Zeitschrift: Cahiers d'archéologie romande

Herausgeber: Bibliothèque Historique Vaudoise

Band: 61 (1993)

Artikel: Archéométrie des scories de fer : recherches sur la sidérurgie ancienne en Suisse occidentale

Autor: Serneels, Vincent

Kapitel: 3: La chaîne opératoire de la sidérurgie

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-836182

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: 12.07.2025

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

3
La chaine opératoire de la sidérurgie

La chaîne opératoire

L'ÉLABORATION du fer peut être décrite comme une suite d'opérations techniques, une chaîne opératoire, qui mène de la matière première naturelle, le minerai, au produit fini, l'objet fonctionnel en fer. Chaque étape est caractérisée par des modifications importantes des matériaux du point de vue chimique et/ou physique.

Définir les gestes techniques, les outils et les appareils utilisés, décrire les matières premières, les produits et les déchets sont les démarches nécessaires pour comprendre les aspects techniques de la chaîne opératoire. Il faut ensuite replacer chaque étape dans son cadre socio-économique, à la fois en ce qui concerne les relations entre les différentes étapes, mais aussi dans le cadre général de la société.

Pour la méthode directe de réduction du minerai de fer, on peut proposer un schéma de la chaîne opératoire. Bien entendu, ce n'est qu'une approche générale qui doit être affinée et précisée pour chaque cas réel. Il existe donc une infinité de variantes techniques. Quant à l'organisation socio-économique de la chaîne opératoire, elle est encore plus diverse. Ce schéma théorique reste cependant un outil utile à la discussion. On peut distinguer cinq étapes fondamentales (fig. 35).

L'extraction minière

L'extraction du minerai et le monde de la mine en général constitue la première étape de la chaîne opératoire. Le minerai, substance naturelle, fait partie des roches du sous-sol. L'extraction va le modifier profondément. Le minerai abattu, ou tout-venant, est réduit en fragments qui sont séparés des parties jugées non valorisables, le stérile. Cette étape est d'une grande complexité. Par leur nature, les minerais sont très variés, en roches dures ou meubles, superficiels ou profonds. Chaque gisement est un cas particulier.

Les techniques mises en œuvre pour extraire le minerai sont nombreuses (abattage, soutènement, aération, exhaure, éclairage, etc.). Ces techniques minières mériteraient de

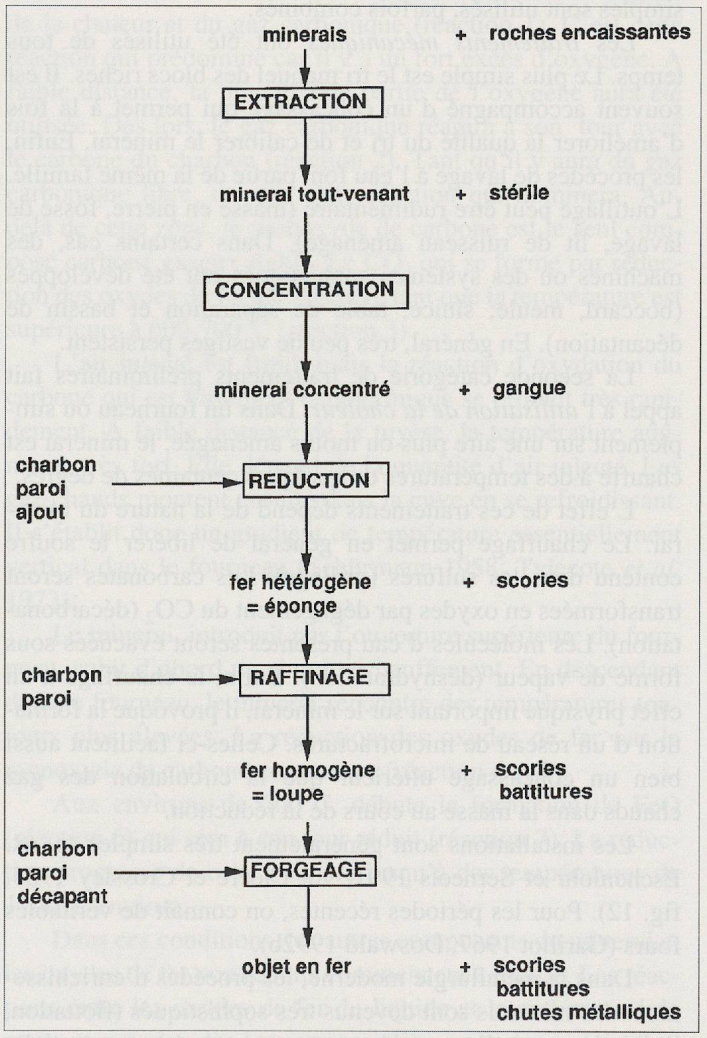


Fig. 35. Schéma général de la chaîne opératoire de la sidérurgie (méthode directe de réduction). D'après GSAF 1991a.

longs développements qui sortent du cadre de cette étude. Il faut cependant rappeler que l'exploitation des mines remonte au Néolithique (silex; Sheperd 1980). L'or, l'argent, l'étain et le cuivre furent activement recherchés bien avant le fer et dans des conditions souvent plus difficiles (Forbes 1963). Les mines de fer n'auront jamais été, sauf peut-être au XIXe siècle, à la pointe des techniques minières.

L'extraction est généralement pratiquée en surface dans des excavations peu profondes de forme quelconque (minière), parfois en tranchées régulières (p. ex. Mangin 1992, 77-96). Avant le Moyen Age, les travaux ne s'effectuent que rarement en galerie (p. ex. Evrard 1867).

Avant de procéder à l'extraction, les Anciens ont dû acquérir les connaissances nécessaires à l'identification des minerais et à la prospection des gîtes. Sur ce savoir et sa transmission d'une génération à l'autre, bien peu de choses nous renseignent .

Les traitements préliminaires du minerai

A la sortie de la mine, le minerai tout-venant n'est que très rarement directement utilisable pour la réduction. Il est nécessaire de l'enrichir. Deux grandes familles de procédés simples sont utilisés, parfois combinés.

