

**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:** 6: L'atelier de réduction de Montcherand et sa région (Vaud, Suisse)  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-836182>

### **Nutzungsbedingungen**

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

### **Conditions d'utilisation**

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

### **Terms of use**

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

**Download PDF:** 06.05.2025

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

## 6

# L'ATELIER DE RÉDUCTION DE MONTCHERAND ET SA RÉGION

(VAUD, SUISSE)

**A**u pied du Jura, à quelques 10 km au N de la colline du Mormont, la ville d'Orbe commande le débouché de la rivière, l'Orbe dans la plaine (fig. 137). Le cours d'eau descend du lac de Joux, par Vallorbe, et se dirige vers Yverdon et le lac de Neuchâtel. La ville occupe un relief peu accentué (alt. 490 m) dominant la basse plaine. A l'O, la rivière taille une gorge profonde à travers les collines qui s'étendent au pied de la chaîne du Jura.

La colline d'Orbe est formée par une structure anticlinale faiblement bombée, bordée à l'E par une faille importante (Aubert 1963; Custer 1928). Le substratum est constitué par les calcaires du Crétacé supérieur (faciès Urgonien). Ils sont recouverts par une faible couverture de sédiments tertiaires et quaternaires. Les alluvions récentes de la rivière se sont déposées dans la basse plaine, à l'E. Vers l'O, la molasse apparaît sous la couverture glaciaire. Dans la gorge, l'Orbe entaille les sédiments du Crétacé. Aux Clées, à 6 km en amont, elle atteint le Jurassique.

La situation générale est la même que pour la région du Mormont (fig. 87). Peu de vestiges renseignent sur l'occupation préromaine. Après la conquête, une station routière se développe à Orbe, près du point de passage de la rivière. Elle est mentionnée sur un document du III<sup>e</sup> siècle de notre ère, l'Itinéraire d'Antonin (*Urba*; Mottas 1986, 124; van Berchem 1982, 63). De là, partait une route à travers le Jura, en direction de Pontarlier. La zone des collines est occupée par des habitats ruraux à l'époque romaine et probablement aussi pendant le Haut Moyen Age (Viollier 1927, carte). Le site prestigieux de la grande villa d'Orbe Boscéaz se trouve à 2 km au N du bourg médiéval (von Gonzenbach 1974).

Un atelier de réduction du minerai de fer a été découvert en 1983 à La Léchère sur le territoire de la commune de Montcherand (Abetel 1992). Aucun autre vestige de métallurgie extractive n'est signalé dans la région.

## Le minerai

### Le Sidérolithique de la région d'Orbe

Le Sidérolithique de la région d'Orbe affleure relativement mal. Sur la colline d'Orbe, il a été observé anciennement en plusieurs points (fig. 139 et 140: M3 à M6). Les terrains habituels sont représentés: sables, bolus jaunes et

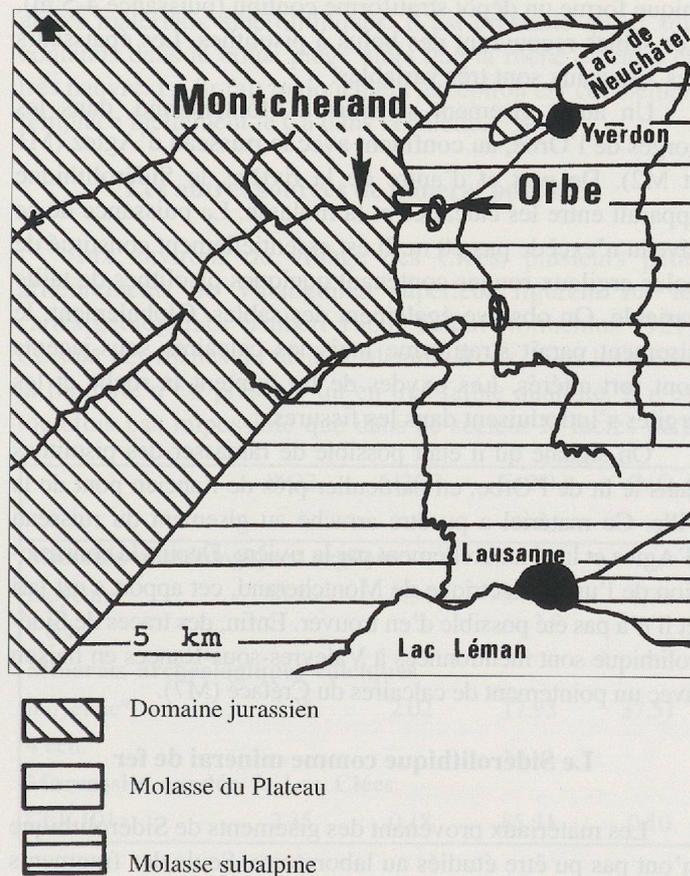


Fig. 137. Esquisse tectonique de la région d'Orbe-Montcherand.

N°	Nom d'usage	Coordonnées			Bibliographie	Mode de gisement	
		X	Y	Z			
<b>Secteur Montcherand-</b>							
<b>Gorge de l'Orbe</b>							
M1	Ruisseau d'Agiez	529 350	175 250	475	Aubert 1963,9 Chavannes 1856, 21	couche et remplissages	peu de pisolithes
M2	Usine électrique	529 300	175 550	500	Aubert 1963, 9 Jaccard 1869, 67 Custer 1928, 21	couche et remplissages	peu de pisolithes
<b>Secteur Colline d'Orbe</b>							
M3	Orbe-Salle omnisport	530 520	173 350	460	Weidmann 1984, 135-41	couche	peu de pisolithes
M4	Orbe-Ancien pont	530 675	174 800	450	Schardt 1880, 626	crevasse ?	
M5	Orbe-Sortie Nord 1	530 675	176 300	450	Schardt 1880, 626	crevasse ?	peu de pisolithes
M6	Orbe-Sortie Nord 2 Le Signal	530 725	176 300	450	Schardt 1880, 626 Pelet 1978, 57	crevasse ? concession 1524	grès rouge
<b>Secteur Rances</b>							
M7	Les Valerettes	530 650	178 650	490	Schardt 1880, 626	crevasse ?	

Fig. 138. Liste des occurrences de Sidérolithique dans la région d'Orbe-Montcherand.

rouges, pisolithes ferrugineux. Les sondages et les terrassements entrepris en 1982-3 donnent une idée assez précise de ce gisement (Weidmann M. 1984). Sous une faible couverture de sédiments quaternaires et oligocènes, le Sidérolithique forme un dépôt stratiforme continu (puissance 4-5 m). Les sables recouvrent des bolus à pisolithes. Les épaisseurs des 2 niveaux sont très variables.

Un autre gisement se situe à Montcherand, dans les gorges de l'Orbe, au confluent avec le ruisseau d'Agiez (M1 et M2). De part et d'autre de la rivière, le Sidérolithique apparaît entre les calcaires et la molasse. La puissance de ce niveau n'excède pas 10 m. Il est essentiellement constitué de bolus argileux rouges contenant quelques pisolithes de taille variable. On observe également des sables. Globalement, le gisement paraît stratiforme mais les calcaires sous-jacents sont fort altérés. Les oxydes de fer teintent la roche et les argiles s'introduisent dans les fissures.

On signale qu'il était possible de ramasser des pisolithes dans le lit de l'Orbe, en particulier près de l'ancien pont de la ville. Ce matériel a pu être arraché au gisement du ruisseau d'Agiez et lavé naturellement par la rivière. Depuis la construction de l'usine électrique de Montcherand, cet apport s'est tari et il n'a pas été possible d'en trouver. Enfin, des traces de Sidérolithique sont mentionnées à Valeyres-sous-Rances en liaison avec un pointement de calcaires du Crétacé (M7).

### Le Sidérolithique comme minerai de fer

Les matériaux provenant des gisements de Sidérolithique n'ont pas pu être étudiés au laboratoire. Seuls des fragments récoltés au cours des fouilles de l'atelier de réduction de La Léchère ont été analysés.

La majorité des échantillons sont des blocs compacts de bolus argileux rouge. Les pisolithes sont très peu nombreux, petits et souvent mal consolidés. Du point de vue de la consistance, ils se distinguent à peine de la matrice argileuse.

Par leur aspect, ces échantillons sont très proches des minerais «archéologiques» argileux de la région du Mormont. On constate fréquemment la présence d'imprégnations d'oxydes de manganèse qui donnent une coloration noire aux surfaces des petites fissures.

Il est très probable que ce matériel provienne des gisements des gorges de l'Orbe. Il est certain que c'est bien la matière première utilisée par les anciens sidérurgistes. En effet, de nombreux échantillons portent des traces visibles de chauffage (aspect fritté, variation de coloration, réaction à l'aimant, présence de FeO). D'autre part, l'on n'a pas retrouvé de pisolithes lavés sur le site.

Les analyses chimiques montrent des teneurs assez basses en fer et un rapport Si:Al supérieur à 4:1, c'est-à-dire élevé. A priori, ce ne sont que des minerais médiocres.

Les teneurs en MnO varient beaucoup et peuvent être élevées (0,4 à 4,6%). Il y a toujours un peu de CaO. Le V est relativement abondant comme c'est souvent le cas dans le Sidérolithique jurassien. Les autres éléments traces ne montrent rien de particulier si ce n'est le Co qui est assez élevé.

D'autres échantillons trouvés au cours des fouilles sont des calcaires ou des marno-calcaires ferrugineux. Ce sont des morceaux de la roche encaissante, fortement altérée et contenant une proportion notable d'argiles sidérolithiques. Ces échantillons sont comparables à ceux trouvés sur le site de Prins-Bois 2 (p. 115). Ils ont des compositions très variables en fonction de la quantité de bolus piégée dans l'échantillon. La teneur en fer n'est pas constante. Par contre, le rapport

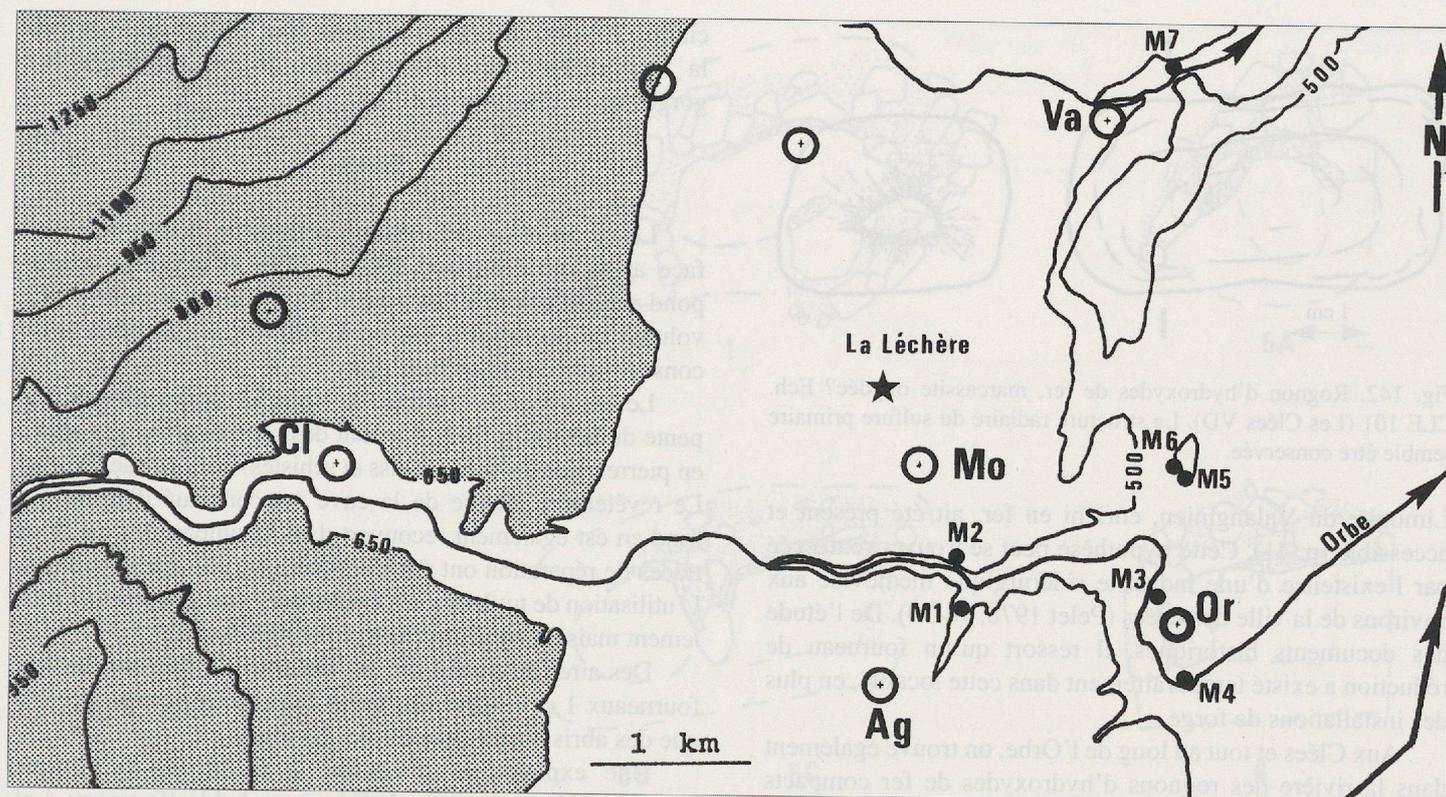


Fig. 139. Carte des sites miniers et métallurgiques de la région d'Orbe-Montcherand.

