

Zeitschrift: Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles
Herausgeber: Société Vaudoise des Sciences Naturelles
Band: 84 (1996-1997)
Heft: 4

Artikel: L'archéologie de l'industrie du fer
Autor: Serneels, Vincent
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-288002>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 12.01.2026

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

L'archéologie de l'industrie du fer

par

Vincent SERNEELS¹

Abstract.—SERNEELS V., 1997. The archaeology of iron industry. *Bull. Soc. vaud. Sc. nat.* 84.4: 301-321.

Recent research on ancient iron industry has taken important new directions in Europe and especially in Switzerland. New data are available, new techniques are applied and new questions are discussed.

Slags and other metallurgical remains provide important informations on the history of technology. Their study permits greater understanding of an industrial activity essential to the economy of ancient societies. A global approach is proposed for the study of metallurgical waste products in their archaeological context: the waste products are quantified and registered in the field; a classification is established, based on manual and visual examination; finally, representative samples are analysed in the laboratory.

In this manner, the remains are interpreted from in a technological point of view in their original production line and, to a certain extent, the importance of the activity can be estimated as well. On a regional scale, systematic study gradually reveals the organisation of this industry and its development in the course of time.

Key words: iron, iron industry, archaeology, Switzerland, slags.

Résumé.—SERNEELS V., 1997. L'archéologie de l'industrie du fer. *Bull. Soc. vaud. Sc. nat.* 84.4: 301-321.

Les recherches sur la sidérurgie ancienne connaissent actuellement un développement important en Europe et particulièrement en Suisse, tant sur le plan de l'acquisition des données qu'en ce qui concerne les méthodes d'étude et les problématiques.

Les scories et autres vestiges métallurgiques fournissent des informations importantes sur l'histoire des techniques. L'étude de ces témoignages permet aussi de décrire une activité économique essentielle pour les sociétés anciennes. La méthodologie est basée sur une approche globale des déchets métallurgiques en relation avec le contexte archéologique: ces matériaux sont quantifiés et enregistrés au cours des fouilles; un classement est établi sur la base d'un examen macroscopique; des échantillons représentatifs sont étudiés au laboratoire.

Cette démarche permet d'interpréter ces vestiges en les replaçant dans la chaîne opératoire de la sidérurgie et, dans une certaine mesure, d'estimer l'importance de l'activité.

¹Centre d'Analyse Minérale, Université de Lausanne, BFSH2, CH-1015 Lausanne.

A l'échelle régionale, une étude systématique dévoile peu à peu l'organisation de l'industrie et son évolution au cours du temps.

Mots clefs: fer, sidérurgie, archéologie, Suisse, scories.

1. INTRODUCTION

Au cours du temps, l'homme a progressivement appris à maîtriser les techniques de production et d'élaboration de différents matériaux: le bois, la pierre, la céramique, les métaux, etc. Les objets qu'il a pu ainsi produire lui ont permis d'avoir une influence toujours plus grande sur son environnement. L'invention de la métallurgie est un pas capital de cette lente évolution. La découverte, puis la généralisation de l'utilisation du 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 agricole et artisanale et confère une efficacité accrue aux armées. S'il est assez abondant, il peut aussi être utilisé avantageusement dans de nombreux autres domaines de la vie courante comme la construction, les transports et les machines.

On situe généralement l'origine de la métallurgie du fer en Anatolie, à la fin du III^e millénaire avant notre ère (PLEINER 1980). Sous la forme de petits objets de valeur, il atteint le nord des Alpes vers 800 av. J.-C. mais son utilisation ne se généralise que quelques siècles plus tard. A l'époque romaine, le fer est très largement disponible. Après la chute de l'Empire, on ne constate pas de régression technique mais le fer circule en quantités qui paraissent nettement moindres. Au cours du Moyen Age, la production croît à nouveau, stimulée par une véritable révolution technique: la généralisation du haut fourneau. La révolution industrielle peut commencer.

Avant le XIV^e siècle, la documentation écrite et iconographique concernant l'industrie est extrêmement pauvre. Les vestiges matériels, livrés par les recherches archéologiques, sont pratiquement les seuls éléments qui permettent de reconstituer ce que fut la sidérurgie en Europe.

Les activités métallurgiques laissent des traces matérielles nombreuses et variées. Les structures de travail, comme les fourneaux ou les foyers fournissent des informations essentielles pour décrire les opérations qui se sont déroulées. Les déchets métallurgiques et autres matériaux associés apportent des informations sur les techniques en usage. Ce sont aussi des témoins privilégiés d'une activité économique essentielle pour les sociétés anciennes dans lesquelles l'utilisation du métal est un facteur déterminant de la prospérité économique. Le contrôle des matières premières, des techniques de traitements et des circuits de distribution conditionnent la disponibilité du métal. Les déchets métallurgiques permettent de localiser les lieux de travail et d'estimer dans une certaine mesure l'importance de la production. C'est alors toute l'organisation de l'industrie qui peut être mise en évidence.

Dans ce but, les déchets métallurgiques doivent être considérés comme des objets archéologiques à part entière. Ils doivent être pris en compte sur le terrain avec les cartes de répartition au sein du site et la quantification des volumes. Les déchets doivent ensuite être étudiés macroscopiquement, triés et classés selon leur aspect et leur forme. Au laboratoire, toutes sortes d'analyses contribuent à formuler une interprétation technologique de ces matériaux (SERNEELS 1993).

2. LA CHAÎNE OPÉRATOIRE DE LA SIDÉRURGIE

Le fer métallique est très rare dans la nature, par contre, les minerais sont abondants (ZITZMANN 1977). Les différents métaux ferreux que l'on peut fabriquer possèdent des propriétés physiques très variées (DE LEIRIS 1971, FLUZIN 1983). Le fer pur est malléable et facile à déformer mais son point de fusion est élevé (1530 °C). Les aciers sont des alliages à base de fer contenant moins de 2 % de carbone. Leur dureté croît en fonction de la teneur en carbone. Les fontes contiennent plus de 2 % de carbone et sont très dures et cassantes. Par contre, leur point de fusion est nettement plus bas (minimum 1150 °C).

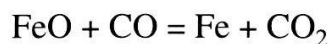
On peut décrire une métallurgie comme une suite d'opérations techniques qui permettent, en partant d'une matière première naturelle, le minerai, de fabriquer des produits finis, les objets fonctionnels. On peut résumer la chaîne opératoire de la sidérurgie en cinq étapes principales (fig. 1 et 2, GSAF 1991/1997). Après avoir localisé le gisement, il faut extraire le minerai du sol (extraction). Ensuite, ce minerai doit être enrichi et séparé de sa gangue (concentration). Le concentré obtenu est alors traité pour fabriquer le métal lui-même (réduction). Ce métal brut est purifié et traité pour obtenir un produit utilisable (raffinage). Enfin, les parties métalliques de l'objet sont mises en forme (forgeage). Après les finitions, l'objet devient fonctionnel. Après leur fabrication, les objets connaissent une période d'utilisation au cours de laquelle l'objet doit être entretenu et réparé. Le métal peut être recyclé.

Chacune des étapes de la chaîne opératoire de la métallurgie est caractérisée par des modifications de la matière, résultats d'actes techniques exécutés par l'artisan. Ces opérations demandent des installations de travail spécifiques et produisent des déchets caractéristiques. L'étude des vestiges sur le terrain et au laboratoire permet donc de les interpréter en termes technologiques, c'est-à-dire de décrire l'étape de la chaîne opératoire à laquelle ils se rapportent (fig. 3).

3. LA RÉDUCTION DU MINERAI DE FER

3.1. Méthodes directe et indirecte de réduction

Dans la majorité des minerais, le fer se trouve sous la forme d'oxydes, c'est-à-dire de minéraux dans lesquels les atomes de fer sont combinés avec des atomes d'oxygène. Pour provoquer la réduction de ces oxydes, on doit travailler à de hautes températures et les mettre en contact avec une substance qui va se combiner avec l'oxygène. Ces conditions peuvent être remplies en plaçant le minerai dans un fourneau dans lequel on brûle du charbon de bois. Au cours de la combustion, le charbon dégage du monoxyde de carbone. Au-dessus de 700° C, celui-ci est capable de réduire les oxydes de fer selon la réaction suivante:



Cette réaction se produit d'autant plus facilement que la température est élevée, que le monoxyde de carbone est abondant et que le temps de contact entre le gaz et le minerai est long.