Les *traitements mécaniques* ont été utilisés de tous temps. Le plus simple est le tri manuel des blocs riches. Il est souvent accompagné d'un concassage qui permet à la fois d'améliorer la qualité du tri et de calibrer le minerai. Enfin, les procédés de lavage à l'eau font partie de la même famille. L'outillage peut être rudimentaire (masse en pierre, fosse de lavage, lit de ruisseau aménagé). Dans certains cas, des machines ou des systèmes sophistiqués ont été développés (boccard, meule; sluice, table de séparation et bassin de décantation). En général, très peu de vestiges persistent.

La seconde catégorie de traitements préliminaires fait appel à l'*utilisation de la chaleur*. Dans un fourneau ou simplement sur une aire plus ou moins aménagée, le minerai est chauffé à des températures de quelques centaines de degrés.

L'effet de ces traitements dépend de la nature du minerai. Le chauffage permet en général de libérer le soufre contenu dans les sulfures (grillage). Les carbonates seront transformées en oxydes par dégagement du CO_2 (décarbonatation). Les molécules d'eau présentes seront évacuées sous forme de vapeur (déshydratation). Enfin, le chauffage a un effet physique important sur le minerai, il provoque la formation d'un réseau de microfractures. Celles-ci facilitent aussi bien un concassage ultérieur que la circulation des gaz chauds dans la masse au cours de la réduction.

Les installations sont généralement très simples (p. ex. Eschenlohr et Serneels 1991, 90; Cleere et Crossley 1985, fig. 12). Pour les périodes récentes, on connaît de véritables fours (Garillot 1967, Doswald 1992b).

Dans la métallurgie moderne, les procédés d'enrichissement des minerais sont devenus très sophistiqués (flottation, lixiviation, etc). Ils constituent souvent une étape essentielle influençant fortement la rentabilité globale.

Au cours de cette opération, le minerai tout-venant est débarrassé d'une partie de sa gangue (minerai concentré). Son état physique et sa composition chimique peuvent être complètement modifiés. Cette étape, techniquement simple, a des conséquences considérables sur la suite des opérations. Les vestiges étant souvent très ténus, ces techniques sont difficiles à reconstituer de manière précise. Cependant, pour toutes les estimations de rendement des procédés de réduction, il est essentiel de définir ce qui a été réellement mis dans le fourneau.

Dans la perspective de la métallurgie ancienne, l'étude du minerai ne peut donc pas être seulement basée sur l'analyse chimique d'échantillons géologiques. Il faut tenir compte des possibilités de concentration du minerai par des moyens techniques simples et procéder à des essais.

La réduction

La réduction du minerai est la phase essentielle de la sidérurgie au cours de laquelle on fabrique le métal (Durrer 1957; Fluzin 1983). Dans les minerais, le fer est combiné avec d'autres éléments dont il doit être séparé. Il faut donc briser les structures cristallines et les liaisons moléculaires. Pour cela, il faut de l'énergie et un agent réducteur capable de se combiner avec l'oxygène présent. Ces deux conditions peuvent être remplies en brûlant du charbon. La température atteinte sera suffisante et, lors de la combustion, le charbon dégage du CO, un agent réducteur puissant dans ces conditions de température. Le carbone solide peut également jouer un rôle.

Les conditions physico-chimiques de la réduction des oxydes de fer

Les courbes de Chaudron indiquent dans quelles conditions de température et de pression partielle de CO, les oxydes de fer sont réduits (fig. 36). Le domaine de stabilité de Fe_3O_4 est limité par les courbes 1 et 3. On constate qu'à haute température (1200°C), il suffit de 10% de CO pour réduire Fe_3O_4 en FeO. A température plus basse, le gaz doit être beaucoup plus riche en CO pour devenir réducteur. Par contre, au-dessous de 575°C (point A), on peut réduire directement Fe_3O_4 en Fe, l'oxyde FeO n'étant pas stable.

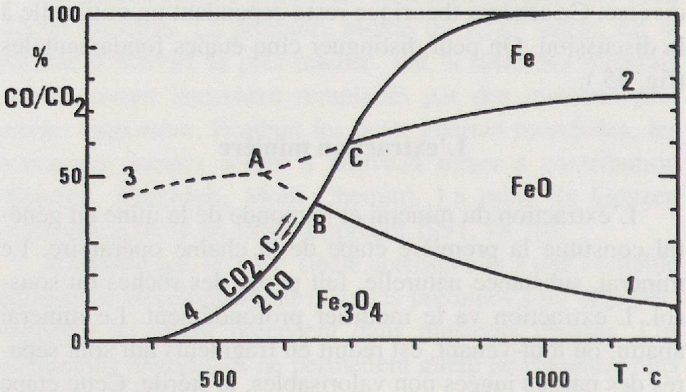
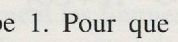


Fig. 36. Réactions entre les oxydes de fer et un mélange gazeux CO/CO_2 en fonction de la température.

Les courbes 1 et 2 limitent le domaine de stabilité de FeO. Avec 75% de CO, on peut toujours réduire FeO en Fe, quelle que soit la température.

La réaction de Boudouard représente la composition du gaz en présence de carbone solide.



$$C + CO_2 \rightarrow 2\ CO$$

L'équilibre n'est atteint que le long de la courbe 4. Si l'on se place dans le domaine situé à droite de la courbe (températures élevées), le CO_2 présent sera réduit par C et donc la pression partielle de CO augmente. Cela permet d'atteindre la courbe 1. Pour que le système évolue vers l'équilibre, il faudra alors réduire Fe_3O_4 en FeO (température minimum 650°C, point B). Lorsque cette réaction aura été complète, la teneur en CO pourra à nouveau augmenter jusqu'à ce que le système arrive à la courbe 2. Il faudra alors réduire FeO en Fe pour parvenir à l'équilibre (température minimum 700°C, point C).

Au-dessus de 700°C, en présence de C solide en excès, dans un système fermé, il est possible de réduire tous les oxydes de fer jusqu'à l'état métallique. La température contrôle la vitesse des réactions.