- Minerai      N° M1 à M7: voir fig. 138      ★ Atelier de réduction
- Villages      Ag = Agiez      Cl = Les Clées      Mo = Montcherand      Or = Orbe      Va = Valeyres-sous-Rances

Si:Al (env. 4:1) est plutôt stable et comparable avec celui des bolus. Ces calcaires, bien que ferrugineux, ne peuvent être utilisés seuls comme minerai. Ajoutés en faible proportion, ils joueront un rôle favorable, abaissant le point de fusion et libérant une certaine quantité de fer (p. 146). Les éléments traces sont presque tous en quantités moindres que dans les

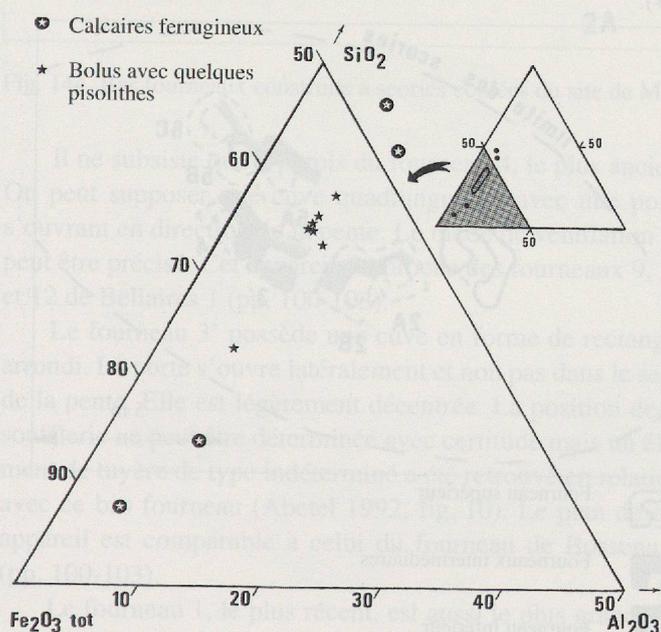


Fig. 140. Composition chimique des minerais «archéologiques» de Montcherand - La Léchère.

autres matériaux sidérolithiques. Il est probable qu'ils sont contenus dans le bolus piégé alors que la roche calcaire est très pauvre. Le Sr fait logiquement exception car cet élément remplace facilement le Ca dans la calcite.

#### Les autres sources de minerai possibles

Aux environs du village des Clées, plusieurs petits affleurements de Valanginien supérieur figurent sur les cartes géologiques (Aubert 1963; Tutein Nolthenius 1921). Ce sont des roches du faciès Calcaires Roux, dans lesquelles la limonite n'est présente qu'en très faible quantité. Il n'est toutefois pas impossible que dans ce secteur le faciès de la

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO
	tot			
<b>Minerais archéologiques argileux</b>				
moyenne	30.26	6.34	54.00	1.74
7 éch.				
<b>Minerais archéologiques calciques</b>				
moyenne*	7.95	2.02	17.93	37.51
4 éch.				
<b>Marcassite oxydée ?, Les Clées</b>				
CLE 101	2.35	0.18	85.31	0.10

Fig. 141. Principaux caractères chimiques des minerais «archéologiques» de Montcherand - La Léchère.

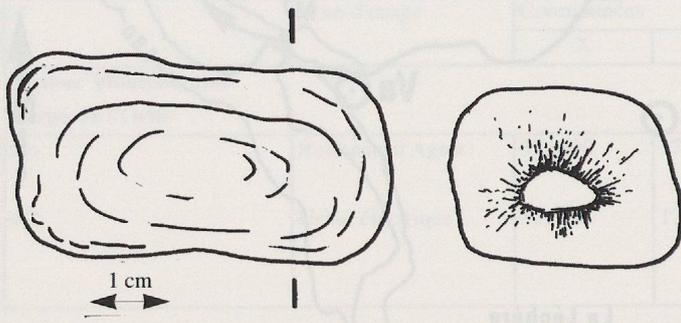


Fig. 142. Rognon d'hydroxydes de fer, marcassite oxydée? Ech. CLE 101 (Les Clées VD). La structure radiaire du sulfure primaire semble être conservée.

Limonite du Valanginien, enrichi en fer, ait été présent et accessible (p. 41). Cette hypothèse peut se trouver renforcée par l'existence d'une industrie sidérurgique médiévale aux environs de la ville des Clées (Pelet 1978, 76-79). De l'étude des documents historiques, il ressort qu'un fourneau de réduction a existé temporairement dans cette localité, en plus des installations de forge.

Aux Clées et tout au long de l'Orbe, on trouve également dans la rivière des rognons d'hydroxydes de fer compacts aux formes globuleuses (diam. 5 cm). Ils se déposent dans les trous et les dépressions du lit de la rivière, en particulier dans les marmites. Ils ne peuvent pas appartenir au Sidérolithique puisqu'aucune occurrence n'est connue à l'amont. Leur structure interne fibro-radiée n'est pas celle des pisolithes (fig. 142). Elle fait penser à la pseudomorphose par les hydroxydes de rognons de marcassite. Leur origine est incertaine, la rivière possédant un bassin versant étendu.

L'analyse chimique montre que l'on a affaire à des hydroxydes de fer quasiment purs (CLE 101, Annexe 5.1, fig. 141 et 142). Le spectre des éléments mineurs et traces, est complètement différent de celui du Sidérolithique. De même, ils ne contiennent pour ainsi dire pas d'aluminium (rapport Si:Al = 10:1). Ces rognons, très riches et naturellement lavés par la rivière, auraient pu former de petites accumulations d'une matière première de choix. Il est, par contre, impossible de détecter leur exploitation sur le terrain.

## Les fouilles de l'atelier de réduction de Montcherand-La Léchère

L'atelier de réduction du minerai de fer de Montcherand, La Léchère, situé sur le tracé de l'autoroute N9b, a été fouillé en 1983 par M. Klausener (Weidmann D. 1984). Une monographie récente lui est consacrée (Abetel 1992).

Le site se trouvait à 2,5 km au NO de la petite ville d'Orbe, au pied des premières chaînes du Jura. Il occupait un coteau en pente douce, exposé à l'E, à environ 580 m d'altitude (fig. 139, coordonnées: 528 790 / 176 850). Il est actuellement complètement détruit.

Le substratum est formé de graviers et limons fluvio-gla-

ciaires. Le lit d'un ancien ruisseau était encore marqué dans la topographie. Les affleurements de Sidérolithique des gorges de l'Orbe ne sont qu'à 2,5 km.

### Le site

La prospection magnétique permet de définir une surface anormale d'environ 300 m<sup>2</sup> (25 x 12 m). Elle correspond probablement à l'extension de la couche de scories. Le volume de scories est estimé à 300 m<sup>3</sup>. L'état général de conservation est assez médiocre.

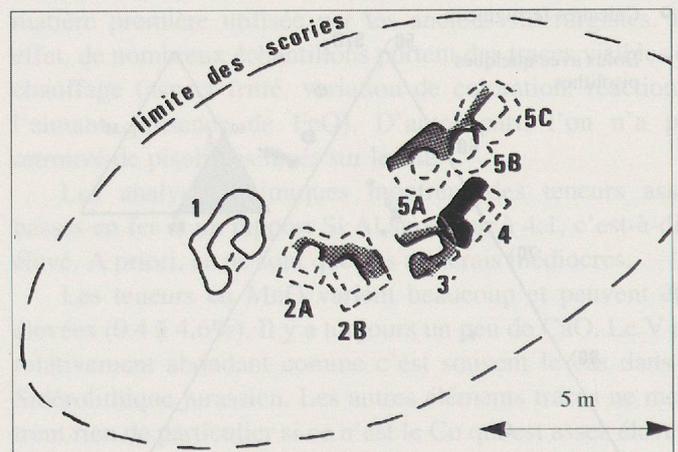
Le site a livré les vestiges de 9 bas fourneaux adossés à la pente du talus (fig. 143). Ce sont des constructions grossières en pierres morainiques (gneiss et schistes) liées par de l'argile. Le revêtement interne de la cuve est constitué d'argile. Le fond en est également recouvert dans la plupart des cas. Des traces de réparation ont été identifiées sur plusieurs appareils. L'utilisation de tuyères n'est avérée que pour 2 fourneaux seulement mais on ne peut l'exclure pour les autres.

Des aires de travail ont été observées à l'amont des bas fourneaux 1 et 4. Quelques trous de poteaux portent à croire que des abris légers devaient les protéger.

Une exploitation remontant à la fin de la période romaine (IV<sup>e</sup> siècle après J.-C.) est probable (fourneau 4 et exploitation antérieure matérialisée par des scories sous le fourneau 4). Le gros de l'activité se place aux VII<sup>e</sup>-VIII<sup>e</sup> siècles après J.-C. (fig. 145). Les 8 autres fourneaux se succèdent ou travaillent par paire (2A et 2B; 5B et 5C). Ce développement est à peu près contemporain de celui que l'on observe de manière générale dans la région du Mormont.

### Les fourneaux

Seuls 3 bas fourneaux sont relativement bien conservés. Des autres, il ne reste que les parois appuyées au talus (fig. 144).



-  Fourneau supérieur
-  Fourneaux intermédiaires
-  Fourneau inférieur

Fig. 143. Plan schématique du site de La Léchère, Montcherand VD, fouilles M. Klausener. D'après Abetel 1992. 1:200.

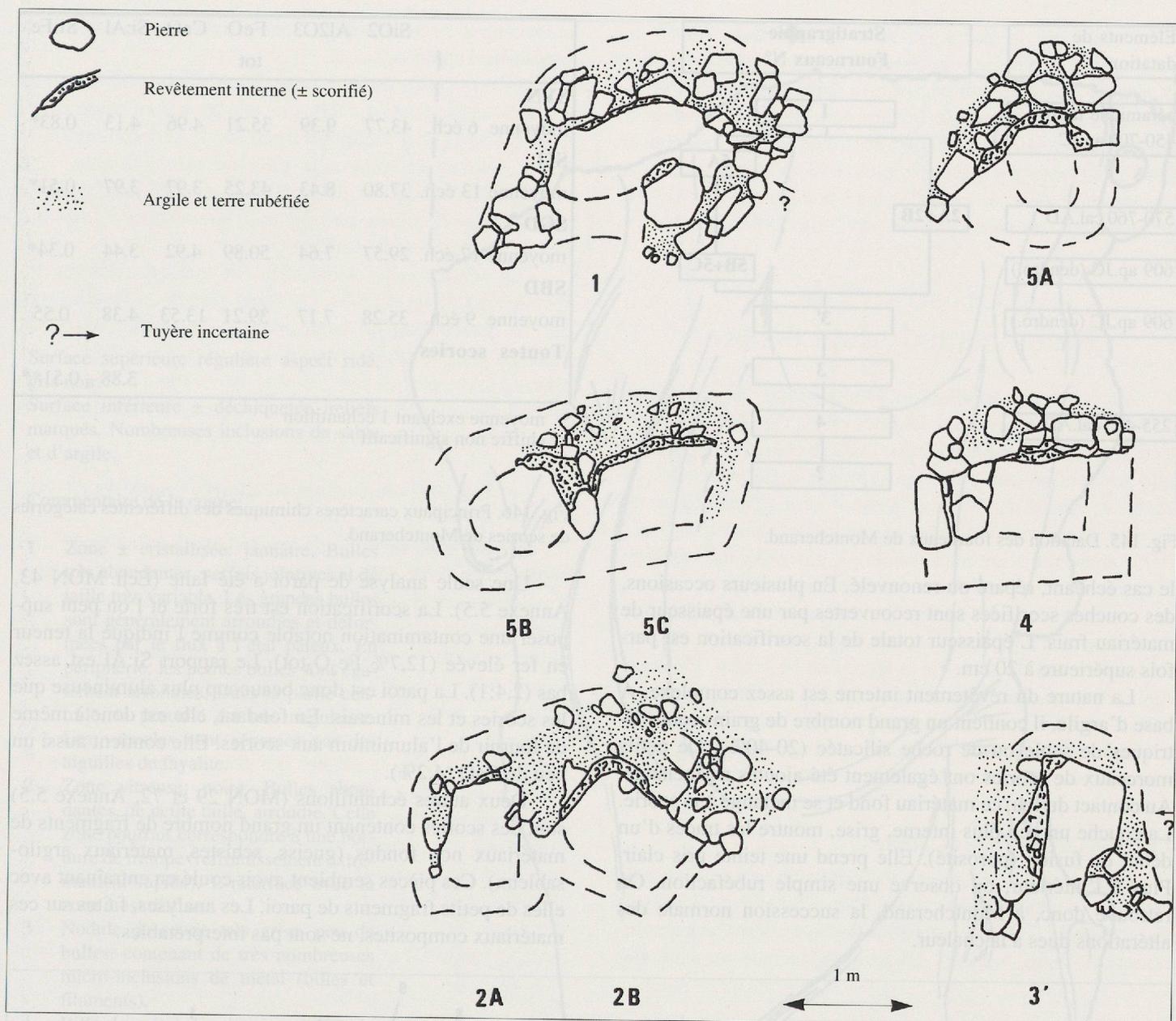


Fig. 144. Bas fourneaux construits à scories coulées du site de Montcherand - La Léchère. D'après Abetel 1992.

Il ne subsiste que 2 parois du fourneau 4, le plus ancien. On peut supposer une cuve quadrangulaire avec une porte s'ouvrant en direction de la pente. Le mode de ventilation ne peut être précisé. Cet appareil est proche des fourneaux 9, 11 et 12 de Bellaires 1 (pp. 100-103).

Le fourneau 3' possède une cuve en forme de rectangle arrondi. La porte s'ouvre latéralement et non pas dans le sens de la pente. Elle est légèrement décentrée. La position de la soufflerie ne peut être déterminée avec certitude mais un élément de tuyère de type indéterminé a été retrouvé en relation avec ce bas fourneau (Abetel 1992, fig. 10). Le plan de cet appareil est comparable à celui du fourneau de Bossena 1 (pp. 100-103).