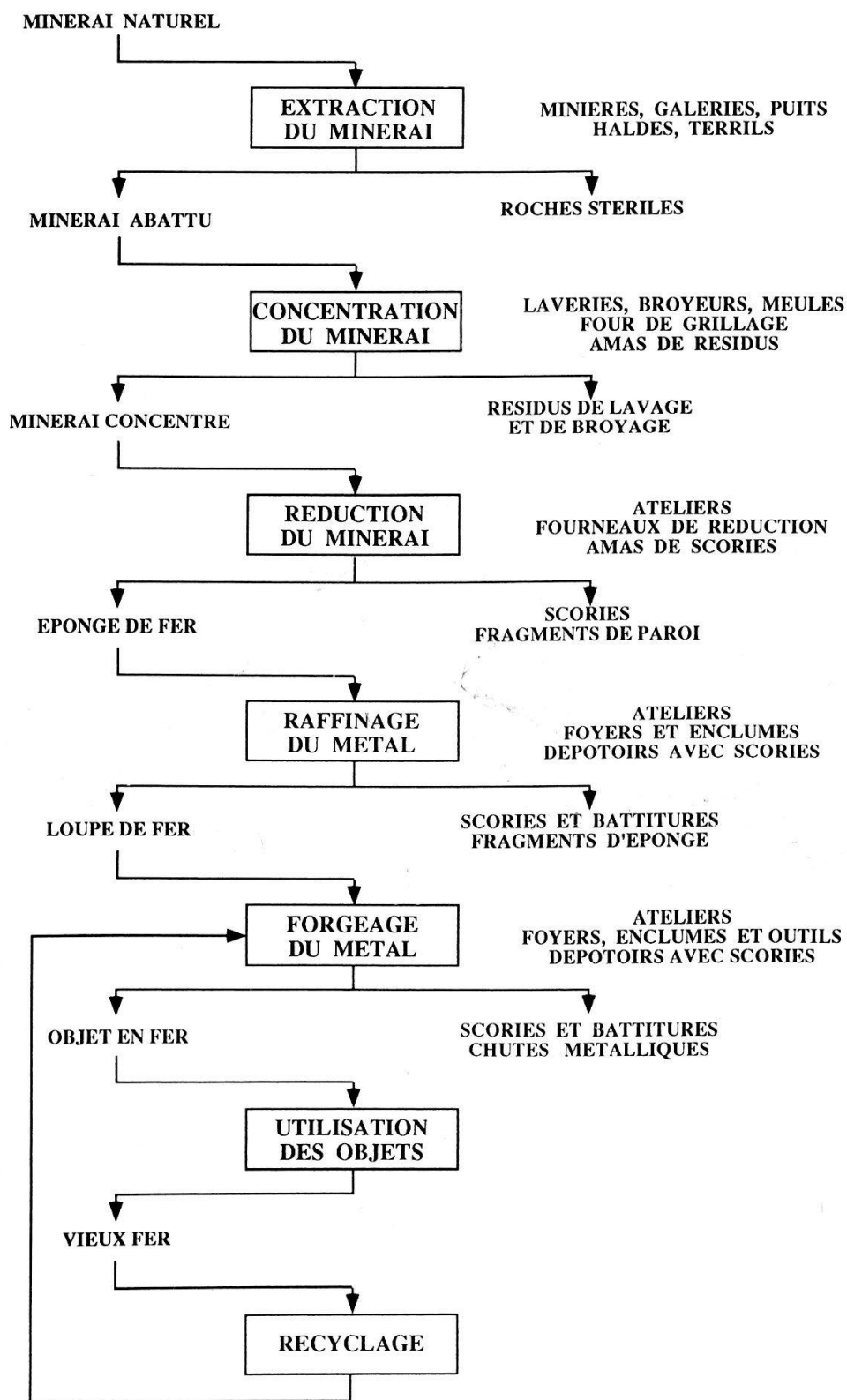


Figure 1.—Schéma de la chaîne opératoire de la sidérurgie (méthode directe de réduction).



Figure 2.—Panorama de la chaîne opératoire de la sidérurgie (méthode directe de réduction). Cette reconstitution graphique est basée sur les données archéologiques fournies par les sites du Haut Moyen Âge dans le Jura suisse.
 1. Extraction du minerai, 2. Concassage du minerai, 3. Réduction du minerai, 4. Raffinage de l'éponge de fer, 5. Fabrication du charbon.

	MINE	CONCENTRATION	REDUCTION	RAFFINAGE	FORGE	FINITION
MATIERES PREMIERES STERILE	XXX X	XXX XXX	X			
RESIDUS BROYAGE RESIDUS LAVAGE NATUREL CONCENTRE	XXX X	X X X	X X X X	X	X	X
COMBUSTIBLES FONDANTS						
MATERIAUX ASSOCIES						
PAROI DE FOURNEAU / FOYER TUYERES			XX X	X X	X X X	X X X
DECAPANTS (sable, argile, etc)						
SCORIES						
ARGILO-SABLEUSES			X	X	XX	X
COULEES			XXX	X		
DE REDUCTION (à fayalite dominante)			XXX	X		
NON COULEES			XXX	X		
INFORMES						
DE POST REDUCTION					X	X
INFORMES					XXX	X
EN CALOTTE (à fayalite dominante)				XXX		
BATTITURES				X	X	X
METAUX						
EPONGES (fragments)			X	X	X	
LOUPES / BARRES (fragments)				X	X	
EBAUCHES					X	
RATES					X	X
CHUTES					X	X
LIMAILLE					X	X
INSTALLATIONS						
FOURNEAU FOYER						
SUPPORT DE FRAPPE						
OUTILS	marteau, masse pointe, coin pic, pioche pelle sceau, hotte, sac lampe pompes, etc	pelle mortier, broyeur meule tamis, crible etc	ringard pinces	marteaux pinces	marteaux pinces tranches poinçons cisaillies de gravure polissoirs	

Figure 3.-Tableau récapitulatif des assemblages de vestiges caractéristiques des différentes étapes de la chaîne opératoire de la sidérurgie (méthode directe de réduction).

La température à laquelle débute la réduction est nettement inférieure à la température de fusion du fer pur et c'est donc un processus qui se produit à l'état solide. Les oxydes sont petit à petit réduits à l'état métallique. Il est nécessaire d'atteindre des températures de 1100 à 1250 °C pour que les autres substances présentes dans le minerai, comme la silice et l'alumine, mélangées à des oxydes de fer résiduels, puissent fondre et s'écouler.

De cette manière, on fabrique une masse métallique solide, pauvre en carbone, plus ou moins poreuse et hétérogène, l'éponge de fer. Le liquide qui concentre les impuretés de la gangue forme des scories. C'est le principe de la méthode directe de réduction des minerais de fer.

En augmentant la température et en prolongeant le temps de réaction, on favorise la diffusion du carbone dans le métal. La réduction des oxydes de fer est plus complète et les températures de fusion des mélanges silicatés pauvres en fer sont atteintes. Deux liquides se forment dans le fourneau, la fonte et le laitier, qui peuvent être écoulés hors du fourneau. La fonte, riche en carbone est très dure et doit être décarburée avant d'être forgée (affinage). C'est le principe de la méthode indirecte de réduction des minerais de fer.

On peut fabriquer de la fonte, de l'acier ou du fer doux dans des fourneaux similaires. Cependant, la fabrication de fonte est plus facile dans un fourneau qui est de grande taille et qui possède une soufflerie très puissante permettant de générer une plus forte température. Pour clarifier la terminologie, on peut appeler «hauts fourneaux» les fourneaux dans lesquels on produit de la fonte. A l'opposé, les installations dans lesquelles on fabrique du fer ou de l'acier par la méthode directe sont des «bas fourneaux» (fig. 4). Il faut souligner qu'il existe des appareils intermédiaires. En Europe, la production intentionnelle de fonte n'est pas clairement attestée avant le Moyen Age et ne se généralise qu'au XVI^e siècle dans certaines régions. Localement, la production du fer par la méthode directe a perduré jusqu'au XIX^e siècle.

3.2. Les déchets et produits de la réduction par la méthode directe

Pour caractériser les opérations de réduction du minerai de fer, il faut mettre en évidence un assemblage comportant des matières premières (combustible, minerai), des déchets de production (scories), des déchets associés (paroi de fourneau) et des produits (métaux).

Les minerais de fer naturels sont très divers. Sur un atelier de réduction, on peut trouver tous les stades intermédiaires entre le minerai naturel et le concentré ainsi que des résidus de lavage ou de broyage. Le charbon utilisé comme combustible pour la métallurgie est souvent choisi avec soin, comme en témoignent les sources écrites (PELET 1983).

