fréquemment un bourrelet excentré et tangent au bord, souvent dans l'axe de l'allongement de la pièce si celle-ci est elliptique. Ce bourrelet possède des surfaces claires, parfois vitreuses et mollement ondulées. Des éléments de matériaux argilo-sableux et des morceaux de roche incomplètement fondus y sont souvent inclus. La zone périphérique est d'aspect variable avec souvent un développement assez abondant de rouille et un relief plus acéré.

Latéralement, il n'est pas rare d'observer la présence d'un placage argileux qui marque l'endroit où la scorie touche la paroi du foyer.

La structure interne, observable sur une coupe est assez variable. Elle montre presque systématiquement une structure de refroidissement radiaire matérialisée par

l'orientation des cristaux et des bulles. La présence de fer à l'état métallique, en nodules, en gouttelettes ou en filaments est fréquente mais leur disposition est très irrégulière. Certaines pièces peuvent être très riches en métal visible (30 ou 40 % du volume). En coupe, le bourrelet supérieur, s'il est présent, possède une teinte claire et montre des matériaux partiellement fondus. Dans la partie centrale, la teinte de la matrice est variable, d'un gris sombre presque noir à un gris clair jaunâtre. Cette teinte est en bonne partie liée à la

proportion de fayalite jaunâtre par rapport à la wüstite gris sombre. Certaines pièces possèdent une structure nettement stratifiée avec des couches millimétriques ou centimétriques de nature contrastée. D'autres sont beaucoup plus homogènes. Parfois, on observe sur un bord de la pièce, un placage argileux cuit et parfois partiellement fondu.

Ces pièces se forment par accumulation de divers matériaux plus ou moins fondus dans le fond du foyer de forge, sous l'orifice de la soufflerie. Elles peuvent se déposer sur le fond du foyer mais souvent elles se solidifient dans les charbons dans une zone qui est simplement un peu plus froide. Lorsque le feu est arrêté, la scorie se refroidit. Si l'opération est relancée, le refroidissement marquera clairement une stratification. Des calottes doubles de ce type ont été découvertes. Un processus de séparation gravifique à l'intérieur du liquide peut être envisagé pour expliquer la formation d'une stratification

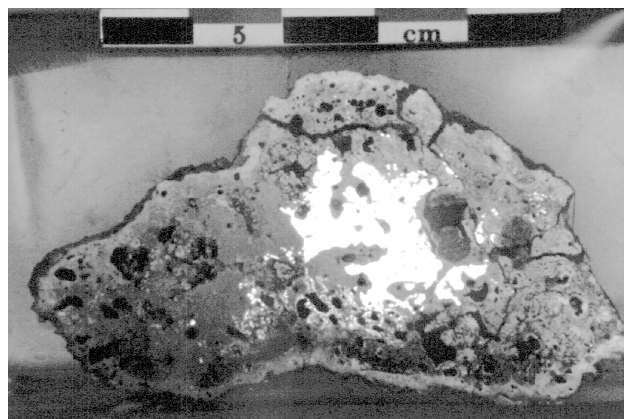


Fig 26 — Coupe dans un fragment d'éponge pauvre en fer (IXe-XIe siècles ap. J.C., Liestal-Röserental, BL, Suisse). Le métal apparaît en blanc, la scorie en gris.

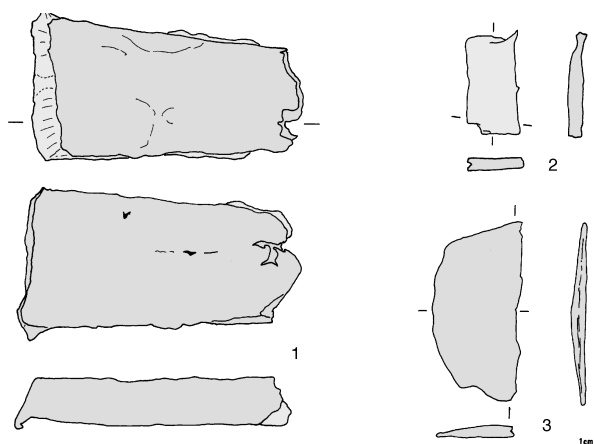


Fig. 27 — Objets en fer associés au travail de la forge provenant du village de sidérurgistes carolingiens de Liestal-Röserntal, BL, Suisse (Serneels 1995b). 1. Chute : extrémité découpée d'une grande barre, poids : 840g (MZF 801). 2. Chute : extrémité découpée d'une petite barre repliée sur elle-même (structure interne en sandwich : Acier 1/soudure/-Acier 2/soudure/-Acier 1, le tout trempé), poids : 40g (MZF 802). 3. Ebauche : demi-disque replié sur lui-même (structure interne en sandwich : Fer-Acier/soudure/-Acier-Fer), poids : 75g (MZF 818).

interne mais peu d'observations supportent cette hypothèse. On peut aussi penser qu'une évolution au cours du cycle de travail, mise en forme puis finition, mène au développement d'une structure ordonnée.

Divers matériaux concourent à la formation des scories en forme de calotte (Mc Donnel 1991, Serneels 1995c, fig. 31). Des particules métalliques peuvent se détacher de la pièce en cours de travail et tomber dans le foyer. Elles peuvent également être détachées par martelage sur l'enclume et tomber accidentellement dans le foyer. La croûte d'oxydes de fer, résultant de l'oxydation à chaud du métal, peut se détacher dans le foyer ou au moment du battage sur l'enclume. Elle peut aussi être liquéfiée par les décapants. Les matériaux constitutifs de la paroi entrent en fusion localement et fournissent une certaine contribution à la scorie. Enfin, diverses substances peuvent être introduites par accident dans le foyer, en fonction des activités menées dans l'atelier. Une source de contamination supplémentaire est la cendre du combustible. Enfin, en chargeant le combustible, on peut aussi introduire des cailloux et autres impuretés dans le foyer.

Un cas particulier est celui du travail de l'éponge de fer brut. La masse métallique travaillée contient dans ce cas une importante proportion de scorie de réduction. Au cours du raffinage, cette scorie sera en partie refondue dans le foyer et alimentera la scorie en calotte.

Les observations microscopiques des scories en forme de calotte permettent d'identifier des battitures ou des pièces de métal travaillées ou non et donc de déduire nombre d'informations sur les travaux de forge en cours (Dunikowski *et al.* à paraître). De même, les analyses de composition permettent de repérer la présence d'éléments chimiques provenant du minerai par l'intermédiaire de la

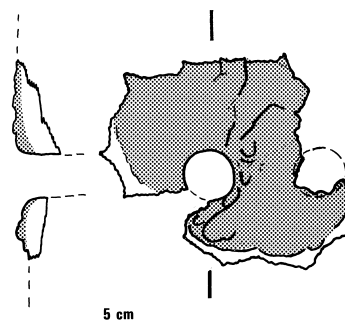


Fig. 28 — Fragment de paroi de foyer de forge avec deux orifices circulaires pour la ventilation, Age du Fer, Yverdon / Parc Piguet, VD, Suisse (Curdy *et al.* 1995).

scorie de réduction dans le cas du raffinage. La présence de métaux non ferreux est aussi un argument pour mieux comprendre l'activité de l'atelier (Serneels 1994).

En règle générale donc, la scorie en calotte, par son volume, son aspect, sa structure interne et sa composition chimique, reflète les activités pratiquées et les matières utilisées. Il s'agit donc d'un témoin privilégié potentiellement riche en informations très diverses. Dans l'état actuel des connaissances, le décryptage de ces informations demeure incomplet. Des études récentes ont permis d'obtenir des résultats encourageants (Serneels 1995b).

Sur quelques ateliers de forge, on note la présence de fragments de scories coulées. Si celles-ci sont très abondantes et volumineuses, elles témoignent probablement d'activités de réduction du minerai sur le même site. En général cependant, il ne s'agit que de petites pièces constituées d'un unique cordon et leur nombre est très faible. Dans ce cas, ces déchets particuliers peuvent provenir du nettoyage à froid d'éponges de fer brut apportées sur le site. On peut aussi envisager que, dans le foyer de forge lui-même, la température soit suffisante pour provoquer un écoulement de scorie relativement petit. Des scories en forme de calotte portant un appendice en forme de coulure sont connues.

Dans un tel cas, l'étude minéralogique et chimique peut fournir des éléments d'interprétation mais les observations archéologiques concernant le contexte de découverte et les autres catégories de déchets métallurgiques seront tout aussi déterminantes.

Bien souvent, les scories subissent une forte fragmentation et, si l'aspect permet de distinguer entre matériaux argilo-sableux clairs et fayalitiques sombres, il faut se résigner à verser une bonne partie du matériel dans la catégorie des « scories informes ».