Le fourneau 1, le plus récent, est aussi le plus grand. La cuve est grossièrement elliptique. La porte est complètement décentrée et s'ouvre en direction de la pente. Le fourneau 1 disposait vraisemblablement d'une soufflerie. Il est probable

que la tuyère débouchait dans la cuve à l'extrémité opposée à la porte. D'après le volume des pierres provenant de la destruction, on calcule une hauteur totale de plus de 1,2 m. Ce fourneau a beaucoup de points communs avec ceux du niveau supérieur de Bellaires 1 (pp. 100-103). Les fourneaux de Montcherand sont globalement proches des appareils contemporains fouillés dans la région du Mormont. Leur état de conservation ne permet pas de faire des comparaisons plus précises. On notera aussi la présence de fourneaux jumelés, comme à Bellaires et à Boécourt. Par contre, les fragments de tuyères sont très rares.

#### Les parois de fourneau

Les parois en pierres des fourneaux de Montcherand sont presque systématiquement recouvertes à l'aide d'un matériau argilo-sableux grossier. Ce revêtement interne était,

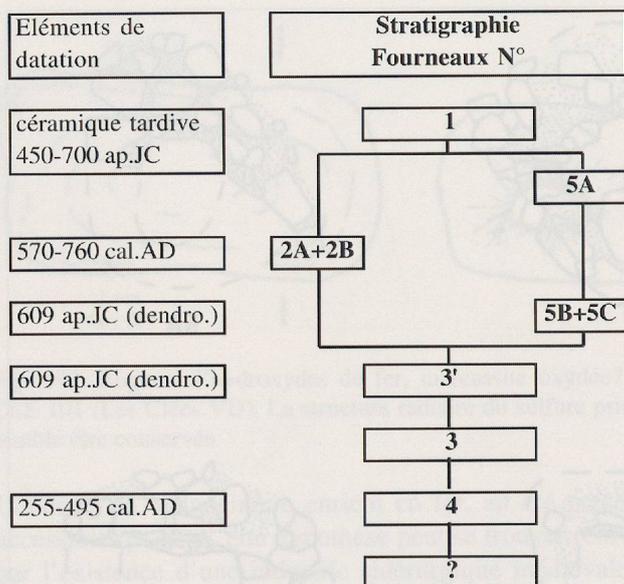


Fig. 145. Datation des fourneaux de Montcherand.

le cas échéant, réparé ou renouvelé. En plusieurs occasions, des couches scorifiées sont recouvertes par une épaisseur de matériau frais. L'épaisseur totale de la scorification est parfois supérieure à 20 cm.

La nature du revêtement interne est assez complexe. A base d'argile, il contient un grand nombre de grains centimétriques de sable ou de roche silicatée (20-40%). De petits morceaux de scories ont également été ajoutés au mélange. Au contact du feu, ce matériau fond et se mélange à la scorie. La couche un peu plus interne, grise, montre les traces d'un début de fusion (porosité). Elle prend une teinte gris clair. Plus à l'intérieur, on observe une simple rubéfaction. On retrouve donc, à Montcherand, la succession normale des altérations dues à la chaleur.

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	CaO	Si:Al	Si:Fe
<b>SVN</b>						
moyenne 6 éch.	43.77	9.39	35.21	4.96	4.13	0.83*
<b>SIJ</b>						
moyenne 13 éch.	37.80	8.43	43.25	3.97	3.97	0.51*
<b>SGD</b>						
moyenne 17 éch.	29.57	7.64	50.89	4.92	3.44	0.34*
<b>SBD</b>						
moyenne 9 éch.	35.28	7.17	39.21	13.53	4.38	0.55
<b>Toutes scories</b>					3.88	0.51**

\* moyenne excluant 1 échantillon

\*\* chiffre non significatif

Fig. 146. Principaux caractères chimiques des différentes catégories de scories de Montcherand.

Une seule analyse de paroi a été faite (Ech. MON 43, Annexe 5.5). La scorification est très forte et l'on peut supposer une contamination notable comme l'indique la teneur en fer élevée (12,7% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>tot). Le rapport Si:Al est assez bas (2,4:1). La paroi est donc beaucoup plus alumineuse que les scories et les minerais. En fondant, elle est donc à même de fournir de l'aluminium aux scories. Elle contient aussi un peu de CaO (4,2%).

Deux autres échantillons (MON 29 et 72, Annexe 5.5) sont des scories contenant un grand nombre de fragments de matériaux non fondus (gneiss, schistes, matériaux argilo-sableux). Ces pièces semblent avoir coulé en entraînant avec elles de petits fragments de paroi. Les analyses, faites sur ces matériaux composites, ne sont pas interprétables.

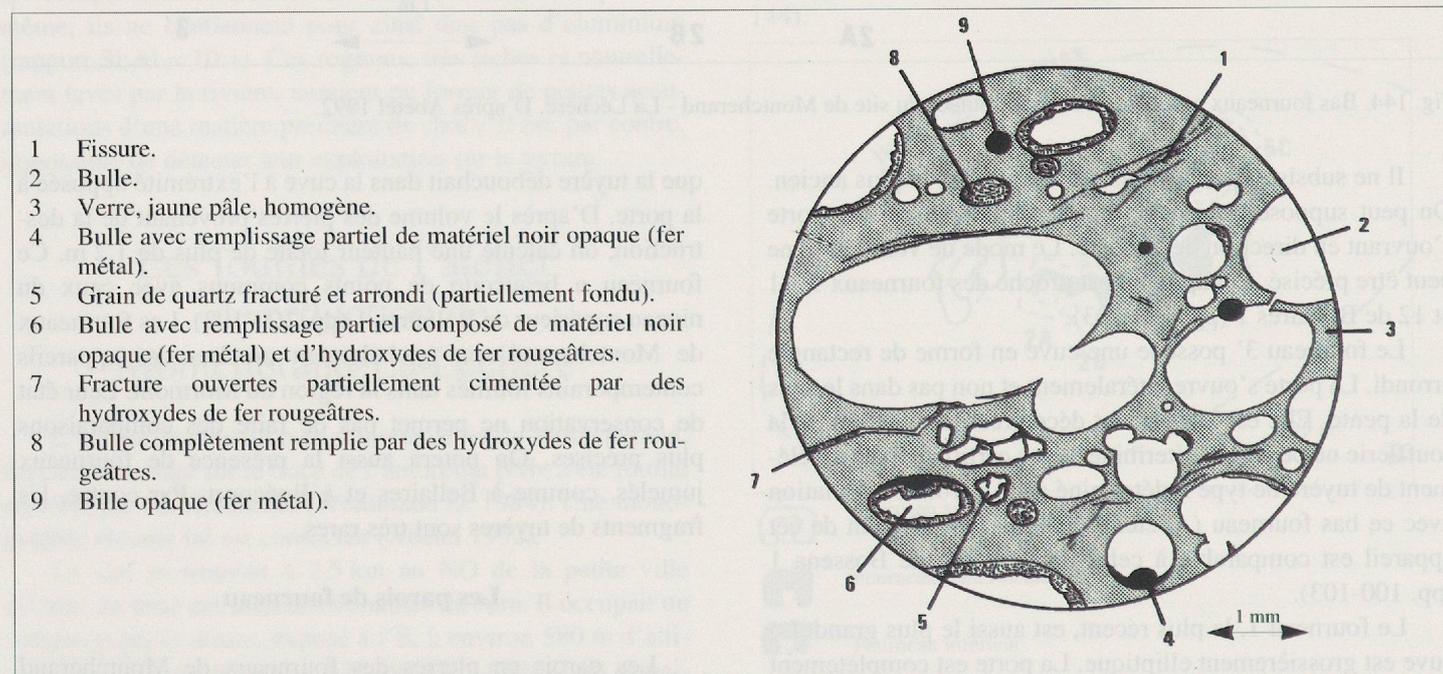


Fig. 147. SVN: scorie coulée vitreuse noire, en forme de tuyau: Ech. MON 28. Aspect de la texture microscopique.



Surface supérieure régulière aspect ridé, gris noir.  
 Surface inférieure  $\pm$  déchiquetée, reliefs marqués. Nombreuses inclusions de sable et d'argile.

Commentaire de la coupe:

- 1 Zone  $\pm$  cristallisée: jaunâtre. Bulles très abondantes, parfois jointives et de taille très variable. Les grandes bulles sont généralement arrondies et déformées par le flux à l'état pâteux. En périphérie, les petites bulles sont également arrondies. Dans la partie centrale, la porosité est très anguleuse. Les vacuoles sont séparées par des aiguilles de fayalite.
- 2 Zone vitreuse: noire. Bulles abondantes, de petite taille, arrondie. Cette zone pourrait correspondre à une bordure de trempe (refroidissement extrêmement rapide). L'interface avec la zone 1 est diffuse.
- 3 Nodule de scorie très grise, peu de bulles, contenant de très nombreuses micro-inclusions de métal (billes et filaments).
- 4 Bille de métal. En d'autres points de la même pièce, on observe des billes plus petites.
- 5 Élément argilo-sableux grisâtre cuit.

Fig. 148. SIJ: scorie intermédiaire jaune, en forme de tuyau. Ech. MON 81 (Montcherand): vue de dessus et coupe.

L'étude de la paroi en lame mince (Ech. MON 4, Annexes 5.5 et 5.6) ne permet pas de préciser beaucoup plus sa nature: fragments de gneiss pris dans une masse argilo-sableuse riche en oxydes et hydroxydes de fer. La chaleur a profondément altéré les caractères optiques des minéraux. Cette analyse n'est pas non plus utilisable. La structure montre clairement au moins 3 couches de scories refroidies les unes après les autres (Abetel 1992, fig. 38).

## Les scories de Montcherand - La Léchère

Au cours des fouilles de Montcherand, de nombreux échantillons de scories ont été prélevés. L'étude de cette collection a été menée a posteriori. Dans le cadre de la publication des fouilles une première approche a été présentée (15 analyses, Abetel 1992). Une seconde série d'analyses a été faite par la suite ainsi que des déterminations minéralogiques (RX, lames minces et microsonde). L'ensemble des résultats est présenté dans ce chapitre (Annexes 5.1 à 5.8)

Les scories de cet atelier forment une série complexe où se côtoient des pièces d'aspects très différents. A côté de scories proches de celles de la région du Mormont, plusieurs catégories spéciales sont présentes. Elles ne connaissent que peu de parallèles ailleurs. L'ensemble du matériel étudié est le résultat des activités de réduction du minerai de fer. Il n'y a aucun témoignage concernant les étapes de travail suivantes.

### Les SVN: scories noires vitreuses

On trouve sur ce site des SVN qui sont assez proches de celles de la région du Mormont. Elles sont légères, avec une forte porosité (30-70%) et forment des coulures assez volumineuses (diam. > 5 cm). L'aspect de surface est générale-

ment celui d'un tissu froissé. Dans certains cas, la surface est profondément ridée.

Comme celles du Mormont, les SVN de Montcherand sont très hétérogènes. La teinte de la pâte, à dominante noire, varie d'une zone à l'autre en tirant sur le vert sombre ou le jaune. De nombreux grains plus ou moins fondus sont visibles. Les inclusions de métal sont peu fréquentes. Elles ont la forme de billes, parfois assez grandes (> 5 mm). Le métal semble avoir été fondu.

Ces scories sont essentiellement vitreuses d'après les spectres RX (Annexe 5.3). Quelques pics de la fayalite sont parfois détectables. En lame mince, l'échantillon MON 28 apparaît complètement vitreux (fig. 147). Du point de vue chimique, ces scories sont les plus pauvres en fer (fig. 146 et 160). Le rapport Si:Al est élevé (4,1:1). Ces compositions demandent des températures de fusion élevées.

### Les SIJ: scories intermédiaires jaunâtres

Les SIJ sont, du point de vue de la forme extérieure, très proches des SVN. Ce sont de grosses coulures aux surfaces froissées ou ridées, de couleur sombre. La texture interne et la couleur de la pâte les distinguent. Elles sont teintées en jaune brunâtre. Les bulles sont très abondantes et nettement anguleuses (fig. 148). La matière est partiellement cristallisée et ce sont des aiguilles de fayalite qui séparent les vacuoles et leur donnent cet habitus anguleux (fig. 149, Annexe 5.6). Dans la plupart des cas, les zones proches des surfaces (jusqu'à 1 cm) sont noires avec une porosité arrondie. Cette variation de texture est liée essentiellement à des conditions de refroidissement légèrement différentes. La bordure externe est vitreuse alors qu'une cristallisation a pu débiter à l'intérieur.

