

CAHIERS D'ARCHÉOLOGIE ROMANDE N° 61  
COLLECTION CRÉÉE PAR COLIN MARTIN

Vincent Serneels

**Archéométrie  
des scories de fer.  
Recherches sur  
la sidérurgie ancienne  
en Suisse occidentale**

LAUSANNE 1993

CAHIERS D'ARCHÉOLOGIE ROMANDE  
COLLECTION CRÉÉE PAR COLIN MARTIN

N° 61

I Mon.

Vincent SERNEELS

TSC 360

**Archéométrie des scories de fer.  
Recherches  
sur la sidérurgie ancienne  
en Suisse occidentale**



5/94

LAUSANNE 1993

10001  
C. 75. 1  
TSC  
360

*Le Prix de la Société académique vaudoise 1994 a été décerné à l'auteur de ce travail*

Ce volume est publié grâce à l'appui  
de la Société vaudoise des sciences naturelles  
de l'Université de Lausanne  
du Département de l'instruction publique et des cultes du canton de Vaud.

Tous les droits de traduction et d'adaptation réservés pour tous les pays  
© 1993 by Cahiers d'archéologie romande  
ISBN 2-88028-061-3

Les commandes et demandes d'ouvrages peuvent être adressées à

Cahiers d'archéologie romande  
Case postale 210  
CH-1000 LAUSANNE 17

Couverture: A. Rahman, CH 1426, Corcelles-près-Concise  
Composition: Atelier La Rebase Bercher  
Photolitho et impression: Imprimerie Cavin SA Grandson

## Remerciements

*L*e chemin parcouru en presque six années de travail est pavé de scories et d'amitié. Je remercie sincèrement tous ceux qui, par leur soutien affectif aussi bien que professionnel, m'ont permis de mener à bien ce travail.

*C'est envers Paul-Louis Pelet que ma dette est la plus lourde. Attentif, toujours disponible, plein de bon sens, de finesse et de savoir, bref de sagesse, il a, en maître avisé, laissé mûrir l'élève.*

*La confiance que m'a accordée Hans-Ruedi Pfeifer ne fut jamais démentie. Au sein du Centre d'analyse minérale, le laboratoire qu'il anime, j'ai trouvé une ambiance, studieuse et humaine, tout à fait propice. Jean-Claude Lavanchy, toujours disponible, fut l'homme de bien des situations délicates. Les étudiants qui ont participé à la préparation des échantillons analysés ont également contribué à ce travail, en particulier Gérald Vernez et Mladen Simic.*

*L'enthousiasme communicatif de Michel Mangin, son ouverture d'esprit, son dévouement parfois, furent des stimulants permanents. A bien des égards, il a été l'interlocuteur le plus exigeant, celui qui vous force à aboutir. C'est souvent dans le cadre de ses séminaires informels que les idées prirent corps.*

*Ludwig Eschenlohr, Walter Fasnacht, Cornel Doswald, Marianne Senn-Luder, Pierre-Alain Vauthey et les autres membres ont fait du Groupe de travail suisse d'Archéologie du fer, un organe dynamique, à même de réaliser des projets communs.*

*C'est dans le cadre matériel et surtout humain de la Section des sciences de la Terre de l'Université de Lausanne que ce travail a pu se faire. Mes remerciements vont à tous les collaborateurs, professeurs, assistants et étudiants, en particulier au sein du secrétariat et des différents laboratoires:*

*Anne-Marie Magnenat, Michel Jaboyedoff, Philippe Thélin, Liliane Dufresne, François Bussy, Jean-Claude Vanney, Raymond Ansermoz et Laurent Nicod.*

*Les archéologues suisses ont fait bon accueil à cette recherche pourtant non conformiste, en particulier Daniel Paunier, François Schifferdecker et Hans Bögli. Emmanuel Abetel fut le premier à m'apporter des échantillons de scories.*

*Les collègues étrangers, Peter et Susan Crew, Philippe Andrieux, Marc Leroy, Alain Ploquin, Claude Forrière, Radomir Pleiner et beaucoup d'autres m'ont fait partager leurs connaissances en maintes occasions au cours de réunions scientifiques ou de visites de terrain.*

*C'est grâce au soutien financier du Fonds national suisse pour la Recherche scientifique que ces recherches interdisciplinaires ont été possibles (requête N° 12-2165.87, professeur H.R. Pfeifer, D. Paunier et P.-L. Pelet). Ce travail a été présenté comme thèse de doctorat en sciences à l'Université de Lausanne en juin 1993 (président: C. Joseph, directeur: H.-R. Pfeifer, membres du jury: M. Mangin, P.-L. Pelet, A. Steck, P. Crew et F. Schweizer). Le manuscrit, remanié, a été accepté dans la collection des Cahiers d'archéologie romande (direction: D. Paunier, G. Kaenel, D. Weidmann).*

*Enfin, j'espère pouvoir obtenir un jour le pardon de ma femme Monique et de mes enfants Guillaume et Virginie, pour les lourds sacrifices qu'ils ont consentis au cours de la rédaction de ce manuscrit. Je ne recommencerai pas.*

*A tous, merci.*

# INTRODUCTION

## Pourquoi des scories?

**P**ENDANT plus de 25 siècles, le fer a joué un rôle de première importance pour l'homme. Les minerais et le bois ne manquaient pas en Europe du Nord; partout ou presque, ils furent exploités. Très vite, le fer devint le métal quotidien, celui du soldat, bien sûr, mais aussi du paysan.

Sans être abondantes, les ressources suisses ont néanmoins permis le développement d'une industrie sidérurgique depuis les origines jusqu'à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle.

Pour les 5 derniers siècles, les sources écrites et les archives rendent compte de l'histoire de cette activité, de ses progrès techniques, de ses succès et déconvenues. Par contre, seules les données archéologiques nous renseignent sur un passé plus lointain. Au premier rang des témoins de ce passé, se trouvent les humbles résidus laissés par les traitements métallurgiques: les scories, par kilos, par tonnes ou par milliers de tonnes. Les scories sont des matériaux archéologiques tellement communs qu'on les mentionne à peine, mais si compliqués qu'on ne les décrit presque jamais. Au-delà de leur simple présence qui témoigne d'une activité métallurgique, il n'est pas aisé de les interpréter plus avant, de leur donner un sens précis.

Sales et encombrantes, les scories finissent souvent au laboratoire où elles sont transformées en colonnes de chiffres. Même si les premières analyses chimiques de scories ont été faites il y a plus de 150 ans (Berthier 1822), il est encore trop souvent difficile d'aller plus loin qu'une simple caractérisation du matériau.

Les moyens modernes d'analyse offrent des possibilités presque illimitées. La réalisation des mesures et des déterminations ne pose pas de problème sérieux, même s'il faut être exigeant sur la qualité des résultats. Le véritable enjeu est de passer des résultats d'analyse à leur interprétation, de la simple constatation des faits à une explication.

C'est sur ce point, l'établissement d'une méthodologie d'étude des scories, qu'auront porté tous nos efforts. Notre démarche a donc été de considérer les scories comme des objets possédant des caractères propres significatifs: chimiques, minéralogiques, texturaux et morphologiques. Définir ces caractères observables puis essayer de constater des

relations entre eux, enfin mettre en rapport les objets avec les structures artisanales mises au jour par les archéologues sont les premières étapes, celles qui peuvent mener à la compréhension détaillée des procédés techniques et parfois à la redécouverte des gestes de l'artisan. A travers une démarche descriptive, celle d'un pétrographe, on parvient ainsi aux éléments qui intéressent l'archéologue.

Sur la base de la connaissance détaillée des techniques et d'une étude régionale des vestiges, il devient possible de décrire l'organisation d'une industrie et de son marché.

Les scories sont le point de départ et le centre de ce travail, les analyses chimiques globales en sont l'outil privilégié. Les principaux résultats sont la caractérisation des scories produites au cours des différentes étapes de la chaîne opératoire de la sidérurgie et la mise au point de techniques d'interprétation quantitatives basées sur les analyses.

## Le cadre du travail

Ce travail comporte deux grandes parties. La première traite des aspects généraux concernant les scories, les minerais et les techniques sidérurgiques (chapitres 1 à 3). Elle a pour but d'introduire les notions de base en chimie, minéralogie, gîtologie et métallurgie ancienne. Ces trois chapitres permettent également d'introduire le vocabulaire qui sera utilisé dans la seconde partie du travail (GSAF 1991a). Les méthodes d'analyse utilisées sont présentées dans l'Annexe 1.

L'archéologue, le géologue ou même le métallurgiste, ne maîtrisent que rarement l'ensemble de ces connaissances. Le spécialiste trouvera donc, dans son propre domaine, des approches parfois très simples; il a cependant semblé indispensable de fournir à chacun un complément dans les autres domaines. Il ne s'agit pas seulement d'une mise au point des acquis de la recherche passée, chaque chapitre présente également des apports nouveaux, fruits de cette étude.

L'étude des scories est abordée de manière détaillée (chapitre 1). Plusieurs approches sont originales (calcul de la production, saturation en oxydes de fer, typologie). Le chapitre 2 introduit la notion de minerai et présente une synthèse sur les occurrences naturelles du fer en Suisse. Si les différentes étapes de la sidérurgie ont, bien sûr, déjà été décrites

l'accent est mis sur la notion de chaîne opératoire (chapitre 3). En outre, cette étude apporte des données nouvelles sur le comportement des éléments chimiques tout au long du processus.

Ces apports nouveaux se fondent sur l'examen et l'analyse d'un abondant matériel provenant de Suisse occidentale. Ils ont néanmoins une portée générale pour l'étude des vestiges de la sidérurgie ancienne, au moins à titre de comparaison.

Il faut également souligner que l'approche ne s'est pas limitée à l'étude d'échantillons au laboratoire; le travail de terrain occupe une place importante.

La seconde partie de l'ouvrage présente, région par région et en détail, les résultats de l'étude des sites et des échantillons (chapitres 4 à 9, analyses aux Annexes 3 à 7). Les ressources minières et les vestiges métallurgiques sont

étudiés. Dans la mesure du possible, ils sont replacés dans un contexte archéologique plus vaste. Au sein de la zone étudiée, chaque aire géographique présente des caractères propres qui justifient le découpage. Il faut souligner que l'état d'avancement de la recherche est très inégal d'un secteur à l'autre.

La Suisse est divisée en trois grandes unités géographiques. Au nord se situe la chaîne du Jura qui renferme les principaux gisements de minerai de fer. Au centre, le Plateau suisse est la région la plus propice à l'établissement humain. C'est là que, de tout temps, s'est concentrée la population. Si le sol est fertile, le sous-sol est pauvre en minerai. Au sud, les montagnes des Alpes ne renferment que peu de gisements, les conditions de vie y sont difficiles. Par contre, certaines vallées sont d'importantes voies de passage.

Située à cheval sur le Jura et le Plateau, la région étudiée permet d'observer les relations entre les zones de production et les centres de consommation du métal (fig. 1).

Deux zones de métallurgie extractive (réduction du minerai de fer) ont été étudiées. Celle du Salève, France, était jusqu'à maintenant pratiquement inconnue (chapitre 4). Ce n'est donc qu'une prospection qui a été menée à bien et de nombreuses questions restent en suspens, en particulier concernant la chronologie de l'exploitation.

A l'opposé, les vestiges métallurgiques des environs du Mormont VD forment un des ensembles les mieux étudiés d'Europe (chapitres 5 et 6; Pelet 1973 [édition revue et complétée: 1993], 1978, 1983 et Abetel 1992). Sept ateliers de réduction et une cinquantaine de fourneaux y ont été fouillés. Ces données archéologiques permettent de cerner l'évolution des techniques sur une période de dix siècles, de l'âge du Fer jusqu'au Haut Moyen Age (Pelet 1982). L'apport de ce travail se trouve essentiellement dans les résultats tirés des analyses chimiques et dans les réflexions sur l'organisation de la production du fer dans cette zone.

Pour une grande part, les interprétations des vestiges de réduction de ces deux régions se fondent sur les résultats de l'étude du site mérovingien de Boécourt, Les Boulies JU. Comme ces vestiges ont fait l'objet d'une publication récente, il n'a pas semblé indispensable de les présenter à nouveau (Eschenlohr et Serneels 1991).

Les scories des habitats gallo-romains du Plateau comme Avenches VD (chapitre 7) et Marsens FR (chapitre 8) sont interprétées comme les témoignages d'une métallurgie de transformation (raffinage et forge). Cette hypothèse s'appuie aussi bien sur les analyses chimiques que les données archéologiques.

Enfin, un panorama des recherches anciennes et actuelles sur le territoire de la Suisse est esquissé (chapitre 9).

L'étude régionale n'a pas pu avoir un caractère exhaustif: les scories sont des matériaux beaucoup trop fréquents sur les sites archéologiques pour pouvoir espérer les voir toutes. Par contre, plusieurs groupes d'échantillons significatifs ont pu être étudiés au laboratoire (235 analyses chimiques inédites; Annexes 3-7). Par la variété des situations étudiées, il est possible de dresser un tableau général de l'organisation de l'industrie du fer ancienne.

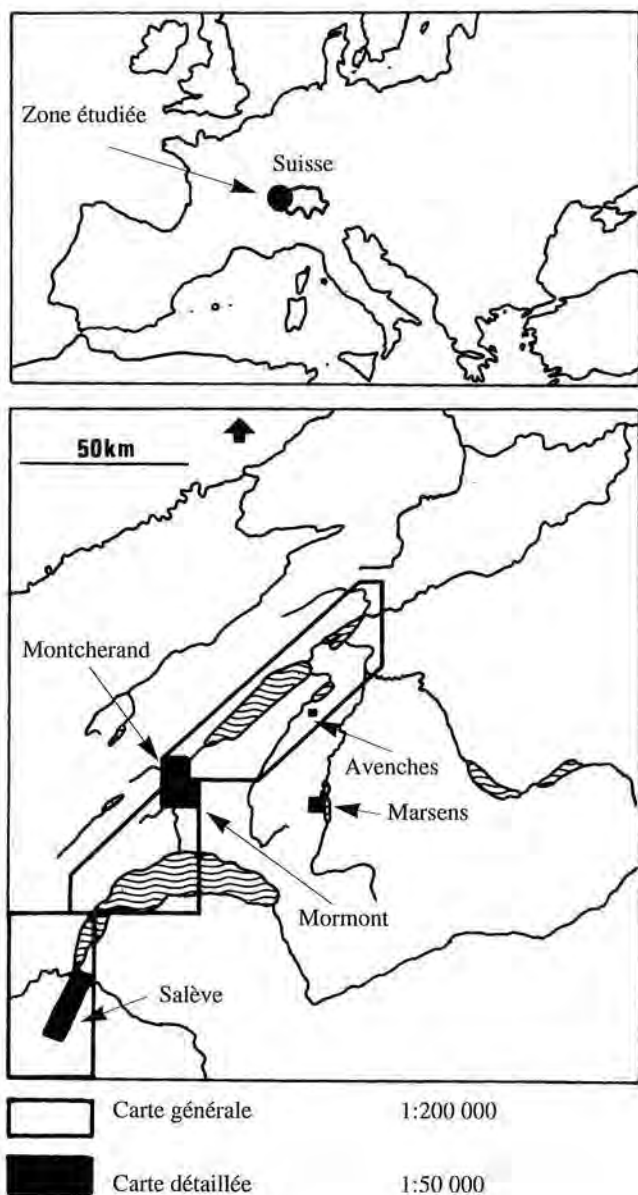


Fig. 1. Limites des zones étudiées.

## Aperçu de l'histoire de la sidérurgie en Europe

Ce sont les métaux natifs, tels que l'or, l'argent et le cuivre, qui furent les premiers utilisés par l'homme. En même temps, il découvrait que la chaleur modifie l'état de la matière (céramique, plâtre, chaux...). Dès lors, le traitement de certains minerais métalliques devint possible. La métallurgie du cuivre et des alliages à base de cuivre (Cu-Sn, Cu-As, etc.) connut un brillant développement.

Les tout premiers objets en fer connus proviennent du Moyen-Orient (Iran, Mésopotamie, Anatolie et Egypte; Waldbaum 1980). Quelques pièces, pour la plupart fabriquées avec du fer météorique, ont été trouvées dans des contextes extrêmement anciens, avant 3000 av. J.-C. Après cette date, apparaissent, toujours dans la même région, les premiers objets en fer

terrestre. Les conditions d'élaboration de ce métal sont encore inconnues faute de découverte archéologique (sous-produit de la métallurgie du cuivre?). Entre 1600 et 1200 av. J.-C., si les objets en fer se font un peu plus nombreux, ils restent des biens de luxe (bijoux, armes de prestige ou objets de culte). Ce n'est qu'au cours des siècles suivants que le fer commencera à être utilisé pour fabriquer des armes et des outils utilitaires. A cette époque, la métallurgie du fer se répand dans le bassin de la mer Egée (Pleiner 1969 et 1980; fig. 2).

Aux IX<sup>e</sup>-VIII<sup>e</sup> siècles avant notre ère, le fer devient d'un usage fréquent au Moyen-Orient. Les Grecs assureront le relais pour la diffusion des objets d'abord, puis des techniques sidérurgiques en direction des Balkans et du sud de l'Italie. Les Phéniciens agiront de même pour les côtes méditerranéennes de l'Espagne. D'autres influences arriveront jusqu'au centre de l'Europe par le Caucase.

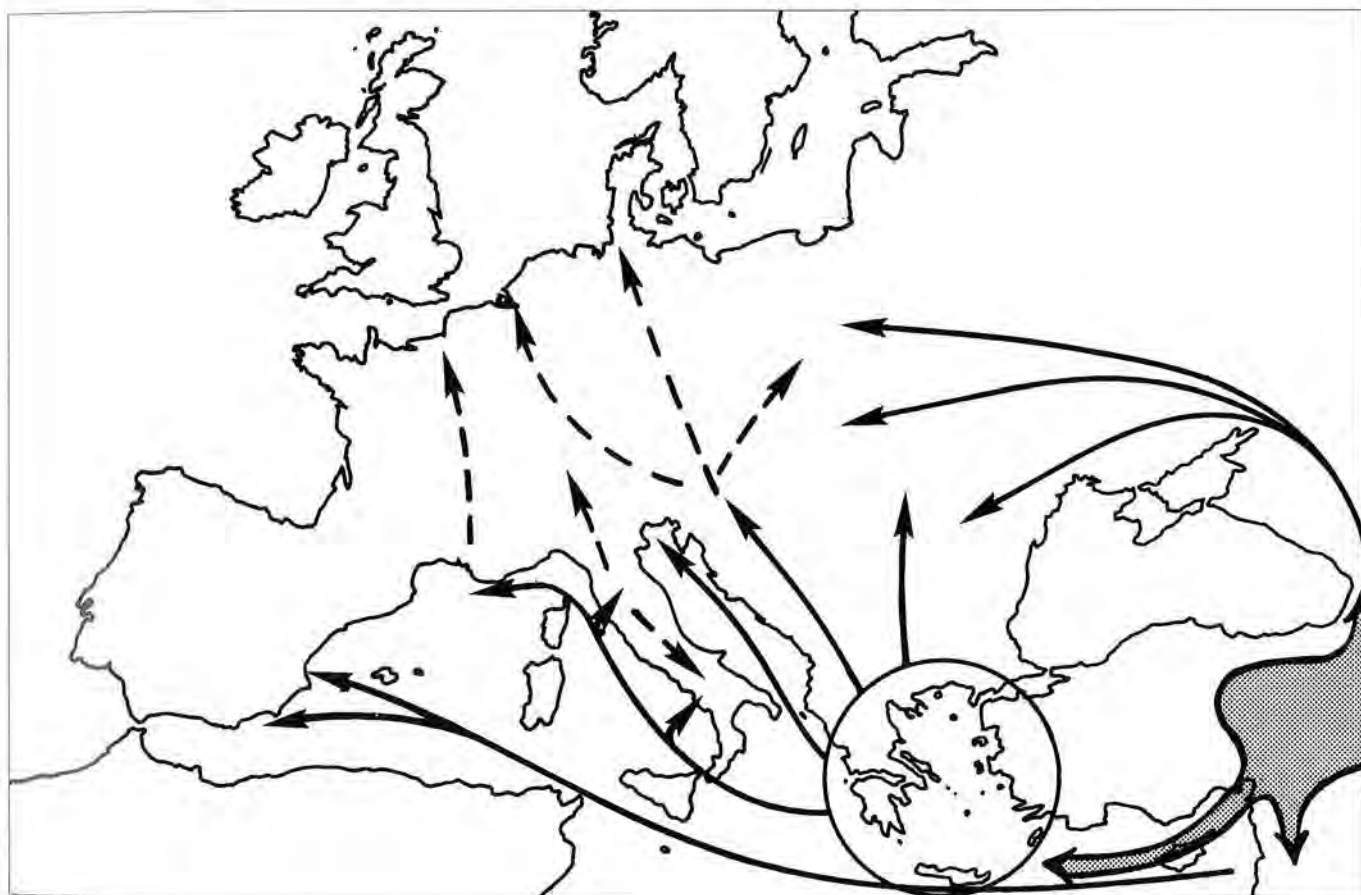


Fig. 2. Premières étapes de la diffusion des objets en fer et des techniques sidérurgiques en Europe. D'après Pleiner 1980, fig. 11.2.



### Région d'origine de la métallurgie du fer: Moyen-Orient

Premiers objets vers 3000 av. J.-C. Utilisation régulière vers 1200 av. J.-C. Exportation des objets et des techniques vers le Caucase, la Grèce et l'Égypte.



### Première extension de la métallurgie du fer: Grèce.

Premiers objets vers 1200 av. J.-C. Utilisation régulière vers 800 av. J.-C.

Exportation des objets et des techniques vers l'Europe centrale par le Caucase, vers l'Italie par la Grèce et vers l'Espagne par la Phénicie.



### Seconde extension de la métallurgie du fer:

Premiers objets vers 800 av. J.-C. Utilisation régulière vers 500 av. J.-C.

Diffusion des objets et des techniques par les Celtes en Europe centrale et par les Etrusques en Italie.

Vers 800 av. J.-C., au nord des Alpes, les objets en fer ne sont plus complètement isolés (en Suisse: épée de Mörigen, etc.). Trois siècles plus tard, le fer devient un métal commun dans ces régions alors que les premiers objets atteignent seulement les îles Britanniques et la Scandinavie.

Au cours des derniers siècles avant notre ère, le fer remplace complètement le bronze pour l'armement et l'outillage. Il joue un rôle primordial dans la vie quotidienne (clous, chaînes, charnières, serrures, etc.). Dès cette époque, le fer est produit sur une grande échelle dans nombre de régions d'Europe mais toujours par la méthode directe de réduction. Le fer est devenu commun, mais il reste un métal relativement difficile à produire.

Sous l'Empire romain, les techniques de production et d'élaboration sont largement répandues. Le métal de qualité fait l'objet d'un commerce à longue distance. Le Norique (Autriche) est la source la plus réputée à l'intérieur des frontières, mais des relations commerciales sont établies avec des régions parfois très éloignées dont la production est connue pour sa qualité supérieure (Inde, Extrême-Orient; Plin, *Naturalis Historia*, livre 34, 138-155). Dans certaines régions, la production est massive et contrôlée par l'Etat ou l'armée (p. ex. le Weald GB; Cleere et Crossley 1985) mais ce n'est pas une règle générale.

Au cours du Haut Moyen Age, la qualité des produits forgés atteint des sommets. Les armes franques sont réputées et exportées (Scandinavie, Orient). L'organisation de la production reste inconnue.

Ce n'est qu'avec l'avènement du procédé indirect que la production va connaître un développement quantitatif sans précédent. C'est à la suite du développement des applications de l'énergie hydraulique aux machines qu'apparaît en Europe le haut fourneau. Dans l'état actuel de la recherche, il est très délicat de localiser et de dater précisément le premier haut fourneau. Dans plusieurs régions, il existe des éléments remontant au XIV<sup>e</sup> siècle ou même plus tôt (Lapphyttan, Suède: Magnusson 1988; Belgique, Pays de Liège: Gillard 1971, 54). Dans bien des cas, on peut supposer

une lente évolution menant du bas fourneau au haut fourneau en passant par des appareils intermédiaires («Stücköfen», «Massöfen», «Flossöfen», etc.). Quoi qu'il en soit, l'emploi de cette nouvelle technologie est généralisé à la fin du XVI<sup>e</sup> siècle (Belhoste 1986). La méthode directe ne sera plus pratiquée que de manière marginale sauf dans quelques régions (p. ex. Catalogne).

Le haut fourneau introduit un changement radical: on ne produit plus le fer à l'état solide mais de la fonte liquide. Cela fut rendu possible par l'utilisation de fourneaux plus grands (temps de réaction plus long) et de souffleries plus fortes (températures plus élevées). Dans ces conditions, le carbone s'allie au fer et abaisse le point de fusion du produit. Outre le fait qu'il augmente considérablement le rendement du minerai, le haut fourneau permet de traiter de manière continue des volumes beaucoup plus grands de matière première. De plus, la fonte moulée trouvera toutes sortes d'applications nouvelles (artillerie, récipients, construction métallique). La contrepartie est que la fonte, dure et cassante, doit être affinée, c'est-à-dire décarburée, avant d'être forgée.