Les battitures forment une autre catégorie de déchets très typique du travail du métal. Au sens propre, le terme désigne les petits fragments de la fine pellicule d'oxydes qui se forme au contact entre le métal chaud et l'air (Allen 1986, fig. 32). Ces oxydes sont brisés lors du martelage sur l'enclume. Les battitures obtenues par le martelage d'un métal épuré sont généralement de fines plaquettes

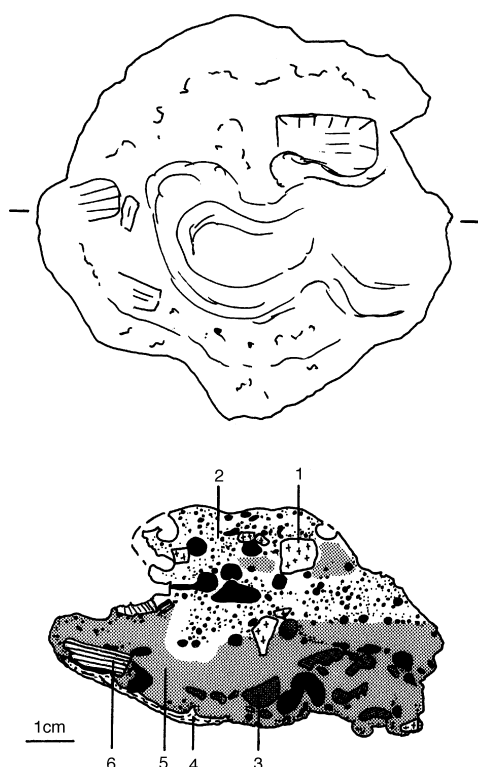


Fig. 29 — Petite scorie en forme de calotte stratifiée (380 g), époque romaine, Avenches VD, Suisse.

1. Morceau de roche silicatée non fondu, anguleux. 2. Zone d'aspect vitreux constituée de domaines centimétriques aux contours flous et de couleur variable. 3. Globule sombre correspondant à des masses de wüstite, probablement des battitures partiellement dissoutes. 4. Placage argilo-sableux riche en oxydes de fer correspondant probablement au fond du foyer. 5. Zone cristallisée gris jaunâtre constituée principalement de cristaux de fayalite. 6. Charbon de bois.

dont la taille est fonction de la température de travail et de la force des coups de marteau. Dans bien des cas, les surfaces des battitures sont moins régulières et forment des ondulations. Ces reliefs témoignent d'une fusion partielle à la surface du métal, ce qui est grandement facilité par la présence de silice. Les battitures irrégulières se forment donc plus volontiers avec du métal riche en inclusions de scorie ou recouvert de décapant. Dans les cas extrêmes, les particules de liquide qui sont éjectées du métal par le compactage forment des billes au cours de leur trajet dans l'air. En arrivant au sol, froides, elles garderont cette forme sphérique et chaudes, elles s'étaleront mollement.

Les battitures sont principalement composées d'oxydes de fer, magnétite et wüstite, et parfois de silicates de fer et de verre. Elles sont normalement gris sombre et ne se couvrent pas de rouille. Elles sont fortement magnétiques. Normalement, les battitures s'accumulent à proximité immédiate de l'enclume et se conservent dans tous les recoins que l'on ne nettoie pas. Par contre, sur le sol même de l'atelier, dans les zones de passage régulièrement piétinées, elles sont rapidement détruites car elles sont très fragiles. Elles contribuent alors à imprégner le sédiment du sol avec du fer.

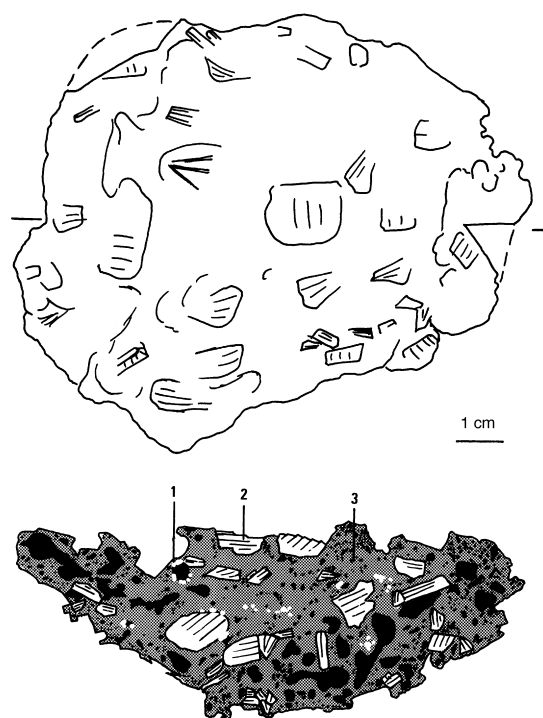


Fig. 30 — Scorie en forme de calotte homogène (450 g), époque romaine, Marsens FR, Suisse.

1. Filament et billes microscopiques de métal. 2. Charbon de bois. 3. Zone cristallisée gris très sombre constituée de fayalite et de wüstite.

A côté des battitures au sens propre, le forgeage provoque la formation de très nombreux déchets de petite taille, souvent acquise par fracturation. Dans le sédiment, outre les battitures, on trouvera des petites particules de métal plus ou moins oxydées, des petits fragments de matériaux argilo-sableux cuits ou fondus et de scorie. Il est bien difficile de préciser à chaque fois le processus de formation de ces déchets qui jusqu'à maintenant n'ont pas fait l'objet de beaucoup de recherches. Un autre cas particulier est constitué par la limaille de fer produite par les opérations d'abrasion du métal (polissage, affûtage). La conservation de ces particules métalliques très fines est pratiquement impossible mais les sols imprégnés par ces déchets seront extrêmement riches en oxydes de fer et probablement indurés en conséquence.

9.3 Les produits

Comme pour la matière première métallique, il est relativement rare et anormal de trouver un stock de produits finis dans un atelier. Les objets fabriqués sont normalement utilisés ailleurs que dans la forge. Le spectre d'objets en métal que peuvent livrer les ateliers est assez vaste. Les outils de travail du métal ont été décrits plus haut. A côté des chutes de barre, d'autres types de chutes peuvent être rencontrés, en particulier des fragments de tôle découpée. On peut aussi s'attendre à la découverte de pièces en cours de fabrication. La plupart des objets sont mis en forme par étapes successives et on désigne les produits intermédiaires par le terme d'ébauche. Par contre, un

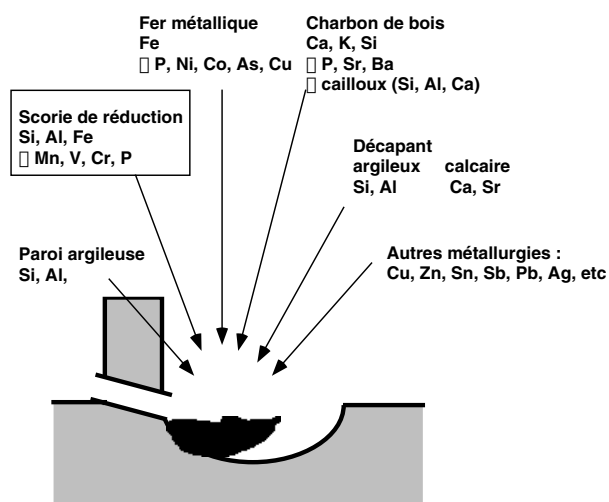


Fig. 31 : Schéma illustrant la formation des scories en forme de calotte : Différentes sources fournissent de la matière qui est incorporée dans la scorie en forme de calotte au cours du travail du métal. La composition chimique de la calotte sera le reflet de l'importance relative des différentes contributions. Lors du raffinage, l'éponge de fer impure apporte de la scorie de réduction contenant des éléments chimiques typiques du minerai mais difficilement réductibles dans les conditions du bas fourneau, tels que Mn, V, Cr ou P. Ces éléments ne sont normalement pas présents dans les scories de forgeage du fer épuré.

raté est une pièce dont la fabrication a été abandonnée en raison d'un défaut technique. On trouve aussi des déchets de métal informes qui ont été mis au rebut principalement à cause d'un traitement thermique raté. Le carbone qui se trouve dans l'acier, s'il subit un chauffage trop fort dans une atmosphère trop oxydante, pourra entrer en combustion, c'est-à-dire brûler. Le métal perdra toute sa cohésion et deviendra impossible à travailler. Pour finir, le forgeron a aussi souvent l'habitude de collecter systématiquement le vieux fer et de le stocker pour une réutilisation éventuelle (Conin *et al.* 1995).

C'est sur les sites d'utilisation que l'on retrouvera les produits en fer, parfois en quantités très importantes. Les problématiques qui entourent les objets en fer sont trop vastes pour être traitées dans le cadre de ce travail mais il faut souligner que dans la perspective de l'étude de l'industrie du fer, les objets finis doivent évidemment être pris en compte.

Les objets en fer ont fait l'objet d'innombrables études. En général, elles privilégient une approche typologique visant à établir une classification. Bien souvent la démarche est élargie pour étudier la fonction de ces objets (Gaitzsch 1980, Manning 1976 et 1985). Il est plus rare que les thématiques quantitatives, comme l'estimation du volume de métal mis en œuvre sur un site ou pour mener à bien une activité précise, soient abordées. Ce domaine reste à étudier.