Seule la fayalite, parfois accompagnée de quartz résiduel, est détectable par diffraction des rayons X. En lame

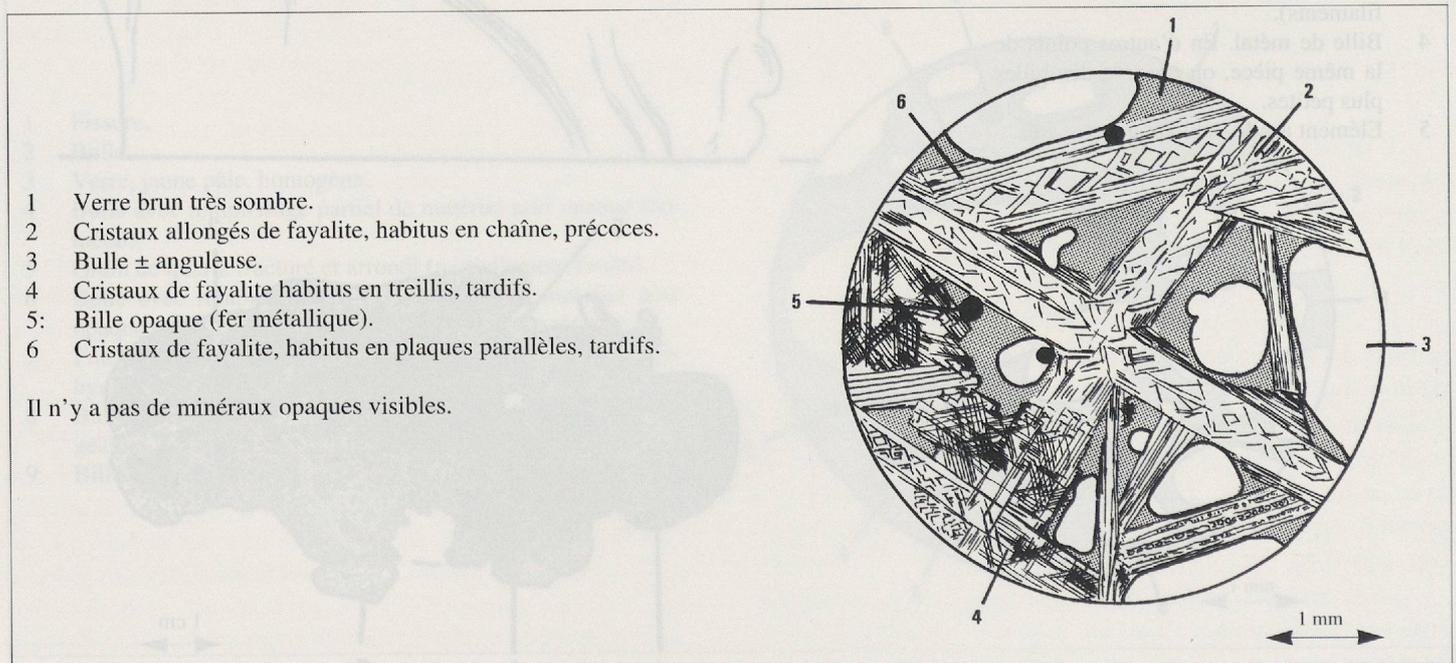


Fig. 149. SIJ: scorie intermédiaire jaunâtre. Ech. MON 36. Aspect de la texture microscopique.

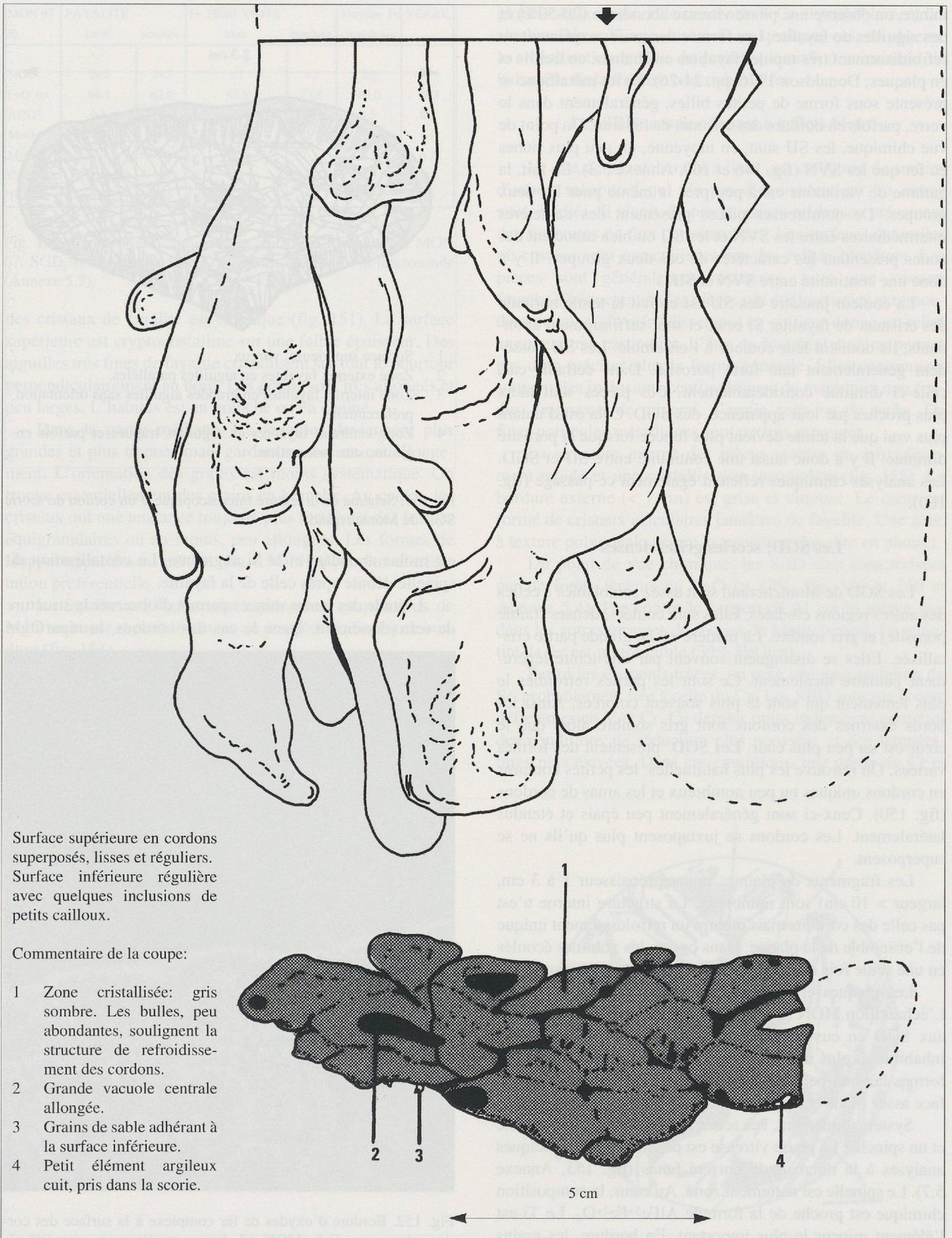


Fig. 150. SGD: scorie grise dense, en amas de cordons. Ech. MON 67 (Montcherand). Vue de dessus et coupe.

mince, on observe une phase vitreuse abondante (20-50%) et des aiguilles de fayalite. Les formes des grains expriment un refroidissement très rapide (fayalites en chaînes, en treillis et en plaques; Donaldson 1976; pp. 24-26). Le fer métallique se présente sous forme de petites billes, généralement dans le verre, parfois en bordure des cristaux de fayalite. Du point de vue chimique, les SIJ sont, en moyenne, un peu plus riches en fer que les SVN (fig. 146 et 160, Annexe 5.3). En fait, la gamme de variations est à peu près la même pour les deux groupes. De nombreuses pièces présentent des caractères intermédiaires entre les SVN et les SIJ ou bien associent des zones présentant les caractères de ces deux groupes. Il y a donc une continuité entre SVN et SIJ.

La couleur jaunâtre des SIJ est en fait la teinte normale des cristaux de fayalite. Si ceux-ci sont suffisamment abondants, ils donnent leur couleur à l'ensemble. Les SIJ possèdent généralement une forte porosité. Dans certains cas, celle-ci diminue considérablement. Ces pièces sont alors plus proches par leur apparence, des SGD. Cela est d'autant plus vrai que la teinte devient plus foncée lorsque la porosité diminue. Il y a donc aussi une continuité entre SIJ et SGD. Les analyses chimiques reflètent également ce passage (fig. 160).

#### Les SGD: scories grises denses

Les SGD de Montcherand sont assez semblables à celles des autres régions étudiées. Elles sont coulées, denses (faible porosité) et gris sombre. La matière est en grande partie cristallisée. Elles se distinguent souvent par une teinte légèrement jaunâtre localement. Ce sont les parties refroidies le plus lentement qui sont le plus souvent colorées. Ainsi les bords externes des cordons sont gris sombre alors que le cœur est un peu plus clair. Les SGD présentent des formes variées. On retrouve les plus habituelles: les petites coulures en cordons uniques ou peu nombreux et les amas de cordons (fig. 150). Ceux-ci sont généralement peu épais et étendus latéralement. Les cordons se juxtaposent plus qu'ils ne se superposent.

Les fragments de plaques minces (épaisseur 1 à 3 cm, largeur > 10 cm) sont nombreux. La structure interne n'est pas celle des cordons mais montre un refroidissement unique de l'ensemble de la plaque. Dans ce cas, les volumes écoulés en une seule fois doivent être nettement plus importants.

Les plaques épaisses (épaisseur 3 à 7 cm) sont rares. L'échantillon MON 52 possède une structure qui fait penser aux SGD en cuvette du Salève. Cet échantillon est assez inhabituel à plus d'un titre. A de rares exceptions près, ces formes laissent penser que les SGD s'écoulent sur une surface assez plane et horizontale, sans limite latérale précise.

Systématiquement, ces scories contiennent de la fayalite et un spinelle. La phase vitreuse est peu abondante. Quelques analyses à la microsonde ont été faites (fig. 153, Annexe 5.7). Le spinelle est nettement zoné. Au cœur, la composition chimique est proche de la formule  $AlFe^{3+}Fe^{2+}O_4$ . Le Ti est l'élément mineur le plus important. En bordure, les grains sont beaucoup plus pauvres en Al et plus riches en Fe. Le Ti

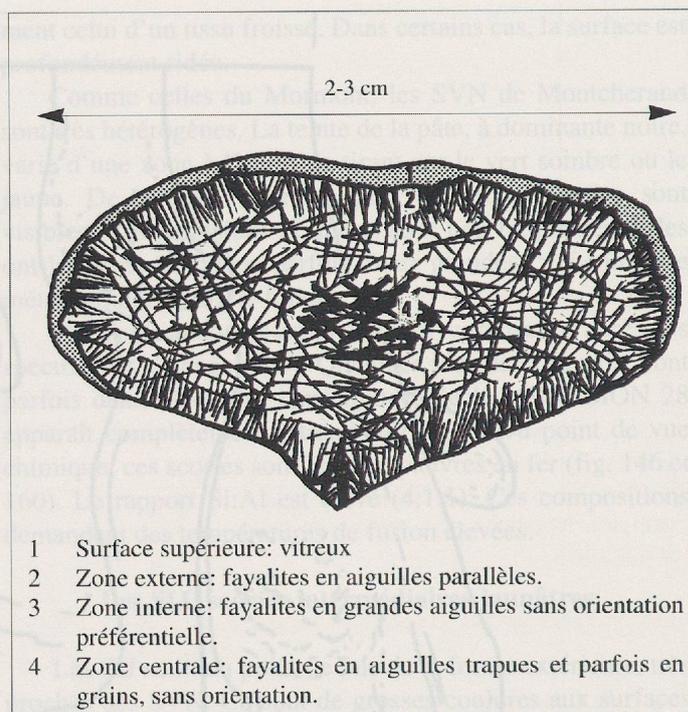


Fig 151. Schéma de la texture microscopique d'un cordon de scorie SGD de Montcherand.

est moins abondant et le Si augmente. La cristallisation du spinelle débute après celle de la fayalite.

L'étude des lames minces permet d'observer la structure de refroidissement. Dans le cas des cordons, la répartition

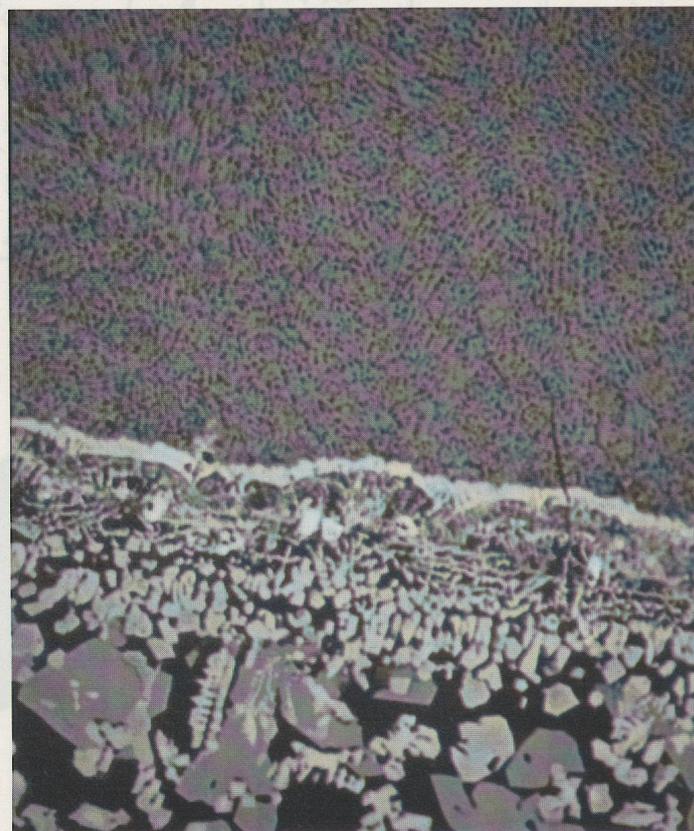


Fig. 152. Bordure d'oxydes de fer complexe à la surface des cordons de scorie. Ech. MON 67. Image en électrons rétrodiffusés (BSE).