Les fourneaux sont mis à rude épreuve au cours de l'utilisation et doivent être fréquemment réparés. Le revêtement interne de la paroi est fait d'argile et de sable, parfois mélangé avec de la paille. Les fragments possèdent une face externe qui a été en contact avec le feu. La face interne est simplement cuite et résulte d'un arrachement. Les tuyères qui sont les conduits destinés à amener l'air dans le fourneau, peuvent être de simples trous percés dans la paroi ou bien des pièces en céramique spécialement fabriquées.

Les scories résultent de la solidification du liquide qui s'est formé au cours de la réduction dans le fourneau. Leur forme et leur aspect permettent de restituer leur position lors du refroidissement et de comprendre la dynamique de

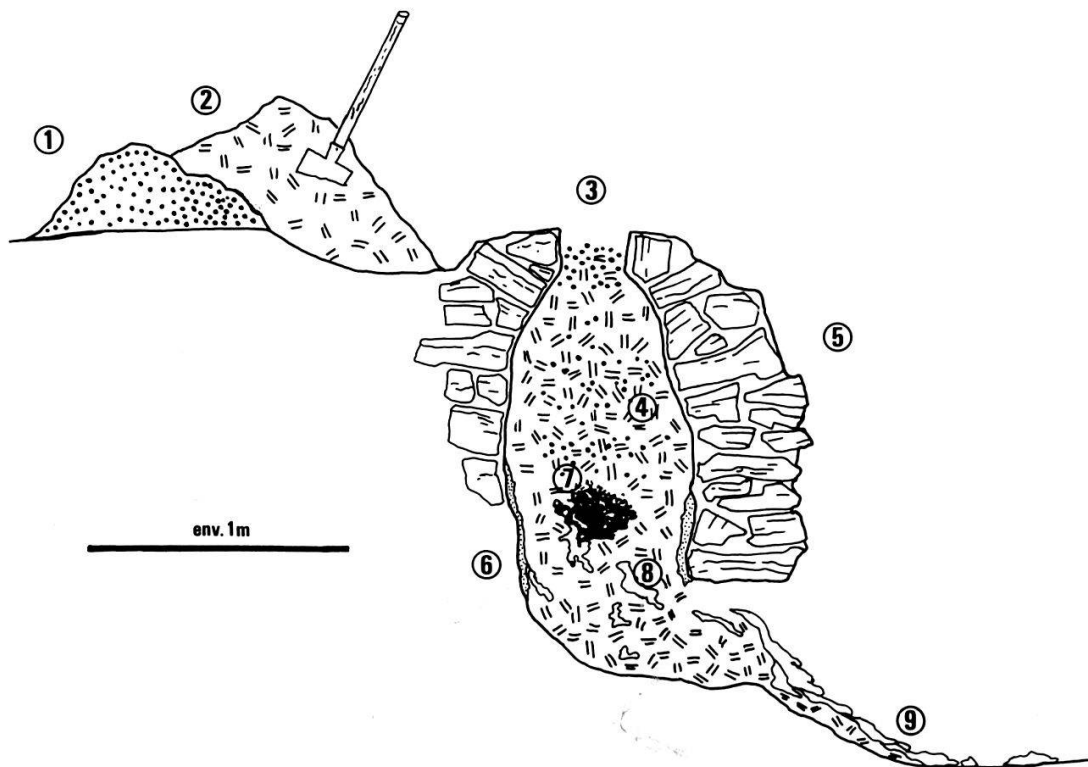


Figure 4.—Schéma d'un bas fourneau de réduction du minerai de fer. Ce schéma est basé sur les données fournies par les sites du Haut Moyen Age dans le Jura suisse (PELET 1993, ESCHENLOHR et SERNEELS 1991).

1. Minerai, 2. Charbon, 3. Gueulard, 4. Cuve remplie de charbon, 5. Manteau externe en pierres, 6. Revêtement interne en argile sableuse, fusion partielle, 7. Eponge de fer, 8. Scories internes, 9. Scories coulées externes. La soufflerie n'est pas représentée: 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, amovible, était probablement située dans la porte frontale. D'autres systèmes de soufflerie sont imaginables.

l'opération (fig. 5). De nombreux bas fourneaux sont construits de manière à laisser la scorie s'écouler à l'extérieur (ESCHENLOHR et SERNEELS 1991, LEROY 1997, DUNIKOWSKI et CABBOI 1995, DOMERGUE 1993). Dans d'autres cas, au contraire, les scories s'accumulent à l'intérieur du fourneau, dans la partie basse (BIELENIN 1992, WEISGERBER 1978). Enfin, dans certains fourneaux, la scorie n'est pas séparée de l'éponge au cours de la réduction. Elle doit être ensuite cassée en morceaux et parfois broyée pour isoler les fragments contenant du métal.

Les scories de réduction par la méthode directe ont pour constituant principal la fayalite, un silicate de fer (Fe_2SiO_4). D'autres minéraux peuvent être présents, en fonction de la composition chimique du liquide, des conditions à

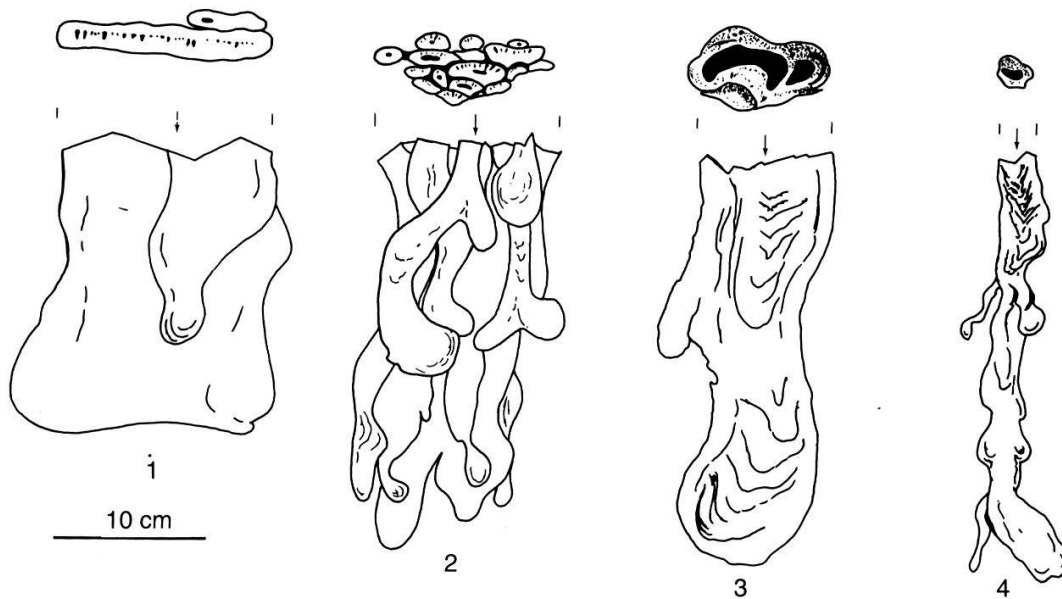


Figure 5.—Quelques exemples de fragments de scories coulées d'aspect varié.

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

l'intérieur du fourneau et lors du refroidissement. La composition chimique des scories est fonction de la composition du minerai, de l'adjonction d'autres substances au cours de l'opération et de l'efficacité de la réduction. La comparaison entre l'analyse du minerai et celle des scories permet de vérifier la compatibilité entre les deux matériaux, de faire des hypothèses sur l'efficacité de la réduction (saturation en oxydes de fer, SERNEELS 1993) et la nature du métal produit (réduction des éléments proches du fer: Ni, As, Mn, P, etc.).

Lorsque l'on dispose d'une série de données de bonne qualité, il est possible d'établir un bilan chimique (SERNEELS 1995a). En principe, les substances présentes dans la gangue du minerai et qui ne peuvent pas être réduites à l'état métallique au cours de l'opération, comme la silice et l'alumine, doivent être incorporées en totalité dans la scorie. Les proportions entre ces éléments dans le minerai et dans la scorie doivent donc rester identiques. Par calcul, il est possible de déduire la quantité de minerai nécessaire à la fabrication d'une quantité de scorie donnée. De là, en déduisant la quantité de fer perdue dans la scorie, il est possible de calculer la quantité de fer qui a pu être réduite à l'état métallique. En pratique, les proportions entre ces éléments sont souvent perturbées par des ajouts volontaires (fondant) et accidentels (paroi fondue, cendre de charbon) dont il faut tenir compte dans le calcul.