Dans la partie située à gauche de la courbe 4 (températures basses), en présence de C solide, CO est instable et devrait s'oxyder en CO_2. La vitesse de cette réaction est très faible et un équilibre apparent s'instaure entre les oxydes de fer et le gaz (traits discontinus). Même à ces faibles températures, en présence d'une grande proportion de CO dans le gaz, la réduction est possible.

Ces réactions se produisent à l'état solide. Il n'est pas nécessaire de fondre le minerai (point de fusion du fer 1537°C). La réduction sera d'autant plus facile que la température est élevée, que le gaz est riche en CO et que le temps de contact entre les oxydes de fer et le CO est grand (influence de la taille des particules et de l'état physique du minerai en général). Il faut souligner que la réduction au bas fourneau est loin d'être totale: seule une partie du fer présent passe à l'état métallique.

La fusion de la scorie

Il est rare de trouver, dans la nature, des minerais constitués d'oxydes de fer purs. Il y a toujours une gangue. Une partie de celle-ci peut être éliminée au cours du traitement préliminaire du minerai, mais cette séparation n'est pas totale. De plus, le charbon de bois contient une petite quantité de sels minéraux (cendres: 2-3%). Ceux-ci participent au système. Dans les fourneaux anciens, les parois sont constituées de matériaux, certes réfractaires, mais qui réagissent tout de même à un fort impact de chaleur. La paroi fournit donc une certaine quantité de matière au système.

Les substances chimiques qui se trouvent dans la gangue, dans les cendres ou dans la paroi sont essentiellement SiO_2, Al_2O_3 et CaO. Ces oxydes ne sont réduits par le carbone qu'à des températures beaucoup plus élevées que le fer.

Pour pouvoir séparer physiquement le fer métallique solide des autres constituants du système, il faut faire fondre ces derniers. Le point de fusion d'un mélange SiO_2-Al_2O_3-CaO-FeO_n dépend de la composition chimique (pp. 14-17). Les températures les plus basses de ce système se situent aux alentours de 1100°C. Ce mélange fondu forme la scorie. Il est indispensable d'obtenir cette fusion de manière à séparer le fer métallique de la scorie. Plus cette séparation sera complète, plus le produit de la réduction sera homogène et facile à travailler.

La réduction au bas fourneau

Le bas fourneau doit donc assurer une double fonction: la réduction des oxydes de fer à l'état métallique et la fusion de la scorie. Pour ces raisons, les températures nécessaires se situent au-dessus de 1000°C. Elles ne sont pas particulièrement difficiles à atteindre en utilisant du charbon de bois comme combustible et une ventilation forcée. Il est même probable que l'on puisse y arriver avec du bois et une ventilation naturelle.

On peut décrire la succession des réactions à l'intérieur du fourneau en suivant de bas en haut le parcours des gaz et de haut en bas, celui de la charge minérale (fig. 37).

L'air introduit par la tuyère dans la partie inférieure du fourneau active la combustion du charbon: celui-ci dégage de la chaleur et du gaz carbonique (réaction 1). C'est cette réaction qui prédomine car il y a un fort excès d'oxygène. A faible distance, la plus grande partie de l'oxygène aura été utilisée. Dès lors, le gaz carbonique réagira à son tour avec le carbone du charbon (réaction 2). Tant qu'il y aura du gaz carbonique libre, ce sera cette réaction qui dominera. Au-delà de cette zone, le monoxyde de carbone est le seul composé carboné gazeux stable. Le CO_2 qui se forme par réduction des oxydes de fer est régénéré tant que la température est supérieure à 600-700°C (réaction 3).

L'air injecté est froid, mais la réaction d'oxydation du carbone qui est fortement exothermique se produit très rapidement. A faible distance de la tuyère, la température augmente très fort. Elle dépend de la quantité d'air injecté. Les gaz chauds montent ensuite dans la cuve en se refroidissant. Il s'établit donc un gradient de température essentiellement vertical dans le fourneau (Schürmann 1958; Tylecote *et al.* 1973).

Le minerai, introduit par l'ouverture supérieure du fourneau, subit d'abord un simple échauffement. En descendant dans le fourneau, le minerai rencontre des températures toujours plus élevées. La réduction des oxydes de fer par le monoxyde de carbone commence (réaction 4 et 5).

Aux environs de 600°C, débute la formation de FeO (réaction 6) qui sera à son tour réduit (réaction 7). La réduction progresse de cette manière jusqu'à des températures de 1100°C environ.

Dans ces conditions, les autres composants du minerai et les oxydes de fer non réduits commencent à fondre. Les réactions entre les oxydes de fer du liquide et le carbone solide peuvent prendre dès lors une certaine importance (réaction 8). Les particules de fer solides se rassemblent en une masse alors que la scorie s'écoule par gravité.

	TEMPÉRATURE °C	RÉACTIONS GAZ / CHARBON	RÉACTIONS GAZ / MINERAI	COMPORTEMENT MINERAI / SCORIE
GUEULARD	300 - 400	dilution dans l'air		
		CO_2 ne se régénère plus	④ $3\ Fe_2O_3 + CO \rightarrow 2\ Fe_3O_4 + CO_2$	
			⑤ $Fe_3O_4 + 4\ CO \rightarrow 3\ Fe + 4\ CO_2$ (avec CO/CO2 élevé)	
CUVE	600 - 700		⑥ $Fe_3O_4 + CO \rightarrow 3\ FeO + CO_2$	
		③ $CO_2 + C \rightarrow 2\ CO$	⑦ $FeO + CO \rightarrow Fe + CO_2$	
	1100 - 1200			liquéfaction
	1100 - 1400	② $CO_2 + C \rightarrow 2\ CO$		⑧ $FeO + C \rightarrow Fe + CO$
TUYÈRE	30 -> 1400	① $O_2 + C \rightarrow CO_2$		
FOND				solidification

Fig. 37. Réactions chimiques principales pendant la réduction d'un minerai de fer oxydé dans un bas fourneau. D'après Eschenlohr et Serneels 1991, tab. 8.