A côté des objets fonctionnels, il existe une catégorie de pièces qui présentent un intérêt particulier, les lingots. Le terme même prête à confusion et il recouvre ici tous les objets en fer qui sont destinés au stockage, au transport et

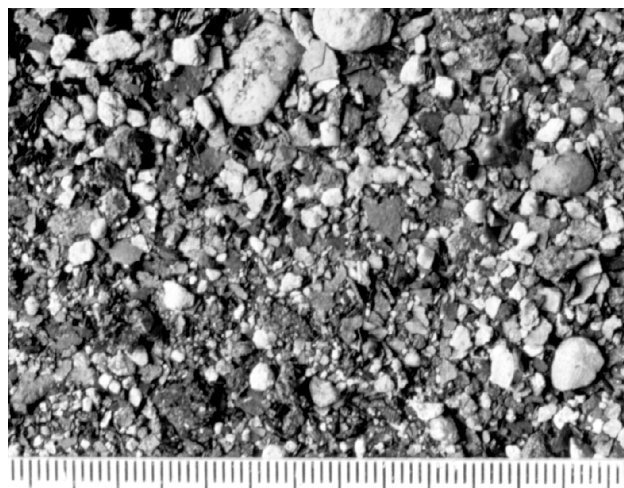


Fig. 32 : Prélèvement de sédiment effectué à proximité immédiate d'une enclume en pierre dans un atelier de forge (époque romaine, Autun / Lycée Militaire, France). Les battitures apparaissent sous forme de lamelles très fines de quelques millimètres de long. Le sédiment contient de nombreux petits fragments de scorie et d'argile cuite ainsi que des charbons.

à la commercialisation. Ces fonctions n'impliquent pas de forme particulière mais en général, on donne aux lingots un aspect qui permet aux consommateurs de les reconnaître et de les identifier. De très nombreuses formes de lingots en fer ont été produites (fig. 33). En Europe occidentale, on connaît principalement les lingots en forme de barre aplatie dont une extrémité est travaillée. Ces objets sont nombreux dans les contextes de la fin de l'Age du Fer et du début de l'époque romaine, surtout en Angleterre, alors qu'elles sont plus rares sur le continent (Crew 1994). Un autre type de lingot bien connu, les «Spitzbarren», possède la forme caractéristique d'une double pyramide. Ils sont fréquents dans les contextes de l'Age du Fer le long du Rhin supérieur et du Danube mais on en trouve dans une bonne partie de l'Europe (Doswald 1994). De nombreuses barres dont la forme est moins caractéristique ont été découvertes, mais leur interprétation reste très difficile. Il faut souligner que, dans l'état actuel des connaissances, les formes commerciales du fer à l'époque romaine sont encore très mal connues. Plusieurs sites de cette époque ont livré des barres de section quadrangulaire ou carrée (Durman à paraître, Feugère *et al.* 1995, Manning 1985 pl.I). D'autres formes ont été identifiées en Scandinavie et en Europe orientale (Müller-Wille 1983).

10 Les ateliers de forge

L'atelier de forge est un espace organisé que diverses installations structurent (Light et Unglick 1984, Serneels à paraître, fig. 20 et 34). Le forgeron doit avoir accès au foyer et à sa soufflerie à moins qu'un aide n'active celle-ci. L'enclume doit être à portée de main de même que le baquet de trempe. Les outils doivent également être faci-

lement accessibles. Ces éléments tiennent sur 10 ou 15 mètres carrés et permettent à l'artisan d'exercer son art. Pour être à l'abri des rigueurs du climat, le forgeron préfère travailler à l'intérieur. Une certaine pénombre peut même l'aider à apprécier la couleur du métal et donc sa température. Mais au fond, rien ne s'oppose au fait qu'il travaille sous un simple auvent, dans une cour ou même à l'extérieur et l'ethnographie aussi bien que l'archéologie en fournissent des exemples.

Bien souvent, il faut des espaces annexes. La réserve de combustible sera volontiers, mais pas toujours, placée dans une pièce voisine pour éviter les risques d'incendie. Un établi, divers supports de frappe, un foyer de recuit à basse température, des stockages pour la matière première et les objets finis, un bac de polissage ou une meule complètent un atelier normal.

Les travaux de finition employant des matières non métalliques demandent elles aussi des espaces de travail et de stockage. Enfin, les métaux non ferreux sont fréquemment associés au fer et peuvent bénéficier d'installations particulières (Senn-Luder in Ebnöther 1995).

L'artisan nettoie son espace de travail et rejette à l'extérieur tous les déchets encombrants qu'il ne peut réutiliser. Par contre, dans les recoins difficilement accessibles, les résidus les plus petits vont s'accumuler, souvent à proximité immédiate de l'endroit où ils ont été produits. Le dépotoir externe ou le premier trou venu que l'on aura besoin de reboucher, sera comblé avec les débris de la forge voisine et ce seront d'abord les pièces les plus volumineuses et les plus faciles à collecter qui seront évacuées. Un homme seul suffit à la besogne. Un apprenti ou un ouvrier l'aide, si nécessaire.

La forge classique telle qu'elle vient d'être décrite n'est cependant pas la seule forme d'organisation du travail du fer. En parallèle, des ateliers spécialisés existent, destinés à abriter un travail ou une gamme de travaux restreinte. Cette situation est certainement fréquente au Moyen Âge et aux époques plus récentes. Les artisans pratiquant l'une ou l'autre activité portent des noms différents : armurier, chaînetier, cloutier, maréchal-ferrant, serrurier, taillandier et bien d'autres. A l'intérieur de chacun de ces métiers, combien de spécialités ! L'atelier qui produit des plaques d'armures et celui où l'on assemble des cottes de mailles ne peuvent être organisés de la même manière. Certains travaux peuvent de plus réclamer une main d'œuvre beaucoup plus abondante.

Il est relativement difficile de fixer l'origine de cette spécialisation. Elle pourrait déjà bien être présente à l'époque romaine mais difficilement perceptible pour les périodes plus anciennes à travers les seules sources archéologiques actuellement disponibles.

A l'opposé, certains ateliers peuvent regrouper de nombreux travailleurs oeuvrant en parallèle ou selon une division technique du travail. L'atelier devient alors usine.

11 Fonction économique des forges

Si les conditions naturelles, comme les ressources en minerai et en combustible, influent considérablement sur la localisation des ateliers de réduction, il n'en va pas de même des forges. Celles-ci sont installées là où l'on a besoin d'elles, c'est-à-dire au contact avec les consommateurs. D'innombrables habitats livrent des traces de travail du fer. Parmi eux, on trouve toutes sortes de sites, de la ferme isolée à la grande ville en passant par les grands domaines ruraux et les villages. Mais on trouve aussi ces activités dans le cadre de sites spécialisés : mines, carrières, relais routiers, sites militaires et politiques, etc.

La constatation banale de la présence de scories de forge sur un site archéologique masque donc de profondes différences entre les ateliers. Ce ne sont pas tant les différences technologiques qui importent même si celles-ci peuvent être majeures. Les véritables questions se posent en terme de compréhension du rôle économique de ces forges.

Deux modèles s'opposent. Il y a d'un côté, l'atelier d'entretien et de réparation. A partir du moment où un certain stock de métal est régulièrement utilisé, des tâches d'entretien sont inévitables. Cette besogne peut être gérée au niveau domestique par les particuliers à condition de ne pas demander un niveau technique important : redresser un clou, affûter un tranchant et peut-être plus. Pour les interventions d'un niveau technique un peu plus complexe, la communauté s'en remettra volontiers à une personne ayant acquis un savoir-faire plus important : forgeage à chaud, soudure, trempe, etc. Ce personnage peut être simplement le plus doué de son groupe ou bien un véritable professionnel qui consacre tout son temps à ses activités artisanales. On voit alors apparaître un atelier fixe, structuré et durable. En même temps, dans ce registre de l'entretien et de la réparation la gamme d'activité doit rester très large. L'atelier sera donc polyvalent. Très souvent, tous les métaux seront traités et des matières non métalliques également. Typiquement, les installations seront simples et les déchets très variés. Les volumes restent limités.

A l'opposé de ce modèle, se trouve la production de masse d'une gamme d'objets très limitée pour la commercialisation. Les artisans sont certainement des professionnels qui vivent de leur travail. Le niveau technique n'est pas forcément élevé puisque cela concerne aussi bien la production des clous que celle des armures décorées. Les installations, outils et structures, seront particulières, adaptées à la production et les déchets seront standardisés. Le volume des déchets dépend du type d'activité et de son importance.

Ces deux modèles sont les plus simples que l'on puisse imaginer. Ils s'opposent par leurs fonctions économiques. Le second est un atelier productif alors que le premier témoigne plutôt de la consommation du métal. Bien sûr, l'éventail des situations réelles est bien plus varié