Le produit du bas fourneau, l'éponge de fer, demeure mal connu. Quelques exemples archéologiques, ethnographiques ou expérimentaux sont décrits dans la littérature (OSANN 1971, BLOMGREN et THOLANDER 1986, STRAUBE 1989, SCOTT 1990, UNGLIK 1993, SERNEELS *et al.* à paraître). Les minerais, les fourneaux et la manière de travailler diffèrent d'une technique à l'autre. Les produits ne peuvent pas être identiques. L'éponge étant élaborée à l'état solide, le métal contient toujours relativement peu de carbone (0 à 2 %) et renferme de nombreux vides de toutes tailles. Une certaine proportion de scorie reste pié-

gée dans la masse métallique (fig. 6). L'éponge est hétérogène à cause de la variation des conditions à l'intérieur de la cuve.

Normalement, les matières premières et les produits ne devraient être présents qu'en faible proportion et ces quantités ne sont pas significatives par elles-mêmes. Par contre, les quantités de scories reflètent le volume total de minerai traité et de métal produit. En ayant estimé le rendement unitaire de l'opération, on peut extrapoler cette estimation à l'échelle de l'ensemble. Une fois produites, les scories se conservent très bien. L'érosion naturelle et les réutilisations (empierrément, remblais, etc.) peuvent être importantes. Les scories constituent aussi un minerai de fer qui a pu être traité dans les hauts fourneaux.

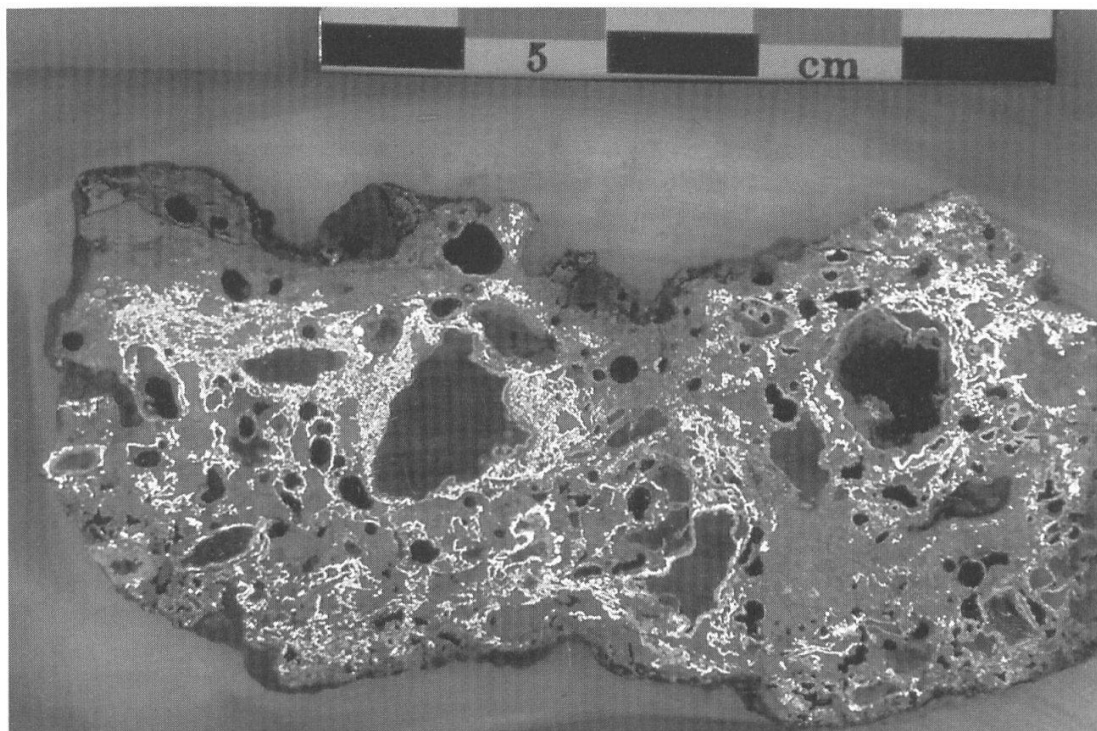


Figure 6.—Coupe dans un fragment d'éponge pauvre en fer (IX-XIe siècle ap. J-C., Liestal-Röserntal, Suisse). Le métal apparaît en blanc. La scorie est grise.

4. LE TRAVAIL DU MÉTAL

4.1. *Le forgeage du fer*

Un métal suffisamment homogène et ne contenant pas trop de carbone peut être forgé. Ce travail poursuit deux buts: d'une part, donner une forme à l'objet, d'autre part, modifier les propriétés physiques du métal. L'artisan chauffe le fer dans un foyer de forge et en le martèle sur l'enclume (fig. 7). Il contrôle son travail en observant la coloration du fer qui reflète la température et en tenant compte de la réaction du métal aux coups de marteau.

Par chauffages et martelages successifs, le forgeron procède à la mise en forme. L'artisan peut assembler des pièces par soudure. En mettant en contact deux surfaces métalliques propres à une température élevée, il lui suffit de quelques coups de marteau pour les réunir de manière définitive.

Au cours du martelage, l'artisan déforme et diminue la taille des grains de métal. Ce processus, l'écrouissage, entraîne un durcissement. Au cours du chauffage, la taille des grains augmente à nouveau et le métal redevient plus malléable. Le forgeron peut aussi modifier la teneur en carbone. Pour la diminuer, il place le métal dans une partie du foyer riche en oxygène, près de l'arrivée d'air par exemple. Si le métal se trouve dans une partie du foyer riche en carbone, celui-ci diffusera à l'intérieur du métal. Ce processus, la cémentation, est très lent et demande un contact intime entre le métal et le carbone, de préférence dans un milieu confiné.

Enfin, pour les aciers, la vitesse du refroidissement est très importante. A haute température, le carbone se trouve en solution dans les grains d'austénite. En dessous de 700° C, ce constituant n'est plus stable et il se décompose en grains de ferrite, pauvre en carbone, et de cémentite, riche en carbone. Ces constituants forment un agrégat lamellaire, la perlite. Pour les aciers refroidis à l'équilibre, la dureté est essentiellement fonction de la proportion de cémentite, c'est-à-dire de carbone. Par contre, si l'on provoque un refroidissement rapide, on peut éviter la formation de perlite et fabriquer à la place des constituants hors d'équilibre durs (martensite, etc.). La dureté dépend à la fois de la teneur en carbone et du refroidissement final. La vitesse de refroidissement peut être contrôlée en plongeant le métal dans un fluide, le plus souvent de l'eau. La trempe est un refroidissement rapide qui provoque une forte augmentation de la dureté. En réchauffant le métal à des températures moyennes, on peut diminuer l'effet de la trempe et atténuer ainsi le caractère cassant des aciers trempés, c'est le recuit.

L'étape du «raffinage» consiste à purifier et compacter l'éponge. Cette opération peut être menée selon deux voies différentes. Lorsque le métal est assez compact et la proportion de scorie faible, ce travail consiste à chauffer et marteler doucement le bloc. Au cours du chauffage, la scorie piégée est refondue. Sur l'enclume, les vides sont refermés et les restes de scorie sont expulsés. Lorsque la proportion de scorie est plus élevée et que le métal est dispersé, le travail commence par un broyage à froid qui permet d'isoler les morceaux riches en métal. Les particules riches en métal sont ensuite assemblées et soudées les unes aux autres par des passages successifs dans le foyer. Dans les deux cas, on aboutit à la fabrication d'une barre de fer relativement homogène et forgeable, la loupe.

Pour les objets les plus simples, comme les clous, le processus de fabrication s'arrête à la mise en forme. Les objets un peu plus complexes demandent des finitions. Un polissage grossier est souvent nécessaire et les tranchants doivent être aiguisés. Enfin, il faut fixer un manche ou une poignée.

D'autres traitements visent un but décoratif. De nombreux objets sont polis de manière à obtenir une surface brillante. Toutes les techniques de gravure et d'estampage peuvent être mise en œuvre sur le fer. Divers matériaux peuvent être incrustés dans le métal. Le fer peut également être recouvert d'un autre métal soit à l'aide de feuilles soit en plongeant l'objet dans un bain. Enfin, lorsque l'on attaque la surface du fer à l'aide d'acides faibles, les parties riches en carbone se colorent différemment des zones pauvres.

Au cours de leur utilisation, les objets en fer doivent être entretenus et réparés. Le recyclage du vieux fer est une pratique extrêmement répandue. Après avoir éliminé la croûte de corrosion, par abrasion ou par martelage, l'artisan peut reforger le métal.

Au cours de toutes ces opérations, une partie du métal est perdue pendant le travail. Contrairement aux autres métaux que l'on peut refondre avec des pertes minimales, dans le cas du fer, le travail et le recyclage impliquent une diminution de la masse de métal (CREW 1991). Le stock doit donc être continuellement renouvelé.