MON 67 %	FAYALITE		Fe HERCYNITE		Oxydes Fe complexes	VERRE
	cœur	bordure	cœur	bordure		
SiO <sub>2</sub>	29.5	29.5	1.7	4.0	5.5	46.5
FeO tot	64.5	63.0	63.5	77.5	84.0	28.3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.3	0.3	25.0	10.0	1.5	8.2
MnO	3.0	3.0	0.8	0.7	3.1	1.1
MgO	2.0	1.0	0.3	0.1	0.5	0.2
CaO	1.0	1.0	0.2	0.7	2.0	10.5
TiO <sub>2</sub>	<0.01	0.01	1.5	0.9	<0.01	0.3

Fig. 153. Composition chimique des phases de l'échantillon MON 67. SGD, scorie grise dense. D'après les analyses à la microsonde (Annexe 5.7).

des cristaux de fayalite est classique (fig. 151). La surface supérieure est cryptocristalline sur une faible épaisseur. Des aiguilles très fines de fayalite cristallisent sur tout le pourtour perpendiculairement au bord. Les grains sont très allongés et peu larges. L'habitus est en branche ou en chaîne.

Dans la partie médiane, les fayalites deviennent plus grandes et plus trapues mais gardent encore un net allongement. L'orientation des grains est moins systématique. On trouve essentiellement des grains en branche. Au centre, les cristaux ont une tendance toujours plus forte vers des formes équigranulaires ou au moins, peu allongées. Les formes de Hopper apparaissent parfois (fig. 154). Il n'y a plus d'orientation préférentielle.

La fayalite est légèrement zonée avec un peu plus de MgO au cœur et probablement un peu plus de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en bordure (fig. 153).

Une cristallisation d'oxydes de fer, complexe, marque la bordure supérieure des cordons (fig. 152). Elle correspond aux structures de «Wüstite-Linien» (Sperl 1980, fig. 7).

La phase vitreuse est assez peu abondante. Sa composition chimique est nettement plus siliceuse que la composition

globale de la scorie. Elle concentre le Ca et probablement les alcalins (Na et K, non dosés). Dans quelques cas, on observe la cristallisation tardive de petites quantités d'un minéral de la famille de la rhönite, très riche en fer.

### Les SBD: scories denses à reflets bleus

Le site de Montcherand a livré une catégorie de scories d'aspect inhabituel qui n'a pas d'équivalent sur les autres sites étudiés. Il s'agit de pièces grises et denses présentant des structures de flux peu marquées. Les surfaces naturelles ou cassées sont caractérisées par des reflets bleuâtres. Les pièces sont généralement massives, avec une cassure franche. Fréquemment les pièces ont été fracturées et ressoudées au cours du refroidissement ce qui leur donne un relief anguleux très particulier. L'état de fragmentation ne permet pas d'en préciser plus la forme générale. Elles contiennent souvent des inclusions centimétriques de matériaux non fondus: fragments de minerai, d'argile cuite ou de roche. De fines particules métalliques sont parfois présentes.

La structure interne des pièces montre un refroidissement rapide et une cristallisation incomplète (fig. 155). La bordure externe (< 1 cm) est grise et vitreuse. Le cœur est formé de cristaux aciculaires jaunâtres de fayalite. Une zone à texture polygonale assure la transition (fayalite en plume).

Du point de vue chimique, les SBD sont caractérisées par de fortes teneurs en CaO (> 12%, fig. 146 et 160 et Annexe 5.4). Par contre le rapport Si:Al est le même que dans les autres groupes de scories de Montcherand. La quantité de fer est plutôt faible (39% FeOtot).

Parmi les éléments traces, on note une augmentation du Sr, probablement liée à celle du Ca. Les SBD sont par contre déficientes en V et Cr. Ce dernier point indiquerait peut-être des conditions de réduction plus poussées et des températures plus élevées. Dans ces conditions, une partie du Cr et

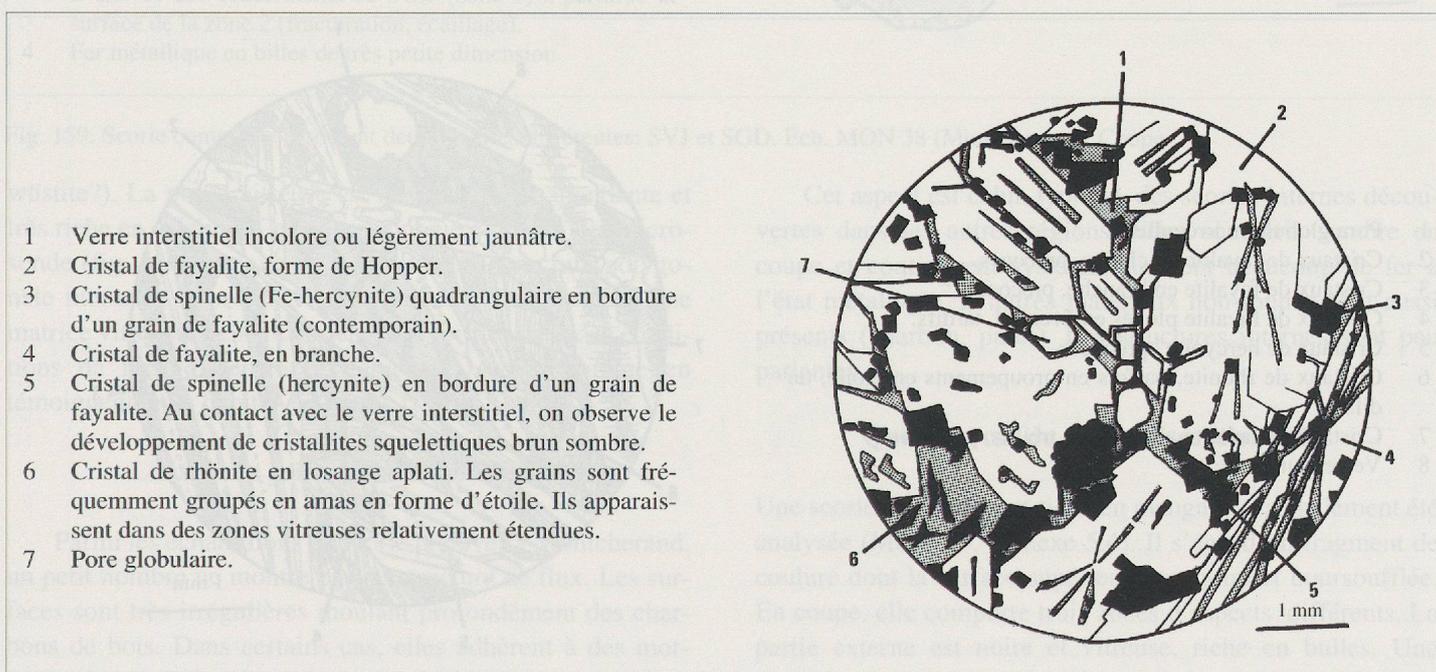


Fig. 154. SGD: scorie grise dense coulée plaque épaisse. Ech. MON 6. Texture microscopique dans la partie centrale.

Surface supérieure légèrement ondulée, lisse, grise avec des reflets bleuâtres.  
 Surface inférieure irrégulière avec un relief acéré. La scorie s'est fracturée lors de l'écoulement et ressoudée ensuite. Les surfaces sont très lisses, d'aspect vitreux et présentent des reflets bleus sombres. La cassure est conchoïdale.

Commentaire de la coupe:

- 1 Bulle.
- 2 Zone cristallisée: jaunâtre à gris. Les aiguilles de fayalite délimitent de fins pores anguleux. Ils sont orientés majoritairement de manière verticale. On distingue dans la partie inférieure des chapelets de bulles délimitant des écoulements en cordons.
- 3 Bordure composée de polygones (1-5 mm) jaunâtres à l'interface entre 2 et 4.
- 4 Zone vitreuse noire. Peu de bulles.

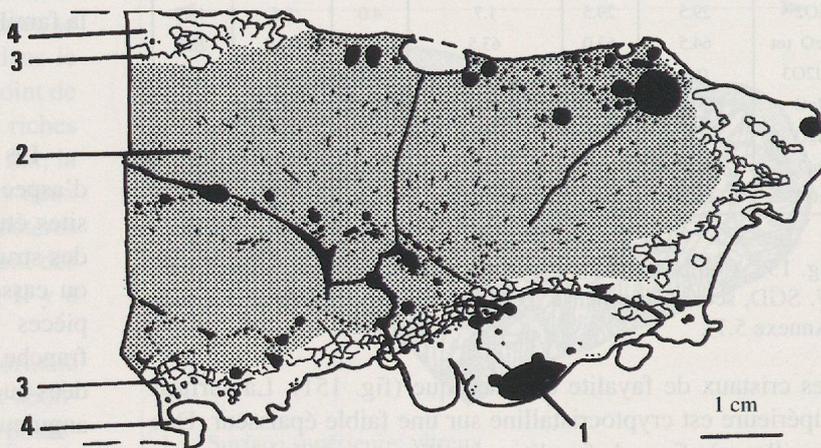


Fig. 155. SBD: scorie dense à reflets bleus. Ech. MON 51. Coupe.

du V passerait dans la phase métallique au cours de la réduction.

Les parties cristallines contiennent de la fayalite. Une première génération cristallise avec des habitus aciculaires (en chaîne et en branche). Une seconde occupe les espaces intergranulaires et se développe sous forme de fins cristaux ployés, groupés en gerbes (fig. 157).

Un minéral riche en fer, de la famille de la rhönite, est un constituant essentiel de ces scories. Il cristallise en même temps que la seconde génération de fayalite et probablement également après celle-ci. On observe quelques rares inclusions d'oxyde de fer dans certains cristaux de fayalite. La nature de cette phase n'a pas pu être précisée (spinelles ou

MON 52 %	FAYALITE		Fe-RHÖNITE		Oxydes Fe complexes	VERRE
	coeur	bordure	coeur	bordure		
SiO <sub>2</sub>	29.5	30.7	26.0	27.0-30.0	analyse	39.0
FeO tot	60.5	56.0	44.0	38.0-43.0	incomplète	10.5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.2	0.2-3.0	12.0	11.5		25.0
MnO	3.0	2.8	0.7	0.7		1.0
MgO	1.8	0.6-1.4	0.4	0.4		0.1
CaO	4.5	5.0-8.5	12.5	12.5		20.0
TiO <sub>2</sub>	< 0.01	< 0.01	1.6	1.2		0.3

Fig. 156. Composition chimique des phases de l'échantillon MON 52. SBD, scorie dense à reflets bleus. D'après les analyses à la microsonde (Annexe 5.8).

- 1 Pore globulaire irrégulier.
- 2 Cristaux de fayalite en chaîne, précoces.
- 3 Cristaux de fayalite en branche, précoces.
- 4 Cristaux de fayalite ployés en éventail, tardifs.
- 5 Cristaux de hercynite? précoces.
- 6 Cristaux de rhönite, parfois en groupements en étoile, tardifs.
- 7 Cristaux de fayalite allongés en treillis, précoces.
- 8 Verre jaune pâle.