C'est la raréfaction du combustible qui deviendra le problème essentiel des producteurs de fer. L'invention du coke permettra enfin d'utiliser la houille à la place du charbon de bois (premiers essais par A. Darby vers 1700). Dans les années qui suivent, de nombreux perfectionnements interviennent (machine à vapeur, laminoir, tréfilerie, etc.). Au début du XX<sup>e</sup> siècle, le développement du convertisseur permet d'obtenir de l'acier fondu en grande quantité (Tylecote 1976, 105-128 et 144-148).

Dans le cadre de ce travail, ce ne sont que les périodes anciennes qui ont été étudiées. Les vestiges de l'âge du Fer sont malheureusement très rares, par contre, les traces laissées par les industries de l'époque romaine et du Haut Moyen Age sont abondantes. Elles relèvent toutes de la méthode directe de fabrication du fer. Le passage à la production de la fonte n'a pas pu être abordé, faute de données archéologiques concrètes.

I  
LES SCORIES, LES MINERAIS  
ET LES TECHNIQUES

# 1

## LES SCORIES: ASPECTS CHIMIQUES ET MINÉRALOGIQUES

**P**OUR l'archéologue, en raison de sa formation même, les aspects chimiques et minéralogiques de l'étude des scories sont difficiles à appréhender. Il est donc nécessaire de fixer quelques notions de base. Mais qu'on ne s'y trompe pas, les scories anciennes sont, du point de vue chimique et minéralogique, fort différentes des roches naturelles; elles déroutent le géologue. Elles se distinguent aussi nettement des résidus de la métallurgie moderne; le métallurgiste aussi s'interroge.

Ce chapitre a pour but d'introduire, pour tous, le système chimique et minéralogique des scories anciennes. C'est la raison pour laquelle nous sommes partis de notions élémentaires pour aboutir aux considérations spécialisées.

Les principales conclusions sont tirées de l'examen critique des propositions faites par d'autres chercheurs et surtout de l'étude des résultats d'analyse des matériaux scorifiés de Suisse occidentale.

La nature variée des minerais de fer de par le monde et les spécificités des techniques mises en œuvre dans d'autres régions empêchent, dans l'état actuel des connaissances, de généraliser ces nouvelles propositions. Leur confrontation avec les données obtenues dans d'autres contextes sera certainement profitable pour la compréhension générale du système et l'interprétation archéologique des résidus sidérurgiques anciens.

### Chimie

L'atome peut être considéré comme le terme ultime de la division de la matière dans lequel les éléments chimiques conservent leur individualité. Les atomes sont composés d'un noyau, comportant un certain nombre de protons et de neutrons, autour duquel se meuvent des électrons. Deux atomes qui ont le même nombre de protons et d'électrons

possèdent les mêmes propriétés chimiques (même élément). S'ils diffèrent par le nombre de neutrons, leurs propriétés nucléaires sont différentes et ce sont deux isotopes d'un même élément. On connaît 89 éléments naturels et quelques autres qui peuvent être fabriqués (Annexe 1). Les corps simples sont constitués d'atomes d'un seul élément. Les corps composés sont formés d'atomes de différents éléments. Les molécules sont des groupements d'atomes caractéristiques. Diverses méthodes d'analyse permettent de connaître la composition chimique d'un corps à différentes échelles.

Les analyses chimiques globales portent sur un volume relativement important de matière qui devrait être représentatif de l'objet étudié. Elles donnent une impression d'ensemble du matériau. Elles fournissent des informations essentielles sur les minerais telles que la teneur en fer et la nature de la gangue. Dans le cas des scories de réduction, elles permettent de décrire l'héritage par rapport au minerai et de détecter d'éventuels ajouts et d'autres contaminations.

Les concentrations en éléments majeurs sont l'outil privilégié pour les calculs de bilan chimique entre minerais et scories. Les éléments mineurs et traces permettent, dans une certaine mesure, d'identifier la source de la matière première. Le comportement de certains éléments fournit des indications sur les conditions physico-chimiques dans lesquelles se sont déroulées les opérations métallurgiques.

Les analyses chimiques ponctuelles portent sur des volumes de matières beaucoup plus petits. Elles donnent la composition, non pas de l'ensemble de l'objet, mais de ses constituants (minéraux, métaux, verre, etc.). Elles permettent donc de les identifier de manière précise et d'observer les variations internes de la composition chimique.

### Les analyses chimiques

Diverses méthodes permettent de déceler la présence d'un élément chimique donné et d'en mesurer la concentration. Quelle que soit la méthode utilisée, cette concentration

est toujours un rapport (de masse, de volume ou de nombre) entre l'élément considéré et l'échantillon entier (% , ppm, ppb).

Une analyse chimique complète devrait, en principe, donner les concentrations des 89 éléments chimiques naturels présents dans l'échantillon. En pratique, quelques éléments, les majeurs, jouent un rôle prépondérant. Ainsi, 9 éléments forment plus de 99,9% de la croûte terrestre:

O	45,5%	Fe	7,0%	Na	2,3%
Si	26,8%	Ca	5,3%	K	0,9%
Al	8,4%	Mg	3,2%	Ti	0,5%

Concentrations des 9 éléments chimiques les plus abondants dans la croûte terrestre (% poids) (Faure 1992).

Parmi ceux-ci, l'oxygène (O) est de loin le plus abondant. Pour cette raison, dans les tableaux d'analyses, les éléments majeurs sont donc présentés en % poids et sous forme d'oxydes.

Il convient également de tenir compte du carbone (C) et de l'hydrogène (H), très abondants à la surface de la Terre. Normalement, la somme des concentrations des éléments majeurs devrait être proche de 100%. On peut admettre une variation de 98 à 101%. Lorsque la somme est plus basse, l'analyse est suspecte et les résultats doivent être utilisés avec prudence (présence de soufre, etc.).

Les éléments traces sont donnés en ppm (1% = 10 000 ppm ; 1ppm = 1gr/t) et sous forme d'élément. Normalement, ils ne constituent ensemble que moins de 0,5% de l'échantillon. Si ce n'est pas le cas, dans certains calculs, il convient de tenir compte de leur présence et éventuellement de leurs combinaisons sous forme d'oxydes (scorie de cuivre, etc.).

Si le choix des éléments majeurs à doser est dicté par la nature, il n'en va pas de même pour les traces. Ce sont les possibilités d'analyse (spécificités de la méthode, sensibilité des appareils, gamme de standards disponibles, etc.) qui imposent des choix.

L'analyse chimique porte toujours sur un volume restreint de matériel, en général quelques grammes, et n'est, à proprement parler, représentative que de celui-ci. Il est donc essentiel de choisir cet échantillon selon une procédure qui permette de connaître sa représentativité à une plus grande échelle.

Les analyses chimiques globales ont été faites par la méthode de la spectrométrie de fluorescence des rayons X (XRF), au Centre d'analyse minérale de la Section des sciences de la Terre de l'Université de Lausanne et avec l'aide de l'ensemble de l'équipe qui y travaille, en particulier H.-R. Pfeifer, chef du centre et J.-C. Lavanchy, 1<sup>er</sup> laborantin. Les procédures standards ont été adaptées au problème spécifique posé par l'analyse des matériaux riches en oxydes de fer (Annexe 1). Toute l'équipe du Centre d'analyse minérale a participé à la mise au point de ces procédures (Pfeifer *et al.* 1991). Quelque 500 analyses de scories, minerais de fer et matériaux associés ont été faites dans le cadre de ce travail.

### La composition chimique des scories et le système $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-FeO}_n$

Toutes sortes de matériaux peuvent prendre un aspect scorifié, en général sous l'influence de la chaleur. Les scories, au sens large, peuvent donc avoir des compositions chimiques extrêmement variées. Dans ce chapitre, il ne sera question que des scories qui sont des déchets résultant du travail du fer. La composition chimique des scories de fer est le reflet de l'ensemble du traitement dont elles sont les résidus, c'est-à-dire à la fois des matières premières utilisées et des travaux exécutés.

La grande majorité des résidus sidérurgiques anciens ont des compositions chimiques globales relativement proches les unes des autres, en tous cas pour ce qui est des constituants majeurs: silice, alumine, chaux et fer sous différentes formes (Fe, FeO,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Le système  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-FeO}_n$  permet de les appréhender (fig. 3; Annexe 1).

Les scories étudiées dans ce travail n'occupent qu'une petite partie du tétraèdre représentant le système  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-FeO}_n$ . La grande majorité d'entre elles se projettent dans un volume restreint, proche du plan  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-FeO}_n$  (fig. 3).

Le calcium est presque toujours un constituant mineur (< 5%). Dans la plupart des cas, la projection sur le plan  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-FeO}_n$  sera la représentation la plus adéquate. Elle ne peut cependant pas être généralisée sans précaution.

Par rapport à l'ensemble des scories anciennes dont les analyses sont fournies par la bibliographie, les scories suisses, en particulier les scories de réduction, sont fréquemment riches en alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3 > 5\%$ ). Ce caractère est à mettre en relation avec la composition chimique du minerai sidérolithique suisse dont la gangue est en général très aluminieuse.

Des exemples de scories anciennes nettement plus riches en calcium existent (par exemple à Ludres en Lorraine,

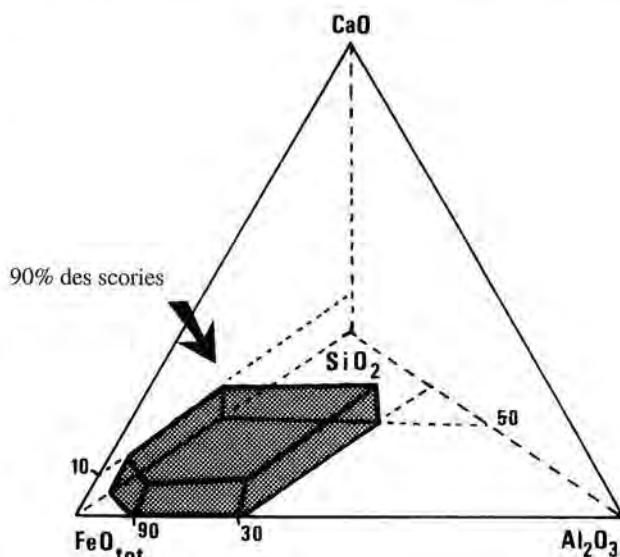


Fig. 3. Le système quaternaire  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-FeO}_n$ . 90% des scories analysées se projettent à l'intérieur du volume grisé.

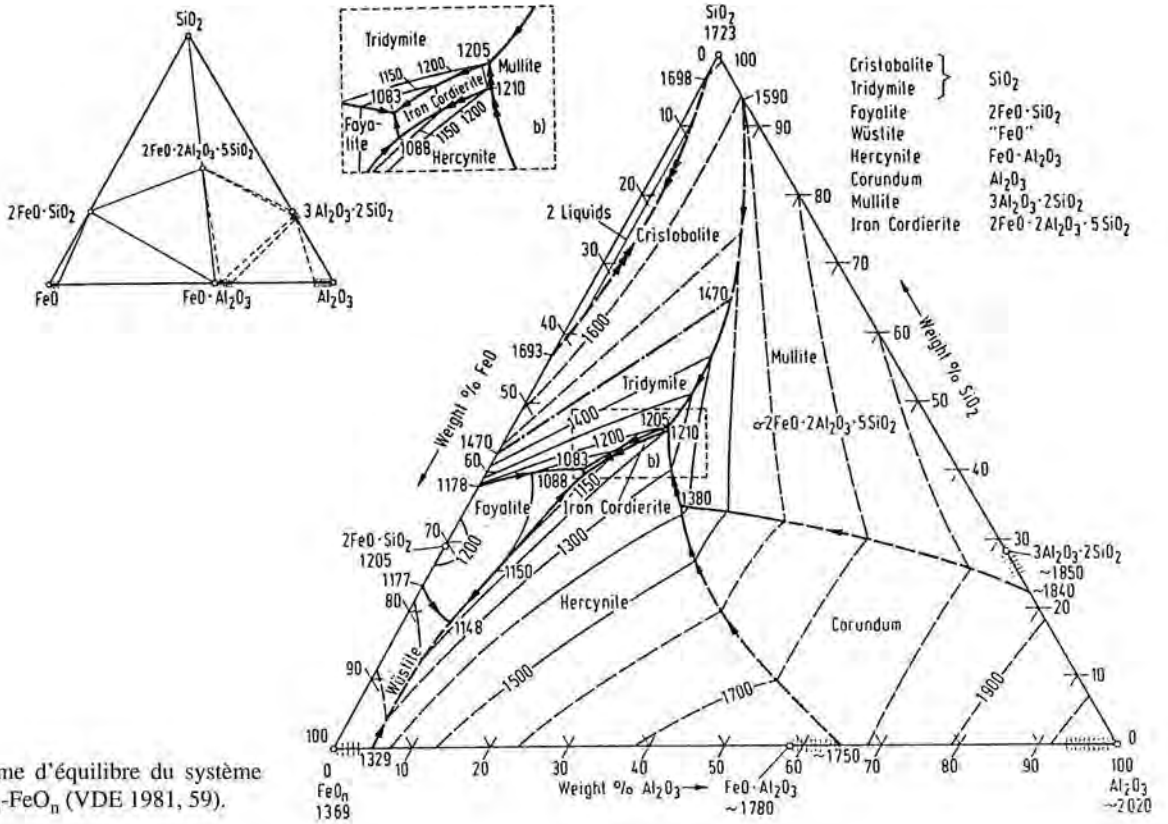


Fig. 4 A. Diagramme d'équilibre du système ternaire SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-FeO<sub>n</sub> (VDE 1981, 59).

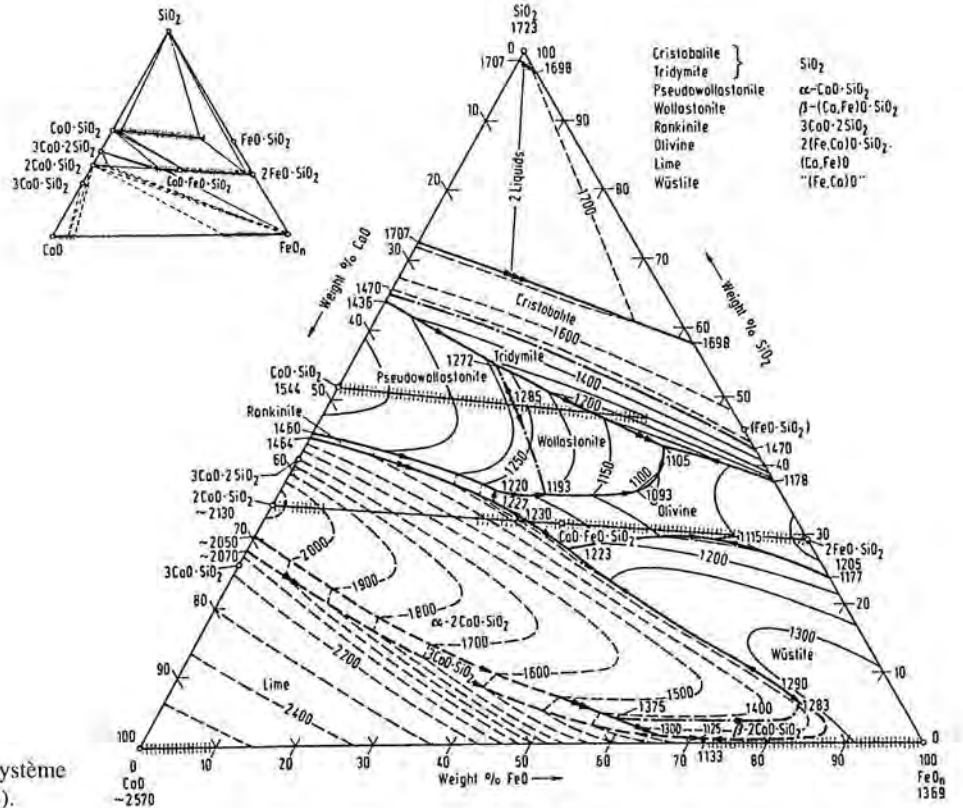


Fig. 4 B. Diagramme d'équilibre du système ternaire SiO<sub>2</sub>-FeO<sub>n</sub>-CaO (VDE 1981, 68).

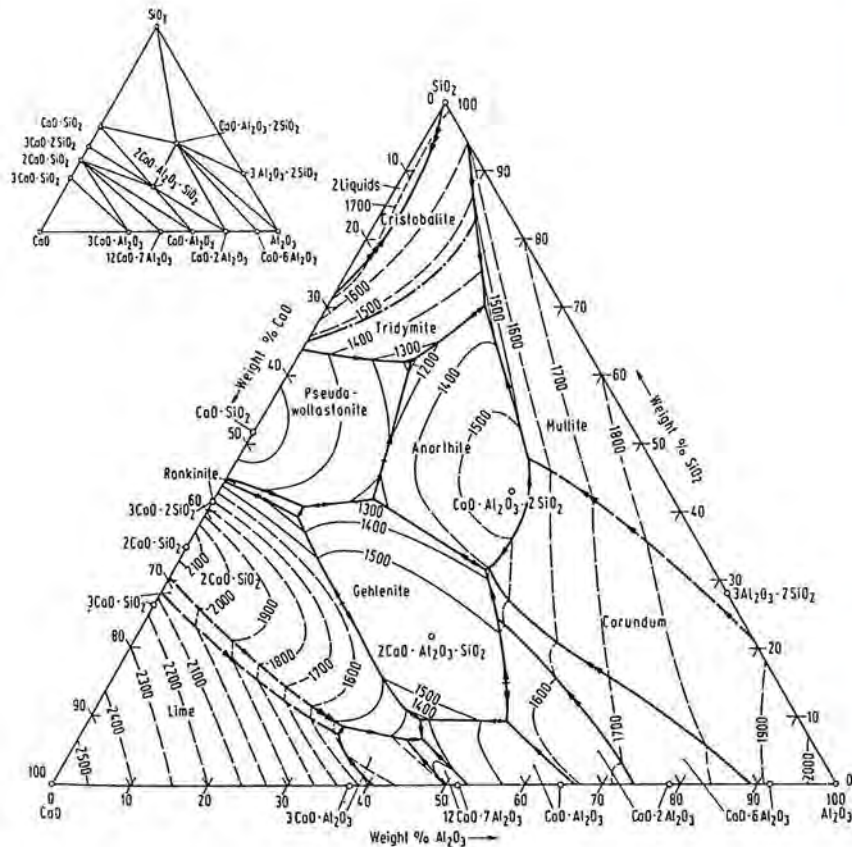


Fig. 4 C. Diagramme d'équilibre du système ternaire SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO (VDE 1981, 57).

France; Leroy *et al.* 1990; utilisation de la Minette). De tels cas sont encore très mal connus en Suisse (utilisation des oolithes ferrugineuses du Dogger). Il est fréquent que le Mn soit abondant dans les scories de réduction anciennes (par exemple à Engsbach, Siegerland, Allemagne; Gilles 1936, 258). La présence de cet élément modifie probablement les équilibres chimiques. En Suisse, le Sidérolithique est parfois riche en Mn (jusqu'à 20% MnO).

Les laitiers de hauts fourneaux se distinguent des scories anciennes par des teneurs en fer nettement plus faibles et en calcium nettement plus élevées. C'est toujours le cas des produits modernes (Obenauer 1954, 253; VDE 1981, 104). Les laitiers plus anciens pouvaient encore contenir 10-15% de fer (hauts fourneaux au charbon de bois; Tylecote 1976, 82). Le MgO est un constituant essentiel des résidus de la métallurgie moderne (utilisation de fondant magnésien). En général, donc, les laitiers sont assez différents des scories de réduction anciennes et sont mieux représentés dans le système chimique SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO.

D'autres résidus de la métallurgie moderne, comme ceux de l'affinage de la fonte, présentent des compositions proches des scories de réduction directe (Tylecote 1976, 88-9). Bien d'autres produits variés (scories de forge au charbon de bois, d'affinage du cuivre, de la fabrication de l'acier, etc.) peuvent prêter à confusion. Enfin, il faut souligner les difficultés qu'il y a pour distinguer, du point de vue chimique, les scories de réduction anciennes et les scories anciennes formées lors des étapes de travail postérieures à la réduction (forge, raffinage).

Généralement, l'analyse chimique seule ne permet pas une interprétation univoque.

Le système quaternaire SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO-FeO<sub>n</sub> est une approximation satisfaisante de la composition chimique de la plupart des scories. Il y a cependant un certain nombre d'exceptions (scories riches en Mn, etc.). De plus, l'influence des faibles concentrations des autres éléments est totalement négligée sans qu'il soit démontré qu'elle soit effectivement négligeable.

Les relations à l'équilibre dans le système quaternaire SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO-FeO<sub>n</sub> ne sont qu'incomplètement connues, ce qui limite les interprétations pour toutes les compositions dont les projections sont éloignées des sous-systèmes étudiés de manière expérimentale. Par ailleurs, dans bien des cas, les scories n'atteignent pas l'équilibre et il est très difficile d'extrapoler les relations dans ces conditions. Enfin, certains facteurs sont complètement négligés, en particulier, le degré d'oxydation du fer ainsi que la nature et la concentration des gaz dissous.

Le diagramme d'équilibre du système SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO-FeO<sub>n</sub> indique néanmoins les compositions chimiques les plus fusibles (fig. 5). Le minimum théorique se trouve à 1083°C. Il faut souligner toutefois que le diagramme représente des équilibres de cristallisation (refroidissement) et non des équilibres de fusion (réchauffement). Dans ce cas, la structure physique du corps solide et le temps de réaction jouent des rôles considérables. Il faut se souvenir que les scories étudiées sont le résultat d'un cycle chauffage-séparation-refroidissement.

dissement et que chaque étape peut avoir une influence sur la composition finale.

A la fin de l'opération de réduction, une partie du fer contenu dans le minerai est soustraite au système. Quelques éléments sont également réduits et passent dans la phase métallique (Ni, Co, Cu, etc.). Par contre, les autres éléments et le reste du fer, forment la scorie (Si, Al, Ca, K, etc.). Dans celle-ci, les proportions entre ces éléments chimiques non réduits ne sont pas modifiées par l'opération elle-même. A priori donc, les rapports entre les principaux constituants, en particulier  $\text{SiO}_2$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , restent constants. Les scories résultant de la réduction d'un même minerai devraient se projeter sur une droite partant du pôle  $\text{FeO}_n$  et passant par la projection de la composition chimique du minerai dans ce système (rapport  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  constant; fig. 6). Dans le cas contraire, il faudra trouver une explication à ce comportement anormal (minerai non représentatif, ajout volontaire, contamination due à la fusion de la paroi, etc.).

De plus, le long de cette droite, la distance entre la projection de l'analyse du minerai et celle de la scorie est proportionnelle à la quantité de fer soustraite au système, c'est-à-dire de la quantité de fer produite. Dans ce système chimique, le minerai doit forcément être plus proche du pôle  $\text{FeO}_n$  que les scories. Par contre, en présence d'une quantité significative de calcium, cette relation n'est pas forcément vraie puisque le calcium peut remplacer le fer dans les silicates formés (pp. 25-29) et n'est pas pris en compte lors de la projection.

On observe généralement que les scories issues de la réduction d'un même minerai présentent des teneurs en fer

très variables, pouvant aller du simple au double. Ces variations peuvent souvent être mises en relation avec des variations de l'aspect de la scorie. Dans quelques cas, on peut démontrer que les scories de compositions différentes ne se sont pas formées dans les mêmes conditions (distance par rapport à la paroi, position par rapport au dispositif de soufflerie, etc.). Il n'est donc pas facile de calculer une teneur en fer moyenne pour un groupe de scories données. Cette moyenne doit être pondérée en fonction de l'abondance des différents types de scorie sur le site si on veut l'utiliser de manière correcte pour calculer la quantité de fer produite.

### Calcul de production

L'étude des vestiges de l'atelier de réduction de Boécourt, Les Boulies JU a permis de développer une approche originale basée sur les analyses chimiques (Eschenlohr et Serneels 1991, 99-106; Serneels sous presse 1). Il s'agit de faire le bilan chimique entre la charge et les produits (fer et scories). Elle a pour but de calculer la production de fer en comparant les analyses de minerais et de scories. Accessoirement, elle permet de mettre en évidence des contaminations de la charge par les parois du fourneau, des ajouts volontaires éventuels et la contribution en sels minéraux de la cendre de charbon de bois.