4.2. *Les déchets et les produits du travail du fer*

La matière première peut être présente sous forme de métaux ferreux bruts, purifiés ou recyclés. Le plus souvent, le traitement de l'éponge commence par un nettoyage par percussion à froid. Les parties riches en scories se cassent et sont rejetées (fig. 6). Sur un atelier de raffinage, il n'est pas rare de trouver de petits morceaux de scorie de réduction apportés avec les éponges (NOSEK 1994). On trouvera aussi des fragments de métal ayant subi une purification et une mise en forme plus ou moins complète.

La charbon de bois est le combustible habituel mais, pour le travail du métal, le charbon minéral peut être employé ainsi que l'os et la corne.

Le plus souvent, le forgeron utilise des températures élevées dans son foyer et les matériaux de construction subissent une altération importante. On retrouve donc des fragments de paroi cuite ou scorifiée ainsi que des fragments de tuyère ou de paroi percée. On trouve également des scories constituées de matériaux argilo-sableux plus ou moins fondus, en forme de gouttes ou de nodules irréguliers, d'une taille de quelques millimètres à une dizaine de centimètres. Elles se forment par fusion de la paroi ou bien d'autres substances (décapants, cendre et impuretés du charbon, etc.).

Au cours du chauffage du fer dans le foyer, le métal s'oxyde en surface. Lors du martelage, cette pellicule se brise en fines esquilles, les battitures. Lorsque le métal est très pur, les battitures sont constituées uniquement d'oxydes de fer et ont la forme de fines plaquettes de quelques dixièmes de millimètre d'épaisseur. Si le métal contient des inclusions de scorie, celle-ci est refondue et se mélange avec les oxydes superficiels. Un résultat similaire est obtenu lorsque l'artisan répand du sable ou de l'argile sur la surface du métal. Cette pratique a pour but de décaper les oxydes de fer et d'obtenir des surfaces propres, ce qui facilite diverses opérations dont la soudure. Dans ces cas, les battitures sont irrégulières avec des surfaces boursouflées. Si le matériel est très chaud, lors de son expulsion, il peut former des gouttelettes sphériques.

Ces fines particules sont des indicateurs très précieux des activités de martelage. Elles sont fortement magnétiques et peuvent donc être aisément repérées si l'on teste le sédiment avec un aimant. Elles peuvent être récupérées par un lavage à l'eau (ALLEN 1986, DUNIKOWSKI *et al.* à paraître).

Les scories en forme de calotte sont sans doute les déchets les plus typiques du travail du métal (fig. 8, BARTUSKA et PLEINER 1968, WESTPHALEN 1989, HAUPTMANN et MAI 1989, SERNEELS 1995b). Elles possèdent une forme grossièrement hémisphérique. La surface inférieure convexe peut mouler le fond

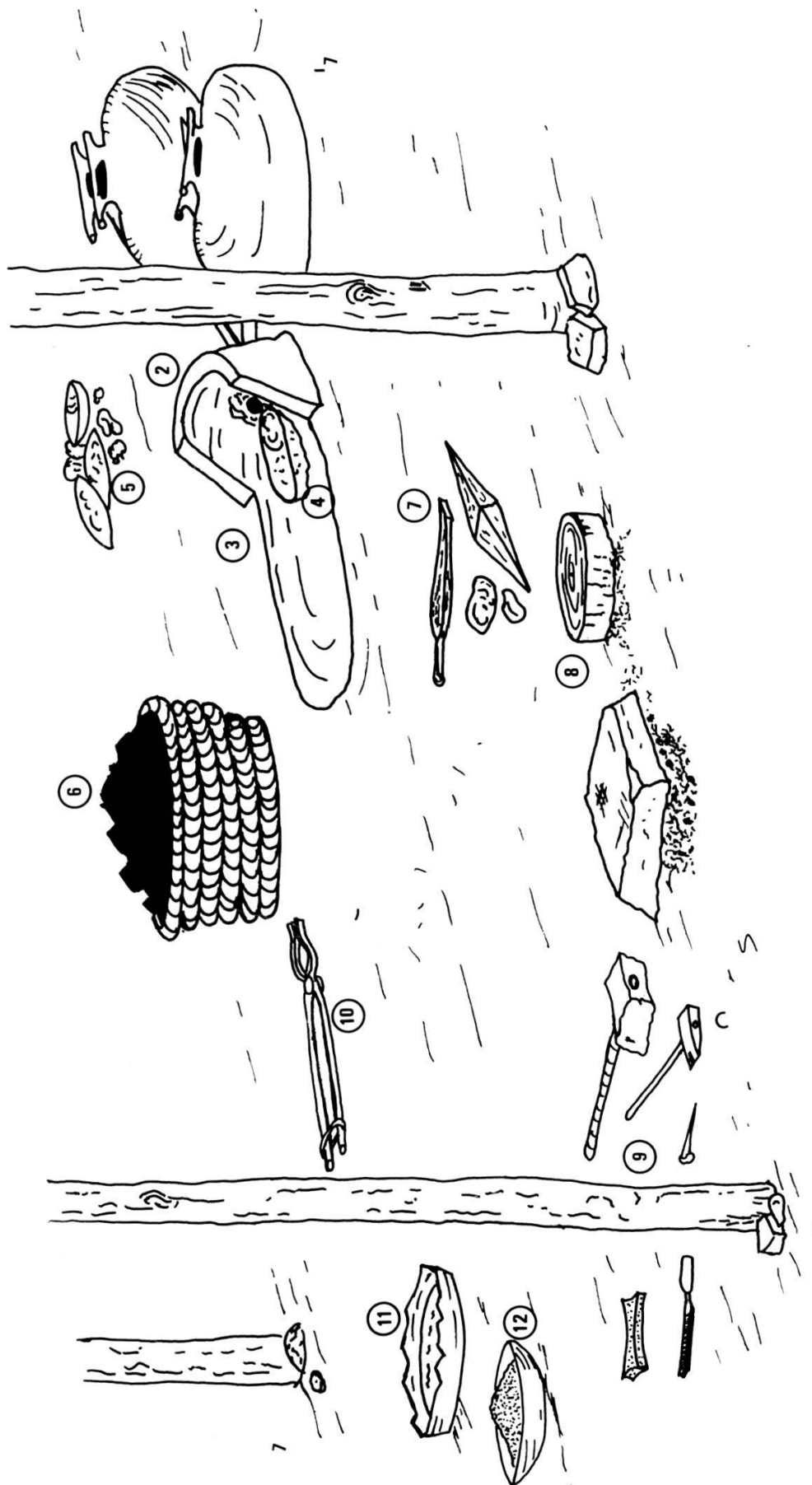


Figure 7.-Schéma d'un foyer de forge et des structures annexes.

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. Pincettes, 11. Vase enterré, réemployé comme baquet de trempe, 12. Réserve de sable pour la soudure ou le polissage.

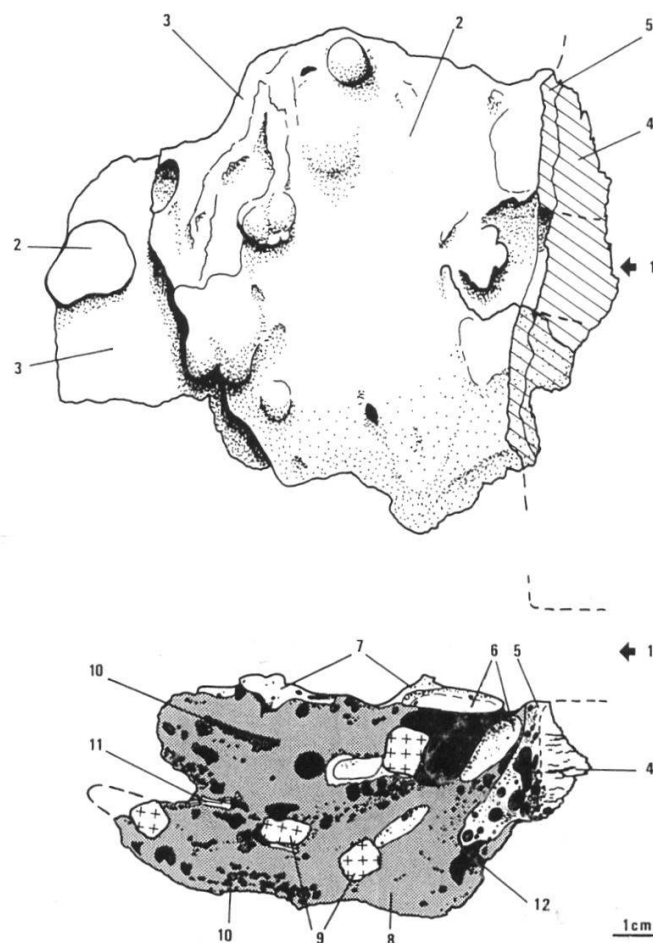


Figure 8.—Scories en forme de calotte, probablement travail de forgeage (Age du Fer, Yverdon, Suisse).