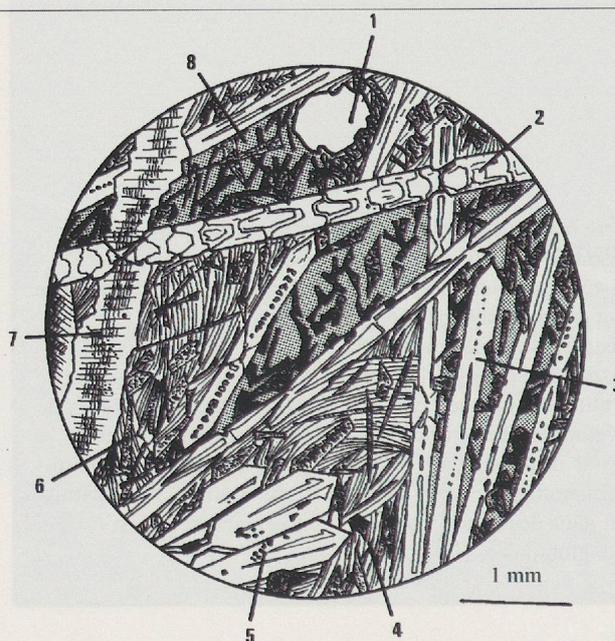
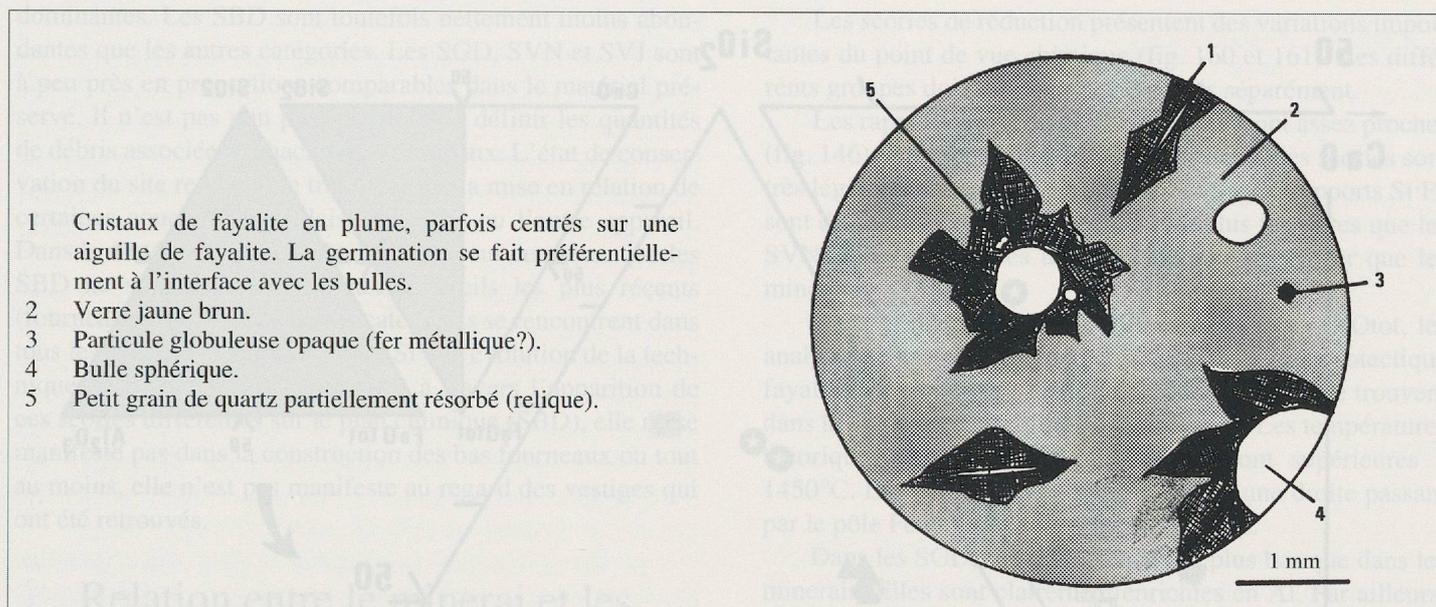
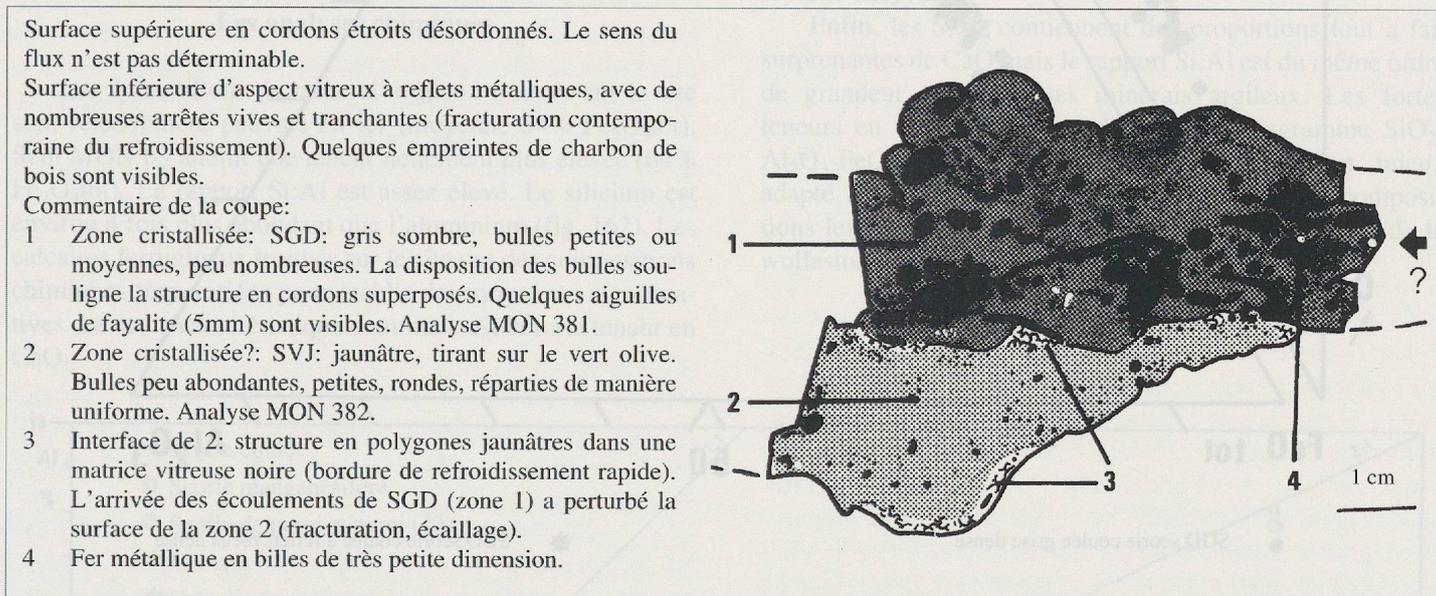


Fig. 157. SBD: scorie dense à reflets bleus, plaque épaisse. Ech. MON 50. Aspect de la texture microscopique.



- 1 Cristaux de fayalite en plume, parfois centrés sur une aiguille de fayalite. La germination se fait préférentiellement à l'interface avec les bulles.
- 2 Verre jaune brun.
- 3 Particule globuleuse opaque (fer métallique?).
- 4 Bulle sphérique.
- 5 Petit grain de quartz partiellement résorbé (relique).

Fig. 158. SBD, scorie dense à reflets bleus, bloc informe vitreux. Ech. MON 71. Aspect de la texture microscopique.



Surface supérieure en cordons étroits désordonnés. Le sens du flux n'est pas déterminable.

Surface inférieure d'aspect vitreux à reflets métalliques, avec de nombreuses arrêtes vives et tranchantes (fracturation contemporaine du refroidissement). Quelques empreintes de charbon de bois sont visibles.

Commentaire de la coupe:

- 1 Zone cristallisée: SGD: gris sombre, bulles petites ou moyennes, peu nombreuses. La disposition des bulles souligne la structure en cordons superposés. Quelques aiguilles de fayalite (5mm) sont visibles. Analyse MON 381.
- 2 Zone cristallisée?: SVJ: jaunâtre, tirant sur le vert olive. Bulles peu abondantes, petites, rondes, réparties de manière uniforme. Analyse MON 382.
- 3 Interface de 2: structure en polygones jaunâtres dans une matrice vitreuse noire (bordure de refroidissement rapide). L'arrivée des écoulements de SGD (zone 1) a perturbé la surface de la zone 2 (fracturation, écaillage).
- 4 Fer métallique en billes de très petite dimension.

Fig. 159. Scorie composite associant deux textures différentes: SVJ et SGD. Ech. MON 38 (Montcherand). Coupe.

wüstite?). La phase vitreuse est moyennement abondante et très riche en calcium. Ces phases ont été étudiées à la micro-sonde (fig. 156, Annexe 5.8). Les zones à structure polygonale montrent la présence de cristaux de fayalite dans une matrice vitreuse. Ce sont des cristaux formés dans des conditions de refroidissement extrêmement rapide comme en témoignent leurs habitus en plume (fig. 158).

### Les scories grises denses non coulées

Parmi les échantillons de scorie prélevés à Montcherand, un petit nombre ne montre pas de structure de flux. Les surfaces sont très irrégulières moulant profondément des charbons de bois. Dans certains cas, elles adhèrent à des morceaux de paroi. On observe souvent le développement d'une oxydation secondaire (rouille).

Cet aspect est celui, typique, des scories internes découvertes dans les autres régions. Elles sont gris sombre en coupe et contiennent systématiquement beaucoup de fer à l'état métallique. D'autres matériaux non-fondus sont aussi présents (charbon, paroi). Les structures internes sont peu parlantes.

### Quelques cas de scories exceptionnelles

Une scorie extrêmement riche en manganèse a également été analysée (MON 53, Annexe 5.4). Il s'agit d'un fragment de coulure dont la surface supérieure est noire et boursouflée. En coupe, elle comporte trois zones d'aspects différents. La partie externe est noire et vitreuse, riche en bulles. Une seconde zone est jaunâtre avec une structure de cristallisation rapide polygonale et la partie centrale est gris sombre homo-

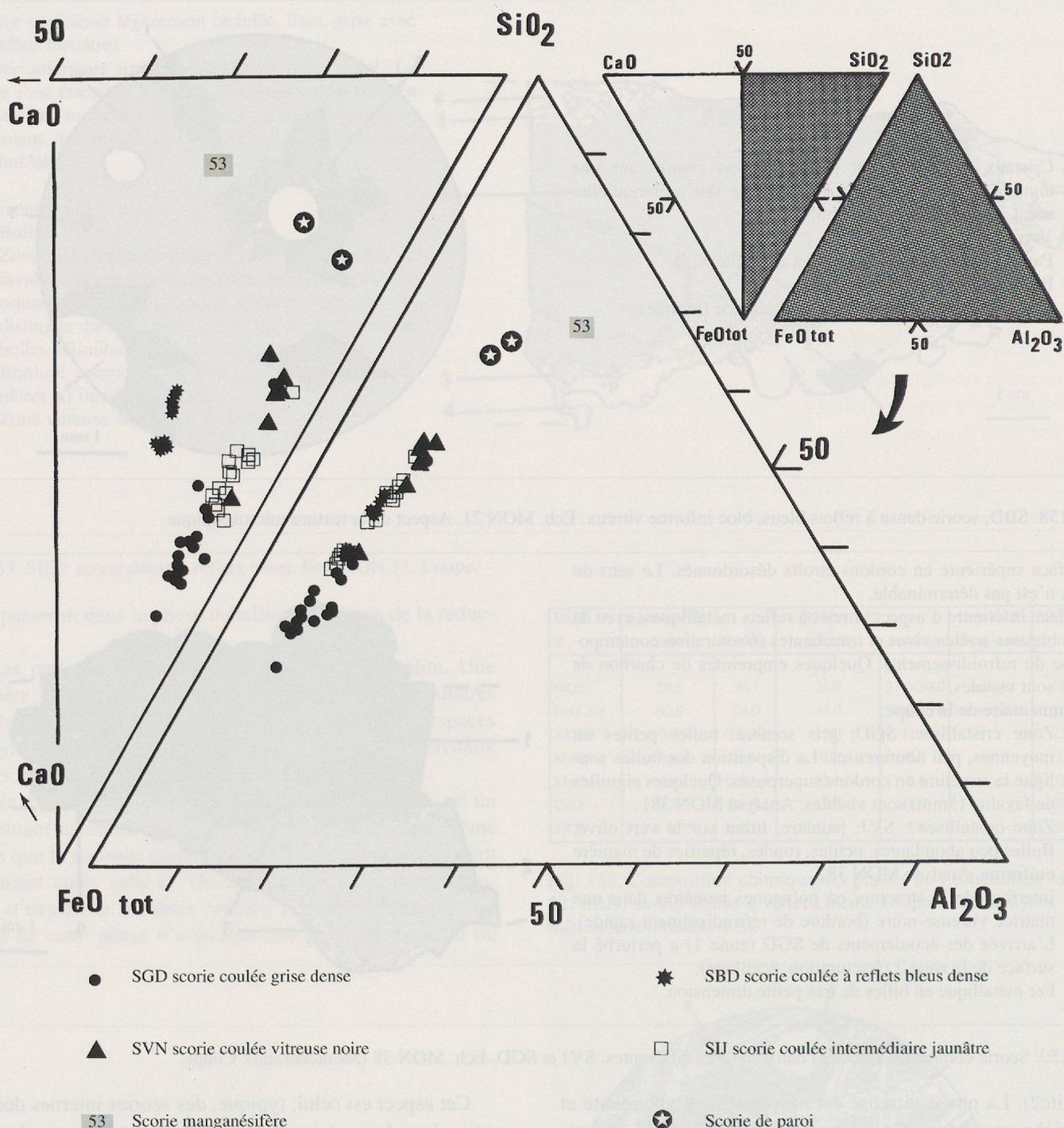


Fig. 160. Composition chimique des scories de Montcherand.

gène avec une très faible porosité. La composition chimique est très pauvre en oxydes de fer mais riche en MnO (22%) et en CaO (15%). Cette pièce est exceptionnelle, tant du point de vue de l'analyse que de l'aspect. C'est du groupe des SBD qu'elle se rapproche le plus. Le spectre de diffraction RX indique la présence d'une olivine riche en fer et en manganèse (probablement proche de la knébélite  $FeMnSiO_4$ ).

Enfin, plusieurs scories composites ont été découvertes. Elles associent, sur une même pièce, des zones qui morphologiquement et chimiquement se rattachent à des catégories différentes: SVN, SVJ et SGD (fig. 159). Aucune association avec les SBD n'a été observée. Cette observation est confir-

mée par les analyses chimiques, qui montrent que toutes les compositions chimiques entre les SVN et les SGD existent alors qu'un hiatus est très nettement perceptible entre ces groupes et les SBD.

### Répartition des scories et quantification

Environ 300 m<sup>3</sup> de scories gisaient aux environs des bas fourneaux de Montcherand. Seul ce chiffre global peut être retenu. Il n'est malheureusement pas possible d'estimer de manière précise les quantités pour chaque catégorie morphologique. Qualitativement, les scories coulées sont largement

dominantes. Les SBD sont toutefois nettement moins abondantes que les autres catégories. Les SGD, SVN et SVJ sont à peu près en proportions comparables dans le matériel préservé. Il n'est pas non plus possible de définir les quantités de débris associées à chacun des fourneaux. L'état de conservation du site rend même très aléatoire la mise en relation de certaines couches de déblais avec l'un ou l'autre appareil. Dans le matériel conservé, on constate tout de même que les SBD ne sont associées qu'aux appareils les plus récents (fourneaux 1 et 2b). Les autres catégories se rencontrent dans tous les niveaux et sur tout le site. Si une évolution de la technique de réduction est perceptible à travers l'apparition de ces scories différentes sur le plan chimique (SBD), elle ne se manifeste pas dans la construction des bas fourneaux ou tout au moins, elle n'est pas manifeste au regard des vestiges qui ont été retrouvés.

## Relation entre le minerai et les scories de réduction

### Les analyses chimiques

Les échantillons de minerai argileux trouvés sur le site sont relativement pauvres en fer (moyenne 54%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ tot). Seul MON 63 atteint une teneur nettement plus élevée (64%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ tot). Le rapport Si:Al est assez élevé. Le silicium est environ 4 fois plus abondant que l'aluminium (fig. 162). Les calcaires ferrugineux trouvés sur le site ont des compositions chimiques trop variées pour établir des moyennes significatives. La seule caractéristique commune est la forte teneur en CaO.

Les scories de réduction présentent des variations importantes du point de vue chimique (fig. 160 et 161). Les différents groupes doivent donc être discutés séparément.