Si l'on cherche à décrire l'opération de réduction du minerai de fer du point de vue chimique, on peut proposer un modèle théorique simple. Il repose sur l'idée que l'ensemble du stock d'éléments chimiques contenus dans le minerai se scinde en deux composants, le fer et la scorie. Mis à part les

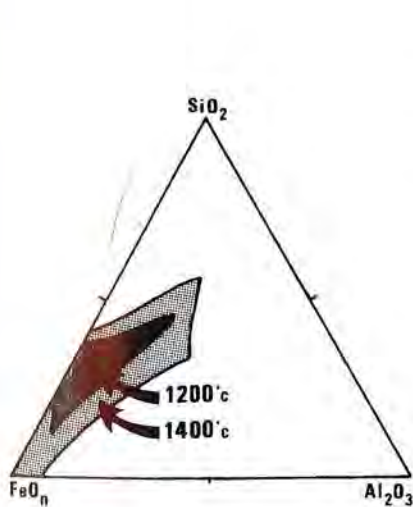


Fig. 5. Système  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-FeO}_n$ : compositions chimiques fusibles à  $1200^\circ\text{C}$  (sombre) et  $1400^\circ\text{C}$  (clair).

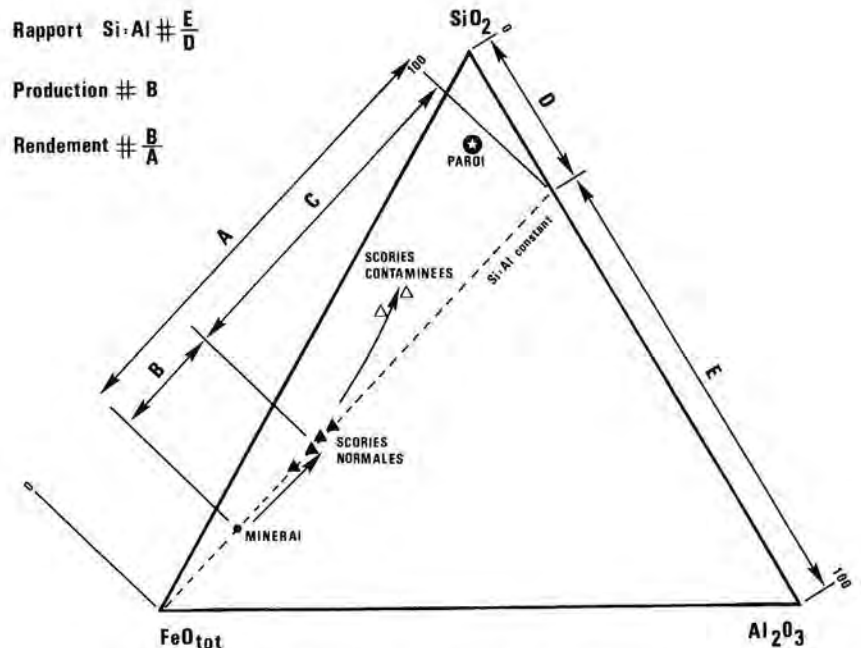


Fig. 6. Principales relations entre la composition chimique d'un minerai et d'une scorie de réduction dans le système  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-FeO}_n$ .

éléments volatils qui sont évacués sous forme de gaz, tous les constituants de la matière première devraient se retrouver dans le produit et les résidus.

Connaissant la composition du minerai et celle de la scorie, il est possible, selon ce modèle, de calculer simplement la quantité de fer produite selon l'équation suivante:

$$\text{Minerai} = \text{Scorie} + \text{Fer}$$

En considérant les trois éléments principaux et en prenant pour unité 100 gr de scorie, on peut écrire le système d'équations suivant:

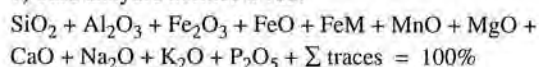
$$\begin{aligned} M \text{ gr Si}/100 \text{ gr minerai} &= \text{gr Si}/100 \text{ gr scorie} \\ M \text{ gr Al}/100 \text{ gr minerai} &= \text{gr Al}/100 \text{ gr scorie} \\ M \text{ gr Fe}/100 \text{ gr minerai} &= \text{gr Fe}/100 \text{ gr scorie} + F \text{ gr Fe} \\ \text{avec } M \text{ constant et } > 1 \end{aligned}$$

Pour tenter de résoudre ce système, on travaille avec des moyennes arithmétiques des concentrations. Cette démarche n'est possible que si cette moyenne a un sens (nombre d'analyses suffisant, cohérence du groupe). Le choix des échantillons retenus dans le calcul de la moyenne peut avoir une influence non négligeable sur le résultat.

De manière à s'affranchir du calcul des produits gazeux, on calcule les concentrations en base anhydre normées à 100 pour les minerais et pour les scories. Enfin, les poids d'oxydes sont recalculés en poids d'éléments pour 100 gr d'échantillon.

#### Mode de calcul:

1) base anhydre normée à 100:



2) % poids éléments:

$$\frac{\% \text{ poids oxyde} \times \text{poids atomique}}{\text{poids moléculaire}}$$

Cette manière de procéder permet de s'affranchir des éléments volatils, beaucoup plus abondants dans les minerais que dans les scories, de même que des problèmes liés aux différents états d'oxydation de certains éléments, en particulier du fer.

En principe, connaissant le contenu en Si, Al et Fe de 100 gr de scorie et de 100 gr de minerai, il est possible de calculer M avec les deux premières équations et ensuite F, dans la troisième. Mais il n'y a pas toujours de solution à ce système. En effet, pour trouver M constant, il faut que le rapport Si:Al soit le même dans le minerai et dans les scories.

En pratique, ce n'est généralement pas le cas. D'autres facteurs, au cours de la réduction, modifient le rapport Si:Al. Le plus évident est la contamination de la charge par la fusion partielle de la paroi du fourneau. Comme le démontrent les pièces archéologiques, celle-ci participe à la réaction. Les reconstitutions expérimentales confirment cette

constatation (Andrieux 1990, 107-113). Les parois des fourneaux fondent effectivement au cours des opérations de réduction expérimentales.

Cet apport de la paroi, modifie la relation de base qui devient:

$$\text{Minerai} + \text{Paroi} = \text{Scorie} + \text{Fer}$$

Le système s'écrit alors de la manière suivante:

$$\begin{aligned} M \text{ gr Si}/100 \text{ gr minerai} + P \text{ gr Si}/100 \text{ gr paroi} &= \text{gr Si}/100 \text{ gr scorie} \\ M \text{ gr Al}/100 \text{ gr minerai} + P \text{ gr Al}/100 \text{ gr paroi} &= \text{gr Al}/100 \text{ gr scorie} \\ M \text{ gr Fe}/100 \text{ gr minerai} + P \text{ gr Fe}/100 \text{ gr paroi} &= \text{gr Fe}/100 \text{ gr scorie} + F \text{ gr Fe} \\ \text{avec } M \text{ et } P \text{ constants} \end{aligned}$$

M est la quantité de minerai nécessaire pour fabriquer 100 gr de scorie et P la quantité de paroi qu'il faut ajouter pour cela. F est la quantité de fer produite par cette opération. L'inégalité de poids apparente entre les deux termes des équations est due à la perte d'oxygène dans les produits solides lors de la réduction des oxydes.

La paroi n'est pas le seul vecteur possible d'une contamination. La cendre de charbon de bois intervient également toujours dans le bilan chimique. Celle-ci représente généralement de 2 à 3% du poids du charbon. Sa nature ne peut guère être précisée a priori et les données de la bibliographie sont encore très insuffisantes. Certains sels minéraux sont nécessaires à la croissance du bois: CaO, MgO, K<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, etc. Ils sont systématiquement présents mais en proportions très variables (Gilles 1958, Lessing 1926). SiO<sub>2</sub> ne sera pas toujours présent mais, dans certaines essences végétales, il peut jouer un rôle important (Tylecote 1990, 224). L'apport du charbon de bois peut être très surprenant (contamination en éléments traces).

Les teneurs en CaO et en K<sub>2</sub>O des scories reflètent généralement ce phénomène. Elles sont nettement plus élevées dans les scories que le calcul ne le laisse prévoir. Il est toutefois peu crédible de calculer la quantité de charbon utilisée sur la base de l'apport de la cendre.

Enfin, les artisans ont pu volontairement ajouter diverses substances à la charge, ce qui aboutit à en modifier la composition chimique. En métallurgie moderne, on ajoute ainsi à la charge différentes substances de manière, soit à abaisser le point de fusion de la charge, soit à améliorer le rendement de l'opération (fondant). De tels usages sont décrits dès le XVI<sup>e</sup> siècle (Agricola 1556, livre IX). Pour les périodes plus anciennes, les études sont insuffisantes. L'origine de cette pratique demeure très mal connue. Elle semble liée à l'émergence du haut fourneau (XIII<sup>e</sup>-XIV<sup>e</sup> siècles).

En général, c'est du calcium qui est rajouté, sous forme de calcaire concassé (castine). En fonction de la nature du minerai, il pourra être souhaitable de lui rajouter de la silice (sable) ou plus rarement de l'alumine (argile).

L'utilisation de végétaux verts peut également avoir une influence. Les parties vivantes des végétaux, feuilles, écorces, tiges, sont en général plus riches en sels minéraux que le bois lui-même (jusqu'à 10%). Dans ce cas, l'apport peut devenir important mais sa nature est difficile à préciser (silice, chaux, potasse, etc.).

Enfin, la sidérurgie se rapprochant parfois assez de la magie, diverses «poudres de perlinpinpin» qui n'ont pas forcément une influence sur le processus métallurgique, peuvent avoir été utilisées pour des raisons essentiellement culturelles.

## Minéralogie

En fonction du type de liaisons qui existent entre les atomes ou les molécules, la matière peut se trouver dans des états d'agrégation différents (gaz, liquide, solide). Ces liaisons sont fortement influencées par les conditions physiques du milieu (pression, température) et chaque état possède un domaine de conditions physico-chimiques propre de stabilité.

Les corps solides se caractérisent par leur résistance aux actions mécaniques. Parmi ces corps, on distingue deux grands types d'organisation de la matière. Dans les solides cristallins, les atomes sont disposés de manière ordonnée dans l'espace selon un réseau (ordre à longue distance; minéraux). Dans les matériaux amorphes, cet ordre, quand il existe, n'est réalisé qu'à courte distance (verres; Zarzycki 1982).

Les minéraux sont des solides cristallins généralement convexes dont la structure cristalline et la composition chimique sont définies. On connaît plusieurs milliers de minéraux (Hurlbut et Klein 1977). Ce sont des constituants essentiels de la plus grande partie des matériaux solides non organiques (roches et matériaux synthétiques).

Les roches et les matériaux synthétiques ne se caractérisent pas seulement par leurs compositions chimique et minéralogique, mais aussi par leur mode de formation. Pour les identifier, il faut donc également connaître la disposition des minéraux à l'échelle microscopique et la position du corps dans son contexte (échelle centimétrique, métrique, etc.).

L'étude des scories, qui peuvent être considérées comme des roches artificielles, doit tenir compte en même temps de tous ces aspects: chimiques, minéralogiques, texturaux et structuraux.

### Déterminations minéralogiques

Les observations au *microscope pétrographique* (lames minces classiques et lames minces polies) permettent d'identifier certaines phases minérales, en particulier les silicates, et de décrire leurs abondances relatives (estimation de la composition modale). Elles permettent surtout de connaître la texture microscopique des scories qui informe sur la dynamique de la cristallisation. En particulier, par l'observation

microscopique on peut distinguer les reliques non fondues et les inclusions (minéral, éléments de paroi, décapant, battitures, etc.).

Les lames minces étudiées dans le cadre de ce travail ont été réalisées dans l'atelier de préparation de la Section des sciences de la Terre de l'Université de Lausanne par R. Ansermoz et L. Nicod.

Les spectres de *diffraction des rayons x* indiquent les principales phases minérales présentes. Dans certains cas, ils aident à distinguer les membres d'une même solution solide (mélange intime de deux pôles purs au sein d'un même cristal). Ils apportent aussi des informations sur l'état général de l'échantillon (rapport phase amorphe / phases cristallisées).

Les mesures ont été effectuées au Laboratoire de rayons x de la Section des sciences de la Terre de l'Université de Lausanne (P. Thélin, responsable du laboratoire et L. Dufresne, 1<sup>re</sup> laborantine). Telle qu'elle a été utilisée, c'est une méthode qui reste essentiellement qualitative (Annexe 1). Elle reste un complément fort utile pour la détermination des minéraux opaques en lame mince.

Les *analyses chimiques ponctuelles* permettent d'identifier de manière précise les constituants et d'observer des variations de composition (Annexe 1). Quelques analyses ont été faites dans le cadre de ce travail à l'aide de la microsonde électronique du Laboratoire de microanalyse électronique de la Section des sciences de la Terre de l'Université de Lausanne (J. Hernandez, professeur responsable du laboratoire et F. Bussy, 1<sup>er</sup> assistant responsable). La microsonde n'a été mise en fonction qu'au moment où ce travail touchait à sa fin. De plus, cette méthode est assez lourde à mettre en œuvre (préparation des échantillons, problème de standards, etc.). Il n'a donc pas été possible d'en tirer tous les avantages, tant du point de vue du nombre d'échantillons étudiés que de l'interprétation des résultats.

L'étude des phases métalliques fait appel aux *méthodes métallographiques* (Schumann 1960, Smith 1988). Il est évident que les particules métalliques présentes dans les scories renferment de précieuses informations sur les conditions dans lesquelles elles se sont formées et éventuellement sur la nature du produit de l'opération métallurgique. Les objets en métal eux-mêmes sont aussi porteurs d'informations concernant leur histoire (techniques de fabrication, traces d'utilisation, etc.).

Dans le cadre de ce travail, il n'a malheureusement pas été possible de mettre en œuvre ces méthodes. Les nombreux travaux publiés démontrent tout l'intérêt de cette approche.

La nature des gaz présents dans les scories est quasiment inconnue, mais leur présence est manifeste, compte tenu de la quantité de bulles que renferment ces matériaux. Apporter des précisions sur ce point permettrait certainement de mieux comprendre les processus métallurgiques anciens. Cela pourrait se faire par l'*étude des inclusions fluides* dans les scories (Roedder 1984). Cette voie de recherche reste à explorer.

C'est sans doute elle qui permettrait de connaître réellement les conditions physico-chimiques qui règnent pendant la réduction.

Le comportement des scories au cours d'un *traitement thermique* est très intéressant. Il donne des informations sur le point de fusion et la viscosité. Des études de ce genre ont parfois été réalisées sur des scories anciennes et les métallurgistes étudient le comportement rhéologique des scories modernes (VDE 1981, 187-226). Le point de fusion est cependant largement influencé par la nature des gaz présents pendant l'expérience. Il n'est donc pas évident de transcrire en terme de températures de fonctionnement du fourneau, les mesures du point de fusion des produits solides.

D'autres méthodes d'analyse et d'autres approches de ces matériaux sont possibles et mériteraient d'être explorées dans le futur (*cathodoluminescence*, etc.).

Pour finir, il faut accorder une grande importance à la *description macroscopique* des échantillons. Elle est primordiale pour la compréhension des données fournies par les autres approches. La forme générale et les différents détails morphologiques d'une scorie permettent de comprendre la position dans laquelle elle s'est refroidie et dans une certaine mesure, les conditions de ce refroidissement.

C'est seulement à travers l'étude morphologique des scories et celle des vestiges archéologiques des ateliers (foyers, fourneaux, aires de travail) que l'on peut comprendre la dynamique des opérations métallurgiques.

Les scories sont des corps solides qui contiennent généralement des minéraux et une phase vitreuse. Les différents minéraux présents peuvent être soit des reliques non fondues (fragments de paroi ou de minerai), soit des produits de la cristallisation de la scorie, soit des produits d'altération secondaire.

Les minéraux que l'on peut trouver dans les scories sont très variés. Parmi les scories métallurgiques, les scories de fer sont celles qui présentent les compositions minéralogiques les moins complexes (Faber 1954; Obenauer 1954; Bachmann 1982; Schnorrer-Köhler 1987; Sperl 1980, fig. 6-39).

### Le fer métallique et ses alliages

Les atomes de fer peuvent se combiner entre eux pour former des solides métalliques (fig. 7). A moins de 910°C, la structure cristalline possède un réseau cubique centré.

Dans ce cas, les atomes de fer occupent les sommets et le centre d'un cube (fer alpha). Entre 910 et 1392°C, les atomes sont disposés suivant un réseau cubique faces centrées (aux sommets du cube et aux centres des faces, fer gamma). De 1392 à 1536°C, on retrouve un réseau cubique centré (fer delta).

Le principal élément d'alliage du fer est le carbone. Le système Fe-C permet une approche des principaux constituants qui se forment dans un état d'équilibre. Il existe divers constituants hors d'équilibre (fig. 8 et 9; Keyser 1959, 186-202; Scott 1991, 9-21). Le carbone peut entrer de manière

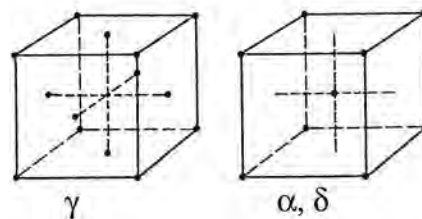


Fig. 7. Assemblages cubique faces centrées (fer gamma) et cubique centré (fer alpha et delta).

interstitielle dans le réseau cristallin du fer (solution solide interstitielle). Les atomes de carbone sont alors disposés entre les atomes de fer qui occupent leur place normale dans le réseau. Dans le fer alpha, cette solution est très peu développée (ferrite, max. 0,03% C). A plus haute température, dans le fer gamma, elle plus étendue (austénite, max. 2,05% C à 1146°C).

Le fer et le carbone peuvent également apparaître en combinaison dans la cémentite,  $Fe_3C$  (6,67% C). Des grains de cémentite peuvent être présents dans une pièce métallique. La perlite est un agrégat eutectoïde de cémentite et de ferrite (cristallisation symplectique des deux constituants). Lorsqu'il y a un excès de carbone encore plus grand, on voit apparaître des grains de graphite (C).

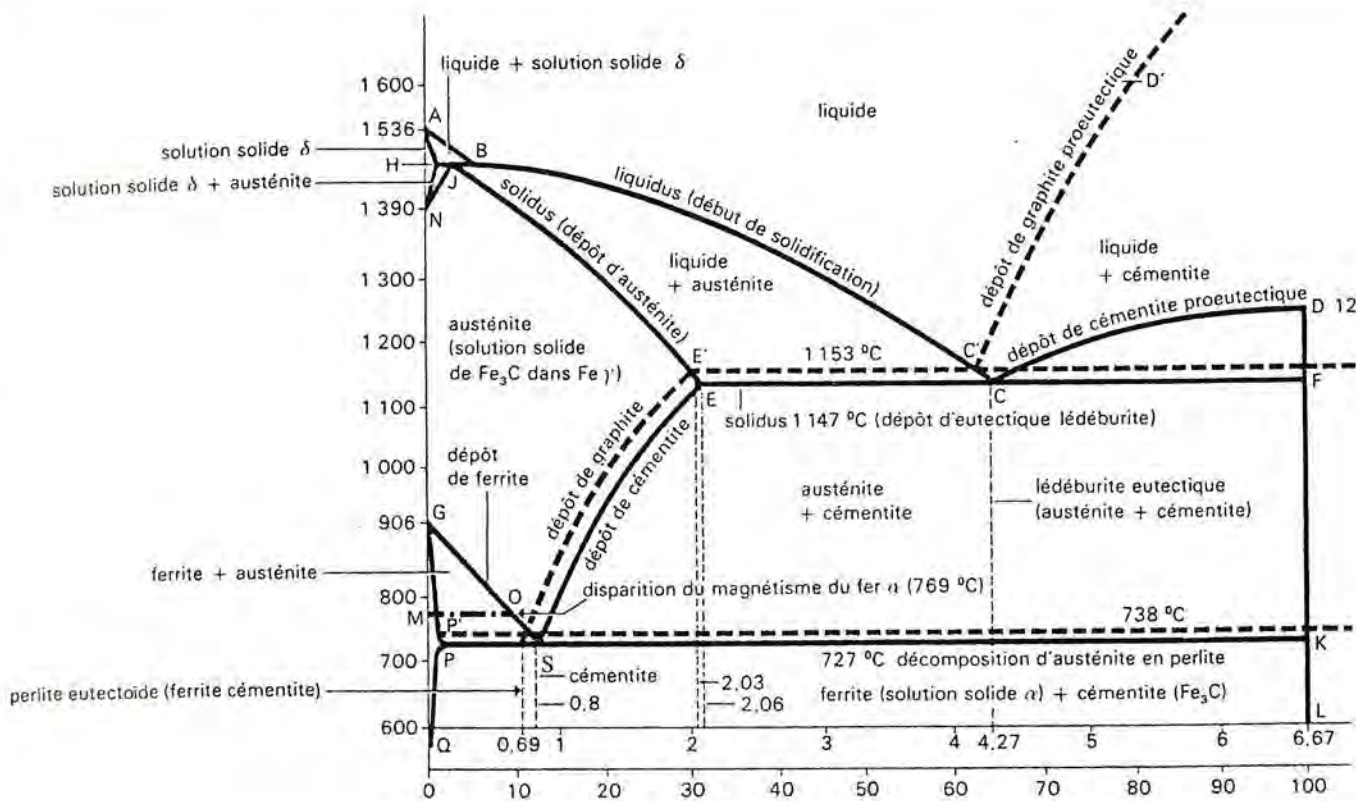
Dans le système Fe-C, des constituants métastables peuvent se former lorsque les conditions de refroidissement ne permettent pas d'atteindre l'équilibre (troostite, bainite et martensite; Keyser 1959, 202-15).

On considère que le fer est pur lorsqu'il contient moins de 0,02% de carbone. De 0,02 à 1,7 %, l'alliage est un acier. Au-delà et jusqu'à 6,67 %, on parle de fonte.

Le point de fusion du fer pur est assez élevé (1536°C). Lorsque la proportion de carbone dans l'alliage augmente, le point de fusion baisse considérablement. Au point eutectique (2,05% C), il n'est plus que de 1146°C. C'est la température minimale de fusion d'un alliage de fer et de carbone. Elle est très voisine des températures de fusion des scories (p. 17).

D'autres éléments d'alliage peuvent se combiner avec le fer, en particulier, Cr, Mn et Ni. Leur présence peut modifier profondément les propriétés physiques du produit. Les aciers alliés modernes utilisent ces possibilités. En ce qui concerne les métaux anciens, il est difficile d'établir que les alliages ont été fabriqués intentionnellement et que l'on a cherché à profiter de ces qualités spécifiques.

Dans les scories, on observe fréquemment des phases métalliques en petites quantités (gouttelettes, billes, nodules, filaments, etc.). Les formes à tendance sphérique indiquent probablement que le métal est passé par l'état liquide. Cela ne donne aucune information précise sur la température de la scorie puisque le point de fusion du fer dépend essentiellement de la quantité de carbone en solution. Les autres morphologies ne renseignent guère. La présence de métal ayant



- A : Point de fusion du fer pur
- S : Point eutectoïde
- C, C' : Point eutectique
- diagramme métastable (cas général des aciers)
- - - équilibre stable (cas général des fontes - formation de graphite); dans chacune des zones d'équilibre des phases, la phase cémentite est remplacée par la phase graphite

Fig. 8. Diagramme d'équilibre partiel du système fer-carbone.

**Fer pur:** Métal gris bleuâtre, malléable, ductile, très tenace; poli, il possède beaucoup d'éclat. Son point de fusion est très élevé (1536°C) mais il se ramollit à des températures bien moindres. Il se laisse travailler et souder à lui-même facilement. Il est magnétique et s'oxyde facilement (rouille). Il cristallise avec des structures différentes en fonction de la température (alpha <910°C, gamma <1392°C, delta <1536°C).

**Ferrite:** Fer alpha contenant du carbone en solution solide (<0,02% C).

**Austénite:** Fer gamma contenant du carbone en solution solide (<2% C).

**Acier:** Alliage de fer et de carbone (0,02 à 1,7% C). Il se laisse travailler et souder plus difficilement que le fer pur mais acquiert, par refroidissement brusque (trempe), une dureté bien supérieure.

**Acier hypoeutectoïde:** Acier composé d'un mélange de grains de ferrite et de perlite (0,02-0,85% C).

**Acier eutectoïde:** Acier composé de grains de perlite (0,85% C).

**Acier hypereutectoïde:** Acier composé d'un mélange de grains de perlite et de cémentite (0,85-1,7% C).

**Perlite:** Structure en agrégat eutectoïde de ferrite et de cémentite.

**Cémentite:** Carbure de fer Fe<sub>3</sub>C (6,67% C).

**Troostite:** Constituant hors d'équilibre de l'acier refroidi à vitesse moyenne.

**Bainite:** Constituant hors d'équilibre de l'acier refroidi à vitesse rapide; agrégat de grains de ferrite et de cémentite en aiguilles plus ou moins ramifiées.

**Martensite:** Constituant hors d'équilibre de l'acier refroidi à vitesse très rapide (trempe).

**Fonte:** Alliage de fer et de carbone laissant toujours apparaître de la cémentite (1,7-6,67% C). C'est un matériau très dur, très cassant, impossible à souder et à marteler. Son point de fusion est bas (min. 1146°C). La fonte convient au moulage.