Le produit brut et les résidus

Il se forme donc à l'intérieur du bas fourneau, près de l'arrivée d'air, un ou des blocs de taille variable, riches en fer métallique. Ces produits restent mal connus du point de vue archéologique.

Quelques pièces sont ou pourraient être interprétées comme tels ou tout au moins comme des fragments (Schaaber 1963, 148-159; Nosek 1977; Domergue *et al.* 1982, fig. 3 et 4; Straube 1989). Les contextes archéologiques ne sont pas toujours suffisamment explicites pour pouvoir considérer sans ambiguïté les objets décrits comme des produits bruts du bas fourneau. Certaines pièces pourraient être des fragments rejetés parce que considérés comme non utilisables par les artisans. Les interprétations sont généralement fondées sur la métallographie. Les reconstitutions expérimentales fournissent également des éléments pour reconnaître le produit du bas fourneau (Pleiner 1969; Andrieux 1990, 382-403; Crew 1991).

Les éponges de fer sont parfois denses, généralement vacuolaires (porosité 10-50%). Le fer se présente en masses, en nodules ou en filaments. Il est toujours associé intimement à de la scorie en proportion variable (10-80%). Les charbons sont fréquents. C'est donc un produit composite avec des parties métalliques et d'autres non.

Il est évident que des bas fourneaux différents donneront des produits bruts eux aussi différents. Leur point commun est que, dans tous les cas, le métal est associé à une certaine quantité de scorie et que la texture du fer n'est pas compacte. Les scories de réduction sont extrêmement diverses quant à leurs formes, leurs aspects et leurs compositions chimiques. D'autres résidus sont associés à la réduction: les cendres et le charbon incomplètement consumé, les fragments de minerai en partie réduits et les morceaux de paroi plus ou moins fondue.

Les bas fourneaux

Toutes sortes de bas fourneaux sont décrits dans la bibliographie. Plusieurs essais de classification ont été proposés (Forbes 1950, 388-391; Coghlan 1956; Cleere 1972; Serning 1976; Tylecote 1987, 177). Aucune ne possède de valeur chronologique universelle. Trop de facteurs locaux (nature du minerai et du combustible, conditions socio-économiques, etc.), ont une influence sur l'architecture des bas fourneaux pour espérer qu'une typologie ait une portée chronologique dépassant le cadre régional.

Un autre point de vue peut être adopté, celui de la typologie technologique (Pelet 1982). Les appareils destinés à la production du fer sont classés en fonction non plus de leur architecture mais sur la base de critères technologiques. Cette démarche permet un classement raisonné des différents bas fourneaux. Elle n'a malheureusement pas d'implications chronologiques. Les nouvelles découvertes suisses (Montcherand VD: Abetel 1992; Boécourt JU: Eschenlohr et Serneels 1991) s'intègrent sans mal au schéma de P.-L. Pelet.

A l'échelle européenne, on peut distinguer quelques grands types d'appareils.

Le type de bas fourneau le plus simple pourrait être *la fosse de combustion* (fig. 38 A). L'examen critique de la bibliographie montre que le fonctionnement n'est pas clairement établi. Plusieurs découvertes, notamment les plus anciennes, ne sont pas crédibles et pourraient correspondre à des foyers de forge ou des appareils plus sophistiqués en très mauvais état de conservation (p. ex. Quiquerez 1866, pl. 1c; Clough 1985).

Les fourneaux plus évolués sont constitués d'une cuve et munis d'un dispositif d'aération naturelle ou artificielle. La forme de la cuve (cylindrique, tronconique, en cloche, etc.) et sa position par rapport au niveau de circulation extérieur

(enterrée, semi-enterrée, adossée à un talus, construite, etc.) présentent toutes les variantes possibles.

Indépendamment de la forme de l'appareil, deux systèmes s'opposent: les fourneaux à scorie piégée («non slag-tapping», fig. 38B) et ceux à scorie coulée («slag-tapping», fig. 38C).

Dans certains bas fourneaux, *la plus grande partie de la scorie reste à l'intérieur de la cuve* (fig. 38B). Elle s'écoule vers le fond et se solidifie dans la zone froide située au-dessous de l'arrivée d'air. Le fourneau peut être nettoyé ensuite et réutilisé. Fréquemment, il est abandonné et un nouvel appareil est construit pour l'opération suivante.

Ce sont typiquement les fourneaux de l'Europe de l'Est et du Nord pendant les premiers siècles de notre ère (Bielenin 1974, Pleiner 1965). Ils sont très peu représentés à l'ouest du Rhin (exceptions: East Anglia, Grande-Bretagne: Tylecote 1986, 135-136; Sarthe, France: Pioger 1971; Morvan, France: Mangin 1992, 55-66). Le fourneau de Lajoux JU en Suisse pourrait faire partie de ce groupe d'après l'aspect des scories (Steiner 1979, Joos, com. pers.). Des modèles comparables sont connus en Afrique et cela avant le début de notre ère (Tylecote 1976, 47) et jusqu'à nos jours (Fuchs 1978). Du point de vue technologique, les fourneaux médiévaux de Scandinavie font partie de la même famille (fourneau «Evenstad», Espelund 1991). De petits fourneaux fonctionnant sur le même principe sont connus à la fin de l'âge du Fer au Pays de Galles (Crew 1986).

L'autre grande famille regroupe les appareils dans lesquels *la scorie est en majeure partie coulée à l'extérieur de la cuve* (fig. 38 C). L'évacuation de la scorie permet probablement le traitement d'un volume de minerai plus important.

Ces fourneaux sont généralement réutilisés un grand nombre de fois.

Les appareils fonctionnant sur ce principe sont largement répandus à travers toute l'Europe et ce, à partir de l'âge du Fer et jusqu'à la période moderne. Les variantes sont très nombreuses (p. ex.: Carinthie, Autriche: Straube 1964; Les Martys, France: Domergue 1991; Weald, Grande-Bretagne: Cleere 1970; Moravie: Pleiner 1958, 208-225). Tous les fourneaux suisses correctement documentés du point de vue archéologique, appartiennent à cette famille sauf peut-être le fourneau 14 de Bellaires 1 VD (Pelet 1993, p. 42).