Les rapports Si:Al des SVN et des SIJ sont assez proches (fig. 146). Par rapport aux minerais argileux, ces scories sont très légèrement enrichies en Al. Par contre, les rapports Si:Fe sont différents (fig. 160). Les SIJ sont plus ferrifères que les SVN. Elles sont toutes un peu plus pauvres en fer que les minerais.

Dans le diagramme d'équilibre  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-FeO}$ tot, les analyses se projettent de part et d'autre de la ligne cotectique fayalite-tridymite (fig. 160). La plupart des SVN se trouvent dans le domaine de stabilité de la tridymite. Les températures théoriques de fusion les plus hautes sont supérieures à  $1450^\circ\text{C}$ . Les points sont alignés le long d'une droite passant par le pôle  $\text{FeO}$ tot qui coupe les isothermes.

Dans les SGD, Si:Al est nettement plus bas que dans les minerais. Elles sont clairement enrichies en Al. Par ailleurs, le fer est élevé. Les analyses se projettent dans le domaine de stabilité de la fayalite et à proximité de la ligne cotectique fayalite-hercynite.

Enfin, les SBD contiennent des proportions tout à fait surprenantes de CaO mais le rapport Si:Al est du même ordre de grandeur que dans les minerais argileux. Les fortes teneurs en CaO empêchent d'utiliser le diagramme  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-FeO}$ tot. Le triangle  $\text{SiO}_2\text{-CaO-FeO}$ tot est mieux adapté. Les analyses se regroupent dans la zone des compositions les plus fusibles, entre les domaines de stabilité de la wollastonite et des olivines.

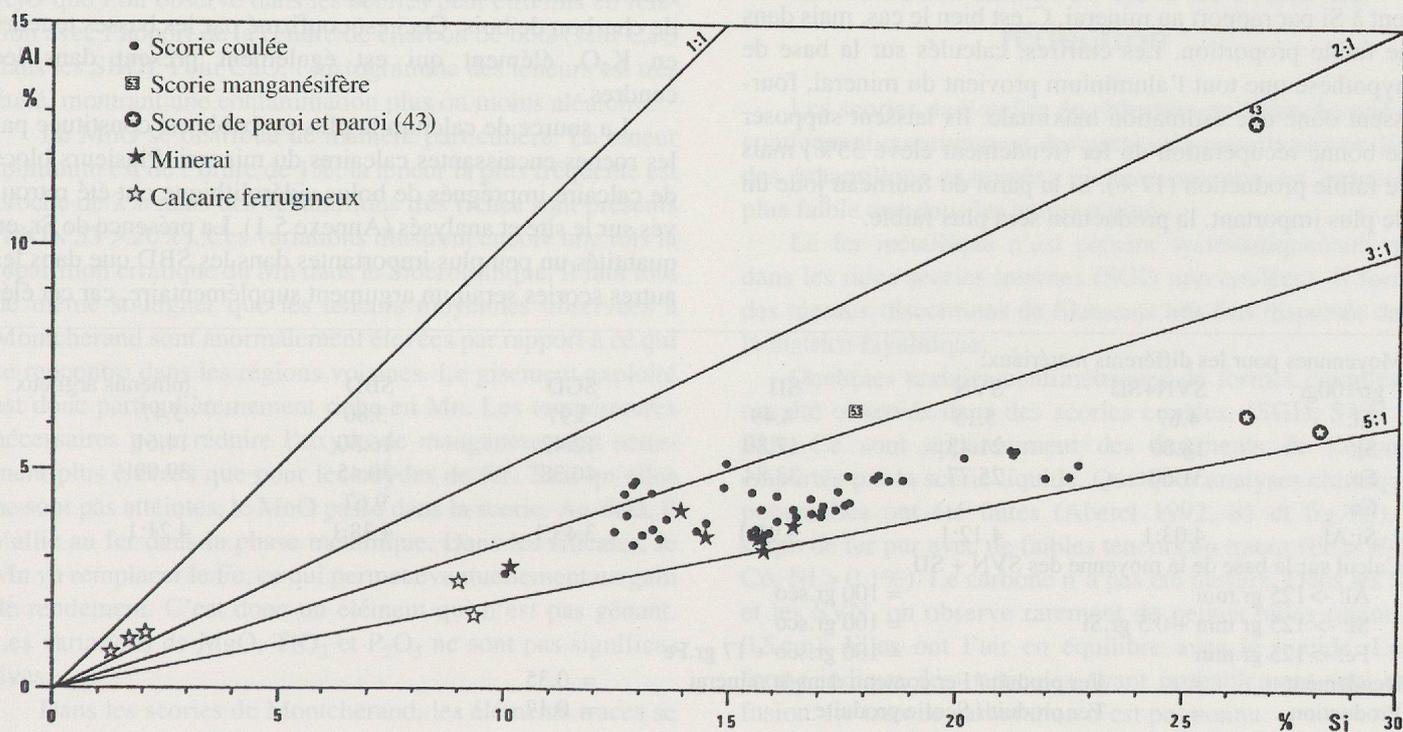


Fig. 161. Rapports Si:Al des échantillons de Montcherand.

Minerais argileux (7 éch.)			
	Si:Al	Si:Fe	Ca:Fe
minimum	3.43	0.22	0.02
moyenne	4.21	0.38	0.03
maximum	4.77	0.46	0.06
Minerais calciques (4 éch.)			
minimum	1.53	0.06	1.05
moyenne	3.12 *	0.36 *	2.66*
maximum	5.79	0.67	4.47

\* valeurs sans signification

Fig. 162. Rapports des composants principaux dans les minerais de Montcherand.

Les SVN et SIJ

Les SVN et SIJ forment une série cohérente avec les minerais argileux. Ces échantillons permettent de faire un calcul de production (fig. 163). La teneur moyenne en fer des scories est significativement différente de celle des minerais, mais cette différence est faible par rapport à ce qu'elle est dans d'autres régions (Mormont, Boécourt). De plus, les scories les plus riches sont à peine différentes des minerais les plus pauvres. Le rapport Si:Al est à peine modifié, le rôle de la paroi est donc difficile à mettre en évidence. De plus, celle-ci n'est connue que par une seule analyse chimique (MON 43, Annexe 5.5). Encore s'agit-il d'un échantillon ayant subi une transformation partielle. Son rapport Si:Al, proche de 2:1 est beaucoup moins élevé que dans les scories. Il indique que la paroi apporte essentiellement de la silice mais aussi de l'alumine et cela dans une proportion supérieure à celle de la gangue du minerai. Les scories contaminées par la paroi devraient donc être enrichies en Al relativement à Si par rapport au minerai. C'est bien le cas, mais dans une faible proportion. Les chiffres, calculés sur la base de l'hypothèse que tout l'aluminium provient du minerai, fournissent donc une estimation maximale. Ils laissent supposer une bonne récupération du fer (rendement élevé 35%) mais une faible production (17%). Si la paroi du fourneau joue un rôle plus important, la production sera plus faible.

Les SGD

Les SGD ne montrent pas la même cohérence que les autres groupes. Leurs rapports Si:Al sont beaucoup moins constants (fig. 161). Ils diffèrent, en général et en moyenne, de celui du minerai. De même, les teneurs en fer sont du même ordre ou même supérieures à celles des minerais. Dans ces conditions, il devient pratiquement impossible de fournir une interprétation suivant le modèle proposé.

On ne peut pas envisager une forte contamination de la paroi. Dans ce cas, le calcul aboutirait rapidement à une impasse: il faudrait rajouter du fer au minerai pour ne fabriquer que de la scorie! On ne peut pas non plus considérer ces scories comme un coproduit des SVN et SIJ. Cela amènerait très vite à calculer une production nulle. De plus, cela n'expliquerait pas les variations du rapport Si:Al au sein du groupe des SGD et par rapport aux SIJ et SVN.

En fin de compte, l'hypothèse la plus raisonnable est d'admettre que les SGD sont le résultat de la réduction d'un minerai de composition légèrement différente, plus alumineux et plus riche en fer. Deux des échantillons de minerai retrouvés sur l'atelier et analysés, MON 62 et 63, qui sont les plus riches en fer, présentent également les rapports Si:Al les plus proches de ceux des SGD. Ils pourraient indiquer qu'il existe des variations de compositions notables entre les différentes parties du gisement de Sidérolithique de Montcherand. Cela ne pourra être confirmé que par une étude approfondie du gîte.

Les SBD

Les SBD sont caractérisées par de très fortes teneurs en Ca (9,67% Ca). Celui-ci ne peut pas être fourni par le minerai argileux. Une telle concentration ne peut pas non plus résulter uniquement de l'apport de calcium lié à la cendre de charbon de bois. Ceci est confirmé par les basses teneurs en K<sub>2</sub>O, élément qui est également présent dans les cendres.

La source de calcium la plus probable est constituée par les roches encaissantes calcaires du minerai. Plusieurs blocs de calcaire imprégnés de bolus sidérolithique ont été retrouvés sur le site et analysés (Annexe 5.1). La présence de Sr, en quantités un peu plus importantes dans les SBD que dans les autres scories serait un argument supplémentaire, car cet élé-

Moyennes pour les différents matériaux:						
gr/100gr	SVN+SIJ	SVN	SIJ	SGD	SBD	minerais argileux
Al:	4.67	5.15	4.49	3.97	3.80	3.47
Si:	18.80	21.43	17.80	12.42	16.50	14.61
Fe:	31.60	25.77	33.84	40.38	30.45	39.09
Ca:					9.67	
Si:Al	4.03:1	4.12:1	3.97:1	3.43:1	4.38:1	4.21:1
Calcul sur la base de la moyenne des SVN + SIJ						
Al: -> 125 gr.min						= 100 gr.sco
Si: -> 125 gr.min + 0.5 gr.Si						= 100 gr.sco
Fe: -> 125 gr.min						= 100 gr.sco + 17 gr.Fe
Rendement	=	Fer produit / Fer contenu dans le minerai		=	0.35	
Production	=	Fer produit / Scorie produite		=	0.17	

Fig. 163. Calcul de production pour les scories de Montcherand.

ment est naturellement concentré dans les calcaires. Par contre, dans les SBD, le rapport Si:Al est du même ordre de grandeur que celui des minerais argileux. Il est en fait un petit peu plus élevé. Cela pourrait être interprété en considérant que les calcaires sont légèrement siliceux mais que l'essentiel du Si et de l'Al proviennent du Sidérolithique qui imprègne ces roches.

Ce qui frappe toutefois, ce sont les grandes variations entre les compositions chimiques des différents échantillons de calcaire ferrugineux alors que les SBD sont très homogènes. Apparemment, les artisans se sont attachés à introduire toujours la même proportion de calcaire dans leur fourneau. Ceci marquerait une réelle volonté de parvenir à un résultat donné, c'est-à-dire, un contrôle strict du processus de réduction.

Les analyses effectuées ne sont malheureusement pas suffisantes pour exécuter un calcul de production pour une charge calcique. En particulier, il faut faire trop d'hypothèses sur la nature exacte de la charge.

La présence de calcium dans la charge a probablement un double effet pendant la réduction. D'un côté, elle abaisse le point de fusion. De l'autre, le Ca remplace le Fe dans les silicates et permet donc de récupérer une plus grande quantité de métal. Dans l'état actuel des connaissances, il n'est pas possible de quantifier ces avantages en termes plus précis. Le rendement du traitement des minerais pauvres de Montcherand a probablement été amélioré par l'utilisation de ces calcaires.

### Les éléments mineurs et traces

L'enrichissement, par rapport au minerai, en CaO et K<sub>2</sub>O que l'on observe dans les scories peut être mis en relation avec l'apport de la cendre de charbon de bois (sauf CaO dans les SBD). Pour CaO, l'histogramme des teneurs est très étalé, montrant une contamination plus ou moins aléatoire.

Le MnO se distribue de manière particulière. La teneur minimum est de l'ordre de 1%; la teneur la plus fréquente est proche de 2% mais des échantillons très riches sont présents (MON 53 > 20%). Ces variations illustrent encore une fois la répartition erratique du Mn dans le Sidérolithique. Il faut tout de même souligner que les teneurs moyennes observées à Montcherand sont anormalement élevées par rapport à ce qui se rencontre dans les régions voisines. Le gisement exploité est donc particulièrement riche en Mn. Les températures nécessaires pour réduire l'oxyde de manganèse sont nettement plus élevées que pour les oxydes de fer. Tant qu'elles ne sont pas atteintes, le MnO passe dans la scorie. Au-delà, il s'allie au fer dans la phase métallique. Dans les silicates, le Mn va remplacer le Fe, ce qui permet éventuellement un gain de rendement. C'est donc un élément qui n'est pas gênant. Les variations de MgO, TiO<sub>2</sub> et P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ne sont pas significatives.

Dans les scories de Montcherand, les éléments traces se comportent de la manière habituelle, à de rares exceptions près (fig. 164). Ce n'est que dans les SBD que certains éléments traces ont un comportement anormal. Les teneurs éle-

vées en Sr sont probablement dues à l'ajout de calcaire, cet élément remplaçant Ca dans la calcite. Cette différence s'explique donc par la nature spéciale de la charge. Par contre, le Cr est assez nettement appauvri. Cet élément est réduit dans des conditions de température un peu plus élevées que celles nécessaires pour la réduction du fer. C'est peut-être l'indice d'une marche des fourneaux à haute température. Le V semble également un peu affecté de la même manière.

Si cette hypothèse est exacte, le métal produit dans ces conditions serait un peu enrichi en Cr, V et probablement Mn. Pour ce dernier élément, la teneur du minerai étant trop variable, il est impossible de mettre en évidence un éventuel appauvrissement relativement aux autres catégories de scories du site.