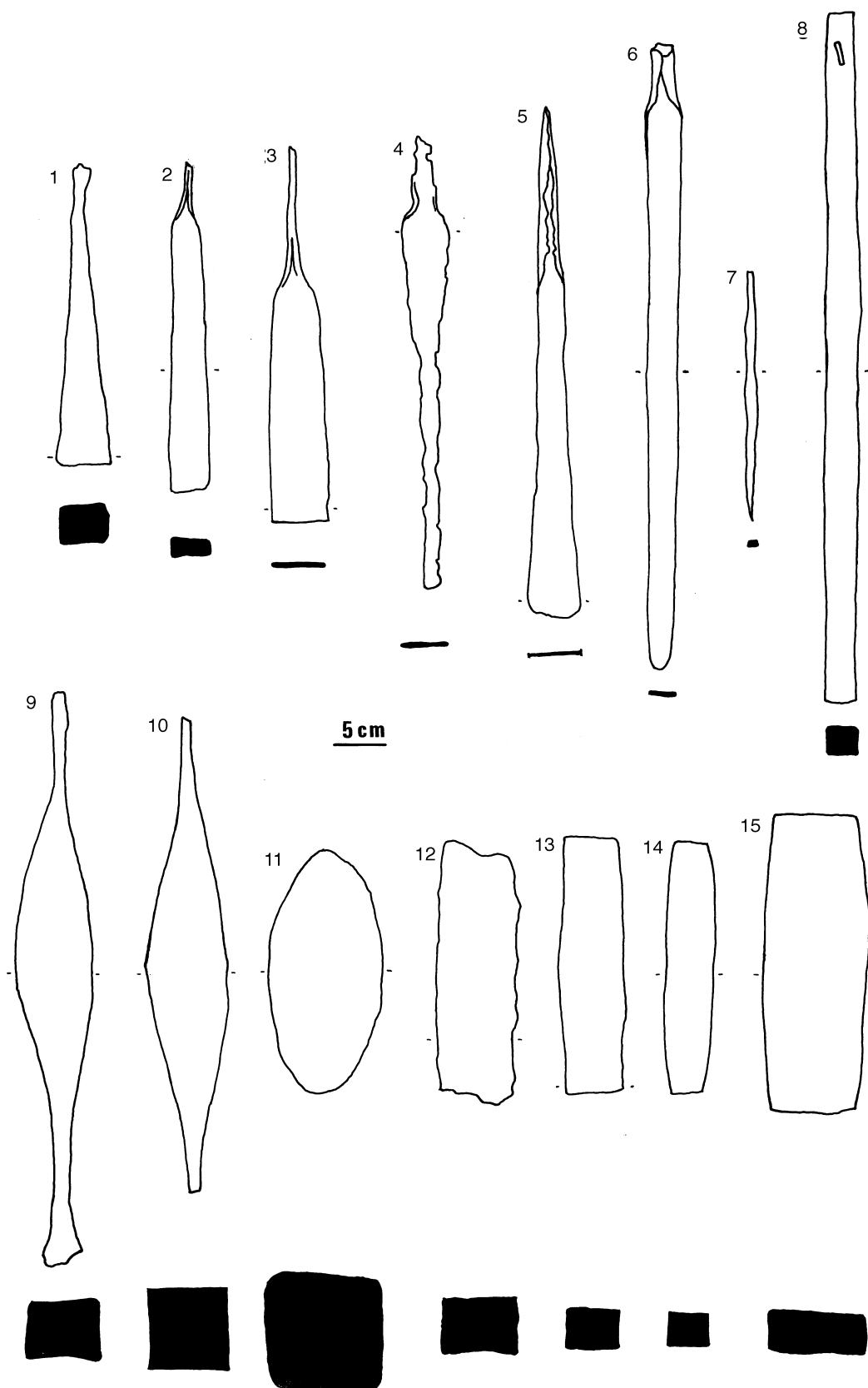


Fig. 33 : Divers lingots de fer d'Europe occidentale (Age du Fer et époque romaine). 1. Berne-Tiefenau, Suisse, Müller 1990 : 1128g, AdF. 2. Berne-Tiefenau, Suisse, Müller 1990 : 850g, AdF. 3. Oberursel-Oberteden, Heidetränk-Oppidum, Allemagne, Müller-Karpe 1977 : AdF. 4. Münster, Allemagne, Wilhelmi 1977 : AdF ? 5. Eprave, Wérimont, Belgique, Mariën 1970 : 260g, AdF. 6. Danebury / Hod Hill type, Grande-Bretagne, Crew 1994, Allen 1967 : 450-700g, AdF. 7. Entrains-sur-Nohain, France, Devaues 1971 : Rom. 8. Saintes-Maries-de-la Mer, France, Feugère *et al.* 1995 : env. 12 livres $\pm$ 3900g, Rom. 9. Königshofen, Aubstadt, Allemagne, Kleemann 1966 : 3970 g, AdF ? 10. Schwadernau, Suisse, von Kaenel 1981 : 6400g, Rom ? 11. Laufenburg, Baden, Allemagne, Rothkegel 1994 : Rom. 12. Cáceres el Viejo, Espagne, Ulbert 1984 : env. 4600g, Rom. 13. Hrvatsa Dubica, Croatie, Durman 1997 : env. 15 livres $\pm$ 4900 g, Rom ? 14. Saintes-Maries-de-la Mer, France, Feugère *et al.* 1995 : env. 6 livres $\pm$ 1950g, Rom. 15. Saintes-Maries-de-la Mer, France, Feugère *et al.* 1995 : env. 18 livres $\pm$ 5900g, Rom.

mais ces modèles sont en quelque sorte les deux extrêmes du spectre.

Dans un atelier réel, on peut bien sûr à la fois réparer le mobilier métallique du voisinage, fabriquer à la demande des pièces de meubles pour le menuisier d'à côté et consacrer le reste de son temps à la production de fibules vendues au marché hebdomadaire. La description d'une telle situation, sur la seule base des vestiges archéologiques sera évidemment très difficile à établir mais lorsque l'activité est clairement orientée vers un pôle, l'étude de l'assemblage des déchets et des installations permet au moins de formuler une hypothèse.

A ce point de vue, il est intéressant de passer en revue quelques cas particuliers et leurs implications. On trouve des forges d'entretien et réparation au service des communautés agricoles (forge de *villa* romaine, forge de village médiéval) mais aussi en milieu urbain. Dans ce second cas, l'existence d'un marché plus étendu encouragera les artisans à compléter leur activité par des productions commercialisables. Des ateliers métallurgiques sont aussi liés aux établissements militaires et aux troupes en campagne. Ils doivent faire face à tous les problèmes de maintenance mais aussi faire preuve d'une efficacité technique particulière compte tenu de l'importance, parfois vitale, que revêtent les armes qu'ils produisent et entretiennent.

On trouve des ateliers remplissant des fonctions similaires mais associées à des sites spécialisés. Un exemple caractéristique est fourni par les mines et les carrières. L'extraction de la pierre et le creusement des mines à l'aide d'outils en fer est la règle générale depuis l'Âge du Fer jusqu'à l'introduction de la poudre. Ces outils subissent une usure rapide et demandent donc un entretien régulier. La forge n'est pas l'élément productif du site mais contribue au fonctionnement global. Les travaux à effectuer sont d'un niveau technique relativement élevé puisque les outils d'extraction doivent être efficaces. L'activité de la forge est continue et spécialisée.

La construction monumentale en pierre est dans une situation relativement similaire. Il faut entretenir l'outillage régulièrement, surtout lorsque les chantiers perdurent pendant des décennies. En parallèle, il faut aussi fournir des pièces de métal destinées à la construction elle-même. La construction en bois cloué peut aussi engendrer une consommation d'objets en fer très importante.

Dans le domaine des transports, le long des axes routiers, des forges vont se spécialiser dans le service aux voyageurs avec l'entretien des voitures et, surtout à partir du Moyen Âge le ferrage des chevaux.

Une situation un peu différente se présente lorsque la métallurgie est associée à une autre production. C'est le cas dans les domaines de la construction navale et dans la charronnerie, par exemple. Sans être le matériau principal et d'ailleurs sans être indispensable, le fer a, dans certains contextes socio-économiques, été utilisé sur une grande échelle pour construire des bateaux ou des voitures. Si les pièces standardisées comme les clous peuvent être achetées à l'extérieur, diverses pièces métalliques doivent être

adaptées directement et montées sur place. D'autres fabrications associent le fer et des matériaux comme le bois et le cuir. L'espace de travail du métal apparaîtra associé à un établissement de plus grande envergure où sont traitées les autres matières. C'est souvent une métallurgie assez rudimentaire, tournée surtout vers la fabrication de pièces d'assemblage.