Le raffinage

L'éponge de fer brute demande à être purifiée, c'est-à-dire qu'il faut éliminer les inclusions non métalliques, scorie et charbon, contenues dans la masse. Il faut aussi resserrer la structure et souder les particules de fer entre elles. Ce résultat peut être obtenu de plusieurs façons et, bien sûr, la technique utilisée est en rapport avec la qualité de l'éponge produite (Serneels, sous presse 2).

Une méthode consiste à placer l'éponge brute dans un foyer ouvert. Sous l'action de la chaleur, la scorie se liquéfie et s'écoule. La pièce est ensuite martelée à chaud. Un certain nombre de cycles chauffage-martelage sont nécessaires pour obtenir un produit forgeable.

Une telle opération se pratique dans un foyer très comparable à celui de la forge (fig. 39), alimenté en charbon de bois et activé par un soufflet. Le résidu essentiel sera formé par une scorie en forme de calotte qui s'accumulera sous l'arrivée d'air, près du fond du foyer. D'autres déchets sont constitués par les parois fondues ou scorifiée et des morceaux informes de scorie. Enfin, le martelage provoque la

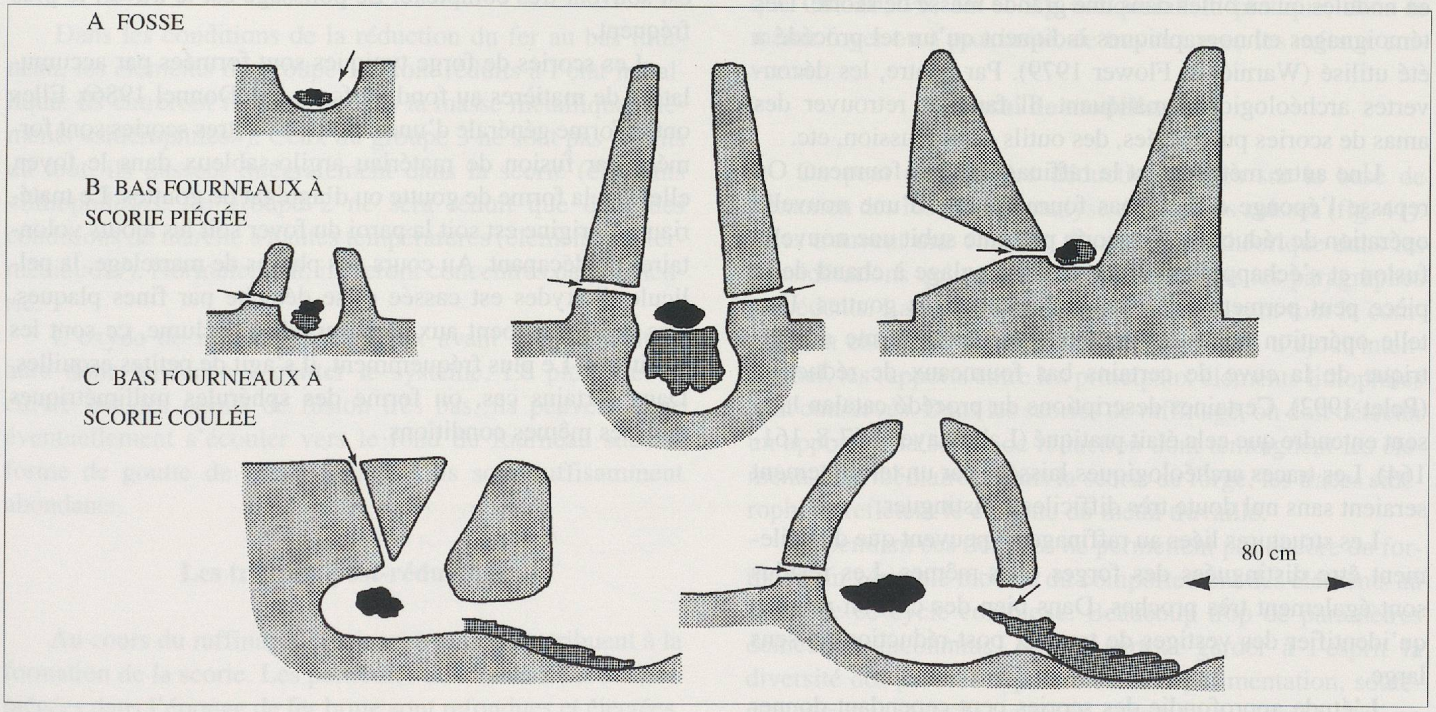


Fig. 38. Principales familles de bas fourneaux.

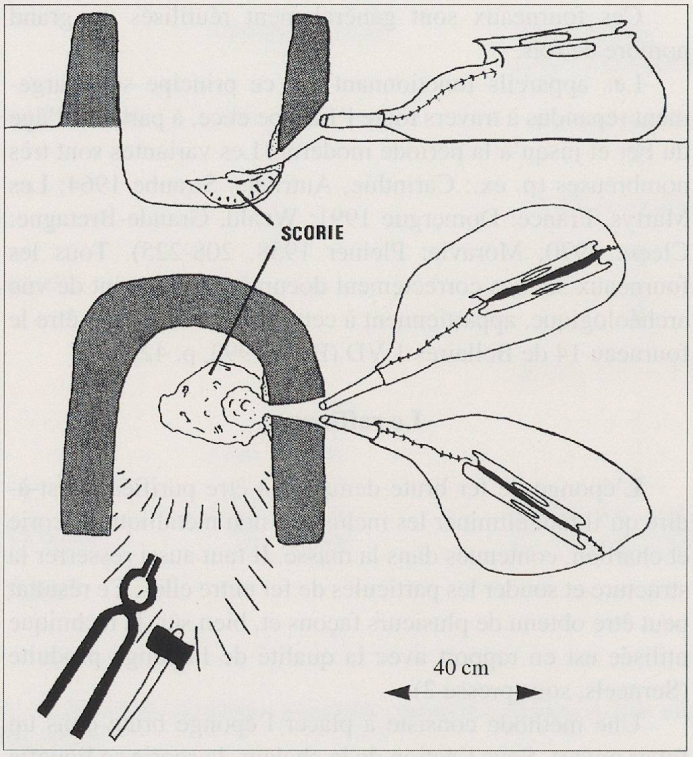


Fig. 39. Schéma d'un foyer de raffinage. D'après GSAF 1991a.

formation d'esquilles d'oxydes de fer, les battitures. Le produit est un bloc de fer épuré et présentant des faces martelées.