**Fonte hypoeutectique:** Fonte contenant de 1,7 à 4,3% C.

**Fonte hypereutectique:** Fonte contenant de 4,3 à 6,67% C.

**Graphite:** Minéral, carbone natif C.

Fig. 9. Tableau récapitulatif des principaux constituants présents dans les métaux ferreux.

subi une fusion dans la scorie ne permet pas non plus d'affirmer que l'ensemble du métal produit a subi le même sort.

### Les oxydes de fer et les spinelles

Le fer a une forte tendance à former des combinaisons avec l'oxygène et il existe toute une gamme de composés de la famille des oxydes. A chacun d'entre eux correspond un domaine de stabilité propre (fig. 10). Le fer se trouve sous forme d'ions  $Fe^{2+}$  ou  $Fe^{3+}$  en liaison avec des anions  $O^{2-}$ .

Au contact avec l'air, se formeront des combinaisons riches en oxygène:  $Fe_2O_3$  (hématite),  $FeOOH$  (goethite), etc. Dans des conditions plus fortement réductrices où l'oxygène est rare, par exemple en présence de monoxyde de carbone CO, apparaîtront les phases pauvres en oxygène telles que  $FeO$  (wüstite) et  $Fe_3O_4$  (magnétite).

#### La wüstite

La wüstite possède une structure où les ions  $O^{2-}$  forment un réseau cubique à faces centrées. Les ions  $Fe^{2+}$  occupent les lacunes octaédriques (fig. 11). Elle serait très simple mais cet oxyde est toujours non stoechiométrique. Des ions  $Fe^{3+}$  remplacent certains  $Fe^{2+}$  et des lacunes compensent l'excès de charge positive. La formule chimique doit donc s'écrire  $Fe_{1-x}O$  (Waychunas 1991, 22-3; Lindsley 1991, 72-5). La wüstite est instable au-dessous de  $570^\circ C$ . Le point de fusion

se situe à  $1424^\circ C$ . Il existe des solutions solides avec  $MgO$ ,  $MnO$  et  $NiO$ .

La wüstite est un minéral rare dans les roches de la croûte terrestre. Elle est par contre décrite dans toutes sortes de scories métallurgiques. Elle est toutefois rare lorsque la concentration en alumine est élevée. Sa présence exprime une sursaturation en oxyde de fer.

Peu de propriétés peuvent être étudiées au microscope pétrographique. Les cristaux sont en général dendritiques. Les spectres de diffraction des rayons x permettent une iden-

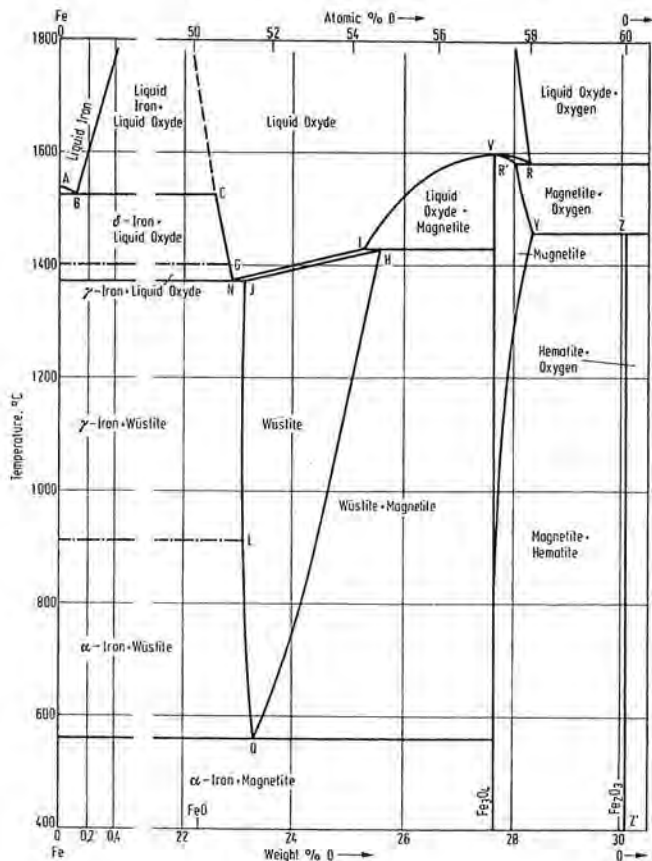


Fig. 10. Diagramme d'équilibre partiel fer-oxygène. VDE 1981, 41.

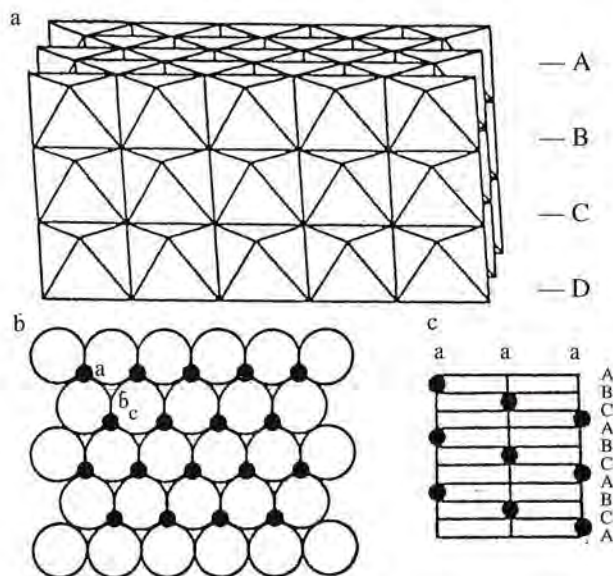


Fig. 11. Structure de type NaCl (wüstite,  $Fe_{1-x}O$ ).  
 a) Lacunes octaédriques (cubique faces centrées).  
 b) Cations  $Fe^{2+}$  (noirs) et des anions  $O^{2-}$  (blancs) dans une couche octaédrique.  
 c) Cations dans des couches octaédriques superposées.

tification sommaire. Les mesures à la microsonde sont peu satisfaisantes en raison du caractère non stoechiométrique de ce minéral.

#### L'hématite

La structure de l'hématite consiste en couche d'ions  $O^{2-}$  disposés en assemblage hexagonal compact déformé alternant avec des couches de cations  $Fe^{3+}$  occupant 2/3 des lacunes octaédriques (Deer et al 1992, 540-2; fig. 12). La formule chimique est généralement proche de  $Fe_2O_3$ . Il existe une solution solide entre l'hématite et l'ilménite ( $FeTiO_3$ ).  $Al^{3+}$  peut également remplacer  $Fe^{3+}$  (jusqu'à 10% à  $1000^\circ C$ ). Des ions  $OH^-$  peuvent remplacer  $O^{2-}$  en particulier lors de la déshydratation de la goethite donnant de l'hydrohématite ou de la protohématite (Waychunas 1991, 23-4).

L'hématite est une forme stable à la surface et est un constituant essentiel de nombreux minerais de fer. Dans les scories de fer, elle peut apparaître dans les produits d'altération ou comme relique.

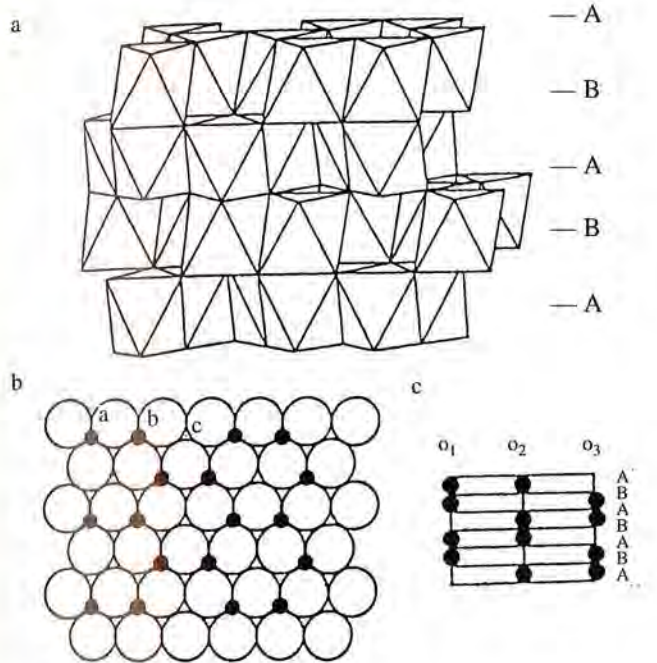


Fig. 12. Structure de l'hématite, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.  
 a) Lacunes octaédriques (hexagonal compact déformé).  
 b) Cations Fe<sup>3+</sup> (noirs) et des anions O<sup>2-</sup> (blancs) dans une couche octaédrique.  
 c) Cations dans des couches octaédriques superposées.

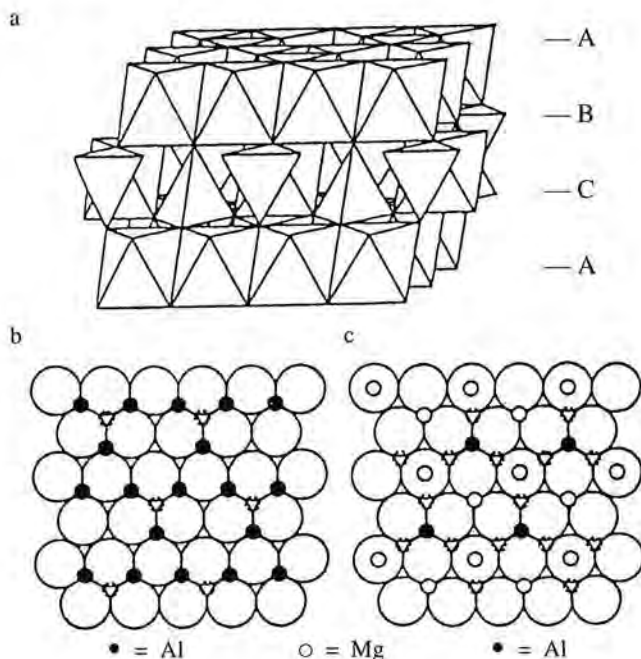


Fig. 13. Structure des spinelles (magnétite Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>).  
 a) Lacunes octaédriques et tétraédriques.  
 b) Cations Fe<sup>2+</sup> et Fe<sup>3+</sup> (noirs) et des anions O<sup>2-</sup> (blancs) dans une couche octaédrique.  
 c) Cations dans une couche mixte.

*La magnétite et les spinelles*

La magnétite est un minéral contenant à la fois du Fe<sup>2+</sup> et du Fe<sup>3+</sup>. Il fait partie de la famille des spinelles (Haggerty 1976, 101-13). La structure de cette famille est dérivée de l'assemblage cubique faces centrées avec occupation de 1/4 des sites tétraédriques (site A) et 1/2 des sites octaédriques (site B). Cette répartition se fait de manière ordonnée (couches d'octaèdres / couches de tétraèdres) de manière à conserver une symétrie cubique (fig. 13).

La formule chimique générale est AB<sub>2</sub>O<sub>4</sub>. De nombreux cations peuvent entrer dans cette structure ce qui permet un grand nombre de substitutions (fig. 14). Les pôles purs sont rares dans la nature. Les solutions solides entre la magnétite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) et l'ulvöspinel (Fe<sub>2</sub>TiO<sub>4</sub>) et la magnésioferrite (Fe<sub>2</sub>MgO<sub>4</sub>) sont continues.

La maghémite (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> gamma) possède une structure dérivée de celle de la magnétite dans laquelle un certain nombre de sites ne sont pas occupés. Ce minéral est métastable et semble se former soit par oxydation de la magnétite soit par chauffage de l'hématite. La solution solide magnétite-maghémite semble complète (Lindsley 1976, 18-31).

Un autre spinelle joue un rôle important dans les scories, c'est la hercynite (FeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>). Dans ce cas également, de nombreux remplacements sont possibles. La solution solide entre magnétite et hercynite n'existe qu'à haute température, mais en dessous de 858°C, on voit apparaître deux phases séparées (Turnock et Eugster 1962).

Il existe également un spinelle manganésifère (galaxite, MnAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>). Les données sur les remplacements dans ce minéral sont rares. Les remplacements Fe/Al; Fe/Mn pourraient fort bien être possibles (fig. 15. ). Enfin, le V et le Cr peuvent entrer dans la structure en remplaçant les cations trivalents Al et Fe<sup>3+</sup>.

<b>site A (coordinance 4) :</b>	<b>site B (coordinance 6) :</b>
2+: Fe, Mg, (Mn, Co, Cu, Zn, Ni)	3+: Fe, Al, (Cr, V)
3+: Fe	2+: Fe, Mg, (Mn)
4+: Ti	

Fig. 14. Répartition des différents cations dans les sites A et B de la structure des spinelles.

Les spinelles sont fréquents dans les roches et dans les scories. Les très nombreuses possibilités de remplacement ne sont, malheureusement, que rarement précisées. La magnétite est souvent décrite. La hercynite est un minéral typique des scories alumineuses (fig. 16). La maghémite se rencontre dans les minerais chauffés ou partiellement réduits.

Les spinelles riches en fer sont des minéraux généralement opaques et toujours isotropes en lame mince (fig. 17). La réflectance est beaucoup plus variable. Les analyses microsonde sont compliquées par la présence simultanée de Fe<sup>2+</sup> et Fe<sup>3+</sup> en proportion non prévisibles. Le rapport Fe<sup>2+</sup>:Fe<sup>3+</sup> est calculé (bilan de charges). Les spectres de diffraction des rayons x ne permettent pas d'identification très précise, souvent en raison d'un zonage.

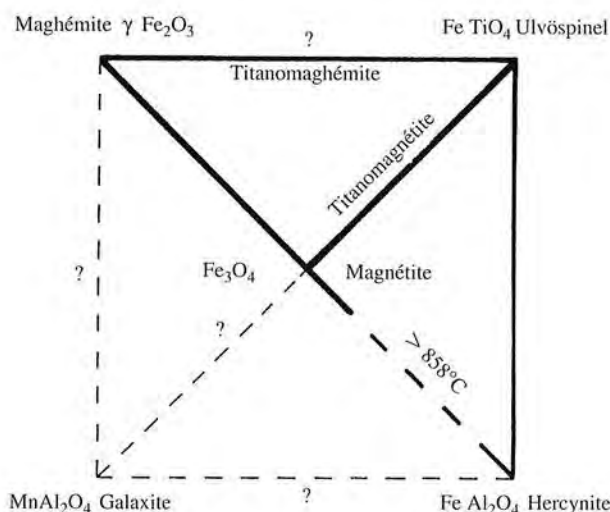


Fig. 15. Principales solutions solides dans les spinelles des scories. Trait gras: solution solide continue. Trait discontinu: solution solide possible.

### Les hydroxydes simples

Le fer forme également des hydroxydes dont la formule générale est  $FeOOH$ . On distingue les différents polymorphes en fonction de leur structure: goethite (= alpha), akaganeïte (= bêta), lépidocrocite (= gamma) et ferroxhyte (= delta) (Waychunas 1991, 33-8). Des composés amorphes de composition comparable existent également. Certains de ces produits contiennent des molécules d'eau supplémentaires incorporées à la structure en nombre variable. Compte tenu de ces particularités, ils sont très difficiles à étudier dans le détail.



Fig. 16. Hercynite (clair). Ech. MON 67. Image en électrons rétro-diffusés (BSE).

Par le terme de limonite on désigne souvent un mélange d'hématite, de goethite et de lépidocrocite cryptocristallines auxquelles sont adsorbées des molécules d'eau. La limonite est souvent intimement mélangée à de la silice colloïdale et à divers minéraux argileux (Deer *et al.* 1992, 582). S'il manque donc de précision, ce terme reste très utile pour décrire de nombreuses situations naturelles.

Les hydroxydes sont les produits typiques de l'altération superficielle en milieu humide de tous les minéraux contenant du fer. Ils se forment aussi par corrosion des métaux ferreux (rouille). Ils sont donc très fréquents et jouent un rôle prépondérant dans certains minerais superficiels (chapeau de fer). Dans les scories, ils se forment comme produits d'altération secondaire des oxydes et des particules métalliques. Les silicates, plus stables, s'altèrent moins vite. Dans une certaine mesure donc, leur présence donne une indication sur le contenu minéralogique initial de la scorie.

### Les silicates

#### Le groupe des olivines

Les olivines possèdent une structure orthorhombique dans laquelle les tétraèdres de silice ( $SiO_4^{4-}$ ) sont isolés les



Fig. 17. Spinelles (noir). Ech. MON 6. Lame mince vue en lumière transmise.

uns des autres. Les liaisons sont normalement assurées par des cations bivalents placés dans des lacunes octaédriques plus ou moins régulières. Les cations les plus fréquents sont  $\text{Fe}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  (olivines sensu stricto; Deer *et al.* 1982, 2-336). La structure autorise plusieurs autres remplacements qui déterminent les principaux membres de la famille (fig. 18). Les minéraux du groupe des olivines sont des constituants extrêmement fréquents des scories. Ce sont, bien entendu, les membres riches en fer qui y sont les plus abondants mais ils ont souvent des compositions complexes en raison des différentes possibilités de substitutions dans cette structure.

Macroscopiquement, les olivines sont des cristaux prismatiques assez trapus de couleur vert clair et à l'éclat vitreux. Dans les scories, ce sont généralement des cristaux aciculaires, grisâtres ou verdâtres avec un éclat parfois métallique.

La fayalite ( $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ) est le minéral typique des scories alors qu'elle est rare dans les roches naturelles. Il existe une solution solide continue avec la forstérite ( $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ ). Les olivines naturelles font généralement partie de cette solution avec une forte représentation des membres magnésiens. Les cations bivalents Ni et Co peuvent entrer dans la structure en remplacement isostructural du fer. Ce ne sont, en général, que des éléments mineurs mais ils peuvent être abondants dans certaines olivines forstéritiques (Deer *et al.* 1982, 9-10).

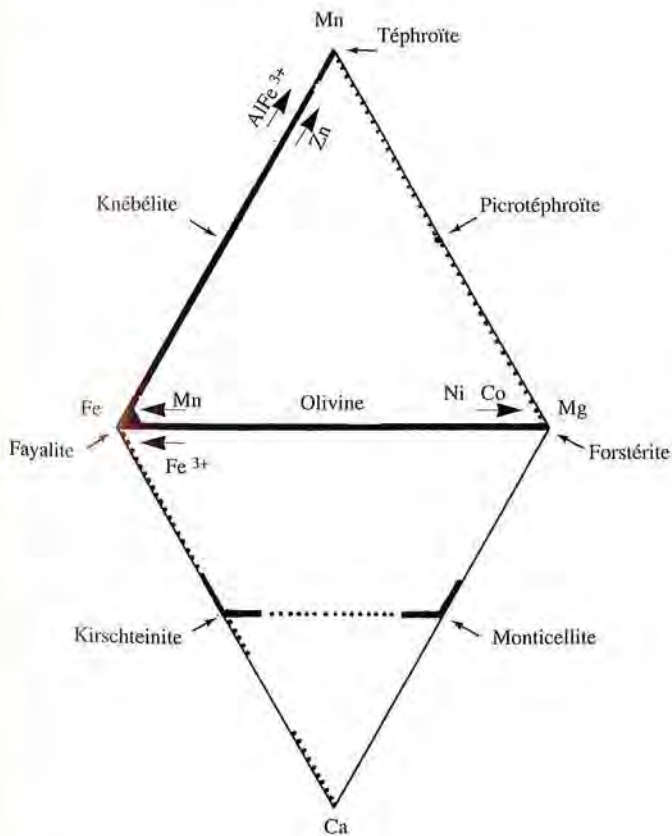


Fig. 18. Groupe des olivines: principales solutions solides.

Trait gras : solution solide continue.

Trait discontinu : solution solide probable, mal connue.

Il existe un pôle manganésifère (téphroïte,  $\text{Mn}_2\text{SiO}_4$ ) et une solution solide complète téphroïte-fayalite (Deer *et al.* 1982, 337-51). Il en existe probablement aussi une avec la forstérite mais elle est mal connue. Dans les termes riches en Mn, on peut trouver une certaine quantité de Zn (roeppeite).

Enfin, le Ca entre également dans la structure (Deer *et al.* 1982, 352-75). Les monticellites ( $\text{CaMgSiO}_4$ ) et les kirschsteinites ( $\text{CaFeSiO}_4$ ) naturelles sont généralement assez pures, mais il existe probablement une solution solide entre ces deux termes (Sahama et Hytönen 1958).

Les olivines purement calciques ( $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ) sont connues dans les laitiers de hauts fourneaux de même que des membres intermédiaires entre  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$  et  $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$  (Obenauer 1954, 485-6; Rigby 1953, 161-3). La série magnésienne est apparemment moins continue. Enfin, des intermédiaires entre les pôles calcique et manganésifère sont décrits (glaucochroïte; Glasser 1961).

Le  $\text{Fe}^{3+}$  peut également remplacer  $\text{Fe}^{2+}$ . L'excès de charge positive est contrebalancé par l'existence de sites vacants. Ce remplacement est plus fréquent et plus important dans les olivines fayalitiques et téphroïtiques. Dans la ferri-fayalite, les lacunes vides sont ordonnées, ce qui modifie légèrement la structure (Deer *et al.* 1982, 10-1).  $\text{Al}^{3+}$  n'est abondant que dans les termes les plus riches en Mn (Deer *et al.* 1992, 339).

Dans le système  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ - $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ , on constate que le point de fusion diminue considérablement avec croissance de la teneur en fer (Bowen et Schairer 1935).

La dynamique de la cristallisation des olivines magnésiennes dans les magmas a été étudiée (Donaldson 1974, 1976 et 1979). Il en ressort que la morphologie des grains peut être mise en relation à la fois avec la vitesse de refroidissement du magma et le degré de surfusion (différence entre la température théorique de solidification et la température réelle à laquelle le magma se fige; angl.: undercooling;  $\Delta T$ ).

Les formes équigranulaires pleines sont caractéristiques des conditions les plus proches de l'équilibre. Lorsque la vitesse de refroidissement ou le degré de surfusion augmente, on voit apparaître des formes incomplètes (formes de Hopper), puis allongées (en gerbe ou branchue; en chaîne) et enfin tabulaires (en treillis, en plaques). Lorsque les conditions sont extrêmes, les cristaux se forment en sphérules ou en plumes.

De telles observations ont été faites sur des roches naturelles et calibrées au laboratoire. Malheureusement, les deux facteurs, T et  $\Delta T$  influencent la morphologie et il est donc impossible de déduire une température sur la seule base des habitus observés. De plus, les études expérimentales n'ont porté que sur les compositions chimiques riches en Mg et non pas en Fe.

Dans les scories, on observe des habitus comparables mais pour les olivines ferrifères (fig. 19). Les observations faites dans le cadre de ce travail sont, autant qu'il soit possible d'en juger, en accord avec ces propositions de la biblio-

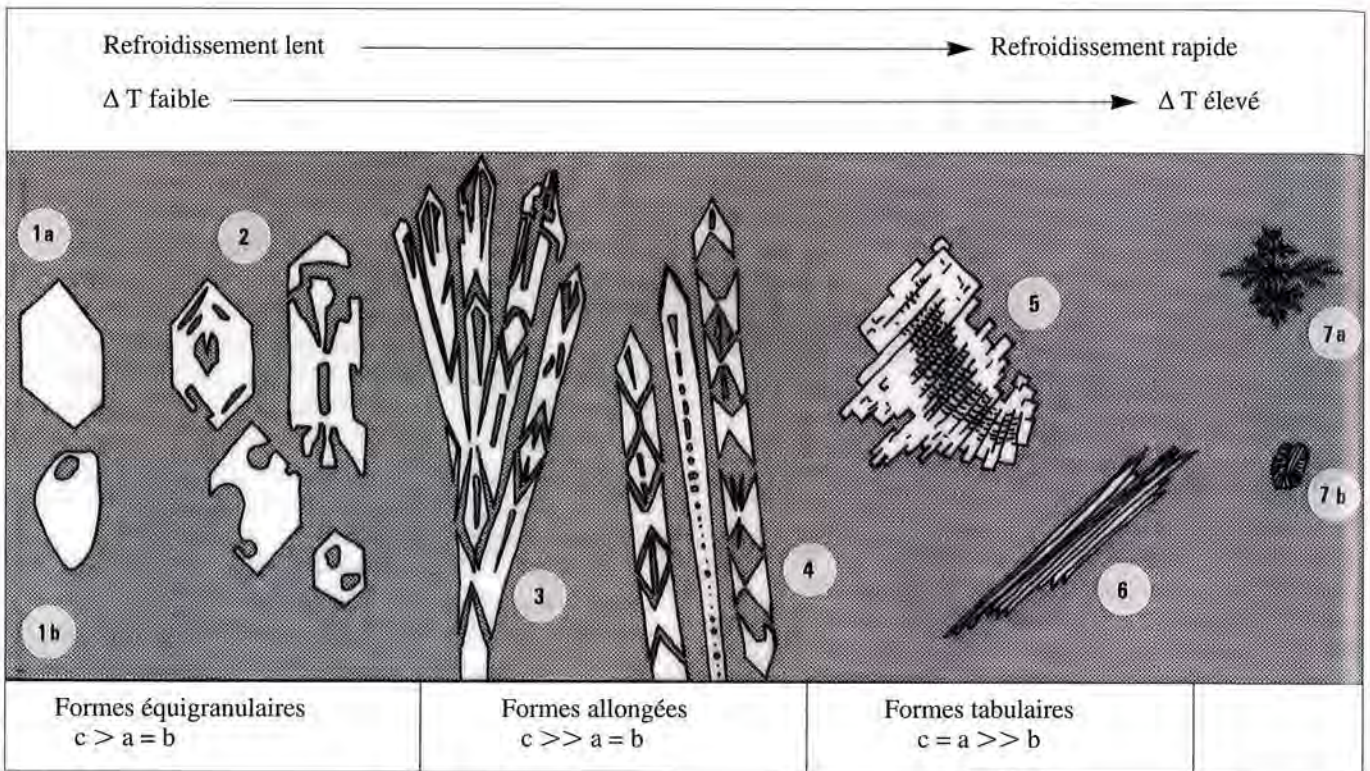


Fig. 19. Principaux habitus de la fayalite. 2 à 7a observés dans les scories. a, b et c: dimensions selon les axes cristallographiques.