1. Emplacement de l'arrivée d'air, 2. Surface vitrifiée lisse, gris bleuté, 3. Surface oxydée, déchiquetée, brun rouille, 4. Paroi du foyer: matériaux argilo-sableux cuits, 5. Paroi du foyer: matériaux argilo-sableux fondus, gris noir, 6. Éléments de paroi incorporés à la scorie: matériaux argilo-sableux partiellement fondus, rouge et noir, 7. Matrice gris clair silicatée riche en inclusions de grains de roche silicatée, 8. Matrice gris sombre à gris jaunâtre, fayalite et oxydes de fer, 9. Inclusion de roche silicatée partiellement fondue, 10. Zone globulaire gris sombre, riche en oxydes de fer, probablement une ancienne battiture, 11. Morceau de charbon.

du foyer ou bien reposer sur des charbons de bois. La surface supérieure est convexe, plane ou concave. Fréquemment on observe la présence d'un bourrelet lisse de couleur claire, accolé au bord de la pièce. On observe parfois latéralement la présence d'un placage argileux correspondant à la paroi du foyer. La structure interne est variable et souvent complexe. En général, on peut constater l'existence d'une structure de refroidissement unique soulignée par une porosité radiaire. Le fer métallique est fréquent, en nodule, en filaments ou en gouttelettes. Dans la partie supérieure, il y a souvent des fragments de roche ou d'argile incomplètement fondus.

La fayalite est le minéral principal mais elle est presque toujours accompagnée d'une proportion importante d'oxydes de fer. De nombreux autres

minéraux peuvent être présents ainsi que des zones vitreuses. La composition chimique est très variable. En moyenne, ces scories sont plus riches en fer que les scories de réduction.

Ces scories se forment par accumulation de tous les matériaux qui tombent dans le foyer (McDONNEL 1991). Si les températures sont suffisantes, ces substances subissent une fusion complète mais certains fragments ne sont que partiellement incorporés dans le bain. Selon le type de travail que l'on effectue, les matières qui contribuent à la formation de cette scorie varient. Presque toujours, de petits fragments du métal et de la pellicule d'oxydes superficielle se détachent de la pièce. La cendre du combustible et les matériaux de la paroi contribuent également. Lorsque l'on traite du fer brut, la scorie de réduction qui est piégée dans l'éponge est refondue. Un apport peut provenir des décapants que l'on utilise pour la soudure. Au cours des finitions, des débris de diverses substances sont également introduits dans le foyer, en particulier des métaux non ferreux. Le recyclage de vieux objets peut également causer des apports divers. La composition chimique reflète ces différents apports (SERNEELS 1994). Dans les scories issues du raffinage de l'éponge, on doit trouver de plus fortes quantités des éléments chimiques caractéristiques des scories de réduction et donc des minerais de fer (V, Mn, Cr, Ti, etc.). Au cours du forgeage du métal purifié l'apport d'éléments subissant la réduction (Ni, Co, Cu, As) est plus grand. La présence de métaux non ferreux (Sn, Ag, Cu, etc.) indique des travaux de finition (SERNEELS 1994).

Le poids, la taille, l'aspect, la structure interne et les compositions chimique et minéralogique sont des caractères significatifs qui distinguent les scories en calottes en plusieurs catégories. La comparaison entre les différentes calottes qui proviennent d'un même site permet de mettre en évidence un travail standardisé ou au contraire, variable.

Des fragments métalliques de toutes tailles font également partie de l'assemblage de matériaux typique du travail du fer. Ils peuvent avoir été perdus accidentellement ou jetés volontairement. Les ébauches sont des objets partiellement mis en forme. La catégorie des ratés rassemble des pièces qui se sont révélées défectueuses. Les chutes sont des fragments détachés volontairement au cours du travail (découpage de la tôle, percement de trou, etc.). Enfin, de la ferraille a pu être stockée sur place en vue d'un recyclage ultérieur.

Enfin, certains vestiges particulièrement fugaces doivent être pris en compte. Sur le sol de l'atelier, une lentille de sable ou d'argile peut indiquer l'emplacement d'une réserve de décapant. Une zone imprégnée par les oxydes de fer témoigne peut-être de l'emplacement d'un polissoir. D'autres objets peuvent avoir une fonction dans les activités sidérurgiques: des vases ou des baquets en bois servent de contenant pour diverses substances liquides ou solides. Des outils en pierre servent de polissoirs, de supports de frappe ou de percuteurs, sans parler des outils en bois qui disparaissent. Le travail du fer est souvent lié à d'autres activités artisanales et en particulier à la métallurgie des métaux non ferreux (fragments de moules, de creuset, etc.).

Le travail du fer provoque la formation de déchets très variés. Les assemblages sont en général beaucoup plus complexes que pour les activités de réduction. Étudiée de manière détaillée, cette complexité devrait permettre de décrire assez précisément les activités. Dans l'état actuel des connaissances, l'interprétation est encore très difficile à établir, en particulier faute de sites de référence correctement étudiés. Il est encore très difficile d'estimer la signifi-

cation des quantités de déchets issus du travail du fer (SERNEELS 1995c). Les techniques de forge modernes mettent en œuvre des métaux industriels beaucoup plus purs que ceux utilisés par le passé et le combustible est presque toujours du coke. Les déchets modernes ne peuvent donc pas être comparés aux anciens. Les reconstitutions expérimentales sont encore peu nombreuses (CREW 1991).

Les données archéologiques sont également insuffisantes pour comparer les sites entre eux. Certaines forges ne sont attestées que par quelques kilos de matériel alors que d'autres sites ont livré plusieurs tonnes de scories en forme de calotte. Les estimations sont difficiles à faire car non seulement il faut que la fouille de l'atelier soit complète mais de plus, les déchets les plus encombrants sont souvent rejetés à l'extérieur.

5. ORGANISATION DE LA PRODUCTION ET DE LA DISTRIBUTION DU FER

Les matériaux qui sont produits aux différentes étapes de la chaîne opératoire doivent être transportés d'un atelier à l'autre et pour finir, jusqu'aux consommateurs. Ce sont toujours les mines qui fournissent les minerais et donc le choix de leurs emplacements échappe en bonne partie à l'homme. Minimiser les transports des matériaux pesants a été un souci constant pendant les périodes anciennes. Pour cette raison, le minerai est généralement concentré à proximité immédiate de la mine. Pour le lavage, il faut pouvoir disposer de ressources en eau suffisantes. Dans la mesure où les bas fourneaux sont des installations relativement petites et autonomes, les ateliers de réduction seront volontiers placés à proximité des mines. Dans certains cas cependant, on préférera transporter le minerai sur quelques kilomètres plutôt que de déplacer le charbon de bois. En poids, il faut au moins autant de charbon que de minerai mais en volume, le combustible est beaucoup plus encombrant. Enfin, avec l'introduction de l'utilisation de la force hydraulique, les ferrières puis les hauts fourneaux devront s'installer à proximité des cours d'eau. Avec les hauts fourneaux qui représentent des investissements plus importants, les transports de minerais et de charbon deviendront plus fréquents et plus longs. Dans certaines régions, le bois devenant rare, les hauts fourneaux doivent cesser leur activité alors que de nouvelles usines sont construites dans les régions boisées.

Le raffinage des éponges de fer des bas fourneaux primitifs ne demande que des installations peu importantes. Le transport de masses métalliques de quelques dizaines de kilos n'est pas difficile. Il n'y a donc pas d'impératif technique qui conditionne l'implantation de ces ateliers. Ils pourront être liés aux ateliers de réduction, en particulier lorsque ceux-ci sont des centres importants que la main d'œuvre occupe en permanence. Ils pourront aussi être situés dans les villages et les habitats groupés, surtout lorsque la réduction est menée à bien de manière saisonnière ou sur des sites isolés et dépourvus de commodité. Avec l'introduction de l'énergie hydraulique, la taille des éponges de fer va augmenter sensiblement et la mise en forme des barres de métal sera facilitée par l'utilisation des gros marteaux hydrauliques, les martinets, installés le long des rivières. Enfin pour l'affinage de la fonte, le recours à une soufflerie activée par l'eau et au gros marteau devient la règle générale. Dans la mesure du possible, les affineries s'installeront à proximité des hauts fourneaux de manière à minimiser le transport de gueuses de fonte mais dès le Moyen Âge,

on connaît des cas où la fonte est transportée sur plusieurs centaines de kilomètres.