D'autres techniques sont possibles. La plus simple est purement mécanique. L'éponge est battue à froid et fragmentée. La scorie est pulvérisée et les particules métalliques, tenaces, sont isolées. Il suffit alors de les sélectionner et de les souder les unes aux autres à la forge. Cette technique serait parfaitement adaptée lorsque le fer se trouve disséminé en nodules ou en billes dans une grande masse de scorie. Des témoignages ethnographiques indiquent qu'un tel procédé a été utilisé (Warnier et Flower 1979). Par contre, les découvertes archéologiques manquent. Il faudrait retrouver des amas de scories pulvérisées, des outils de percussion, etc.

Une autre méthode est le raffinage au bas fourneau. On repasse l'éponge dans le bas fourneau lors d'une nouvelle opération de réduction. La scorie présente subit une nouvelle fusion et s'échappe de la masse. Un cinglage à chaud de la pièce peut permettre de chasser les dernières gouttes. Une telle opération pourrait être suggérée par la forme asymétrique de la cuve de certains bas fourneaux de réduction (Pelet 1992). Certaines descriptions du procédé catalan laissent entendre que cela était pratiqué (Laboulaye 1867-8, 161-164). Les traces archéologiques laissées par un tel traitement seraient sans nul doute très difficiles à distinguer.

Les structures liées au raffinage ne peuvent que difficilement être distinguées des forges elles-mêmes. Les résidus sont également très proches. Dans bien des cas, on ne peut qu'identifier des vestiges de travaux post-réduction au sens large.

L'étude approfondie des scories peut cependant donner des indications en faveur de l'une ou de l'autre activité.

La forge

Une fois que le fer est suffisamment épuré, il devient possible de forger dans de bonnes conditions. L'opération poursuit plusieurs buts qui dépendent de la nature de l'objet à fabriquer.

Deux aspects sont essentiels: d'une part, le forgeron façonne l'objet, il lui donne sa forme, d'autre part, il modifie les qualités physiques du métal (Fluzin 1983).

L'outillage de base du forgeron est constitué du marteau, des pinces et de l'enclume, auxquels s'ajoutent les outils tranchants (ciseaux, etc.). Depuis l'âge du Fer, il existe des outils spécialisés pour les différents travaux (Pleiner 1962).

La mise en forme se fait généralement à chaud, mais le fer peut également être travaillé à basses températures. L'assemblage de pièces différentes peut être réalisé par soudure à chaud. Le brasage consiste à réunir deux parties d'un objet à l'aide d'un autre métal fondu (plomb, cuivre ou étain). Différents traitements permettent de modifier les propriétés physiques du métal. La vitesse du refroidissement a une forte influence sur la dureté du matériau (trempe, revenu). Par contact avec le charbon de bois dans le feu de forge, il est possible d'obtenir une cémentation superficielle du fer par diffusion du carbone à l'état solide.

A maintes occasions au cours du forgeage, l'artisan est amené à nettoyer la surface du métal de la pellicule d'oxydes qui se forme à chaud au contact de l'air. Pour cela, il utilise un décapant (fondant), c'est-à-dire une matière qu'il étend sur les surfaces de manière à ce que les oxydes se détachent de celle-ci. Traditionnellement, on utilise du sable ou de l'argile.

Il faut rappeler qu'après la mise en forme des parties métalliques d'un objet, il faut encore fabriquer le manche et les garnitures diverses. La décoration des pièces métalliques est souvent très complexe. Le polissage est le travail le plus fréquent.

Les scories de forge typiques sont formées par accumulation de matières au fond du foyer (McDonnel 1986). Elles ont la forme générale d'une calotte. D'autres scories sont formées par fusion de matériau argilo-sableux dans le foyer, elles ont la forme de goutte ou d'agrégat de gouttes. Le matériaux d'origine est soit la paroi du foyer soit les ajouts volontaires de décapant. Au cours des phases de martelage, la pellicule d'oxydes est cassée et se détache par fines plaques. Ces débris tombent aux alentours de l'enclume, ce sont les battitures. Le plus fréquemment, il s'agit de petites esquilles. Dans certains cas, on forme des sphérules millimétriques dans les mêmes conditions.

Le comportement des éléments chimiques au cours du processus sidérurgique

La réduction

Les différents éléments chimiques présents dans la charge (minerai, cendre, paroi, ajout éventuel) vont, au cours de la réduction, se partager entre le produit métallique et la scorie. Connaissant l'ordre de grandeur des conditions régnant au cours de l'opération, on peut estimer, au moins qualitativement le comportement des principaux éléments.

Le diagramme d'Elligham (fig. 40) représente la variation d'enthalpie libre ($\Delta G°$) en fonction de la température (T). Chaque droite correspond à la fonction $\Delta G°$ pour un couple métal-oxyde. A une température T donnée, on peut réduire l'oxyde AO à l'aide de l'élément B si $|\Delta G°|$ de B est supérieure à $|\Delta G°|$ de A. Dans ce cas, la droite représentant la réaction $2A + O_2 \rightarrow 2AO$ coupe l'ordonnée de T au-dessus de la droite de la réaction $2B + O_2 \rightarrow 2BO$.

On constate que pour la plupart des éléments, $|\Delta G°|$ diminue quand la température augmente. Pour le carbone, l'effet est contraire. Le carbone sera donc, à haute température, un réducteur pour les autres éléments. Dès lors, on peut considérer 3 groupes d'éléments en fonction de la température à laquelle les droites coupent celle du carbone:

1 basses températures:	Cu, Pb, Ni, Co, Fe, P.
2 températures moyennes:	Mn, Cr, V.
3 hautes températures:	Si, Al, Ca, Mg, Ti, Zr, Ba, Sr, Y, Rb, etc.