- 1a Cristal équigranulaire, prisme bipyramidé trapu (idiomorphe).
- 1b Cristal équigranulaire, arrondi avec lacune de croissance.
- 2 Cristaux équigranulaires, prismes plus ou moins développés, lacunes de croissance orientées ou non (formes de Hopper).
- 3 Cristaux allongés, en gerbe (en branche). Les «branches» se raccordent au «tronc» avec des angles précis ou non.
- 4 Cristaux allongés en chaîne. Dans les cas extrêmes, la chaîne est composée d'une suite d'éléments en forme de H.

- 5 Cristal tabulaire, en treillis. La structure est souvent déformée et courbée.
- 6 Cristaux tabulaires en plaques parallèles très fines.
- 7a Cristal dendritique, en plume (Bryan 1972).
- 7b Sphérule (Blander *et al.* 1976).

graphie. Seules les formes équigranulaires complètes et les sphérules n'ont pas été observées dans les scories étudiées. On note aussi la présence fréquente de cristaux courbés. En général, la proportion de matériel vitreux est d'autant plus importante que les habitus témoignent d'une cristallisation rapide (et/ou d'un  $\Delta T$  élevé).

*Le groupe des pyroxènes*

Certains minéraux du groupe des pyroxènes sont des constituants des scories modernes (Obenauer 1954, 482-3). Ils ne sont que rarement décrits dans les scories anciennes.

Le système des pyroxènes est relativement proche de celui des olivines mais plus complexe tant du point de vue des remplacements de cations dans la structure que des variations de cette structure (fig. 20; Deer *et al.* 1978, Deer *et al.* 1992, 143-222).

La proportion de Si par rapport aux autres cations est plus élevée dans les pyroxènes que dans les olivines. Ils incorporent aussi plus facilement Ca et Al. La structure est basée sur des chaînes de tétraèdres de silice parallèles les unes aux autres et disposées dans une même couche (radical

$\text{SiO}_3^{2-}$ ). Les chaînes sont liées entre elles par des cations placés dans des lacunes de coordinence 6 et 8 formant une autre couche (sites M1 et M2).

La formule chimique générale est  $\text{XYZ}_2\text{O}_6$  dans laquelle X représente le cation occupant le site M2, Y celui qui se trouve en M1 et Z celui en position tétraédrique (fig. 20).

Dans les scories de fer, on peut s'attendre à trouver essentiellement les membres de la famille les plus riches en fer: ferrosilite ( $\text{FeSiO}_3$ , instable à la pression atmosphérique)

<i>Formule générale: <math>\text{XYZ}_2\text{O}_6</math></i>		
X	1+	Na, Li
	2+	Ca, Mn, Fe, Mg
Y	2+	Mn, Mg, Fe
	3+	Al, Fe, Cr
	4+	Ti
Z	3+	Al
	4+	Si

Fig. 20. Principales substitutions possibles pour les cations dans la structure des pyroxènes.

N° mesure	1	33	34	35	36	37	38	39	40	44	45	51	54	61	71	51/3	61/5	
Eléments / nombre de cations			bord		bord				incl.		incl.		incl.					
Si		3,75	4,07	3,92	4,17	4,47	4,06	3,95	3,87	3,88	3,75	3,72	3,89	3,74	3,89	3,81	3,97	4,01
Al	6,00	2,25	1,93	2,08	1,83	1,53	1,94	2,01	2,05	2,01	2,25	2,28	1,98	2,26	1,94	2,18	2,03	1,99
Fe <sup>3+</sup>		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,08	0,11	0,00	0,00	0,13	0,00	0,17	0,00	0,00	0,00
Al		0,08	0,15	0,04	0,22	0,38	0,14	0,00	0,00	0,00	0,21	0,23	0,00	0,32	0,00	0,00	0,00	0,15
Fe <sup>3+</sup>		1,56	1,50	1,56	1,27	0,89	1,40	1,59	1,68	1,54	1,44	1,52	1,65	1,60	2,72	1,66	1,75	1,62
Ti		0,21	0,15	0,19	0,14	0,12	0,17	0,17	0,18	0,22	0,23	0,18	0,16	0,18	0,15	0,22	0,14	0,13
V	6,00	0,20	0,08	0,12	0,08	0,06	0,08	0,12	0,11	0,14	0,16	0,15	0,14	0,10	0,11	0,14	0,90	0,06
Mg		0,08	0,08	0,09	0,09	0,10	0,09	0,10	0,11	0,09	0,12	0,13	0,11	0,14	0,13	0,07	0,11	0,08
Mn		0,08	0,10	0,09	0,09	0,10	0,08	0,09	0,10	0,09	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,08	0,90	0,09
Fe <sup>2+</sup>		3,81	3,94	3,92	3,95	3,89	4,02	3,93	3,82	3,91	3,73	3,70	3,84	3,55	2,78	3,82	3,82	3,83
Ca		0,00	0,00	0,00	0,15	0,44	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
Ca	2,00	1,99	1,99	1,98	2,00	2,00	2,00	2,00	1,99	2,01	1,96	1,93	1,97	2,00	1,95	1,98	1,97	2,00
Fe <sup>2+</sup>		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,07	0,03	0,00	0,05	0,02	0,03	0,00

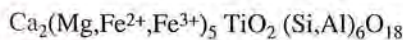
Fig. 21. Analyses chimiques du minéral de la famille de la rhönite (microsonde électronique). Ech. MON52. Normalisation à 14 cations.

et hedenbergite ( $\text{FeCaSi}_2\text{O}_6$ ). Lorsque le système est très riche en calcium, on peut trouver des minéraux contenant cet élément dont les structures sont proches: wollastonite et pseudowollastonite ( $\text{CaSiO}_3$ , pyroxénoïdes; cas de nombreux laitiers de hauts fourneaux).

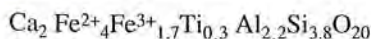
Dans la quasi-totalité des scories étudiées aucun pyroxène n'a été détecté. Dans une seule catégorie de matériel, les scories denses à reflets bleus (SBD) du site de Montcherand, des minéraux de cette famille ont été mis en évidence (pp. 141-144).

Ces scories sont particulièrement riches en CaO (10-15%). Le minéral détecté n'est pas facile à identifier de manière précise car la bibliographie ne fournit aucun parallèle strictement équivalent. Les analyses chimiques ponctuelles et les spectres de diffraction des rayons x permettent de le classer dans la famille de la rhönite (Deer *et al.* 1978, 654-8). Cette famille est isostructurale avec l'aenigmatite dont la structure comporte des chaînes de tétraèdres déformées (pyroxénoïdes).

La rhönite possède une formule chimique complexe:



Le minéral des scories de Montcherand renferme beaucoup de Fe et très peu de Ti. Il est de ce fait assez proche de la dorrite,  $\text{Ca}_2(\text{Mg}_2\text{Fe}^{3+}_4)(\text{Al}_4\text{Si}_2)\text{O}_{20}$ , un autre membre de la famille (Cosca *et al.* 1988). Les analyses chimiques sont données dans l'Annexe 5.7 (fig. 21). Les spectres de diffraction sont proches de ceux de la rhönite et de la dorrite. La formule générale que l'on peut déduire des analyses est:



La proportion de Ti en position octaédrique est faible de même que pour Al en position tétraédrique.

Ce minéral ne peut donc pas être assimilé à ceux décrits dans la bibliographie (fig. 22).

Les grains ne sont pas visibles à l'œil nu (50 $\mu$ ). Ils cristallisent après la fayalite. En lumière transmise, l'indice N est très élevé ( $N > 1.8$ ) et on observe une couleur brun sombre très marquée. Un pléochroïsme d'intensité est très net. La biréfringence ne peut pas être estimée à cause de cette forte coloration. Les formes sont toujours relativement trapues et squelettiques (fig. 23). Les grains comportent fréquemment des lacunes de croissance orientées.

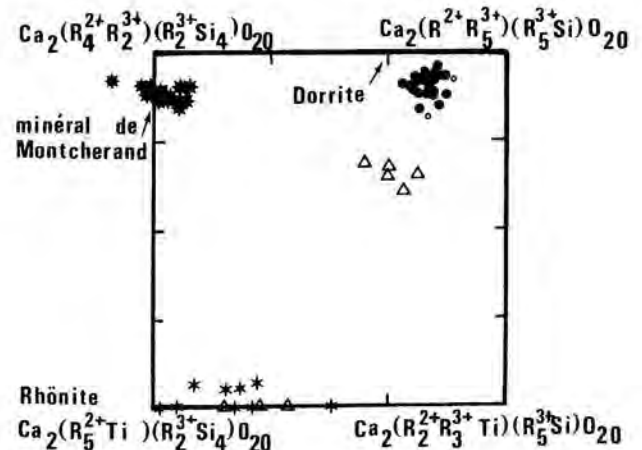


Fig. 22. Compositions chimiques de la rhönite, de la dorrite ainsi que des minéraux de la même famille observés dans les SBD de Montcherand. D'après Cosca *et al.* 1988, fig.6.

Certaines analyses se projettent à l'extérieur du diagramme en raison de la présence de plus de 4 Si dans le site tétraédrique.

Liste des données:

- \* Montcherand : Annexe 5.7
- Foit *et al.* 1987
- Cosca *et al.* 1988
- ★ Deer *et al.* 1978
- △ Havette *et al.* 1982

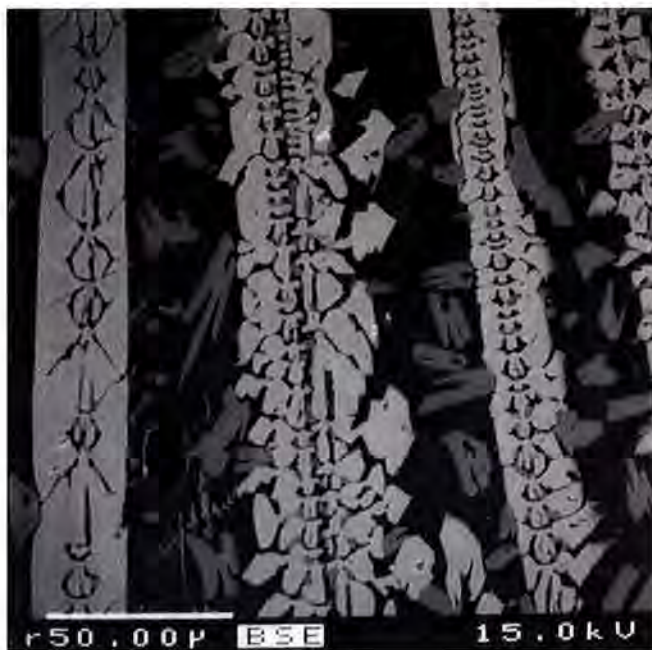


Fig. 23. Les cristaux du minéral de la famille de la rhönite apparaissent en gris moyen. Ech. MON 52. Image en électrons retrodiffusés.

**Le groupe des mélilites**

Les minéraux du groupe des mélilites sont très fréquents dans les laitiers de haut fourneau mais plutôt rares dans la nature, en particulier pour les membres riches en fer (Rigby 1953, 164-9; Obenauer 1954, 478-83).

Ils possèdent une structure de sorosilicates, basée sur des paires de tétraèdres de silice liées par des lacunes octaédriques (radical  $Si_2O_7^{6-}$ ). Cette structure détermine de grandes lacunes irrégulières de coordinence 8 (Deer *et al.* 1986, 285-334). Les cations de Ca occupent ces grands espaces, les lacunes octaédriques accueillent Al,  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$  et Mg. Les sites tétraédriques sont occupés par Si ou Al (fig. 24). De nombreux autres remplacements sont possibles, en particulier Na ou K.

Les minéraux du groupe de la mélilite sont les membres de la solution solide gehlenite  $Ca_2Al_2SiO_7$  et l'åkermanite  $Ca_2MgSi_2O_7$ . Des équivalents ferrifères existent également. La plupart des minéraux naturels et artificiels présentent des compositions plus complexes (mélilite).

Dans les scories étudiées dans ce travail, ces minéraux n'ont pas été mis en évidence.

La cordiérite ferrifère, un autre silicate contenant Al et Fe, est également décrite comme un minéral pouvant se former dans les résidus de traitement métallurgique (Deer *et al.* 1986, 410-540; Rigby 1953, 169-70). Sa formule chimique générale est:  $Fe_2Al_4Si_5O_{18}$ . Elle n'a pas été rencontrée.

**Les groupes des feldspaths et des feldspathoïdes**

Les scories sont généralement pauvres en  $SiO_2$  par rapport aux autres éléments chimiques. Cette sous-saturation est particulièrement marquée vis-à-vis du fer (formation d'oxydes de fer et pas seulement de silicates). Si les scories

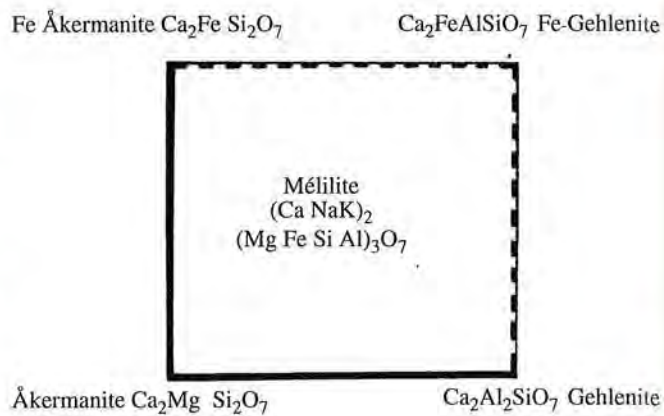


Fig. 24 Composition chimique des minéraux du groupe des mélilites.

Trait gras: solution solide.

Trait discontinu: solution solide probable.

Les mélilites sl. occupent l'intérieur du carré (substitution partielle Na, K / Ca).

sont également riches en éléments alcalins (Na et K), une partie de la silice pourra être utilisée pour former des silicates alcalins, mais cette quantité doit être aussi minime que possible. Les minéraux de la famille des feldspathoïdes seront donc plus faciles à former que les feldspaths (fig. 25). Très fréquemment, les éléments alcalins restent dissous dans la phase vitreuse.

Le  $Na_2O$  est généralement très peu abondant dans les scories. La plus grande partie du  $Na_2O$  présent dans la charge sera vaporisé au cours du processus métallurgique (sublimation à 1275°C). Ce sont donc des feldspathoïdes potassiques qui se forment: la leucite ( $KAlSi_2O_6$ ) et éventuellement la kalsilite ( $KAlSiO_4$ ). L'un et l'autre peuvent incorporer une certaine quantité de Na.

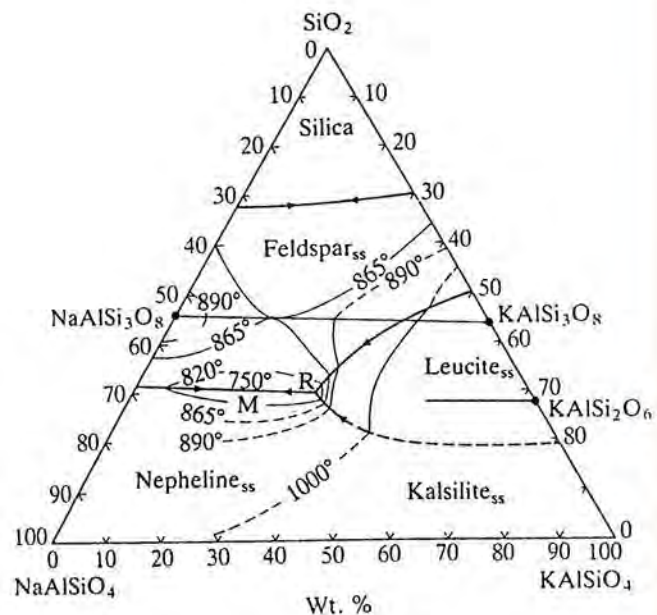


Fig. 25. Composition chimique des feldspaths et des feldspathoïdes. D'après Deer *et al.* 1992.

La leucite est un produit de cristallisation primaire qui a été observé dans les scories de raffinage étudiées. Dans un cas, il est probable que l'on ait affaire à la kalsilite (diffraction RX). Les feldspaths observés sont toujours des reliques non fondues (contamination par la paroi).

#### Le groupe de la silice

Il existe plusieurs formes de la silice cristallisée ( $\text{SiO}_2$ ). Le quartz est la forme la plus abondante dans les roches. Il est souvent présent en petite quantité dans les scories. Chaque fois qu'il a été observé, c'est à l'état de relique non fondue et non pas de produit de cristallisation. Ce sont soit des reliques héritées de la charge soit incorporées dans la scorie au moment où elle s'écoule sur le sol à l'extérieur du fourneau.

Compte tenu de la sous-saturation globale en silice des scories, il est peu probable qu'un minéral de cette famille puisse se former. Dans les rares cas où cela pourrait être possible (parois fondues), on attendrait les polymorphes de haute température (trydimite et cristobalite). Ces minéraux n'ont pas été détectés au cours de ce travail.

## Saturation en oxydes de fer

Le concept de saturation en oxydes de fer dans les scories est analogue à celui de saturation en silice pour les roches magmatiques (Shand 1943, 127-137). Originellement, le concept est basé sur le fait que, dans les roches ayant cristallisé à l'équilibre, on n'observe pas certaines associations de minéraux. En particulier, le quartz n'est pas compatible avec les feldspathoïdes. La présence de quartz (silice libre) définit les roches sursaturées, celle des feldspathoïdes, les roches sous-saturées. Cette idée a, par la suite, été étendue à une approche chimique, en particulier pour les roches volcaniques aphanitiques (rapport entre  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et les éléments calco-alcalins).

Dans les scories, c'est le fer qui est l'élément le plus abondant. En admettant qu'il se combine avec les autres éléments présents pour former des minéraux on peut distinguer 3 cas en suivant la même idée:

1 *Sursaturation*: Il y a plus de fer dans le système qu'il n'en faut pour former des minéraux avec l'ensemble des autres éléments. L'excès de fer apparaît sous la forme d'un oxyde libre (wüstite, magnétite).

2 *Saturation*: Il y a juste assez de fer pour former des minéraux avec l'ensemble des autres éléments.

3 *Sous-saturation*: Il n'y a pas assez de fer pour former des minéraux avec l'ensemble des autres éléments. On voit alors apparaître des phases moins riches en fer (pyroxènes, etc.).

### Les minéraux saturés

Parmi les silicates des scories, c'est la fayalite qui contient la plus grande proportion de Fe relativement au Si (2 Fe pour 1 Si). Tous les autres minéraux de ce groupe présen-

tent un rapport moins élevé (fig. 26). Dans un système  $\text{SiO}_2$ - $\text{FeO}_n$ , on verra donc apparaître des oxydes de fer libres (wüstite ou magnétite) à condition qu'il y ait plus de deux fois plus de Fe que de Si. Dans le cas contraire, on verra apparaître du quartz; la ferrosilite ( $\text{FeSiO}_3$ ) n'étant pas stable à la pression atmosphérique (si le mélange contient un peu de Ca, un clinopyroxène peut se former). La fayalite est donc un minéral saturé en oxydes de fer.

Par ailleurs, la fayalite ne peut stocker dans son réseau que de faibles quantités de Al. Dans les scories étudiées, cet élément est abondant et il faut donc en tenir compte dans le système.

L'aluminium va contribuer à former un spinelle de la solution solide hercynite  $\text{FeAl}_2\text{O}_4$ /magnétite  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Dans la hercynite, le rapport Fe:Al est de 1:2. Il est beaucoup plus bas que le rapport Fe:Si dans la fayalite. Par contre, à haute température ( $> 850^\circ\text{C}$ ), cette solution solide est continue. Il semble donc logique de choisir comme minéral alumineux saturé en oxydes de fer, un composé intermédiaire: «ferri-hercynite»  $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}\text{AlO}_4$  qui présente le même rapport Fe:X que la fayalite (2:1).

La paire fayalite + ferri-hercynite peut être considérée comme une limite significative dans le système Si-Al-Fe. Elle sépare un domaine sursaturé où apparaissent des minéraux très riches en fer (wüstite, wüstite alumineuse, magnétite, magnétite alumineuse) d'un domaine où l'on trouve des minéraux moins riches en fer (pyroxènes, clinopyroxènes, mélilites, hercynite, etc.).

### Rôles des différents cations

Il convient cependant d'examiner également le rôle des autres ions présents dans les scories avant de chercher à donner un sens à cette démarche.

Mg et Mn remplacent de manière isostructurale  $\text{Fe}^{2+}$  dans les olivines et les spinelles, même en quantités importantes. Logiquement donc, leurs concentrations doivent être additionnées à celle du  $\text{Fe}^{2+}$ .

Le rôle du Ca est plus subtil. Il n'entre pas dans les spinelles mais peut remplacer  $\text{Fe}^{2+}$  dans les olivines. De plus c'est un élément nécessaire à la formation des autres silicates possibles (pyroxènes, mélilites, etc.). Sa présence en quantité significative modifie profondément les relations dans le système. Il faudra donc toujours considérer séparément la teneur en calcium.

Al peut remplacer  $\text{Fe}^{3+}$  dans la solution solide des spinelles. Il peut entrer en petite quantité dans la fayalite et est un constituant important dans les autres silicates. Sa présence est prise en compte.

$\text{Fe}^{3+}$  est le cation qui pose le plus de problèmes: il peut se substituer de manière isomorphe à  $\text{Fe}^{2+}$  ou  $\text{Al}^{3+}$ . En plus, il peut témoigner de l'oxydation secondaire de phases réduites ou même provenir d'une précipitation postérieure à la formation de la scorie. Son dosage est toujours difficile à faire de manière précise.

Dans le système de projection triangulaire, on est obligé de calculer tout le fer sous une seule forme ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ tot,  $\text{FeO}$ tot

ou Fetot). La plus judicieuse semble être Fetot. Le calcul en milliatomes pour 100 gr d'échantillon permet de simplifier avantageusement la représentation et de la rendre beaucoup plus lisible (fig. 26).

Le Ti peut entrer dans toutes les structures cristallines décrites, généralement en remplacement des cations bivalents mais aussi des trivalents. Il est heureusement rarement abondant ce qui permet de ne pas en tenir compte dans la plupart des cas.

Les alcalins, K et dans une moindre mesure Na, toujours peu abondant, n'entrent que dans les ménilites en remplacement du Ca (très accessoirement dans les pyroxènes).

Si de tels minéraux ne se forment pas, les alcalins constituent des silicates dépourvus de fer comme les feldspatoïdes (leucite, kalsilite). Ce n'est qu'en présence d'une quantité très importante de silice que l'on verra éventuellement apparaître des feldspaths (orthose, albite, anorthite). A notre connaissance, ils ne sont pas décrits dans les scories anciennes comme produits de cristallisation mais seulement comme reliques.

Toutefois, des quantités significatives d'alcalins modifient les relations dans le système puisqu'ils se combinent avec la silice et l'alumine sans consommer d'oxydes de fer. Les alcalins n'apparaissent pas dans le triangle Fe-Si-Al. Cette représentation n'est donc pas utilisable s'ils sont abondants.

Les principales limitations à l'utilisation du concept de saturation en oxydes de fer sont donc liées à la présence d'autres éléments chimiques que Si, Al et Fe. L'abondance des calco-alcalins, Ca, Na et K est un point critique.