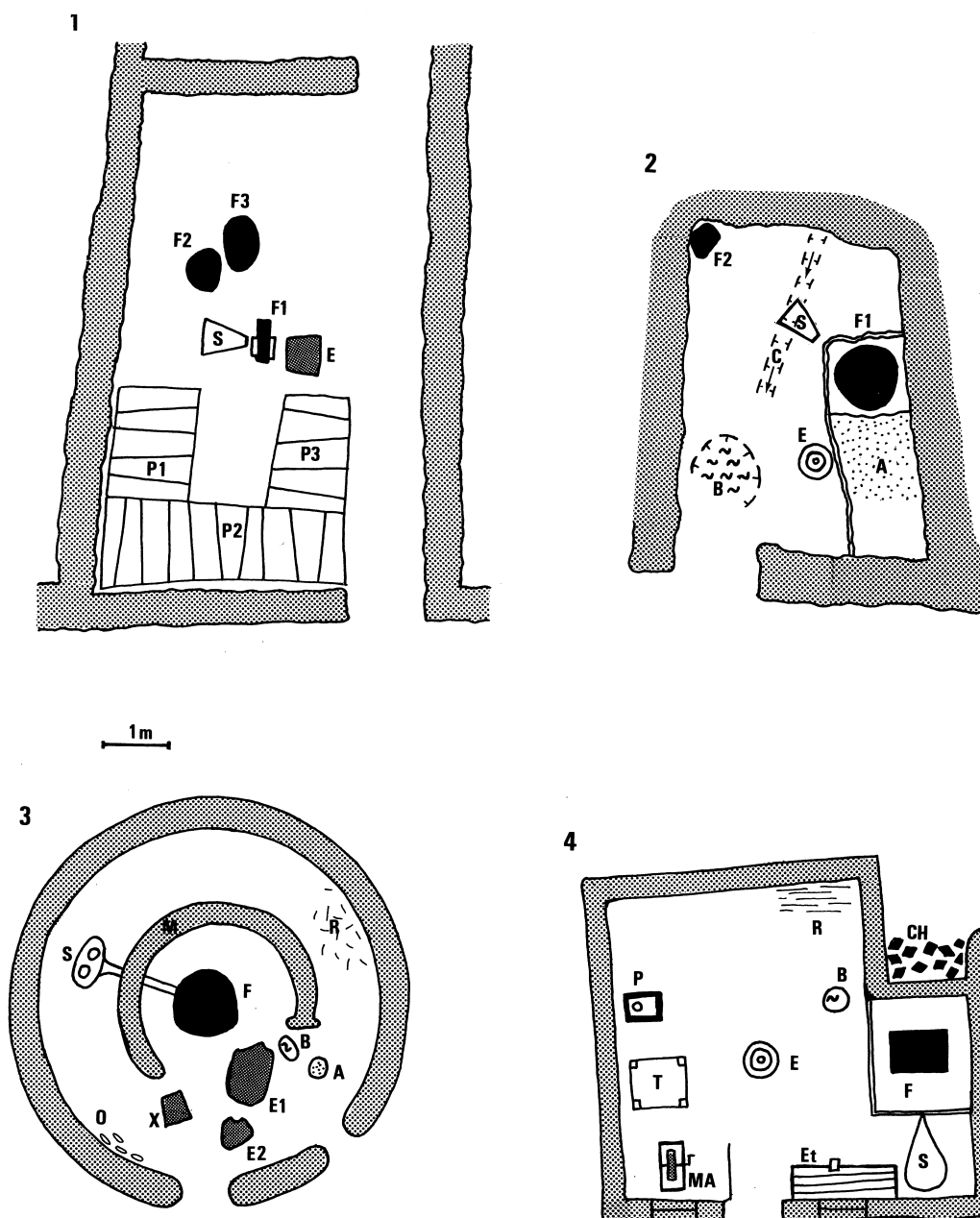
Dans le domaine des forges productives, il existe une vaste gamme de possibilité. Un atelier peut être spécialisé à l'extrême et ne fournir qu'une pièce particulière d'un ensemble ou même n'effectuer qu'un seul geste sur une pièce donnée. A l'opposé, la gamme de produits peut être relativement étendue. Le niveau technique des travaux est aussi très variable. L'équipement du cloutier est simple et sa technique aussi. Le fourbisseur d'épée couvre une gamme technique beaucoup plus étendue et plus complexe même si, lui aussi, limite sa production à un seul type d'objet. Indépendamment de la complexité des produits, certains ateliers spécialisés travaillent pour une clientèle voisine alors que d'autres commercialisent leurs produits à grande distance. Enfin, certains ateliers ou groupes d'ateliers acquièrent une réputation qui dépasse les frontières et leur permet d'utiliser une image de marque.

Tous les objets de la vie quotidienne ont pu faire l'objet de productions spécialisées. C'est dans le domaine de la production des armes que les exemples sont les plus faciles à trouver. La réputation de certains centres de production médiévaux est parvenue jusqu'à nous (Tolède, Solingen, etc.). Au Bas Empire, on sait par la *Notitia Dignitatum* que la production d'armement est centralisée dans quelques villes dotées de fabriques d'état (James 1988). La production des barres de fer épuré à partir d'éponges de fer brut peut être une activité spécialisée dont la signification, en termes économiques est tout à fait particulière.

Archéologiquement, tous ces ateliers sont des forges et livrent des déchets à première vue comparables. Cependant, la signification de ces vestiges est totalement différente. Pour cette raison, un effort méthodologique doit être poursuivi pour distinguer les différents types d'atelier de travail du fer. Il apparaît que le meilleur moyen d'y parvenir est la prise en compte sur le terrain de l'ensemble des déchets métallurgiques. Bien sûr, les études approfondies peuvent apporter des informations décisives mais il est indispensable de pouvoir remettre dans leur contexte les résultats obtenus par l'examen d'un nombre forcément limité d'échantillons.

Conclusion : techniques, économie et société

Les vestiges des activités sidérurgiques se prêtent assez facilement à une lecture technologique. L'étude, d'abord sur le terrain puis au laboratoire, livre d'innombrables informations sur les méthodes utilisées aux différentes



Autun, Lycée Militaire, France Ville romaine, quartier artisanal Chardon-Picault et Ducoux 1993	Brandes-en-Oisan, France Mine d'argent médiévale Baillly-Maître 1995	Kafjeka, Togo Village contemporain Hahn 1993	Saint-Joseph, Ontario, Canada Poste frontière, XIXème siècle Light et Unglik 1984
F1 Foyer en fosse quadrangulaire S Soufflet de F1 F2 Foyer en cuvette F3 Foyer plat E Enclume en pierre la table est au ras du sol P1 Plancher (stockage ?) P2 Plancher (stockage ?) P3 Plancher (stockage ?)	F1 Foyer sur table S Soufflet de F1 F2 Foyer plat E Billot en bois avec enclume métallique ? A Réserve d'argile (soudure) B Baquet de trempe ? C Canal d'amenée d'eau	F Foyer au sol S Soufflet de F M Muret de protection X Siège du forgeron E1 Enclume en pierre au sol E2 Enclume en pierre au sol A Réserve d'argile (soudure) B Baquet de trempe O Outils (marteaux en pierre) R Réserve de matière première	F Foyer sur table S Soufflet de F E Billot en bois avec enclume métallique Et Etabli avec étau métallique B Baquet de trempe (position probable) MA Meule à aiguiser CH Réserve de charbon R Réserve de matière première (position probable) T Table (position probable) P Poêle (position probable)

Fig. 34 : Exemples d'ateliers de forge de diverses périodes et régions. a) Plans. b) Tableau explicatif et références.

étapes de la chaîne opératoire. Les résultats acquis pour des sites de différentes époques et régions fournissent des jalons pour une histoire générale de ces techniques. Ils offrent la possibilité de comprendre à grande échelle les emprunts et les échanges, ainsi que d'étudier le phénomène mystérieux de l'innovation technique. De nombreux jalons sont plantés mais l'histoire générale reste à faire.

Au-delà de la technologie, c'est aussi le poids économique de l'industrie que l'on peut chercher à mettre en évidence. Les scories de fer sont quasiment indestructibles. Si elles ont été massivement réemployées dans certaines régions, on en garde souvent la trace. Les quantités existantes ou celles que l'on peut restituer sont, d'une certaine manière, proportionnelles à la production primaire du métal. On peut donc parvenir à une estimation prudente de cette production. La sidérurgie extractive est sans doute un des rares domaines de l'économie ancienne pour lequel une telle estimation est théoriquement possible sur la base des vestiges matériels.

D'innombrables mentions de scories de forge dans les publications archéologiques démontrent que le travail du fer a été pratiqué en maints endroits, pour ne pas écrire partout. Il importe maintenant de cerner de manière plus précise ces activités et de discerner les ateliers d'entretien du métal sur leur lieu d'utilisation et les véritables centres manufacturiers. Des progrès méthodologiques doivent encore être accomplis mais les moyens pour parvenir à cet objectif sont maintenant mis en évidence. L'étude archéologique des espaces et installations de travail couplée avec l'étude qualitative et quantitative des déchets de production offre cette possibilité.

Enfin, les données quantitatives concernant la production et la transformation du fer ne prennent leur sens que si elles sont mises en regard de la consommation. Quantifier la consommation du fer au travers des sources archéologiques est très délicat. Contrairement aux scories, les objets en fer se conservent très mal. La durée de la circulation est très difficile à estimer. Le fer est recyclable, au moins dans une certaine mesure. Dans le sol, outre les aléas qui affectent tous les vestiges archéologiques, le fer souffre d'une corrosion très importante. Enfin, les objets en fer sont souvent négligés dans les publications archéologiques.

Il en résulte qu'à l'heure actuelle on ne peut se faire qu'une idée très superficielle des quantités de fer utilisées au cours des périodes anciennes. Comment juger alors de l'importance relative d'une production ? Il faut donc accumuler plus de données quantitatives, poids et nombre d'objets par catégories, sur les trouvailles archéologiques. Malgré toute l'ambiguïté de ces données, ce sont les seules qui peuvent réellement servir de base à une compréhension de la consommation. Manifestement, le rôle du fer dans la société évolue. De métal rare et prestigieux, il devient un matériau commun. Son emploi se manifeste d'abord dans les domaines pour lesquels il est le mieux adapté, l'outillage artisanal et l'armement. Il est aussi introduit dans l'agriculture. Il joue alors un rôle écono-

mique et stratégique important. Enfin, lorsqu'un surplus à bon marché est disponible, le fer est utilisé pour toutes sortes d'usages. Il peut entrer massivement dans la construction et dans les moyens de transport (voitures, bateaux, fers à cheval, clous de chaussure, etc.). Sans être indispensable dans ces domaines, c'est un matériau qui remplit efficacement son rôle. Les objets en fer découverts sur les sites archéologiques témoignent à la fois du volume de métal qui est consacré à l'une ou à l'autre de ces grandes catégories d'utilisation mais aussi de la qualité du métal qui est utilisé. Il faut qu'un équilibre s'établisse entre la production et la demande, tant en quantité qu'en qualité.

Les vestiges matériels des activités métallurgiques sont donc des témoins privilégiés d'une facette des économies anciennes. Éclairer cet aspect peut contribuer de manière significative à une meilleure compréhension des sociétés anciennes dans leur ensemble.