Les propriétés physiques du métal obtenu ne sont pas connues. Il est impossible de dire si cette variation de la composition chimique donne au métal des qualités souhaitables ou pas.

enrichissement		K <sub>2</sub> O, Zr, Sr, Rb, Ba
	+ pépite	MnO
	faible	MgO, Y, V
stable		TiO <sub>2</sub> , P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , Cr
appauvrissement		As, Pb, Zn, Cu, Ni, Co
absent		Na <sub>2</sub> O

Fig. 164. Comportement des éléments traces et mineurs dans les scories de réduction de Montcherand.

## Le métal associé aux scories de réduction

Les scories de l'atelier de réduction de Montcherand ne contiennent que rarement des particules métalliques (< 10% des échantillons examinés). Cette proportion est beaucoup plus faible que dans les autres régions.

Le fer métallique n'est présent systématiquement que dans les rares scories internes (SGD non coulées). Il forme des réseaux discontinus de filaments très fins dispersés dans la matrice fayalitique.

Quelques nodules centimétriques de formes complexes ont été observés dans des scories coulées. (SGD, SVN ou SIJ). Ce sont apparemment des fragments de l'éponge emportés par la scorie liquide. Quelques analyses chimiques ponctuelles ont été faites (Abetel 1992, 81 et fig. 39). Il s'agit de fer pur avec de faibles teneurs en traces (Fe > 99%; Co, Ni > 0.1%). Le carbone n'a pas été mesuré. Dans les SIJ et les SVN, on observe rarement de petites billes (diam. < 0,5 cm). Elles ont l'air en équilibre avec le liquide. Leur forme indique des particules ayant probablement subi une fusion. Le taux de carburation n'est pas connu.

Seuls quelques clous en fer ont été retrouvés au cours des fouilles. Les données archéologiques ne permettent ni de les mettre en relation avec une production locale ni d'exclure

cette possibilité. Les analyses chimiques ponctuelles ne mettent pas en évidence de parenté entre le métal des objets et celui des scories (Abetel 1992, 83).

## Les autres produits scorifiés

Le site de Montcherand a livré une série de pièces d'aspect scorifié qui ne peuvent pas être considérées comme des scories au sens strict, c'est-à-dire qui ne sont pas des produits de la solidification d'un liquide. Ce sont des pièces de texture vacuolaire, grumeleuse, de couleur brun sombre (Abetel 1992, fig. 37). Certaines sont en forme de galette plus ou moins aplatie (diam. 5-20 cm, ép. 2-5 cm). Plusieurs fragments ont été trouvés sur le fond du four 2b, d'autres dans les zones de rejet des scories.

La porosité est très grande (30% env.). Les vides sont de forme et de taille très irrégulières. Une bonne partie du volume est constituée par des charbons de bois dont seule la structure est conservée, la matière organique ayant été remplacée par des oxydes et hydroxydes de fer. On reconnaît également des fragments de matériaux argilo-sableux (paroi), des grains de roches silicatées (sables, graviers) et des morceaux de scories centimétriques. Les contours de ces éléments montrent souvent un début de fusion. On remarque également des éléments argileux rougeâtres qui sont de petites pièces de minerai non fondu. Le tout est cimenté par des oxydes et hydroxydes de fer. Ces pièces réagissent à l'aimant.

Ces objets résultent donc de l'accumulation de fragments variés soudés par une matrice d'oxydes de fer. Ils ont pu se former sur le fond du fourneau, dans une zone de température assez basse. Ces pièces auraient également subi une importante oxydation postérieurement à leur formation.

Les compositions chimiques, très différentes de celles des véritables scories, sont compatibles avec cette explication (Annexe 5.5). Elle rend compte des teneurs élevées en CO<sub>2</sub> (charbon), H<sub>2</sub>O (hydratation) et Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (oxydation) que l'on mesure.

Les éléments traces sont également intéressants puisque l'on constate un net enrichissement en Zn, Pb et Cu. C'est pour le Zn que cet effet est le plus spectaculaire avec des teneurs de 700 à plus de 2000 ppm contre moins de 100 ppm dans les scories. On peut penser que le ZnO présent dans le minerai, transformé en gaz au-dessus de 900°C, a été ensuite réduit vers 1000°C. Le métal s'est ensuite condensé en un liquide qui s'est écoulé vers le fond du fourneau. Les enrichissements en Cu (jusqu'à 100 ppm) et Pb (jusqu'à 50 ppm) s'expliquent par les points de fusion de ces éléments, inférieurs aux températures de réduction du fer. Ils pourraient ne pas s'allier au fer métallique mais se concentrer à la base du fourneau. Il est plus difficile de comprendre l'enrichissement en As. Pour Ni et Co, on retrouve dans les fonds de fourneaux des teneurs comparables à celles des minerais mais bien supérieures à celles des scories.

De nombreux petits grains brunâtres, plus ou moins magnétiques, étaient présents dans le sédiment. Deux prélèvements de ce matériel ont été analysés (Annexe 5.5: grenaille). Du point de vue chimique, ils s'apparentent plus aux

fonds de fourneau qu'aux autres matériaux analysés. Ils pourraient correspondre à des pièces de ce type fragmentées. Leur abondance compenserait la rareté des fonds de fourneau conservés. Montcherand est le seul site étudié, qui ait livré de tels objets. La bibliographie ne fournit guère de parallèle (Money 1971, 105).

## L'atelier de Montcherand et son contexte

### La production

Le gisement de Sidérolithique qui affleure dans les gorges de l'Orbe est probablement la source de matière première. L'atelier n'aurait que difficilement pu s'installer sur le lieu même de l'extraction. En effet, les pentes sont très raides autour du gisement et la rivière capricieuse. Il devait être plus simple de transporter le minerai sur quelques kilomètres jusqu'à un lieu favorable et facile d'accès, en particulier, pour faciliter l'acheminement en charbon.

La quantité de scories produites (300 m<sup>3</sup>) permet de ranger cet atelier dans la catégorie des sites importants. D'après les calculs, la production totale de métal brut est voisine de 50 t mais cette estimation reste peu précise. La durée de l'occupation est supérieure à 300 ans.

C'est apparemment le minerai tout venant qui a été principalement utilisé. Le volume nécessaire serait de 200 à 300 m<sup>3</sup> environ. L'épuisement de la mine ne peut pas être la raison de l'abandon de l'atelier.

Les environs semblent avoir été occupés depuis la pré-histoire, mais la mise en valeur des terres pour l'agriculture a été plus intense en bordure de la plaine que sur les pentes de la montagne. Le bois ne devait pas manquer. Les charbons, prélevés sur le site et étudiés, indiquent une prédominance très forte du chêne (Abetel 1992, 42-44). Les résineux sont absents. C'est donc probablement une forêt de basse altitude qui a été charbonnée. Au Moyen Âge, la zone qui s'étendait d'Orbe jusqu'aux Clées était encore couverte par le bois de Chassagne (c'est-à-dire de chênes; Mottaz, 1914, 366). Les besoins en charbon de l'atelier restent limités par rapport aux ressources que l'on peut supposer.

### Relations entre l'atelier de Montcherand et le district sidérurgique du Mormont

L'atelier de Montcherand présente bien des points communs avec les sites de la région du Mormont. L'organisation du travail semble identique. Sur un même emplacement, au cours des siècles, on reconstruit régulièrement des fourneaux de réduction. On réutilise les ruines des anciens appareils pour en construire de nouveaux. Sur les ateliers, il n'y a pas trace d'autres activités, domestiques ou artisanales, que celle de la réduction du minerai.

Sur le plan technologique, les fourneaux de Montcherand présentent les mêmes caractères généraux que ceux du Mormont. Leur état de conservation ne permet cependant pas

de dire s'ils différaient quant aux détails. Les matières premières utilisées sont comparables, quoique le minerai du Mormont semble d'une qualité légèrement supérieure. Les scories de Montcherand, mis à part les SBD, sont très proches de celles du Mormont. Les techniques de fabrication mises en œuvre sont donc comparables.

Toutefois, à Montcherand les artisans ont exploré un nouveau domaine technologique. Les analyses des SBD démontrent clairement l'utilisation d'une charge calcaire de manière répétée et donc non accidentelle. Ce sont les calcaires altérés au contact du Sidérolithique qui ont été utilisés. Le gisement étant loin d'être épuisé, ce n'est pas faute de minerai argileux que l'on a eu recours à ces calcaires mais en raison de leurs qualités propres. Les artisans de Montcherand étaient donc en train d'ouvrir la voie à une technique pleine d'avenir, celle des fondants, qui se généralisera avec le haut fourneau.

Les données actuellement disponibles ne permettent pas de dire si les sidérurgistes de la région du Mormont n'ont pas, eux aussi, exploré cette voie. Les sites de Prins-Bois 2 et Voualève 1 ont livré des scories anormalement riches en CaO et, pour le premier d'entre eux, des blocs de calcaire ferrugineux (p. 114). Les résultats d'analyse de Montcherand jettent un éclairage nouveau sur ces quelques données de la région du Mormont. Il est cependant trop tôt pour conclure dans ce sens.

Pour finir, la période de fonctionnement de l'atelier de Montcherand correspond à celle pendant laquelle l'activité sidérurgique est la plus intense dans la région du Mormont.

Si l'atelier de Montcherand est géographiquement isolé, il s'intègre tant sur le plan technologique que socio-économique, à l'ensemble plus vaste de la région du Mormont.

## La région de Vallorbe et l'industrie médiévale et moderne

A partir du Moyen Âge, la sidérurgie va se développer dans l'arrière-pays montagneux du Jura vaudois et dans les régions adjacentes, en France et sur territoire neuchâtelois. Ce mouvement correspond à la mise en valeur de nouvelles terres, de leurs mines et de leurs forêts. Les sources historiques ont permis une étude détaillée de cette industrie (Pelet 1971, 1978 et 1983). Bien qu'il n'y ait pas de données nouvelles, il paraît nécessaire de rappeler les points principaux.

L'aire géographique concernée est située au-delà de la première chaîne du Jura. Elle comporte la vallée de Joux, la haute vallée du Doubs à partir du lac de Saint-Point et le valon de Noirvaux soit un triangle Le Brassus VD - Pontarlier F- Couvet NE. L'altitude des fonds de vallée est située entre 900 et 1000 m. Les sommets atteignent 1400 m.

Du point de vue géologique, cette zone fait partie du Jura plissé (cartes géologiques françaises Mouthe 583 et Pontarlier 557; suisses Le Sentier 1221 et Les Verrières 1162; Aubert 1943; Rickenbach 1925; Rittener 1920). Une série de crêtes anticlinales alternent avec les vallées synclinales. Au bas des pentes, les couches du Crétacé affleurent alors que

sur les sommets, l'érosion met à nu les terrains jurassiques. Un puissant décrochement NS coupe la chaîne et perturbe la structure générale.

Le faciès riche en fer du Valanginien supérieur, la Limonite, connaît un assez grand développement mais les affleurements restent peu nombreux (p. 41; Guillaume 1966, 140-144). Partout où la Limonite était accessible, elle fut exploitée. L'observation des terrains en place est très difficile actuellement mais la topographie témoigne des travaux miniers. Sur le versant français, les mines furent en activité plus récemment et quelques observations ont pu être faites sur la nature du minerai et les travaux miniers par les premiers géologues (Merle 1905, 133-135; Cayeux 1922, 841-863).

Des minerais pisolithiques, sidérolithiques ou plio-quaternaires, sont également mentionnés, par exemple aux Granges le long du lac de Saint-Point (Jaccard 1869, 116). A ce sujet, la bibliographie est très ancienne et les données récentes manquent.

Au sommet du Risoux, lieu dit Les Mines, une mine de fer fut en activité probablement au XVII<sup>e</sup> siècle. La nature du minerai n'est pas bien définie (filon d'oxydes et d'hydroxydes de fer?). Les puits et galeries effondrés sont encore bien visibles dans la forêt.

En plus des minerais, les forêts de cette région d'altitude offre de grandes ressources en bois. Les rivières fournissent la force motrice nécessaire. Les conditions de l'épanouissement d'une sidérurgie mécanisée sont donc réunies.

Ces territoires ne semblent pas être occupés avant le Moyen Âge, bien que situés non loin de la route romaine qui mène d'Orbe à Pontarlier. A ce jour, aucun indice ne permet de penser que les minerais de cette région aient été connus et, a fortiori, exploités. Il n'est par contre pas démontré qu'ils ne se prêtaient pas, techniquement, à la réduction directe dans un bas fourneau sans soufflerie hydraulique et que c'est pour cette raison qu'ils n'ont pas été utilisés.

Sur le versant suisse, le développement de l'industrie métallurgique se fait à partir de la fin du XIII<sup>e</sup> siècle. La première usine est édifiée à Vallorbe. D'après les textes, il s'agit clairement d'un atelier destiné à la réduction du minerai de fer par le procédé direct mais équipé d'une soufflerie hydraulique. A la fin du XV<sup>e</sup> siècle, de nouvelles usines du même type sont bâties, à Vallorbe même ainsi que dans la vallée de Joux et à Sainte-Croix. La technique du haut fourneau ne se développe qu'après 1525 et remplace petit à petit la méthode directe.

Dès la fin du XVII<sup>e</sup> siècle, les hauts fourneaux périclitent. Le dernier d'entre eux s'éteindra en 1811. Parallèlement l'industrie s'oriente vers l'affinage de la fonte locale ou importée. C'est également l'essor de la clouterie, puis des fabrications spécialisées.

Toutes ces étapes sont bien connues grâce aux travaux des historiens. A n'en pas douter, une approche des vestiges matériels avec les moyens de l'archéologie industrielle serait intéressante, en particulier en ce qui concerne les appareils de réduction par la méthode directe équipés de souffleries hydrauliques qui demeurent très mal connus à tous points de vue.