Les ateliers de forge ont des fonctions très variées. Certains sont placés au contact direct des utilisateurs car il faut pouvoir assurer sur place les réparations et l'entretien du mobilier en fer. On trouve des forges dans les grands établissements ruraux, dans les habitats groupés, sur les sites militaires, sur les chantiers de construction, près des mines et des carrières ou encore le long des routes. C'est la proximité des consommateurs qui est recherchée et les matières premières, métal et charbon, sont acheminées jusqu'à l'atelier.

Dans d'autres cas, les forges sont des ateliers spécialisés qui produisent des objets particuliers et destinés à un vaste marché. La production d'armes, qui est souvent étroitement surveillée par les autorités politiques et militaires, obéit à ce schéma mais c'est également possible pour toutes sortes d'autres équipements. Certaines régions se sont ainsi spécialisées pendant des siècles dans la production de clous pour la construction navale, par exemple. L'implantation de ces centres spécialisés obéit à des règles diverses. C'est parfois la proximité des centres de production primaire qui est primordiale, dans d'autres cas, c'est l'existence de voies commerciales ou la proximité d'un marché important qui est le facteur prépondérant. Enfin, pour l'armement en particulier, la volonté des autorités politiques et les impératifs de sécurité peuvent peser d'un poids considérable.

Au cours des périodes les plus récentes de l'Histoire, on peut constater, sur la base des sources écrites, que l'organisation de la production sidérurgique se modifie en permanence. Après une période de prospérité, de grands centres sidérurgiques déclinent ou modifient complètement leur activité. Dans certains cas, l'industrie est intensive et concentrée; dans d'autres, le travail est réparti entre une multitude d'entreprises. Certaines régions produisent du fer, d'autres en importent. Autant de données essentielles pour comprendre l'histoire économique. Pour les périodes anciennes, en l'absence de documents écrits en nombre suffisant, le recours aux vestiges matériels et en particulier aux déchets métallurgiques, est la seule voie d'étude possible pour décrire ces phénomènes.

6. LES VESTIGES SIDÉRURGIQUES DE SUISSE

Il faut rappeler que par le passé, les recherches menées en Suisse ont souvent été à la pointe dans le domaine de l'archéologie sidérurgique (Jura «bernois»: QUIQUEREZ 1866/1992, canton de Schaffhouse: GUYAN 1946, Jura vaudois VD: PELET 1973/1993). Depuis une dizaine d'années, l'étude des vestiges matériels de la sidérurgie connaît un renouveau en Suisse et dans les régions voisines. Les membres du Groupe de Travail Suisse d'Archéologie du Fer, en collaboration avec de nombreux chercheurs de tous horizons, essayent de développer ces recherches selon plusieurs axes (collectif, *Minaria Helvetica* 1993). Le travail se poursuit actuellement sur le terrain (prospection, fouille, sondage), dans les collections anciennes (inventaires de scories et d'objets) et au laboratoire (analyses chimiques, minéralogiques et métallographiques). Des reconstitutions expérimentales ont été menées à bien et les contacts avec les chercheurs des régions voisines ou lointaines apportent des données de comparaison.

Des campagnes de prospection visent à répertorier et décrire les minéralisations et les amas de scories de réduction, principalement tout au long de la chaîne du Jura mais aussi dans les Alpes. Quelques ateliers de réduction ont été fouillés complètement (Montcherand VD, Boécourt JU, Roche BE, Langenbruck BL, etc.). D'autres sites ont fait l'objet de sondages permettant de préciser les datations et les techniques. Certaines découvertes anciennes font l'objet de compléments d'études. Plusieurs ateliers de travail du fer ont également été fouillés récemment (Sévaz FR, Biberist SO, Develier-Courtetelle JU, Liestal BL, Dietikon ZH, Zurzach AG, etc.). De nombreuses trouvailles anciennes ou récentes de déchets métallurgiques (Vidy VD, Avenches VD, Marsens FR, Zug ZG, etc.) ou d'objets en fer (Avenches VD, Oberwinterthur ZH, etc.) ont été étudiées.

Ces recherches sont en cours et doivent être poursuivies mais d'ores et déjà, un renouvellement des méthodes et des problématiques est acquis. Bien des points restent obscurs mais certaines tendances apparaissent.

Peu de choses sont connues concernant le début de l'Age du Fer. Au cours de la période de La Tène, manifestement, les objets deviennent assez abondants et les habitants du Plateau sont correctement approvisionnés en métal. Il semble que le travail du fer est assez largement diffusé car de nombreux sites d'habitat groupé ont livré des scories de forge. Par contre, la production primaire du métal n'est pas identifiée. Les nombreux lingots découverts sur le Plateau pourraient témoigner d'un commerce à longue distance mais leur origine, proche ou lointaine, ne peut pas être démontrée actuellement. De plus, la datation de ces objets reste souvent incertaine. Faute d'étude spécifique, il n'est pas possible de comparer le niveau technique des forgerons suisses par rapport à leurs voisins.

A l'époque romaine, le fer est devenu un matériau extrêmement commun. Des masses de métal considérables sont utilisées non seulement pour les armes et les outils mais aussi dans la construction et les transports. Des dizaines de sites livrent des indices de forge qui montrent bien que cette activité est devenue banale. Jusqu'à maintenant, aucun grand centre de production d'objet en fer n'a été identifié clairement mais il est probable que dans certaines agglomérations, le travail du fer est une activité économique de première importance (Vidy VD ?, Augst BL ?). Par contre, tout au moins aux I^{er} et II^e siècles de notre ère, la production primaire semble très faible, au regard du très petit nombre d'ateliers de réduction datés de cette période. Les circuits commerciaux mis en place à l'intérieur de l'Empire romain ont sans doute permis d'approvisionner à bon compte le marché suisse au moyen des excédents produits dans les grands districts sidérurgiques des autres provinces. On connaît en effet des centres de production majeurs à cette époque, en Gaule (Montagne Noire, Bourgogne, Centre, Sud de la Belgique, etc.), dans les provinces danubiennes (Norique, Pannonie et Dalmatie) et plus loin encore, en Angleterre et en Espagne. Les formes commerciales du fer à l'époque romaine demeurent cependant trop mal connues et peu de lingots ont été clairement identifiés. Il est également possible qu'une grande partie du métal soit parvenue en Suisse sous la forme d'objets finis.

Les vestiges de la période mérovingienne sont complètement différents. Plusieurs dizaines de bas fourneaux de cette période sont connus et cela dans tous les districts du Jura et même en Valais. Les VI^e, VII^e et VIII^e siècles apparaissent comme une période de développement considérable de la produc-

tion locale de fer. Quelques indices laissent penser que ce phénomène débute un peu plus tôt. Les habitats contemporains sont encore mal connus et il est difficile de juger si le travail du métal est, comme précédemment, largement diffusé. Un des rares habitats de cette époque, le site de Develier-Courtetelle JU, situé au milieu de la vallée de Delémont, apparaît à la lumière des fouilles en cours, comme un centre important de transformation du métal brut. Les sépultures masculines de cette époque livrent couramment des armes en fer soigneusement forgées mais la quantité de fer utilisée dans la vie courante est difficile à établir sur la seule base de ces découvertes funéraires.

L'augmentation de la production, qui est manifeste, répond sans doute à la demande locale, palliant à l'effondrement du commerce des marchandises pesantes à longue distance. En même temps, le fer est probablement devenu plus rare qu'à l'époque romaine. Le rôle du district sidérurgique jurassien comme centre exportateur potentiel à l'échelle suprarégionale doit encore être précisé.

Par la suite, à l'époque carolingienne puis au Moyen Âge proprement dit, l'industrie sidérurgique se maintient sur le territoire suisse. Le Jura central reste très actif et l'industrie du Fricktal AG se développe notablement. La mine du Gonzen SG va jouer un rôle important. À partir du XVI^e siècle, les textes laissent entrevoir que de nombreux autres petits centres sont en activité dans le Jura ainsi que dans les Alpes, plus ou moins partout où du minerai est disponible. Tout au long de cette période, la production existe et se développe même mais la demande semble supérieure à l'offre. On exporte un peu mais on importe aussi beaucoup de métal.

L'extraction minière est toujours active à la fin du XIX^e siècle mais l'industrie sidérurgique ne se maintiendra bientôt plus qu'en faisant appel aux matières premières importées. Au cours des deux guerres mondiales, l'extraction sera brièvement relancée sur une petite échelle. Aujourd'hui, les seuls minerais de fer extraits servent aux archéologues pour tenter de reproduire les procédés anciens dans leurs bas fourneaux reconstitués et à quelques forges, attirés par les méthodes traditionnelles.