Dans les conditions de la réduction du fer au bas fourneau, les éléments du groupe 1 seront réduits à l'état métallique. Ils entreront facilement dans la masse métallique (éléments «sidérophiles»). Ceux du groupe 3 ne sont pas réduits du tout, ils passent intégralement dans la scorie (éléments «lithophiles»). Le groupe 2 ne sera réduit que dans des conditions de marche à hautes températures (éléments «intermédiaires»). Normalement, ils seront concentrés dans la scorie.

L'oxyde de zinc devient gazeux avant d'être réduit, il aura donc tendance à quitter le système. Le plomb et le cuivre ont des points de fusion très bas, ils peuvent donc éventuellement s'écouler vers le fond du fourneau sous la forme de goutte de métal liquide s'ils sont suffisamment abondants.

Les travaux post-réduction

Au cours du raffinage, plusieurs sources contribuent à la formation de la scorie. Les particules de scories de réduction piégées dans l'éponge de fer brute sont refondues et éjectées. Des morceaux de métal (fer et éléments d'alliage) sont perdus. La paroi du foyer fond et contribue également. La cendre de charbon est incorporée. Des battitures peuvent être incorporées si elles tombent dans le foyer mais leur composition chimique est, a priori, la même que celle de la masse métallique dont elles se détachent. Enfin, un décapant, sable ou argile, peut être utilisé.

On peut attendre des compositions chimiques très différentes des scories de réduction. En effet, la teneur en fer sera généralement très élevée. Cette fois, les éléments sidérophiles ne seront pas séparés, leurs teneurs devraient être élevées. Pour les lithophiles, il sera impossible de quantifier les apports de la paroi, de la scorie de réduction refondue et d'un éventuel décapant. La cendre de charbon joue un rôle proportionnellement plus important dans les scories post-réduction. Le Ca et le K sont souvent abondants pour cette raison.

Par contre, les éléments intermédiaires offrent une alternative. Mn, Cr et V sont souvent assez abondants dans les minerais de fer car ils ont des comportements géochimiques assez comparables à cet élément, en particulier dans les sols et minerais d'altération continentale. Ils sont tous trois abondants dans le Sidérolithique et passent dans la scorie au cours de la réduction. Au contraire, ils sont moins abondants dans les matériaux argileux normaux et les sables, c'est-à-dire les constituants éventuels de la paroi et des décapants. Des teneurs élevées en Mn, Cr et V indiquent donc une participation importante de la scorie de réduction refondue à la scorie de raffinage.

Les scories de forge se constituent de la même manière que les déchets du raffinage, mis à part que la contribution de la scorie de réduction est mineure et que le rôle des décapants est éventuellement prépondérant.

Dans le cadre de la forge, d'autres activités métallurgiques prennent souvent place. La présence d'éléments tels que Cu, Zn, Pb, Sb et Ag indiquerait la pratique, dans le même foyer ou à proximité, de travaux avec les métaux cuivreux.

Essai de modélisation

On peut résumer les déductions faites sur la base de l'examen des résultats d'analyse des scories suisses (fig. 41). Elles trouvent une ébauche d'explication théorique dans les considérations qui ont été développées dans les paragraphes précédents. La scorie de réduction reflète avant tout la composition chimique du minerai. Si il n'y a pas d'ajout intentionnel, les rapports entre les principaux éléments lithophiles sont conservés. Dans les scories de raffinage, on doit détecter un apport de la scorie de réduction dont témoignent les éléments intermédiaires. Dans la scorie de forge, les traces sidérophiles reflètent le contenu du métal travaillé.

Cependant ces données ne permettent pas encore de formuler un véritable modèle du comportement des éléments au cours de ce cycle complexe. Beaucoup trop de paramètres demeurent inconnnus. Il faut surtout garder à l'esprit la diversité des processus possibles. L'expérimentation, soutenue par un contrôle serré au laboratoire, devrait être en mesure d'évaluer ces propositions.