Bibliographie

- Allen 1967 : D. Allen, Iron Currency Bars in Britain, *Proceedings of the Prehistoric Society*, N.S. 33, 1967, 307-335.
- Allen 1986 : J.R.L. Allen, Interpretation of some Romano-British smithing slag from Awre in Gloucestershire, *The Journal of Historical Metallurgy Society* 20/2, 1986, 97-104.
- Arwindsson et Berg 1983 : G. Arwindsson et G. Berg, *The Mästermyr find. A Viking Age Tool Chest from Gotland*. Stockholm, 1983.
- Bailly-Maître 1993 : M.-C. Bailly-Maître, Les méthodes de l'archéologie minière, 237-262 in : R. Francovich (ed.), *Archeologia delle Attività Estrattive e Metallurgiche*, Edizioni All'Insegna del Giglio, Firenze 1993, 640p.
- Bailly-Maître 1995 : M.-C. Bailly-Maître, Mines et forges au Moyen Age et au début des Temps Modernes, réflexions autour de l'exemple de Brandes, 333-347 in : Benoit et Fluzin 1995.
- Bartuska et Pleiner 1968 : M. Bartuska et R. Pleiner, Untersuchung der Schlackenproben von Mühlthal, 97-102 in H. Dannheimer : *Epolding-Mühlthal, Siedlung, Friedhöfe und Kirche des Frühen Mittelalters*, Münchener Beiträge zur Vor- und Frühgeschichte 13, München, 1968.
- Benoit et Fluzin 1995 : P. Benoit et Ph. Fluzin (ed.), *Paléoméallurgie du fer et Cultures, symposium international Belfort - Sévenans, 1-3.11. 1990*, Belfort, 1995, 539 p.
- Belhoste 1986 : F. Belhoste, The Diffusion of the Blast Furnace Process across Western France in the 15th and 16th Centuries, 5-19 in : *Medieval Iron in the Society, papers and discussions at the symposium in Norberg*, 6-

- 10.05.1985, vol. 2, Jernkontorets Forskning, 39, 1986, 133 p.
- Bielenin 1983 : K. Bielenin, Der Rennfeuerofen mit eingetieftem Herd und seine Formen in Polen, 47-62 in : *Internationales Symposium zur vor- und frühgeschichtlichen Eisengewinnung, 10-14.11. 1980*, Akademie Sankelmark / Flensburg, Festschrift Hans Hingst, Offa 40, 1983, 197 p.
- Bielenin 1992 : K. Bielenin, *Starozytne Gornictwo i Hutnictwo Zelaza w Gorach Swietokrzyskich* [Ancient Mining and Iron Metallurgy in the Gory Swietokrzyskie - Holy Cross Mountains], Kielce 1992, 268 p.
- Blomgren et Tholander 1986 : S. Blomgren et E. Tholander, Influence of the Ore Smelting Course on the Slag Microstructures at Early Ironmaking, usable as Identification Basis for the Furnace Process Employed, *Scandinavian Journal of Metallurgy* 15, 1986, 151-160.
- Celis 1991 : G. Celis, *Les fonderies africaines du fer, un grand métier disparu*, Frankfurt am Main 1991, 225 p.
- Chardon-Picault et Ducreux : P. Chardon-Picault et F. Ducreux : Un quartier artisanal avec atelier de bronziers à Autun, *Revue Archéologique de l'Est*, 44, 1993, 199-209.
- Chieze et Benoit 1990 : V. Chieze et P. Benoit, Images de la forge dans les manuscrits de la Bibliothèque Nationale, XIII-XVIe siècle, 11-21 in : *L'image des mines et de la métallurgie, Table Ronde Paris 1987*, Pierres et Terre 33, 1990, 172 p.
- Cleere 1972 : H.F. Cleere, The Classification of Early Iron-Smelting Furnaces, *Journal of Antiquaries* 52, 1972, 8-23.
- Cleere et Crossley 1985 : H.F. Cleere et D. Crossley, *The Iron Industry of the Weald. Leicester*, 1985, 395 p.
- Conin et al. 1995 : A. Conin, I. Guillot, J. Grandemange et P. Benoit, La forge du Samson, 375-386 in Benoit et Fluzin 1995.
- Craddock 1995 : P.T. Craddock, *Early Metal Mining and Production*, Edimburg University Press 1995, 363 p.
- Crew 1991 : P. Crew, The Experimental Production of Prehistoric Bar Iron, *Historical Metallurgy*, 25/1, 1991, 21-34.
- Crew 1994 : P. Crew, Currency Bars in Great Britain : Typology and Function, 345-350 in Mangin 1994.
- Crew et Crew 1997 : P. Crew et S. Crew (ed.) : Early Iron-working in Europe, Archaeology and Experiment, *Abstracts, International Conference Plas Tan y Bwlch 1997*, Plas Tan Y Bwlch Occasional Paper 3, 1997, 115 p.
- Curdy et al 1995 : P. Curdy, L. Flutsch, B. Moulin et A. Schneiter : Eburodunum vu de profil : coupe stratigraphique à Yverdon-les-Bains VD, Parc Piguet 1992, *Annuaire de la Société Suisse de Préhistoire et d'Archéologie* 78, 1995, 7-56.
- Davis et al. 1985 : D. Davis, R. Maddin, J.D. Muhly et T. Stech, A steel pick from Mount Adir in the northern Galilee, *Journal of Near Eastern Studies* 44, 1985.
- De Boe 1977 : G. De Boe, *Bas-fourneaux des XVIe et XVIIe siècles à Roly*, *Archaeologica Belgica* 196, 1977, 111-115.
- Decaëns 1971 : J. Decaëns, Un nouveau cimetière du haut moyen âge en Normandie, Hérouvillette (Calvados). *Archéologie Médiévale* 1, 1971, 1-125.
- De Leiris 1971 : H. De Leiris, *Métaux et alliages, tome II : Fers - Aciers et Fontes*, Masson, *Techniques de l'Ingénieur*, vol.6 : Sidérurgie, 1971.
- Devauges 1971 : J.B. Devauges, Entrains gallo-romain, ville, sanctuaire et centre industriel, *Les Annales du Pays Nivernais* 1, 1971, 24-29.
- Dillmann et al. 1997 : P. Dillmann, P. Fluzin et M. Urteaga : Refining of an Experimental Biscayan Bloom from Agorregi, 73-75, in Crew et Crew 1997.
- Domergue 1993 : C. Domergue (dir), B. Cauuet, E. Lavielle, J.M. Pailler, R. Sablayrolles, P. Sillières, F. Tollon, *Un centre sidérurgique romain de la Montagne Noire, le Domaine des Forges (Les Martyrs, Aude)*, *Revue Archéologique de Narbonnaise*, supplément 27, Paris 1993, 477 p.
- Doswald 1995 : C. Doswald, Les lingots de fer protohistoriques en Europe occidentale : problématique générale, 333-344 in Mangin 1994.
- Duhamel du Monceau 1761 : H. Duhamel du Monceau, *Art du charbonnier ou manière de faire le charbon de bois, Description des arts et métiers*, Paris 1761.
- Dunikowski et Cabboi 1995 : C. Dunikowski et S. Cabboi, *La sidérurgie chez les Sénon : les ateliers celtiques et gallo-romains des Clérimois (Yonne)*, *Documents d'Archéologie Française* 51, Paris 1995, 186p.
- Dunikowski et al. à paraître : C. Dunikowski, M. Leroy, P. Merluzzo et A. Ploquin, Des déchets paléométallurgiques, Quels indices pour une forge ?, in : G. Nicolini, N. Dieudonné-Glad (dir.), *Les Métaux dans l'Antiquité : travail et conservation, colloque 1995 à Poitiers* (Monogr. Instrumentum, à par.).
- Durman 1997 : A. Durman, Iron Resources and Production for the Roman Frontier in Pannonia, 6-8 in Crew et Crew 1997.
- Duvauchelle 1990 : A. Duvauchelle, Les outils en fer du Musée Romain d'Avenches, *Bulletin de l'Association Pro Aventico* 32, 1990, 118 p.
- Ebnöther 1995 : C. Ebnöther, *Der römische Gutshof in Dietikon*, Monographien der Kantonsarchäologie Zürich 25, Zürich 1995, 438 p. (Beiträgen M. Senn-Luder).
- Eschenlohr et Serneels 1991 : L. Eschenlohr et V. Serneels, *Les bas fourneaux mérovingiens de Boécourt-Les Boulies (JU/Suisse)*, *Cahiers d'Archéologie Jurassienne* 3, Porrentruy 1991, 144 p.
- Espelund 1991 : A. Espelund (ed.), *Ole Evenstad : Praktische Abhandlung von den Eisensteinen, welche sind in Norwegen in Sümpfen und Morästen Finden, und über die Methode solche in Eisen und Stahl zu Verwandeln*