BIBLIOGRAPHIE

- ALLEN J.R.L., 1986. Interpretation of some Romano-British smithing slag from Awre in Gloucestershire. *J. of Hist. Metall. Soc.* 20/2: 97-104.
- BARTUSKA und PLEINER R., 1968. Untersuchung der Schlackenproben von Mühlthal. In DANNHEIMER H. (Hgb.) *Epolding-Mühlthal, Siedlung, Friedhöfe und Kirche des Frühen Mittelalters. Münchener Beitr. zur Vor- und Frühgeschichte* 13: 97-102.
- BIELININ K., 1992. Starożytne Gornictwo i Hutnictwo Żelaza w Gorach Świętokrzyskich (Ancient Mining and Iron Metallurgy in the Gory Świętokrzyskie - Holy Cross Mountains), Kielce. 268 p.
- BLOMGREN S. and THOLANDER S., 1986. Influence of the Ore Smelting Course on the Slag Microstructures at Early Ironmaking, usable as Identification Basis for the Furnace Process Employed. *Scandinavian J. of Metallurgy* 15: 151-160.
- Collectif, 1993. La sidérurgie ancienne dans le Jura. *Minaria Helvetica* 13b.
- CREW P., 1991. The Experimental Production of Prehistoric Bar Iron. *J. of Hist. Metall.* 25/1: 21-34.
- DE LEIRIS H., 1971. Métaux et alliages, tome II. Fers - Aciers et Fontes. Techniques de l'Ingénieur, vol.6: Sidérurgie. Masson, Paris.

- DOMERGUE C., CAUUE T. B., LAVIELLE E., PAILLER J.M., SABLAYROLLES R., SILLIERES P., TOLLON F., 1993. Un centre sidérurgique romain de la Montagne Noire, le Domaine des Forges (Les Martys, Aude). *Revue Archéologique de Narbonnaise*, suppl. 27. 477 p.
- DUNIKOWSKI C. et CABBOI S., 1995. La sidérurgie chez les Sénon s: les ateliers celtiques et gallo-romains des Clérimois (Yonne). *Documents d'Archéologie Française* 51. 186 p.
- DUNIKOWSKI C., LEROY M., MERLUZZO P. et PLOQUIN A., (à paraître). Des déchets paléométallurgiques. Quels indices pour une forge ?, in Les Métaux dans l'Antiquité: Travail et Conservation, Colloque 1995, Poitiers.
- ESCHENLOHR L. et SERNEELS V., 1991. Les bas fourneaux mérovingiens de Boécourt-Les Boulies (JU/Suisse). *Cahiers d'Archéologie Jurassienne* 3. 144 p.
- FLUZIN Ph., 1983. Notions élémentaires de sidérurgie. In ECHARD N. Métallurgies africaines: nouvelles contributions. *Mémoires de la Société des Africanistes* 9: 13-44.
- GSAF 1991/1997. Groupe de Travail Suisse d'Archéologie du Fer (DOSWALD C., ESCHENLOHR L., FASNACHT W., SENN M., SERNEELS V.): 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. *Technique des Fouilles*, n° spécial 1991, 2^e édition 1997. 48 p.
- GUYAN W.U., 1946. Bild und Wesen einer mittelalterlichen Eisenindustriellandschaft im Kanton Schaffhausen. Basel.
- HAUPTMANN A. und MAI P., 1989. Chemische und mineralogische Untersuchungen an Schlacken aus der Colonia Ulpia Traiana. *Spurenlese, Beiträge zur Geschichte des Xantener Raumes*: 93-104.
- LEROY M., 1997. La sidérurgie en Lorraine avant le haut fourneau, l'utilisation du minerai de fer oolithique en réduction directe. Monographie du CRA 18. Editions du CNRS, Paris. 305 p.
- MCDONNELL G., 1991. A Model for the Formation of Smithing Slags. International Symposium «Form Bloom to Knife», Ameliowka, 9.1989. *Materiały Archeologiczne* 26: 23-26.
- NOSEK E.M., 1994. The Metallography of gromps, in MANGIN M. (Ed.), La sidérurgie ancienne de l'Est de la France dans son contexte européen, Colloque de Besançon 11.1993, p. 65-73. *Annales littéraires de l'Université de Besançon* 456. 364 p.
- OSANN B., 1971. Rennverfahren und Anfänge der Roheisenerzeugung. Verein Deutscher Eisenhüttenleute Fachausschussbericht, Düsseldorf. 2 vol., 170 + 51 p.
- PELET P.-L., 1983. Fer, Charbon, Acier dans le Pays de Vaud, vol. 3: Du mineur à l'horloger. *Bibliothèque historique vaudoise* 74. 491 p.
- PELET P.-L., 1993. Une industrie reconnue: Fer Charbon Acier dans le Pays de Vaud, *Cahiers d'Archéologie Romande* 60. (Edition revue de PELET P.-L. 1973). 139 p.
- PLEINER R., 1980. Early Iron Metallurgy in Europe, in WERTIME T.A and MUHLY J.D. (Ed.). The Coming of the Age of Iron, p. 335-376. Yale University Press. London . 555 p.
- QUIQUEREZ A., 1866/1992. De l'âge du fer. Recherches sur les anciennes forges du Jura bernois, Monuments de l'ancien évêché de Bâle. *L'Œil et la Mémoire* 10, 1992, Porrentruy. 126 p. (Edition en fac-similé de QUIQUEREZ A. 1866).
- SCOTT B.G., 1990. Early Irish Ironworking. *Ulster Museum Publication* 266, Belfast. 238 p.
- SERNEELS V., 1993. Archéométrie des scories de fer. Recherches sur la sidérurgie ancienne en Suisse occidentale. *Cahiers d'Archéologie Romande* 61. 240 p.
- SERNEELS V., 1994. L'apport des analyses chimiques de minerai, scories et produits associés à l'étude de la sidérurgie ancienne, p. 75-82, in MANGIN M. (Ed.), La sidérurgie ancienne de l'Est de la France dans son contexte européen, Colloque de Besançon 11.1993. *Annales littéraires de l'Université de Besançon* 456. 364 p.

- SERNEELS V., 1995a. A propos de quelques scories: Le fer en Suisse romande, in BENOIT P. et FLUZIN PH. (Eds). Paléoméallurgie du fer et cultures, p. 21-28. Symposium international Belfort - Sévenans, 11. 1990, Belfort. 539 p.
- SERNEELS V., 1995b. De la réduction à la forge in Objets en fer et savoir-faire. Rencontres archéologiques de Guiry-en-Vexin, p. 37-47. Actes des journées «Autour du Fer» 1992 et 1993, Guiry-en-Vexin. 124 p.
- SERNEELS V., 1995c. Du minerai à l'objet: un village de sidérurgistes du VIIIème au XIIème siècle à Liestal Röserntal (BL/Suisse), in SCHMAEDECKE M.(Hgb.). Ländliche Siedlungen zwischen Spätantike und Mittelalter, p. 35-44. Beiträge zum Kolloquium Liestal 1995. *Archäologie und Museum* 33. 124 p.
- SERNEELS V., HUYSECOM E. and FLUZIN PH., (à paraître). Inagina, Slag and Eutectoid Steel. Paper presented at the International Conference Early Ironworking in Europe, Archaeology and Experiment, Plas Tan y Bwlch 1997.
- STRAUBE H., 1989. Untersuchungen an norischen Fundluppen, in PLEINER R. (Ed.). Archaeometallurgy of Iron 1967-1987, p. 43-52, pl. 3-7. Symposium Liblice 5-9.09.1987, Prague 1989. 496 p.
- UNGLIK H., 1993. Metallurgical Study of an Iron Bloom and Associated Finds from Kodlunarn Island, in FITZHUGH W. et OLIN J. S. (Eds). Archaeology of the Frobisher Voyages, p. 181-212. Smithsonian Institution Press, Washington-London. 271 p.
- WEISGERBER G., 1978. Eisen + Archäologie. Eisenerzbergbau und -verhüttung vor 2000 Jahren in der VR Polen, Ausstellungskatalog Deutsches Bergbau-Museum, Bochum.
- WESTPHALEN P., 1989. Die Eisenschlacken von Haitabu. *Bericht über die Ausgrabungen in Haitabu* 26, Neumünster. 112 p.
- ZITZMANN A., 1977. The Iron Ore Deposits of Europe and adjacent Areas. Hanovre, 2 vol.: 1977 et 1978. 418 et 386 p.

Manuscrit reçu le 18 septembre 1997