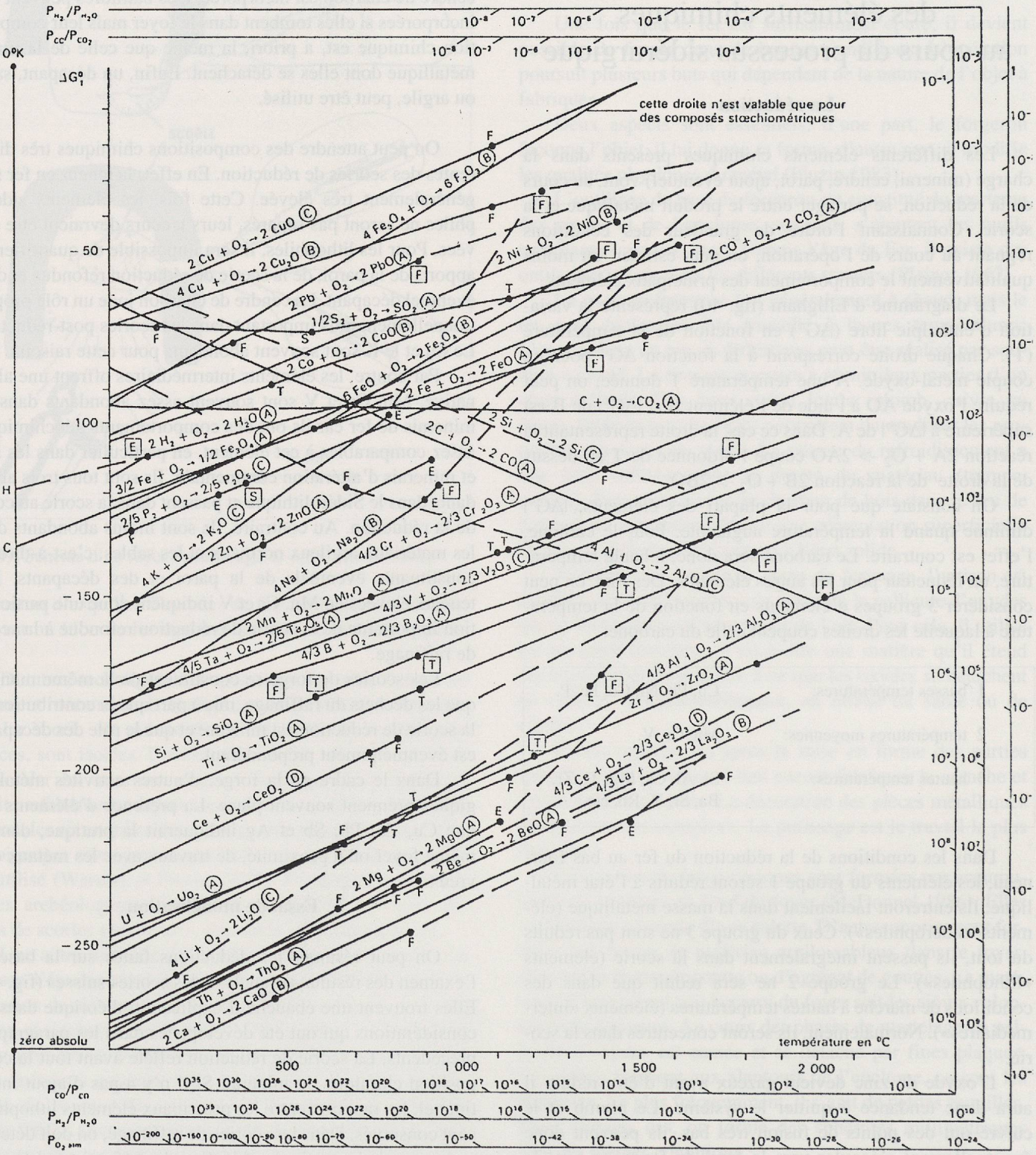


Fig. 40. Diagramme d'Elligham: variation de l'enthalpie libre en fonction de la température.

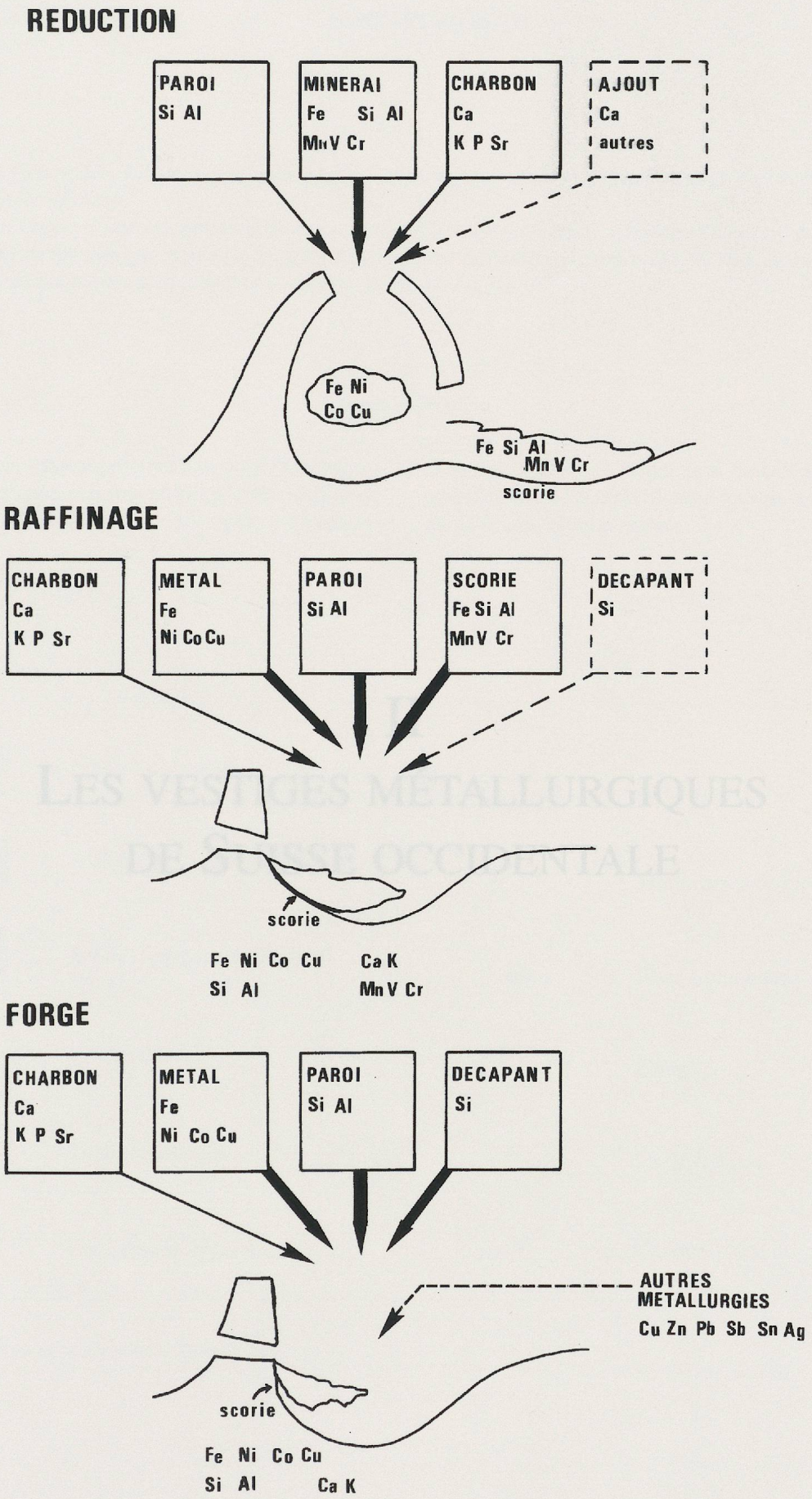


Fig. 41. Essai de modélisation du comportement des éléments chimiques au cours du processus sidérurgique, basé sur les données fournies par les analyses de scories de Suisse occidentale.