- (København 1790-Göttingen 1881), Arketype, Trondheim 1991, 43 + 12 p.
- Espelund 1995 : A. Espelund, *Iron Production in Norway during two Millennia, From the Ancient Bloomery to the Early Use of Electric Power*, Trondheim 1995, 126 p.
- Evrard 1955 : R. Evrard, *Les artistes et les usines à fer*, Liège 1955, 107p.
- Feugère et al. 1995 : M. Feugère, J.-F. Maréchal et M. Vedel, Une cargaison romaine de lingots de fer. *Bulletin Instrumentum* 2, 1995, 15.
- Fluzin 1983 : Ph. Fluzin, Notions élémentaires de sidérurgie, 13-44 in N. Echard, *Métallurgies africaines : nouvelles contributions*. Paris, *Mémoires de la Société des Africanistes* 9, 1983, 339 p.
- Forbes 1950 : R.J. Forbes, *Metallurgy in Antiquity, a Notebook for Archaeologists and Technologists*, Leiden 1950, 489 p.
- Ford et Willies 1994 : T.D. Ford et L. Willies (ed.), *Mining Before Powder, Peak District Mines Historical Society Bulletin* 12/3, 1994, 149 p.
- François 1843 : J. François, *Recherches sur les gisements et le traitement direct des minerais de fer dans les Pyrénées et en particulier en Ariège*, Paris 1843, 1 vol + 1 atlas, 1843, 404 p.
- Gaitzsch 1980 : W. Gaitzsch, *Eiserne römische Werkzeuge*, British Archeological Reports, International Serie 78, Oxford 1980.
- Gömöri 1987 : J. Gömöri, The Hungarian Bloomeries, 125-138 in Pleiner 1989.
- Grouenewoudt et van Nie 1995 : B.J. Groenewoudt et M. van Nie, Assessing the scale and organisation of germanic iron production in Heeten, the Netherlands, *Journal of European Archaeology* 3/2, 1995, 187-215.
- GSAF 1991 : Groupe de travail Suisse d'Archéologie du Fer (C. Doswald, L. Eschenlohr, W. Fasnacht, M. Senn et V. Serneels) : *Minerais, Scories, Fer : cours d'initiation à l'étude de la métallurgie du fer ancienne et à l'identification des déchets de cette industrie*. Association Suisse des Techniciens des Fouilles Archéologiques, 1991, 48 p. (= Technique des Fouilles n° spécial).
- Gummerus 1913 : H. Gummerus, Darstellungen aus dem Handwerk auf römischen Grab- und Votivsteinen in Italien, *Jahrbuch des Kaiserlich Deutschen Archäologischen Instituts* 28, 1913, 63-126.
- Hahn 1993 : H.P. Hahn, Eisentechniken in Nord-Togo, *Kulturanthropologische Studien* 21, Münster 1993, p. 170.
- Hauptmann et Mai 1989 : A. Hauptmann et P. Mai, *Chemische und mineralogische Untersuchungen an Schlacken aus der Colonia Ulpia Traiana ; Spurenlese, Beiträge zur Geschichte des Xantener Raumes*, Köln 1989, 93-104.
- Hegedus 1962 : Z. Hegedus, Loupes de fer dans les musées hongrois. *Revue d'Histoire de la Sidérurgie*, 3/1, 1962, 197-207.
- Henning 1991 : J. Henning, Schmiedegräber Nördlich der Alpen, *Saalburger Jahrbuch* 46, 1991, 65-82.
- Higgins 1993 : R.A. Higgins, *Engineering Metallurgy, vol.1 : Applied Physical Metallurgy*, Arnold London 1993 (6th), 550 p.
- Hingst 1983 : H. Hingst, Das Eisenverhüttungsrevier auf dem Kammberg-Gelände in Joldelund, Kreis Nordfriesland, 163-176 in : *Internationales Symposium zur vor- und frühgeschichtlichen Eisengewinnung, 10-14.11. 1980*, Akademie Sankelmark / Flensburg, Festschrift Hans Hingst, Offa 40, 1983, 197 p.
- Hua Jue-ming 1993 : Hua Jue-ming, Les moulages à métaux ferreux dans l'ancienne Chine. *Pour la Science*, mars 1993, 66-73.
- Huysecom 1996 : E. Huysecom, *Inagina, l'ultime Maison du Fer*, Film video, 52 min., PAVE 1996.
- James 1988 : S.T. James, The Fabricae : State Arms Factories of the Later Roman Empire, 257-331 in : J.C. Coulston (ed), *Military Equipment and the Identity of Roman Soldiers, 4th Roman Military Equipment Conference*, British Archaeological Reports, International Series 394, 1988.
- Juleff 1996 : G. Juleff, An ancient wind-powered iron smelting technology in Sri Lanka, *Nature* 379, 1996, 60-63.
- Kleemann 1966 : O. Kleemann, Der Erste Fund Vorgeschichtlicher Eisenbarren in Franken, *Mainfränkisches Jahrbuch für Geschichte und Kunst* 18, 1966, 121-134.
- Knau 1995 : H.L. Knau, Renn- und Roheisenverhüttung - Osemundfrischen. *Zur Geschichte der Eisen- und Stahlerzeugung im märkischen Sauerland*, 165-171 in Magnusson 1995.
- Leroy 1997 : M. Leroy, *La sidérurgie en Lorraine avant le haut fourneau, l'utilisation du minerai de fer oolithique en réduction directe*, Monographie du CRA, CNRS éditions, Paris 1997, 305 p.
- Light et Unglick 1984 : J.D. Light et H. Unglick, *Forge d'un poste de traite sur la frontière 1796-1812*, Ottawa 1984, 135 p.
- Lyngstrøm 1995 : H. Lynstrøm, Prehistoric iron technology in Denmark, 47-48 in Magnusson 1995, vol 2.
- Magnusson 1988 : G. Magnusson, Lapphyttan, 177-198 in Sperl, G. (éd.) : «*The First Iron in the Mediterranean*» : *Proceedings of the Populonia/Piombino Symposium 1983*, PACT 21, Strasbourg 1988, 199 p.
- Magnusson 1995 : G. Magnusson (ed.), *The Importance of Ironmaking, Technical Innovation and Social Change, Papers presented at the Norberg Conference May 1995*, 2 vol., Jernkontorets Berghistoriska Utskott 58 et 62, 1995, 428 p et 311 p.
- Mangin 1994 : M. Mangin (ed), *La sidérurgie ancienne de l'Est de la France dans son contexte européen, colloque Besançon 10-13.11. 1993*, Annales littéraires de l'Université de Besançon, 536, Paris 1994, 424 p.