Ces éléments ne sont que très rarement abondants dans

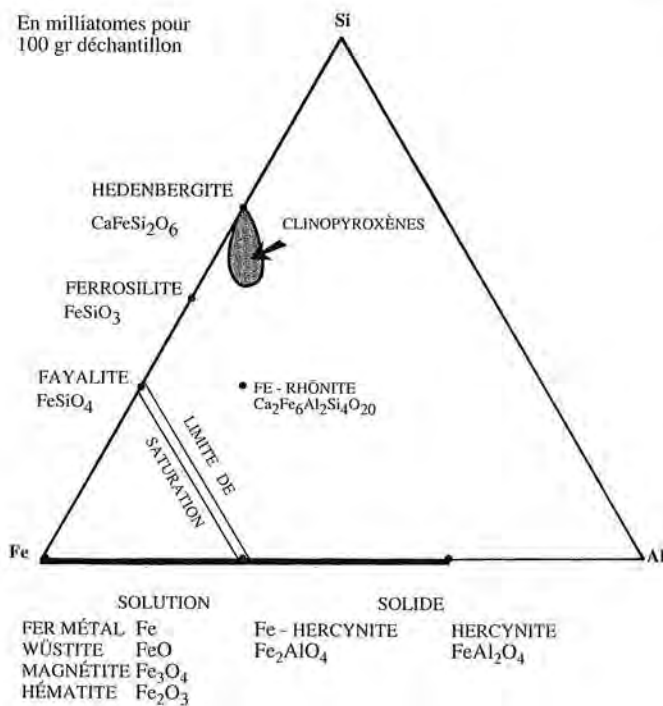


Fig. 26. Diagramme de saturation en oxydes de fer pour les scories.

Exprimé en milliatomes pour 100 gr d'échantillon:

$$SF = \frac{Fe + Mg + Mn}{Si + Al}$$

sous-saturation < 2 → «pyroxène normatif»  
 saturation = 2 → fayalite + Fe-hercynite  
 sursaturation > 2 → «wüstite normative»

Sous réserve de faibles teneurs en Ca, K et Na.

Fig. 27. Calcul de l'indice de saturation en oxydes de fer dans les scories anciennes.

les scories étudiées. Celles-ci se prêtent donc à cette approche. Mais cette situation favorable n'est pas une règle absolue. Dans d'autres contextes (traitement de minerais calciques, etc.), il sera nécessaire de l'adapter en fonction des observations minéralogiques et des résultats des analyses chimiques.

### Indice de saturation en oxydes de fer

Il y a donc de nombreuses limites à l'utilisation d'un tel indice de saturation en oxydes de fer dans les scories. Clairement, cette démarche n'est pas encore totalement aboutie et demande à être affinée. Toutefois, l'utilisation d'un indice de saturation simple peut être un guide dans l'interprétation des scories (fig. 27).

Cet indice est en quelque sorte un moyen d'apprécier l'efficacité d'un processus de réduction. Dans les résidus sursaturés, une partie du fer disponible n'a pas été récupérée. Au contraire, dans les scories sous-saturées, une proportion de fer supérieure à la normale a été extraite du minerai.

Pour les opérations de raffinage ou de forge, ce raisonnement n'est pas pertinent. Les résidus seront généralement sursaturés du fait de la présence de morceaux de métal provenant de la pièce travaillée.

Pour les laitiers de haut fourneau (FeO<sub>n</sub> < 5%), cet indice de saturation en fer n'a guère de sens. Dans ce cas, l'indice de basicité (CaO + MgO / SiO<sub>2</sub> et autres formules) développé pour approcher la pression partielle d'oxygène du laitier (pO<sub>2</sub>) reflète mieux les propriétés essentielles de celui-ci (VDE 1981, 3-8). En revanche, sa signification pour les scories riches en oxydes de fer n'est pas évidente.

### Calcul de norme

Sur la base de la composition chimique globale, on peut également tenter de calculer la composition minéralogique virtuelle des scories (calcul de norme). Cette approche, dérivée de la pétrographie des roches effusives, a été développée pour les scories par plusieurs chercheurs (Kresten et Serning 1983).

Malheureusement, ces calculs ne sont que difficilement interprétables. La raison principale est sans doute que les scories sont des corps qui ne sont pas en équilibre thermodynamiquement.

L'indice de saturation en oxydes de fer est une approche plus simple qui paraît mieux adaptée. Elle pourrait même

permettre de formuler une autre procédure de calcul de la norme des scories, basée cette fois sur les oxydes de fer et non plus sur la silice.

Par ailleurs, ces calculs d'indice de saturation en oxydes de fer ou de norme paraissent relativement bien adaptés à l'étude des scories de réduction. Dans ce cas, la situation présente beaucoup de similitude avec les conditions de formations des roches magmatiques pour l'étude desquelles des concepts voisins se sont révélés utiles. Par contre, pour les scories issues des étapes de travail post-réduction, la situation est complètement différente. La scorie est formée par l'accumulation de matériaux divers au fond du foyer. L'analogie se ferait plutôt avec les roches sédimentaires qui, elles, ne se prêtent pas du tout à ce type d'approche.

## 2

# LES MINÉRAIS DE FER

**L**E fer est un élément chimique très abondant dans la croûte terrestre (env. 7%). De nombreuses roches sont donc riches en fer. Mais elles ne constituent pas pour autant des minerais.

En effet, un minerai est une roche qui doit non seulement contenir la substance recherchée, mais également être exploitable du point de vue technique et économique. Les connaissances techniques et des conditions économiques évoluant en permanence, la notion de minerai change avec le temps. Pour les périodes anciennes, on ne peut pas définir les minerais selon les critères utilisés actuellement. De même, il existe une différence d'échelle considérable entre les industries minières anciennes et modernes. Les tonnages traités aujourd'hui sont infiniment supérieurs à ce qu'ils furent par le passé.

La valeur d'un minerai dépend de sa teneur mais également de la nature et de la concentration des éléments qui accompagnent le fer. Les minerais les plus riches ne sont donc pas forcément les plus intéressants.

La nomenclature des minerais de fer est assez complexe. Les différentes classifications répondent chacune aux besoins de leurs utilisateurs. Pour le géologue, la classification est basée sur les conditions de formation du minerai. Ces critères génétiques sont ceux qui orienteront la prospection sur le terrain et qui aideront à prévoir l'extension du gisement. Pour le métallurgiste, c'est le comportement du minerai pendant le traitement qui est le critère essentiel de classification (Durrer 1957, 1-4).

D'autres approches sont encore possibles, en particulier, celle du mineur: le gisement est profond ou superficiel, en roche meuble ou dure, etc. Enfin, il faut souligner que la bibliographie est encombrée par les appellations anciennes et traditionnelles dont le sens est parfois devenu totalement obscur.

## Les minéraux des minerais de fer

Les minerais de fer sont très abondants et très variés. Ils sont constitués de minéraux contenant le fer associés à d'autres constituants qui forment la gangue. Les gangues sont extrêmement variées et il ne peut être question ici d'en faire la liste. Il est par contre utile de rappeler brièvement les principaux minéraux ferrifères (fig. 28).

Le fer à l'état natif est très rare. Dans les roches terrestres basiques, on peut trouver de petits grains de fer métallique. Il ne forme que très rarement des masses métriques (île Disko, Groenland). Certaines météorites sont essentiellement constituées de métal (Buchwald 1975). Il s'agit d'alliages de fer et de nickel (kamacite et taenite).

Les oxydes, magnétite et hématite, ainsi que les hydroxydes de fer, goethite et limonite, jouent un rôle primordial dans les minerais. Ce sont les minéraux les plus importants au point de vue économique. Parmi les carbonates de fer exploités, la sidérite et l'ankérite sont les principaux.

		% Fe
Ferrite	Fe	100
Kamacite	Fe,Ni	90-95
Taenite	Fe,Ni	65-25
Magnétite	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	72.4
Ilménite	FeTiO <sub>4</sub>	36.8
Hématite	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	69.9
Goethite	FeOOH	62.9
Limonite	FeOOHnH <sub>2</sub> O	±50
Sidérite	FeCO <sub>3</sub>	48.3
Ankérite	FeCa(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	2 25.9
Pyrite	FeS <sub>2</sub>	46.6
Pyrrhotine	Fe <sub>1-x</sub> S	±57
Arsénopyrite	FeAsS	±33
Chamosite	Chlorite	±28

Fig. 28. Teneurs en fer des principaux minéraux des minerais de fer.

Les minéraux de la famille des sulfures, bien que riches en fer et relativement abondants, ne forment pas des minerais très recherchés à cause de la présence du soufre. Cet élément est difficile à éliminer totalement et gêne considérablement le travail du métallurgiste. La pyrite et la pyrrhotine sont les sulfures les plus riches en fer. Les silicates qui contiennent du fer sont très nombreux, mais soit le fer y est trop peu abondant soit il est difficilement récupérable ou ces minéraux sont rares. Les gisements sont donc assez exceptionnels. Les chlorites riches en fer (thuringite, chamosite, etc.) sont pratiquement les seuls silicates à jouer un rôle économique. Ce sont des minéraux fréquents dans les oolites ferrugineuses (Déverin 1945, 29-33; Delaloye 1966). Exceptionnellement d'autres minéraux peuvent jouer un rôle (glauconie, vivianite, greenalite, etc.).

### Classification des minerais de fer d'après les conditions de formation

Les classifications modernes se réfèrent à des concepts génétiques (conditions de formation et histoire des roches). Ce point de vue permet une classification en une dizaine de types et de nombreux sous-types (Zitzmann 1977, 13-35).

1. Les *minerais de fer magmatiques* résultent de l'accumulation de cristaux, essentiellement magnétite et ilménite, par séparation gravifique au cours des premiers stades de cristallisation d'un magma basique. Les gîtes sont lenticulaires ou en veines. Le contenu en titane est élevé (ex.: Taberg, S Suède).

2. Les *minerais de fer métasomatiques de contact* se forment lors de la transformation des roches calcaires au moment de la mise en place d'une intrusion granitique. A la fin de la cristallisation du magma, des solutions enrichies en fer et en éléments volatils se forment. Au contact avec les calcaires il se forme des skarns. Les gisements sont généralement massifs et irréguliers ou suivent les fissures et les plans de l'ancienne stratification. Le minéral essentiel est la magnétite qui peut être transformée en hématite. Les sulfures sont presque toujours présents (ex.: Magnitnaya, Oural, Russie).

3. Les *minerais de fer hydrothermaux* ont pour origine la cristallisation de solutions liées aux épisodes magmatiques tardi- ou post-orogéniques. Ces solutions se déposent le long de fissures. On distingue les veines à sidérite (ex.: Siegerland, Allemagne) et les veines à hématite (ex.: S Harz, Allemagne) avec une gangue de quartz, de calcite ou de barytine. Parfois, les solutions imprègnent de manière diffuse les roches encaissantes calcaires (ex.: Bilbao, Espagne) ou forment des gisements stratiformes non concordants (ex.: Erzberg, Autriche).

4. Les *minerais de fer volcano-sédimentaires* se forment lors du dépôt syngénétique dans des sédiments marins de solutions exhalatives. Ce processus est lié au magmatisme

des stades précoces d'une ouverture géosynclinale. Les gisements sont stratifiés et les faciès sont sédimentaires. On observe l'intercalation de niveaux riches et de niveaux pauvres. La gangue est siliceuse, calcaire ou tufacée. L'hématite est le principal minéral, accompagnée de silicates de fer, de sidérite et de pyrite. (ex.: Lahn-Dill, Allemagne).

5. Les *minerais de fer sédimentaires marins* les plus fréquents sont composés d'oolites (corps ovoïde, diamètre 0,1-2 mm, à texture concentrique souvent centrée sur un claste détritique ou biogène) ferrugineuses (limonite, hématite, glauconie, sidérite, chamosite ou mélange de ces différents minéraux). La matrice est argileuse ou calcaire. L'origine du fer pourrait être continentale (réaction avec l'eau riche en acide humique, transport sous forme d'humates ou de bicarbonate de fer, décomposition à une certaine distance du rivage et formation d'hydrogels qui cristallisent en carapaces successives autour d'un germe). Ce mécanisme n'est pas le seul envisageable et on peut en proposer de purement marin. La minéralogie des roches sédimentaires riches en fer est contrôlée par les phénomènes diagénétiques. Ce type de minerai forme des couches de grande extension et d'épaisseur constante (ex.: minette de Lorraine, France). Des placers à magnétite se forment par tri mécanique des minéraux lourds par la mer à proximité de gisements primaires (sables noirs).

6. Les *minerais de fer sédimentaires continentaux* sont le plus souvent liés aux marais et tourbières. Le fer est dissous par l'eau riche en acide humique puis précipite lors de l'évaporation de l'eau ou de changements des conditions physico-chimiques (Eh et pH). Il se forme alors des encroûtements et des concrétions de limonite impure accompagnées fréquemment d'oxydes de manganèse (ex.: Lipetsk, URSS). Des gisements anciens ayant une origine comparable, sont liés aux bassins charbonniers (ex.: Ruhr, Allemagne).

7. L'*altération* par les eaux de surface est souvent un facteur d'enrichissement considérable. Des accumulations importantes de limonite peuvent se constituer lors de l'oxydation superficielle des filons de sulfures («chapeaux de fer», «gosan»).

Sous un climat tropical, les eaux de surface attaquent les roches cristallines ou sédimentaires, emportant les substances solubles alors que les hydroxydes d'aluminium et de fer s'accumulent sur place. Ces formations, les *latérites*, contiennent des nodules d'hématite et de goéthite noyés dans une matrice argileuse. Elles ne sont généralement pas exploitables sauf si elles se développent sur des roches riches en fer (ex.: Lokris, Grèce). Un autre type de latérite ferrifère se développe par altération des calcaires. La dissolution des carbonates permet la concentration des hydroxydes de fer, d'aluminium et de manganèse qui se déposeront dans le karst. Dans certains cas, on observe la formation de pisolithes et de concrétions ferrugineuses. Le remaniement par les eaux de ruissellement est un facteur d'enrichissement (ex.: Delémont, Suisse).

8. Les minerais de fer métamorphiques rubannés (BIF) semblent avoir été des sédiments d'origine chimique (dissolution / précipitation). Ces minerais se présentent sous forme de formations stratifiées de grande extension (1000 km) d'âge précambrien (> 500 mio a). Ils sont caractérisés par l'alternance de lits riches en fer ou en silice (ex.: taconites du Lake Superior District, USA; itabirites de Itabira, Brésil).

Enfin, certains gisements tels que les skarns de Dannemora (Suède) sont le résultat d'histoires géologiques tellement complexes qu'il est absurde de chercher à les intégrer à une classification génétique.

## Les minerais de fer en Suisse

Le sous-sol suisse n'est pas riche en mines métalliques. Les gisements sont toujours relativement petits et les teneurs plutôt basses. La topographie, difficile dans les Alpes mais aussi dans le Jura, ne facilite pas l'industrie minière. Le fer

est le métal le plus répandu. Sans former de gisements très importants, les minerais du pays ont permis le développement d'une industrie depuis les origines de la sidérurgie jusqu'au milieu de ce siècle.

Les minerais de fer suisses ont fait l'objet de multiples études. La carte des gîtes de W. Epprecht est le document synthétique le plus complet (Epprecht 1957; fig. 30). A cette échelle, elle fournit une excellente image générale même si elle peut être complétée dans le détail.

Il faut souligner la division du territoire en trois grandes zones distinctes du point de vue métallogénique. Au nord, court la chaîne du Jura où les gisements sont abondants. Au centre, sur le Plateau molassique, il n'y a aucune formation susceptible de fournir du minerai. Enfin, les Alpes apparaissent comme un domaine complexe du point de vue métallogénique.

Deux types de minerais sont prépondérants (fig. 29): les minerais d'altération continentale (Sidérolithique), les minerais oolithiques marins mésozoïques (oolithes ferrugineuses). Les autres sont moins importants (magnétites, hématites, sidérites, etc.).

Type de minerai	Localité		Composition chimique moyenne (%)									Volume (tonnes)		
			Fe	Mn	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	P	S	PAF	exploité	réserve	
<b>SIDEROLITHIQUE</b>														
Jura	Schaffhouse	SH	43.0	0.3	11.4	12.6	0.1	0.1	0.03	0.07	12.8	172 000	160 000	
	Dünnerntal	SO	44.0		11.8	7.9	0.1	0.1	0.06		11.0	100 000	2 000 000	
	Delémont	JU	44.0	0.3	11.5	11.0	0.1	0.1	0.02	0.10	13.5	1 530 000	2 500 000	
	Goumoens-le-Jux	VD	12.5	0.3	50.0	18.7	0.4	0.1	0.04	0.30	8.0			
	Mormont	VD	41.0	0.2	21.5	10.5	1.6	0.3	0.30	0.25				
Alpes	Dents du Midi	VS	30.0	0.1	36.0	15.5	0.1	1.2	0.06	0.50	5.0			
<b>OOLITHES FERRUGINEUSES</b>														
Jura	Schaffhouse	SH	20.0	0.1	20.0	8.0	15.0	3.0	0.40	0.20	20.0		1 500 000	
	Fricktal	AG	28.0	0.3	15.0	6.5	11.6	1.9	0.50	0.16	18.5	1 350 000	70 000 000	
	Erlinsbach	AG-BE	25.0	0.3	14.0	11.0	15.0	1.0	0.30	0.20	21.0		875 000	
	Scheulte	SO	25.0	0.2	10.6	3.6	25.9		0.39	0.11	25.0			
Alpes	Erzegg	BE	38.0	0.1	14.0	10.0	4.0	2.0	0.70	0.90	11.0	150 000	1 300 000	
	Chamoson	VS	31.0	0.3	16.4	12.0	5.8	1.8	0.40	0.30	14.0	40 000	500 000	
<b>LIMONITE DU VALANGINIEN</b>														
Jura	Auberson	VD	19.0		4.6	16.8	28.8	2.2	0.20	0.10	10.0			
<b>MAGNETITES</b>														
Alpes	Mont Chemin	VS	30.0		17.0	2.0	5.0	12.5	0.10	0.30		67 000	7 000	
<b>HEMATITES ET SIDERITES</b>														
Alpes	Gonzen	SG	50.0	0.8	5.3	0.6	7.5	0.9	0.05	0.60	5.6	1 650 000	1 000 000	
	Val Tisch	GR	51.5	1.3	12.7	3.7	3.6	0.6	0.02	1.20	2.0	2 200	1 500	
	Val Ferrera	GR	30.0	21.0	12.0	0.2	6.2	1.5	0.10	0.20				

Fig. 29. Principaux minerais de fer suisses. Modifié d'après Fehlmann et de Quervain 1952, tab. 6.



## Le Sidérolithique

Le terme de Sidérolithique désigne une formation géologique qui regroupe des terrains très divers. Le mode de gisement varie également d'une localité à l'autre. De même, les faunes fossiles découvertes ne sont pas strictement contemporaines. Ils ont en commun de s'être formés dans des conditions voisines et d'occuper une position stratigraphique comparable au toit des sédiments mésozoïques sous les terrains oligocènes.

Les publications récentes sur le Sidérolithique suisse sont assez rares et portent sur des gisements isolés (Epprecht *et al.* 1963; Kürsteiner *et al.* 1990). Ce sont les travaux anciens qui fournissent les observations les plus nombreuses. Les principales synthèses sur le sujet datent du début de ce siècle (Fleury 1909, Baumberger 1923). Ce fait s'explique à la fois par l'important débat quant à l'origine du Sidérolithique qui eut lieu à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle et par la fermeture des exploitations minières à la même époque. Depuis lors le débat s'est calmé et les observations nouvelles sont devenues rares.

### Les produits sidérolithiques

Le Sidérolithique n'est pas un niveau homogène. Il se présente comme un ensemble de roches différentes juxtaposées verticalement et horizontalement.

#### *Les minerais pisolithiques ou Bohnerz*

Les roches les plus typiques sont les formations riches en concrétions ferrugineuses. Ce sont elles qui forment les minerais de fer. Les concrétions sont généralement des pisolithes, c'est-à-dire des corps globulaires plus ou moins sphériques dont le diamètre varie de quelques millimètres à quelques centimètres (de la taille d'un petit pois à celle d'une noix). Ces pisolithes possèdent une écorce indurée brunâtre constituée d'hydroxydes de fer (fig. 31.1). Le noyau est une pâte homogène riche en oxydes et hydroxydes de fer (hématite et goëthite) mélangés à des minéraux argileux. Il contient parfois des éléments étrangers comme des grains de quartz. Dans certains cas, des enveloppes successives entourent le noyau (structure concentrique; fig. 31.2).

Fréquemment, les concrétions sont des agrégats réunissant sous une même écorce plusieurs pisolithes. Les plus grosses pièces peuvent atteindre 20 cm de diamètre. Dans bien des cas, les concrétions ferrugineuses se présentent sous des formes quelconques d'aspect plus ou moins scoriacé (fig. 31.5 et 31.6).

Les pisolithes forment parfois des accumulations très compactes. Ils peuvent représenter jusqu'à 80% du volume de la roche. Ils sont cimentés par des matériaux argileux, eux-mêmes riches en fer. La kaolinite est le constituant principal de cette gangue. La nature de ces argiles est très proche de celle du noyau des pisolithes.

Le plus souvent, les pisolithes sont dispersés dans une matrice argileuse et ne forment que quelques pourcents de la roche.

#### *Les argiles ou bolus*

Les argiles, plus ou moins plastiques et plus ou moins pures forment la plus grande partie des produits sidérolithiques. Elles sont le plus souvent colorées en rouge ou en jaune, en fonction de la teneur en fer (fig. 31.3 et 31.4). On en rencontre de toutes les couleurs: vert, bleu, violacé, etc.

Il existe un très large spectre de ces produits argileux qui diffèrent tant par leur composition chimique que par la présence d'éléments tels que quartz détritique, galets roulés ou pisolithes ferrugineux.

#### *Les sables ou huppers*

Le plus souvent, ce sont des sables composés exclusivement de grains de quartz (fig. 31.9 et 31.12). Ils contiennent parfois une faible fraction argileuse. Dans certains cas, les oxydes et hydroxydes forment des concrétions informes ou imprègnent et colorent la roche.

#### *Les calcaires ou raitsches*

Des calcaires d'aspects très variés appartiennent au Sidérolithique. Ce sont des roches impures contenant souvent des pisolithes ferrugineux et d'autres fragments (fig. 31.7). Les empreintes de plantes sont fréquentes. Les calcaires sont souvent jaunâtres.

#### *Les conglomérats ou gompholithes*

Des conglomérats de galets, surtout des calcaires jurassiques, appartiennent au Sidérolithique. La nature des éléments et leur degré d'arrondi sont variables, passant localement à des brèches (fig. 31.8). Le ciment est généralement calcaire, mais les éléments gréseux ou argileux ne sont pas rares.

### Les modes de gisement

#### *Les dépôts stratiformes*

Dans la vallée de Delémont, le Sidérolithique forme une véritable couche régulière. Il se dépose de manière plus ou moins discordante sur une surface érodée et karstifiée. Le substratum est formé par les sédiments du Jurassique supérieur (Kimméridgien). Il est recouvert par la molasse (Oligocène). Localement, le Sidérolithique est stratifié, c'est-à-dire qu'on distingue des variations verticales des terrains. Les variations latérales sont très importantes. (Fig. 31.10).

De manière assez grossière, on retiendra que les produits calcaires sont caractéristiques de la partie supérieure alors que les bohnerz sont plutôt proches de la base. Les observations les plus documentées sont celles fournies par les relevés de Quiquerez (Rollier 1898, 75-101). Cet auteur a eu accès aux galeries de mine et aux puits en activité alors que ses successeurs ne purent se fonder que sur des affleurements relativement mauvais effondrés ou recouverts par la végétation.

Dans le canton de Schaffhouse, le Sidérolithique forme également un dépôt stratiforme. Il est nettement discordant sur les terrains du Jurassique et recouvert par la molasse (Baumberger 1923, 19-31; Hofmann 1991). Au pied du Jura vaudois, certains gisements (Orbe, Goumoens-le-Jux) présentent des caractères stratiformes. Toutefois, ils semblent

être d'extension limitée. La question de la formation in situ de ces roches est difficile à trancher. Il est fort probable qu'une grande partie des matériaux soient remaniés.

### Les remplissages

Tout au long de la chaîne du Jura, le Sidérolithique apparaît en remplissage de structures karstiques. Ces dernières peuvent être superficielles, formées au sommet des sédiments mésozoïques. Ailleurs, le karst est souterrain et ce sont des boyaux ou des poches qui sont comblés. Dans quelques cas, les produits sidérolithiques colmatent des structures d'origine tectonique, reprises par l'érosion karstique. (Fig. 31.11 et 31.12).

### Age et formation du Sidérolithique

Des fossiles très variés ont été découverts dans le Sidérolithique: mammifères, reptiles, oiseaux et invertébrés, en tout plus d'une centaine d'espèces. D'une région à l'autre, ces faunes ne sont pas du même âge. Dans certains gisements, les fossiles ne sont pas tous contemporains. Les dépôts sont datés du Lutétien, du Bartonien et du Ludien, soit de l'Éocène moyen et supérieur (Stehlin 1903-6).

Les conditions de formation des terrains sidérolithiques ont fait l'objet d'hypothèses très variées. Après les premières descriptions (Mérian 1821), les premières tentatives d'explication feront appel à une origine hydrothermale et semi-plutonique (Gressly 1841). Cette théorie gardera son influence pendant quelques années (Quiquerez 1852). Avec les découvertes d'ossements, le caractère sédimentaire du Sidérolithique sera reconnu par les géologues (Greppin 1870).

Depuis lors, l'analogie avec les formations latéritiques actuelles permet de mieux comprendre ce terrain. Dans le détail, bien des points restent obscurs et il est peu probable que les maigres affleurements encore visibles répondent un jour à l'ensemble des questions. Le Sidérolithique est une formation très complexe qui s'est constituée au cours d'une fort longue période.

Globalement, les données disponibles font penser que le Sidérolithique résulte d'un processus sédimentaire en milieu continental sous un climat chaud et humide (tropical). Une grande partie du matériel provient du remaniement sur place ou à faible distance, d'un ancien sol ferrallitique, voire d'une véritable cuirasse.

Au cours du Paléocène et de l'Éocène, le Jura, en particulier la bordure S, subit une longue période d'émergence. Les sédiments crétacés sont partiellement érodés et un karst se développe sur et dans les calcaires du Jurassique. Les argiles de décalcification s'accumulent en surface et dans le karst au cours de cette période d'altération hydro-chimique.

En surface, un sol se forme et évolue, avec comme conséquence un enrichissement en fer (Segalen 1964, 115-7). Cela aboutit à la formation des pisolithes et des agrégats ferrugineux dans le sol (Nahon 1976, 36-40; 1986 et 1991, 154-62; Tardy et Nahon 1985; Boulange et Bocquier 1983). En même temps, l'érosion se poursuit, remobilisant les produits de l'altération et de la pédogenèse.

La complexité des figures sédimentaires dans le Sidérolithique laisse penser que les matériaux sont généralement remaniés et redéposés (fig. 32). Des gisements correspondant à une séquence formée sur place ne sont pas encore identifiés. La fin de la séquence sédimentaire du Sidérolithique est marquée par des formations conglomératiques ou bréchiques et surtout par des calcaires lacustres.

### Répartition du Sidérolithique

On peut trouver des terrains sidérolithiques pratiquement dans tout le Jura (Fleury 1909, 41-77). Les formations à pisolithes ne sont par contre pas systématiquement présentes et ne forment des accumulations importantes que dans quelques régions.

Grossièrement, entre Schaffhouse et Bienne, les affleurements sont assez nombreux. Plus à l'O, ils se font beaucoup plus rares (chapitres 5 à 7). Ils sont absents sur le plateau des Franches-Montagnes. De Bienne à Yverdon, on ne signale que quelques poches. C'est dans le secteur du pied du Jura vaudois, entre La Sarraz et Yverdon qu'il y a le plus de petits gisements. Au-delà de la frontière, sur le Salève, le Sidérolithique est à nouveau bien développé quoique fort différent (chapitre 4).

Dans les Alpes, on retrouve ce niveau mais il a subi une forte déformation et un métamorphisme parfois important (Arbenz 1910, Chaix 1923, Wieland 1979). Vu le contexte tectonique, les occurrences sont plutôt petites et discontinues.

L'épisode continental éocène marque une bonne partie du continent européen, depuis le massif de Bohême jusqu'au massif armoricain (Ziegler 1982, pl. 24). Ces conditions permettent à des roches comparables au Sidérolithique de se former dans cette large aire géographique. Elles ne sont toutefois pas strictement contemporaines ni identiques (variations locales du climat, de la topographie et du substratum).

Dans les régions limitrophes, les analogies sont frappantes. Les terrains éocènes du Jura souabe sont le prolongement à l'E du Sidérolithique suisse (Eichler 1961; Seeger 1963). En Franche-Comté, des roches semblables sont connues (Rosenthal 1990, 35-38). Au SO, des niveaux attribués au Sidérolithique affleurent bien au Salève sous forme de sables ferrugineux (Joukowski et Favre 1913). Ils se prolongent de manière discontinue jusqu'à la vallée du Rhône. Sur les bordures E et SE du Massif central français, on retrouve des séries comparables. Malheureusement, il n'existe pas encore de travail synthétique sur les minerais de fer d'altération continentale éocènes à l'échelle européenne.

### Les formations à pisolithes ferrugineux plio-quatennaires

Des formations à pisolithes ferrugineux postérieures au Sidérolithique sont connues. Elles sont très difficiles à distinguer pétrographiquement. En Suisse, elles n'ont été clairement reconnues que dans le canton de Schaffhouse (Hofmann 1991, 66-7). Elles sont mieux attestées en Franche-Comté (Rosenthal 1990, 38-41). Il est fort probable que de nouvelles occurrences seront mises en évidence dans les années à venir.

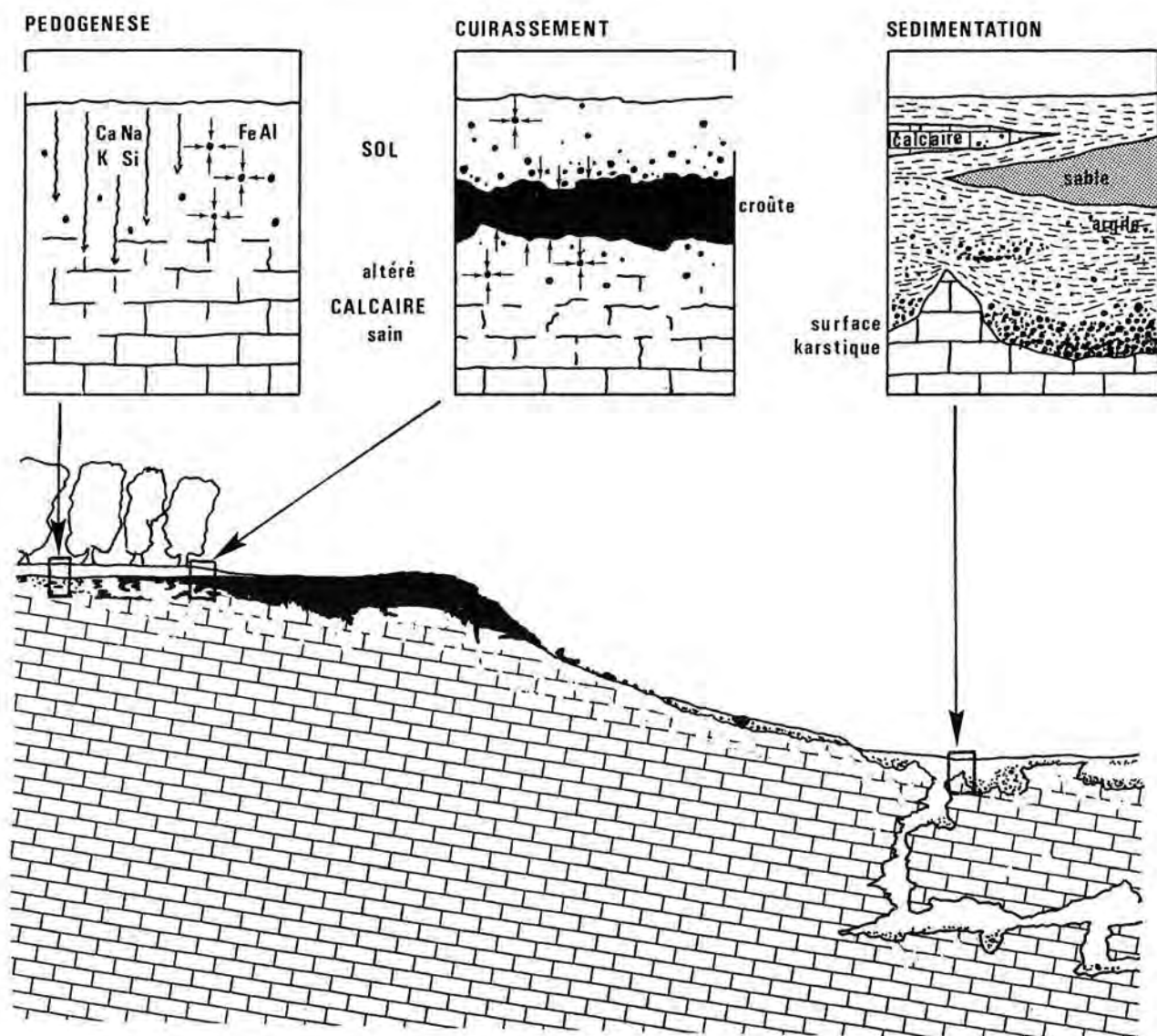


Fig. 32. Schéma de la formation du Siderolithique suisse.

Fig. 31. Aspects du Siderolithique. Echelle des échantillons: env. 1:2.

*De gauche à droite, et de haut en bas:*

Fig. 31.1. Pisolithes, Boécourt (JU).

Fig. 31.2: Pisolithes et agrégats, Boécourt (JU): Coupes (Eschenlohr et Serneels 1991, fig. 18).

Fig. 31.3. Formation argileuse rouge ou bolus, Goumoens-le-Jux (VD).

Fig. 31.4. Formation argileuse jaune ou bolus, Neunkirch (SH).

Fig. 31.5. Concrétion ferrugineuse amorphe, Les Molliets (Salève, France).

Fig. 31.6. Concrétion ferrugineuse amorphe, Lausen (BL).

Fig. 31.7. Calcaire ou raitsche, Boécourt (JU)

Fig. 31.8. Brèche de remplissage, Grande Gorge, (Salève, France)

Fig. 31.9. Sables blancs, carrière de Vovray en Bornes (Salève, France).

Fig. 31.10. Affleurement stratiforme complexe, Ferme des Lavois à Boécourt (JU): la zone riche en pisolithes apparaît en brun sombre dans les argiles rouges (Eschenlohr et Serneels 1991, 29-35).

Fig. 31.11. Affleurement de remplissage karstique argileux, carrière entre Courrendlin et Choindez (JU).

Fig. 31.12. Affleurement de remplissage sableux, carrière de Vovray en Bornes (Salève, France).



Il est possible qu'une partie des concrétions qu'elles contiennent proviennent du démantèlement du Sidérolithique. Plus vraisemblablement, elles attestent que les conditions de formation des pisolithes étaient encore réunies au cours du Plio-quaternaire dans certaines régions du Jura.

### Caractères chimiques et aspects miniers

La composition chimique du Sidérolithique varie très fort en fonction des produits analysés. Les minerais de fer, en particulier après lavage des pisolithes, présentent par contre les mêmes caractéristiques (fig. 29). C'est un minerai à gangue argileuse donc riche en alumine. La silice est assez variable. La teneur en fer est supérieure à 40%. Le manganèse est le seul élément mineur important. Si la teneur moyenne est basse, localement le minerai peut être enrichi. Certaines analyses donnent plus de 20% MnO. Le phosphore et le soufre sont très bas.

Les minerais sidérolithiques sont généralement des roches meubles affleurantes. Par contre, la plupart des gisements ont une extension limitée et les zones riches sont discontinues. Seul le grand gisement de la vallée de Delémont est recouvert par une forte épaisseur de terrains plus jeunes. Au XIX<sup>e</sup> siècle et sans doute avant, il a été exploité en puits et galeries.

## Les minerais oolithiques

### Les oolithes

Les oolithes ferrugineuses sont de petites concrétions constituées de minces couches entourant un noyau détritique ou clastique. Elles présentent donc une structure concentrique typique. A l'intérieur de chaque couche, on peut parfois obser-

ver le développement d'une structure radiaire. Le diamètre est généralement inférieur à 1 mm. La composition minéralogique est très variable. Les oolithes ferrugineuses sont généralement centrées sur un débris clastique, grain de quartz ou bioclaste. Les écorces sont constituées d'oxydes (hématite, limonite), de carbonates (sidérite) ou de silicates de fer (chamosite et autres chlorites). Elles sont prises dans une gangue calcaire ou marneuse. La proportion d'oolithes dans la roche est extrêmement variable (de quelques % à plus de 90%) et sera donc un des facteurs essentiels de l'enrichissement du minerai.

Ce sont des sédiments marins de faible profondeur (haute énergie) déposés en couches continues et relativement épaisses. L'origine du fer qui se trouve piégé dans les sédiments reste discutée.

Des couches de ce type peuvent se développer sur de grandes surfaces, comme en Lorraine (minette). En Suisse, l'extension des zones riches est plus limitée.

### Répartition stratigraphique et géographique

Au cours du Jurassique supérieur, plusieurs niveaux à oolithes ferrugineuses se sont formés (fig. 33). Le contenu en fer est extrêmement variable. Les principaux gisements se trouvent dans la partie orientale de la chaîne du Jura (fig. 30). Une série de pointements de moindre importance existent dans les Alpes (zone Helvétique).

Dans le Jura, le gisement principal se trouve dans le Callovien et l'Oxfordien du Fricktal, entre Herznach et Wölfinswil AG (Fehlmann et Rickenbach 1962, 13-34; Jeannot 1951; Frei 1952). D'autres occurrences, souvent plus petites et moins riches, se trouvent dans le sud du canton de Schaffhouse dans le Callovien inférieur et dans le Bajocien (Fehlmann et Rickenbach 1962, 45-49 et 53). Ces couches se prolongent en Allemagne. Enfin, l'Aalénien, le Toarcién et le Domérien sont parfois minéralisés (Wittnau AG; Fehlmann

Sous-Système	Etage	Horizon	Schaffhouse	Argovie	Autres
MALM	OXFORDIEN	Cordatus	x	x	
		Lamberti	x	xxx	x
DOGGER	CALLOVIEN	Anceps-Althea	x	xxx	x
		Macrocephalus	x	x	
	BARTHONIEN	Varians			
		Spathkalk		x	
		Hauptrogenstein			
	BATHONIEN	Blagdeni			
		Humphresi	x		
		Sauzei-Sowerbyi	x	x	
	AALÉNIEN	Concavus-Murchisonae	x	x	x
		Opalinuston			
LIAS	TOARCIEN			?	
	DOMÉRIEN			?	

Fig. 33. Répartition stratigraphique des principaux niveaux à oolithes ferrugineuses du Jura suisse. D'après Fehlmann et Rickenbach 1962, tab. 1.

et Rickenbach 1962, 45). D'autres localités de moindre importance et surtout moins bien connues, existent le long de la chaîne du Jura, en particulier au N du plateau des Franches-Montagnes (Montfaverger JU).

Dans les Alpes, on retrouve les couches du Dogger, plissées et métamorphosées. De petits gisements s'échelonnent depuis la vallée du Rhône jusqu'à celle du Rhin (Fehlmann et Rickenbach 1962, 58-84).

Les minerais alpins sont caractérisés par le développement de silicates de fer (chlorites) dans les oolites en raison du métamorphisme qui affecte ces régions. Les gisements principaux sont ceux de Chamoson VS (Déverin 1945, 23-40; Fehlmann et Rickenbach 1962, 61-76; Delaloye 1966) et de l'Erzegg-Planplatte BE (Déverin 1945, 41-60; Tröhler 1966). D'autres occurrences existent, en particulier dans le Lauterbrunnental BE, dans l'Urbachtal BE, autour de la Windgälle UR et au Glärnisch GL.

### Les caractères chimiques principaux et les aspects miniers

Les teneurs en fer de ces minerais sont relativement basses (20-40%; fig. 29). La gangue est en général riche en carbonates dans les minerais du Jura. Ces minerais sont pauvres en manganèse. Le phosphore peut être assez élevé, il est toujours présent (0,5%).

Ce sont des couches d'extension assez importante et les zones minéralisées se suivent sur plusieurs kilomètres dans le Jura. Les roches ne sont pas très dures et relativement faciles à exploiter. Un chauffage préliminaire du minerai permet de détruire les carbonates et d'enrichir considérablement le concentré.

Dans les gîtes alpins, la géométrie est moins prévisible et l'extension des gisements plus limitée. La minéralogie rend le traitement plus difficile. La roche est plus dure et les conditions d'accès délicates.

## Les autres minerais en Suisse

### La limonite du Valanginien

Au Crétacé, la sédimentation marine se poursuit dans le Jura. Aux calcaires de plate-forme du Malm succèdent des niveaux plus marneux. Au cours du Valanginien supérieur, se déposent des calcaires oolithiques, bioclastiques, de teinte ocre et renfermant quelques intercalations de marnes, c'est la formation des «Calcaires Roux» (Guillaume 1966, 138-9; Steinhäuser et Charollais 1971, 46-8). Ils atteignent 30 m d'épaisseur au maximum. La patine ocre est due à la présence d'hydroxydes de fer dans la roche. Dans la partie centrale du bassin, la limonite est un minéral constitutif. Le faciès de la «limonite de Métabief» se rencontre dans une aire géographique limitée entre le lac de Joux VD, Sainte-Croix VD, et Nozeroy, France (fig. 34).

Ce faciès est constitué de calcaires à oolites et débris clastiques, eux aussi plus ou moins ferrugineux (Cayeux 1922, 844-863, fig. 71-72, 77-78). Il est interprété comme le

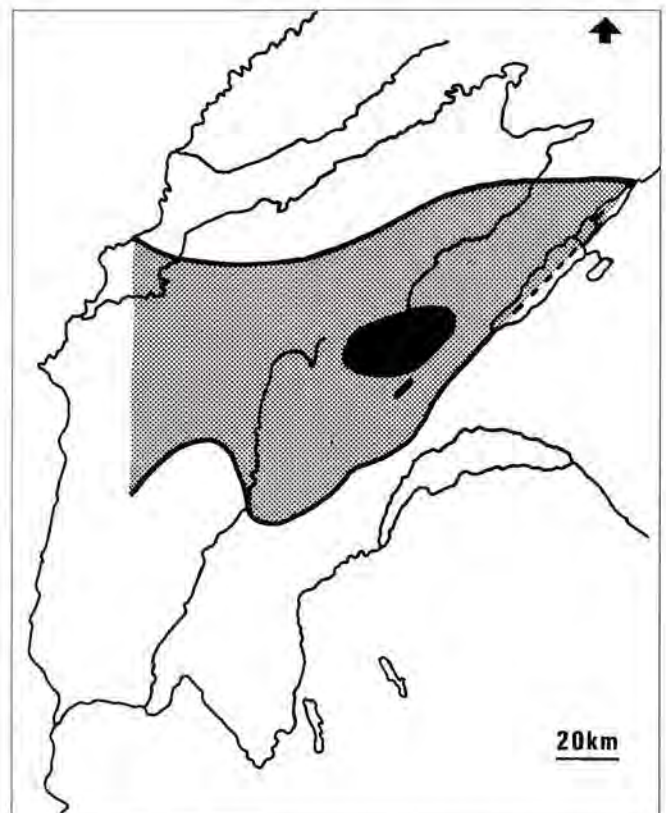


Fig. 34. Extension du faciès de la limonite du Valanginien (gris) et zone d'exploitation de la limonite de Métabief (noir).

résultat d'une sédimentation plutôt détritique ou tout au moins, témoignant d'un intense remaniement. C'est un minerai pauvre en fer et riche en calcium (fig. 29). Les données chimiques sont anciennes et peu nombreuses.

L'exploitation fut intense dans le Jura français au XIX<sup>e</sup> siècle. Il n'existe que quelques descriptions anciennes de ces travaux (Rosenthal 1990, 33-4). Sur le versant suisse, ce minerai fut extrait dès le Moyen Âge (Pelet 1983, 315-318).

### Le Mont Chemin et les amas de magnétite

Dans les Alpes suisses, plusieurs gisements sont constitués par des amas de skarns riches en magnétite massive. Les paragenèses associées sont fort complexes. L'origine de ces gîtes est soit magmatique soit liée au métamorphisme de contact. Ce sont des minerais très riches en fer (> 60% Fe; fig. 29). Les sulfures présents en diminuent la qualité.

Le gisement du Mont Chemin VS, près de Martigny, est le plus important (Hugi *et al.* 1948, 9-68; Wutzler 1983; Marschall, en prép.). D'autres se situent dans la région du Simplon VS (Hugi *et al.* 1948, 109-13) et dans le Val d'Aoste (Dousset et Tollardo 1981, 51-6).

### Le Gonzen et les minerais à hématite et sidérite

Des veines de sidérite et/ou d'hématite existent dans les Alpes en Valais, au Tessin et dans les Grisons (Val Tisch GR

et Val Ferrera GR; fig. 29 et 30). On leur attribue généralement une origine magmatique mais les remobilisations métamorphiques jouent également un rôle. Ce sont généralement des gisements de faible tonnage (Eugster 1923; Heim 1923; Brun 1988; Wenger et Steiger 1990, 24). Les teneurs sont très variables. Les difficultés d'accès compliquent l'exploitation.

Enfin le gisement d'hématite massive, de magnétite et de sidérite du Gonzen SG occupe une place à part en raison de son importance exceptionnelle en terme de volume par rapport aux autres gîtes des Alpes suisses (Oberholzer 1923; Epprecht 1946). Son origine est volcano-sédimentaire avec une composante métamorphique liée à la formation des Alpes (Pfeifer *et al.* 1988). Ce minerai est très riche en fer et, dans certaines parties du gisement, en manganèse (fig. 29). C'est un excellent minerai pour l'industrie moderne.

### Divers

Certains niveaux du Crétacé contiennent des nodules riches en sulfures diagenétiques. Dans des conditions d'altération particulières, on peut envisager un enrichissement en fer notable (Bertrand et Weidmann 1979). Des gîtes d'accumulation secondaire ont pu se former (placers). Il existe aussi des veines de sulfures dans lesquelles la pyrite est généralement un constituant important (Della Valle 1992). L'altération par les agents atmosphériques a pu mener à la constitution de faibles volumes d'oxydes et d'hydroxydes de fer (chapeaux de fer). Il faut noter que compte tenu de la présence des glaciers dans les Alpes et des dimensions restreintes des gisements primaires, ce phénomène n'a pas pu avoir une grande ampleur. De petits placers de magnétite ont pu se former localement dans les régions où les roches basiques comme les ophiolites sont abondantes (moraine de Praffleuri VS; Hubacher W., communication personnelle). Le développement de minerai de fer liée aux marais ou aux tourbières est peu vraisemblable mais pas impossible dans certaines parties du Jura mal drainées.

Si ce genre de formation n'a qu'un intérêt anecdotique pour le métallogéniste, à l'échelle de l'exploitation antique, ce sont autant de sources possibles.

## Archéologie minière et histoire de l'exploitation des minerais suisses

L'histoire de l'exploitation des mines de fer suisses est presque entièrement tributaire des sources écrites (Fehlmann 1932; Fehlmann et Rickenbach 1962, 85-116). L'archéologie minière n'apporte que des éléments extrêmement ténus et isolés.

Pour la période de l'âge du Fer jusqu'au XV<sup>e</sup> siècle, ce sont les données archéologiques concernant les ateliers métallurgiques qui sont la source d'information principale.

### Les rares découvertes archéologiques minières

A la Bossena (Ferreyyres VD), une petite exploitation minière est directement liée à un atelier de réduction du VII<sup>e</sup> siècle ap. J.-C. (Pelet 1993, pp. 87-88; p. 98). Aux Boulies (Boécourt JU), les traces d'extraction sont mal définies et il n'est pas possible de les rattacher stratigraphiquement au site. Elles peuvent lui être largement postérieures (Eschenlohr et Serneels 1991, 27-47).

Ailleurs, c'est seulement par l'association spatiale d'amas de scories et de structures d'extraction (puits, minières) que l'on peut postuler une relation. A. Quiquerez mentionne que les galeries de mines de la vallée de Delémont ont, à plusieurs occasions, recoupé des travaux anciens souterrains (Quiquerez 1866, 5-7). Il les attribue aux Romains mais les éléments de datation font défaut. Au Gonzen (Sargans SG), c'est encore aux Romains que l'on attribue les travaux à ciel ouvert mais sans aucune base scientifique. Il en va de même dans la plupart des autres cas mentionnés par la tradition (Mont Chemin VS, etc).

Les données archéologiques sur les mines sont donc quasiment inexistantes pour les périodes anciennes. Les travaux les plus anciens sont généralement détruits par l'avancement de l'exploitation. Il y a peu d'espoir d'obtenir de nouvelles données car seule une exploitation minière moderne serait à même de recouper des anciens travaux inconnus. Or celle-ci est complètement arrêtée en Suisse depuis une trentaine d'années.

Des travaux de surface des XVI<sup>e</sup>-XIX<sup>e</sup> siècles sont encore visibles dans certaines régions (Birchmeier 1986; Hofmann 1991 et 1992; Doswald 1992). Rares sont les mines de fer où des galeries anciennes sont accessibles (Mont Chemin VS).

### Les mines de fer historiques

Ce n'est qu'à partir du XVI<sup>e</sup> siècle que la documentation historique permet de cerner l'activité minière, essentiellement sur la base de demandes de concessions et grâce aux comptes des entreprises métallurgiques (Fehlmann 1932). A cette période, le tableau est éloquent: pratiquement tous les types de minerai et toutes les régions sont exploités.

La production va augmenter lentement pendant les deux siècles suivants. La première moitié du XIX<sup>e</sup> siècle, est la période d'activité la plus intense. Par la suite, les minerais suisses seront lentement remplacés par des matières premières importées. Pendant les deux guerres mondiales, les ressources locales seront à nouveau mises à contribution (Gonzen, Herznach, Mont Chemin). La mine du Gonzen cesse son activité en 1966 (Epprecht 1991, 78-79).