- Mangin *et al.* 1992 : M. Mangin, I. Keesmann, W. Birke et A. Ploquin, *Mines et métallurgie chez les Eduens, le district sidérurgique antique et médiéval du Morvan-Auxois*. Annales littéraires de l'Université de Besançon 456, Paris 1992, 364 p.
- Manning 1976 : W. H. Manning, *Catalogue of Romano-British Ironwork in the Museum of Antiquities Newcastle upon Tyne*, Newcastle upon Tyne 1976.
- Manning 1985 : W. H. Manning, *Catalogue of the Romano-British Iron Tools, Fittings and Weapons in the British Museum*, London 1985.
- Mariën 1970 : M.E. Mariën, *Le Trou de l'Ambre au Bois de Wérimont, Eprave*, Monographie d'Archéologie Nationale 4, Bruxelles, 1970.
- McDonnel 1991 : G. McDonnel, A Model for the Formation of Smithing Slags. International Symposium «Form Bloom to Knife», Ameliowka, 18-22.09.1989, *Materialy Archeologiczne*, 26, 1991, 23-26, 2 pl.
- Motykova et Pleiner 1987 : M. Motykova et R. Pleiner, Die Römerzeitliche Siedlung mit Eisenhütten in Orech bei Prag, *Pamatky Archeologicke* 78, Praha 1987, 371-448.
- Müller 1990 : F. Müller, *Der Massenfund von der Tiefenau bei Bern*, Antiqua 20, Basel 1990, 265p.
- Müller-Karpe 1970 : A. Müller-Karpe et M. Müller-Karpe, Neue latènezeitliche Funde aus dem Heidetränk-Oppidum im Taunus, *Germania* 55, 1977.
- Müller-Wille 1983 : M. Müller-Wille, *Das Handwerk in vor- und frühgeschichtlicher Zeit*. Göttingen 1983.
- Needham 1980 : J. Needham, The Evolution of Iron and Steel Technology in East and Southeast Asia, 507-541 in Wertime et Muhly 1980.
- Oddy et Swaddling 1985, W. A. Oddy et J. Swaddling, Illustrations of Metalworking Furnaces on Greek Vases, 43-57 in P. T. Craddock et M. J. Hughes (ed.), *Furnaces and Smelting Technology in Antiquity*, British Museum Occasional Paper 48, 1985, 244 p.
- Osann 1971 : B. Osann, *Rennverfahren und Anfänge der Roheisenerzeugung*, Verein Deutscher Eisenhüttenleute Fachausschussbericht, Düsseldorf 1971, 2 vol, 170 + 51 p.
- Ottaway 1992 : P. Ottaway, *Anglo-Scandinavian Ironwork from Coppergate*, The Archaeology of York, The Small Finds 17/6, 1992, 736p. 54 pl.
- Pelet 1982 : P.L. Pelet, Recherches sur la métallurgie du fer dans le Jura vaudois. 205-214 in : *Mines et fonderies antiques de la Gaule, Table ronde du CNRS Toulouse 21-22.10.1980*, Paris, 1982, 329 p.
- Pelet 1983 : P.L. Pelet, *Fer, Charbon, Acier dans le Pays de Vaud, vol. 3 : Du mineur à l'horloger*. Lausanne, Bibliothèque historique vaudoise 74, 1983, 491 p.
- Pelet 1988 : P.L. Pelet, Ruiner la végétation ou sauvegarder la nature : la ferrière de Champex au XIV^e siècle, *Revue suisse d'Histoire*, 38/1, 1988, 30-44.
- Pelet 1993 : P.L. Pelet, Une industrie reconnue. *Fer, Charbon, Acier dans le Pays de Vaud*. Cahier d'Archéologie Romande 60, Lausanne, 1993, 139 p.
- Pernot *et al.* 1993 : M. Pernot, A. Duval, D. Lacoste et F. Conche : Un atelier de travail du fer à la Porte du Rebout, 332-337 in J.-L. Flouest *et al.* : Les fouilles du Mont Beuvray, rapport biennal 1990-91, *Revue Archéologique de l'Est* 44, 1993.
- Pigeau 1995 : E. Pigeau, Ateliers de forge antique et travaux de construction à Chartres (Eure-et-Loir, site de Barbou), 137-140 in Mangin 1994.
- Pleiner 1958 : R. Pleiner, Die Ergebnisse neuer Ausgrabungen an vor- und frühgeschichtlichen Eisenhüttenplätzen in Böhmen und Mähren, *Stahl und Eisen* 78/24, 1958, 1748-1754.
- Pleiner 1958b : R. Pleiner, *Zaklady Slovanskeho Zelezarskeho Hutnictvi V Ceskych Zemich [Die Grundlagen der Slavischen Eisenindustrie in den Böhmisches Ländern]*, Monumenta Archaeologica Praha 1958, 326 p.
- Pleiner 1980 : R. Pleiner, Early Iron Metallurgy in Europe. 335-376 in Wertime et Muhly 1980.
- Pleiner 1989 : R. Pleiner (ed), *Archaeometallurgy of Iron 1967-1987, Symposium Liblice 1987*, Prague 1989, 496 p.
- Pleiner 1993a : R. Pleiner, *The Celtic Sword*, Clarendon Press Oxford, 1993, 156 p., 36 pl.
- Pleiner 1993b : R. Pleiner, Die Technologie der Messerherstellung in der Frühmittelalterlichen Fürstenburg von Budec, Böhmen, *Pamatky Archeologicke* 84, Praha 1993, 69-92.
- Pertlwieser 1970 : M. Pertlwieser, Die hallstattzeitliche Höhensiedlung auf dem Waschenberg bei Bad Wimbach / Neydharting, Wals, Oberösterreich, Teil II : Die Objekte, *Jahrbuch des Oberösterreichischen Musealvereines* 115/1, 1970, 37-70.
- Rageth 1982 : J. Rageth, Die römischen Schmiedegruben von Riom GR. *Archéologie suisse*, 5/4, 1982, 202-208.
- Rostoker et Bronson 1990 : W. Rostocker et B. Bronson, *Pre-industrial Iron, its Technology and Ethnology*, Archaeomaterials Monograph 1, Philadelphia, 1990, 232p.
- Rothkegel 1994 : R. Rothkegel, *Der römische Gutshof von Laufenburg / Baden*, Landesdenkmalamt Baden-Württemberg, Stuttgart 1994.
- Schaltenbrand-Obrecht 1996 : V. Schaltenbrand-Obrecht, *Beiträge zum römischen Oberwinterthur - Vitodurum 7, Ausgrabungen im Unteren Bühl*, Teil II. Die Eisenfunde, 141-228, pl. 37-73, Monographien der Kantonsarchäologie Zürich 27, 1996, 431 p.
- Schubert 1957 : H.R. Schubert, *History of British Iron and Steel Industry from c. 540 B.C. to A.D. 1775*. London 1957, 445 p.
- Serning 1976 : I. Serning, Tidig Järnframställning Skandinavien, När järnet kom. Polen-Vendsyssel-Göteborg vid tiden omkring Kr.F., Göteborg, 1976, 41-71.
- Serneels 1993 : V. Serneels, *Archéométrie des scories de fer. Recherches sur la sidérurgie ancienne en Suisse oc-*

- cidental*. Cahiers d'Archéologie Romande 61, Lausanne 1993, 240p.
- Serneels 1994 : V. Serneels, L'apport des analyses chimiques de minerai, scories et produits associés à l'étude de la sidérurgie ancienne, 75-82 in Mangin 1994.
- Serneels 1995a : V. Serneels, A propos de quelques scories : Le fer en Suisse romande, 21-28 in Benoit et Fluzin 1995.
- Serneels 1995b : V. Serneels, Du minerai à l'objet : un village de sidérurgistes du VIII^e au XII^e siècle à Liestal Röserntal (BL / Suisse), 35-44 in : M. Schmaedecke (ed), *Ländliche Siedlungen zwischen Spätantike und Mittelalter, Beiträge zum Kolloquium Liestal 1995*, Archäologie und Museum 33, 1995, 124 p.
- Serneels 1995c : V. Serneels, De la réduction à la forge, 37-47 in *Objets en fer et savoir-faire, Rencontres archéologiques de Guiry-en-Vexin, Actes des journées «Autour du Fer», 1992 et 1993*, Guiry-en-Vexin, 1995, 124p.
- Serneels à paraître : V. Serneels, Les ateliers sidérurgiques d'Autun Lycée-Militaire, réflexion sur le contexte socio-économique, in : G. Nicolini, N. Dieudonné-Glad (dir.), *Les Métaux dans l'Antiquité : travail et conservation, colloque 1995 à Poitiers* (Monogr. Instrumentum, à par.).
- Serneels et al. 1997 : V. Serneels, E. Huysecom et Ph. Fluzin : Inagina, Slag and Eutectoid Steel, 104-110 in Crew et Crew 1997.
- Shafer et Zare 1991 : N.E. Shafer et R.N. Zare, Through a Beer Glass Darkly, *Physics Today*, oct. 1991, 48-52.
- Straube 1989 : H. Straube, Untersuchungen an norischen Fundluppen. 43-52, pl.3-7 in Pleiner 1989.
- Tomas i Morera 1995 : E. Tomas i Morera (ed.), *La farga catalana en el marc de l'arqueologia siderurgica, Simposi Internacional sobre la Farga Catalana Ripoll 1993*, Andorra 1995, 511 p.
- Tylecote 1987 : R.F. Tylecote, *The early history of metalurgy in Europe*, Longman, London 1987, 391 p.
- Ulbert 1984 : G. Ulbert : *Cáceres el Viejo, Ein spätrepublikanisches Legionslager in Spanisch-Extremadura*, Madrider Beitrage 11, Mainz 1984.
- Unglik 1993 : H. Unglik, Metallurgical Study of an Iron Bloom and Associated Finds from Kodlunarn Island, 181-212 in W. Fitzhugh et J.S. Olin (eds) ; *Archaeology of the Frobisher Voyages*, Smithsonian Institution Press, Washington-London 1993, 271 p.
- von Kaenel 1981 : H.M. von Kaenel, Ein Depotfund von 16 doppelpyramidenförmigen Eisenbarren in Schwader-nau BE, *Archéologie Suisse* 4/1, 1981, 15-21.
- Voss 1987 : O. Voss, Iron Furnaces in Denmark, 151-157 in Pleiner 1989.
- Voss 1994 : O. Voss, Iron Age and Medieval Iron Smelting in Denmark, 293-301 in Mangin 1994.
- Voss 1995 : O. Voss, Snorup - an Iron Producing Settlement in West Jutland 1st - 7th Century AD, 132-139, in Magnusson 1995.
- Waldbaum 1980 : J.C. Waldbaum, The First Archaeological Appearance of Iron and the Transition to the Iron Age, 69-98 in Wertime et Muhly 1980.
- Webster 1955 : G. Webster, A Note on the Use of Coal in Roman Britain, *Journal of Antiquaries* 35, 1955, 199-216.
- Weisgerber 1978 : G. Weisgerber, *Eisen + Archäologie. Eisenerzbergbau und -verhüttung vor 2000 Jahren in der VR Polen*, Ausstellungskatalog Deutsches Bergbaumuseum, Bochum, 1978.
- Wegewitz 1957 : W. Wegewitz, Ein Rennfeurofen aus einer Siedlung der älteren Römerzeit in Scharmbeck (Kreis Harburg), *Nachrichten aus Niedersachsens Urgeschichte* 26, 1957, 3-25.
- Wertime et Muhly 1980 : T.A. Wertime et J.D. Muhly (ed.), *The Coming of the Age of Iron*, Yale University Press, London 1980, 555 p.
- Westphalen 1989 : P. Westphalen, *Die Eisenschlacken von Haitabu*, Bericht über die Ausgrabungen in Haitabu 26, Neumünster 1989, 112 p.
- Wilhelmi 1977 : K. Wilhelmi, Ein « neuer », zweiter Barrenfund der vorrömischen Eisenzeit nördlich des Rheins, *Germania* 55, 1977, 184-190.
- Yalçin et Hauptmann 1995 : Ü. Yalçin et A. Hauptmann, Archäometallurgie des Eisens auf der Schwäbischen Alb, 269-309 in M. Böhm et al., *Beiträge zur Eisenverhüttung auf der Schwäbischen Alb*, Forschungen und Berichte zur Vor- und Frühgeschichte in Baden-Württemberg 55, Theiss, Stuttgart 1995, 336 p.
- Zimmer 1982 : G. Zimmer, *Antike Werkstattbilder*, Bilderheft Staatlichen Museen Preussischer Kulturbesitz, H 42, Berlin 1982, 64 p.
- Zitzmann 1977 : A. Zitzmann, *The Iron Ore Deposits of Europe and adjacent Areas*. Hanovre, 2 vol., 1977 et 1978, 418 et 386 p.