Il semble que le XVI<sup>e</sup> siècle corresponde à une véritable période de développement mais les prémices sont déjà perceptibles au siècle précédent dans plusieurs régions. Les documents historiques ne permettent guère de remonter plus haut dans le temps.

### 3

## LA CHAÎNE 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

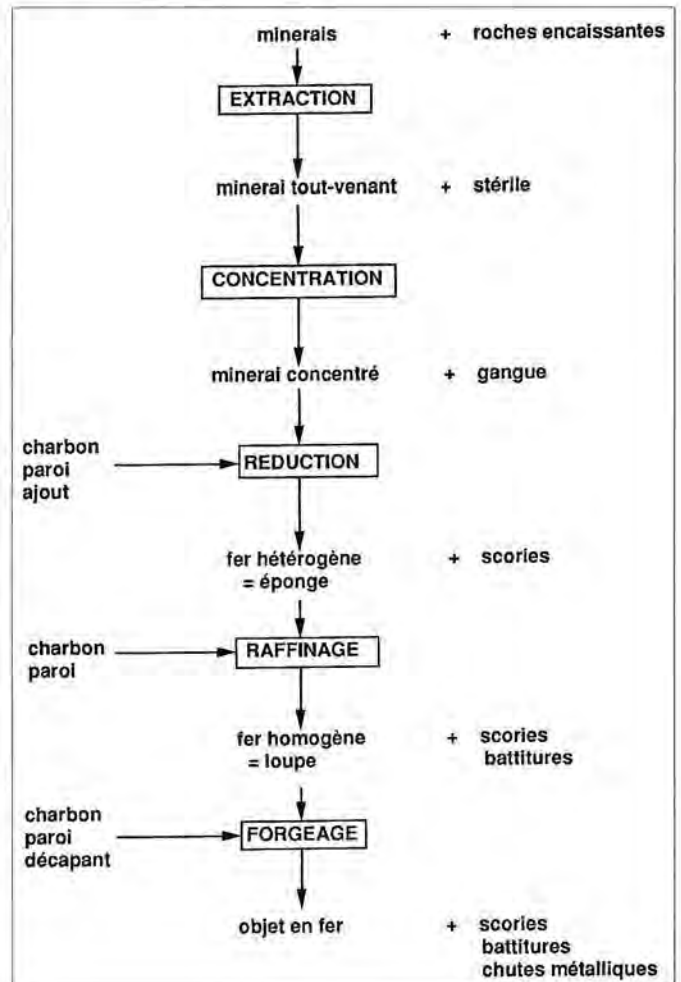


Fig. 35. Schéma général de la chaîne opératoire de la sidérurgie (méthode directe de réduction). D'après GSAF 1991a.

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 XIX<sup>e</sup> 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

À 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 (bocard, 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 transformés en oxydes par dégagement du CO<sub>2</sub> (décarbonation). 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 microfissures. 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. Eschenlöhr 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<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 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<sub>3</sub>O<sub>4</sub> en FeO. À 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<sub>3</sub>O<sub>4</sub> en Fe, l'oxyde FeO n'étant pas stable.

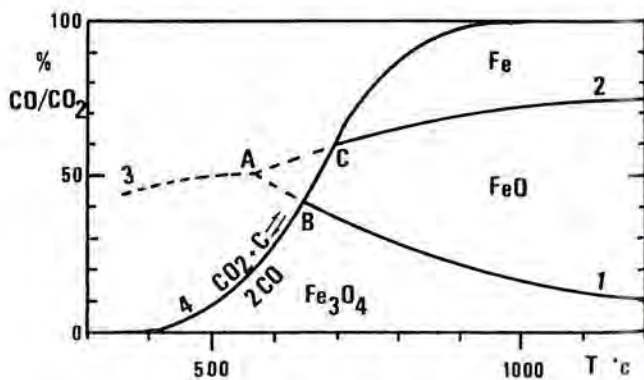
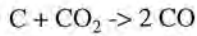


Fig. 36. Réactions entre les oxydes de fer et un mélange gazeux CO/CO<sub>2</sub> en fonction de la température.

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.



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<sub>2</sub> 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<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 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<sub>2</sub>. 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<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 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<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO-FeO<sub>n</sub> 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<sub>2</sub> 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 / MINÉRAI	COMPORTEMENT MINÉRAI / SCORIE
GUEULARD	300 - 400	dilution dans l'air		
		CO <sub>2</sub> ne se régénère plus	④ $3 \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CO} \rightarrow 2 \text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO}_2$	
			⑤ $\text{Fe}_3\text{O}_4 + 4 \text{CO} \rightarrow 3 \text{Fe} + 4 \text{CO}_2$ (avec CO/CO <sub>2</sub> élevé)	
CUVE	600 - 700		⑥ $\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO} \rightarrow 3 \text{FeO} + \text{CO}_2$	
		③ $\text{CO}_2 + \text{C} \rightarrow 2 \text{CO}$	⑦ $\text{FeO} + \text{CO} \rightarrow \text{Fe} + \text{CO}_2$	
	1100 - 1200			liquéfaction
TUYÈRE	1100 - 1400	② $\text{CO}_2 + \text{C} \rightarrow 2 \text{CO}$		⑧ $\text{FeO} + \text{C} \rightarrow \text{Fe} + \text{CO}$
	30 - 1400	① $\text{O}_2 + \text{C} \rightarrow \text{CO}_2$		
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 (Schaber 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 consommé, 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.

À 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 (Bieleń 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 scorifiées et des morceaux informes de scorie. Enfin, le martelage provoque la

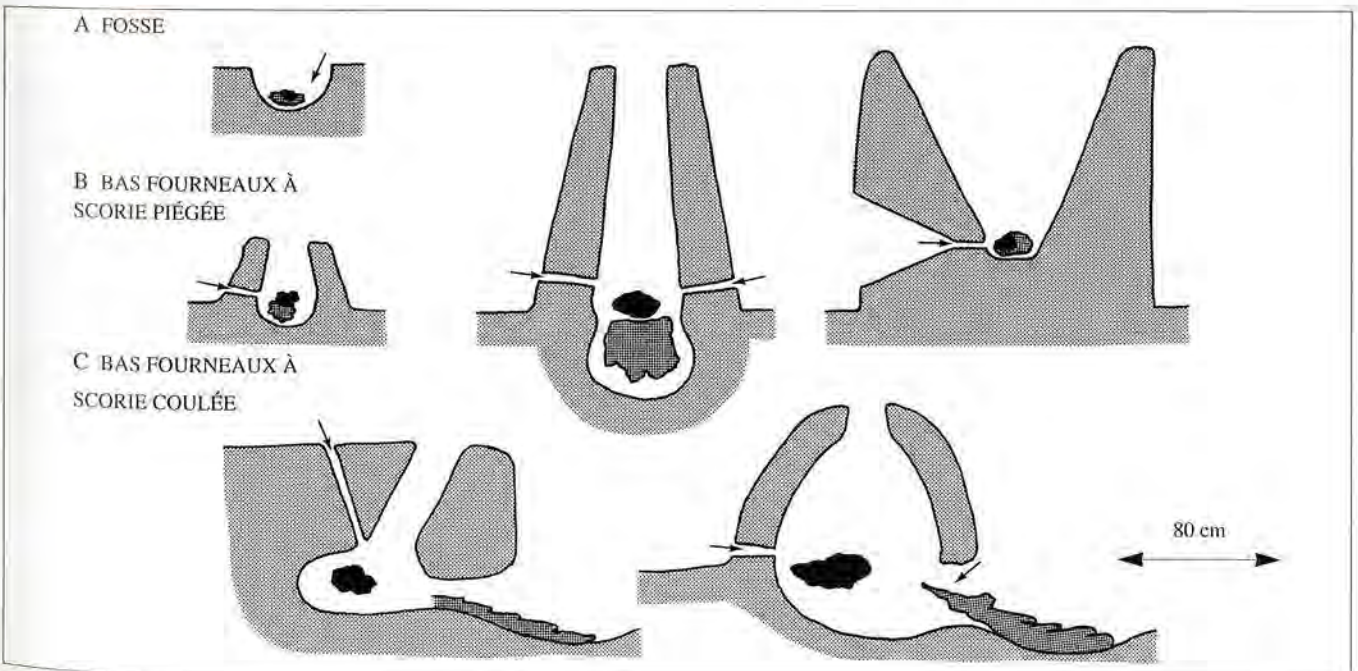


Fig. 38. Principales familles de bas fourneaux.

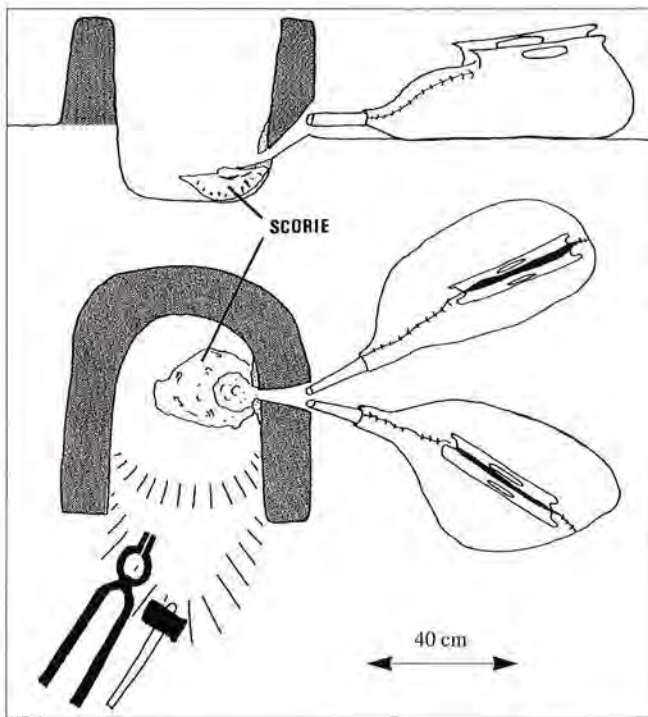


Fig. 39. Schéma d'un foyer de raffinage. D'après GSAF 1991a.

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.

À 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 (McDonnell 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 matériau 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'Ellingham (fig. 40) représente la variation d'enthalpie libre ( $\Delta G^\circ$ ) en fonction de la température (T). Chaque droite correspond à la fonction  $\Delta G^\circ$  pour un couple métal-oxyde. A une température T donnée, on peut réduire l'oxyde AO à l'aide de l'élément B si  $|\Delta G^\circ|$  de B est supérieure à  $|\Delta G^\circ|$  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,  $|\Delta G^\circ|$  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 per-

due. 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.

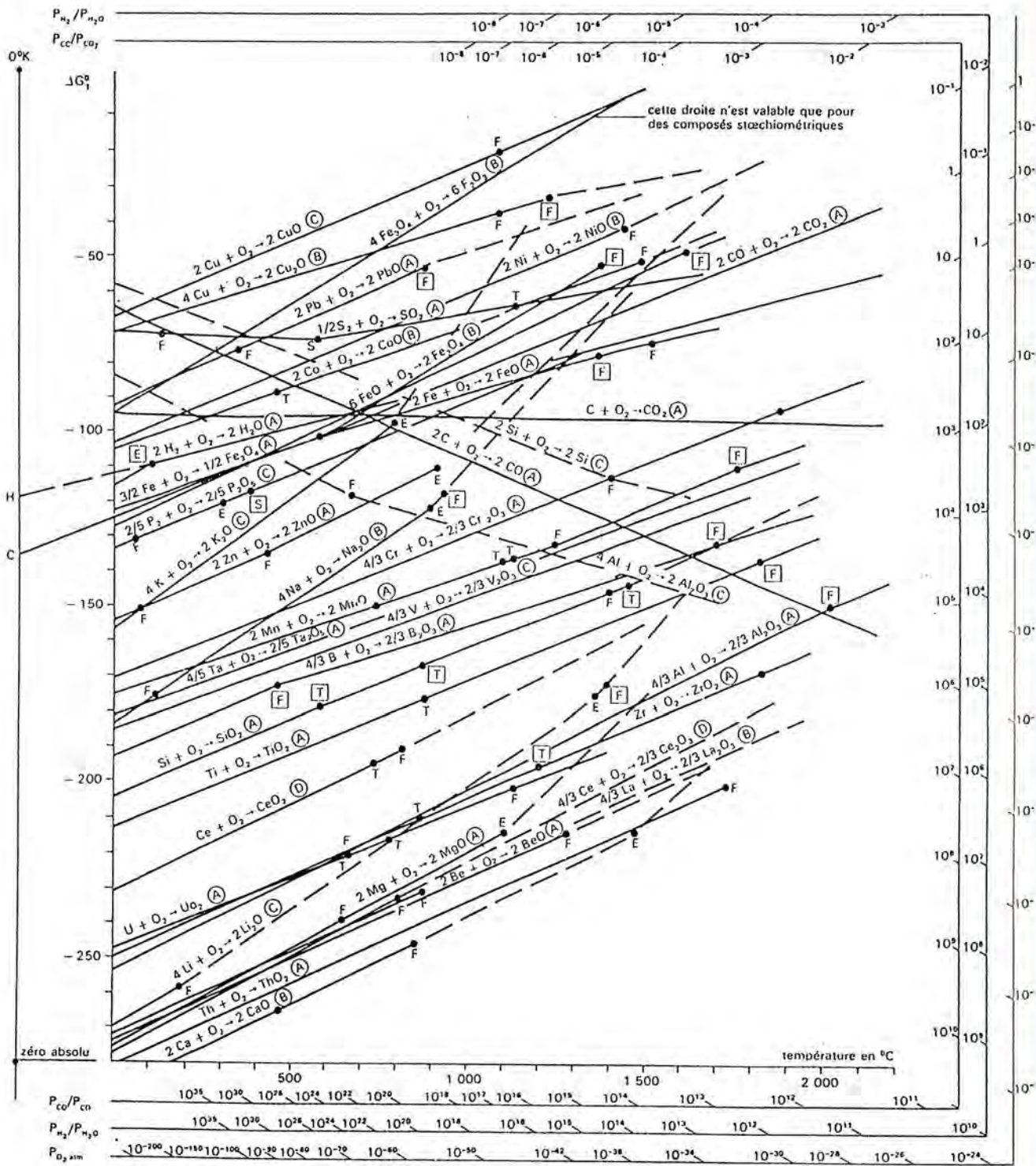
Les scories de forge se constituent de la même manière que les déchets du raffinage, mis à part que la contribution de la scorie de réduction est mineure et que le rôle des décapants est éventuellement prépondérant.

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 inconnus. 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.



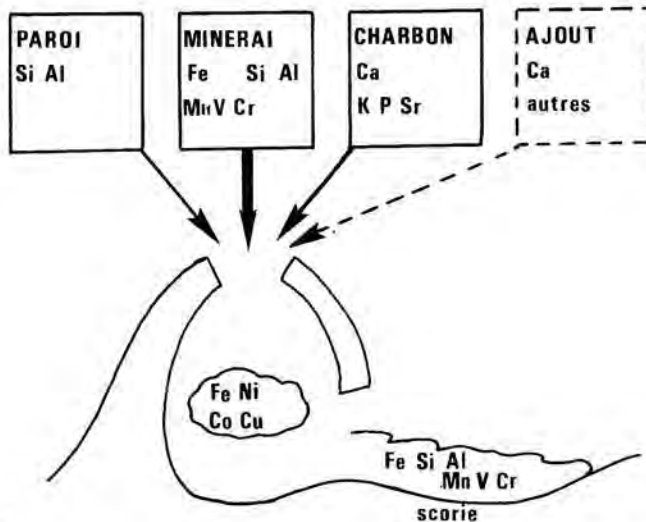
Précision approximative (à 25 °C)

- (A) ± 1 kilocalorie
- (B) ± 3 kilocalories
- (D) ± 10 kilocalories
- (C) > ± 10 kilocalories

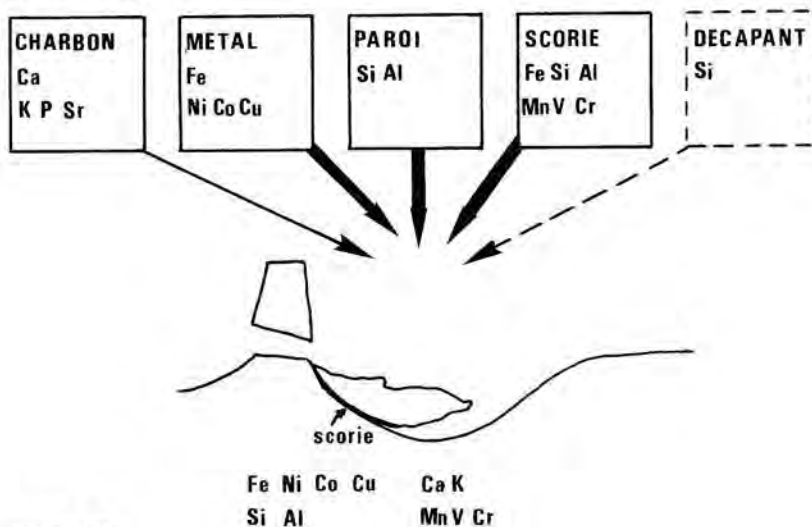
changement d'état	élément	oxyde
point de fusion	F	(F)
point d'ébullition	E	(E)
point de sublimation	S	(S)
point de transition	T	(T)

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

### REDUCTION



### RAFFINAGE



### FORGE

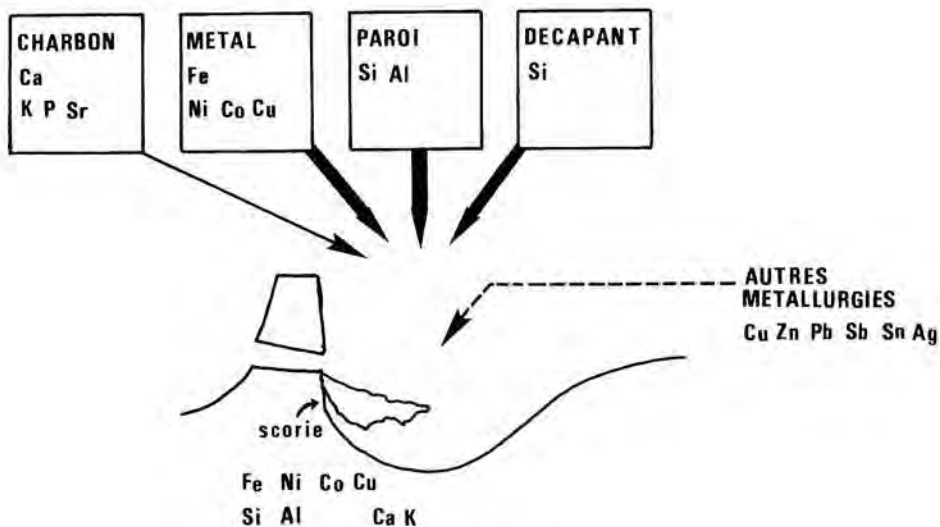


Fig. 41. Essai de modélisation du comportement des éléments chimiques au cours du processus sidérurgique, basé sur les données fournies par les analyses de scories de Suisse occidentale.

II  
LES VESTIGES MÉTALLURGIQUES  
DE SUISSE OCCIDENTALE

## Avertissement

Pour faciliter la lecture des chapitres décrivant les différentes régions étudiées, il a nous paru utile de placer en tête de cette partie quelques données pratiques.

Chaque zone fait l'objet d'une présentation générale, suivie d'une évaluation des ressources minières potentielles. Les sites où existent des traces de métallurgie sont ensuite présentés avec une discussion à propos des scories, de la morphologie et de la chimie. Les analyses chimiques sont données en annexe (Annexes 3 à 7).

### Les plans de sites

Les plans schématiques représentant la position topographique des ateliers de réduction sont établis d'après les relevés sur le terrain. Sauf indication spéciale, les signes convention-

nels ont toujours le même sens (voir légende commune des plans de sites). La numérotation renvoie aux tableaux récapitulatifs et aux cartes générales.



Rochers calcaires



Affleurement de Sidérolithique



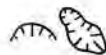
Scories regroupées en amas



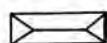
Scories éparses



Talus, monticule



Creusement, dépression



Bâtiment



Muret, amas de pierres



Place à charbon



Etang



Lit de ruisseau



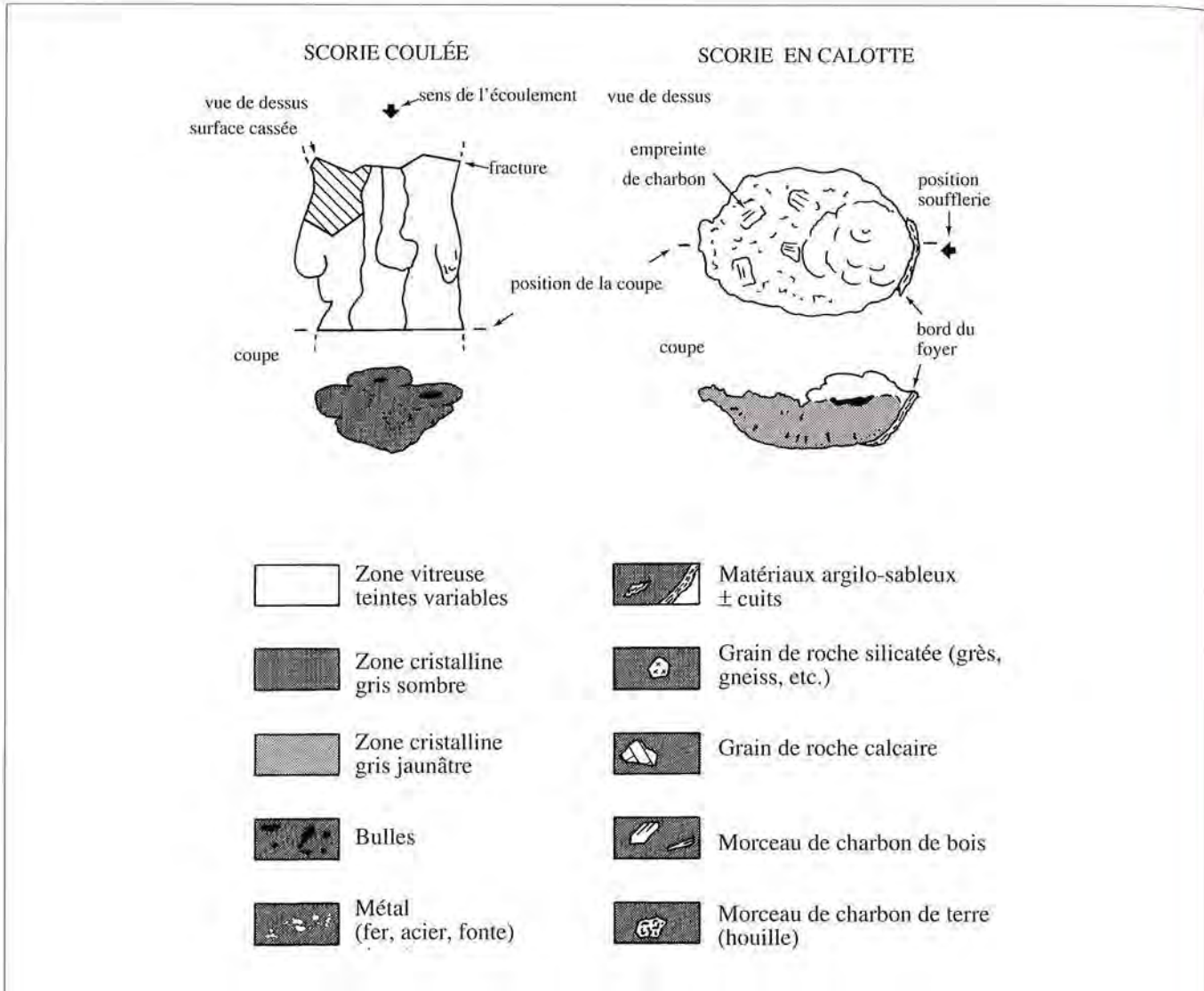
Chemin, route

Légende commune aux plans schématiques de sites.

### Les dessins de scories

Les dessins de scories et autres matériaux liés à la métallurgie ont tous été exécutés à l'échelle 1:1. Dans la mesure du possible, les normes et les légendes sont unifiées (voir légende commune des dessins de scorie). Il n'a cependant pas été possible de tenir compte graphiquement des innom-

brables variations subtiles de teinte ou de texture qui sont observables. Chaque figure est donc accompagnée d'un descriptif précis qui nuance la légende générale. Les numéros des échantillons permettent, le cas échéant, de retrouver dans les Annexes 3 à 7 les résultats d'analyse correspondants.



Légende commune aux dessins de scories.

## LE DISTRICT SIDÉRURGIQUE DU MONT SALÈVE (SAVOIE, FRANCE)

### Le Mont Salève

LE Salève forme un relief allongé de 20 km de long, situé au SE de Genève, de Cruseilles à Etrembières (fig. 42). Ses hautes falaises dominent de plus de 600 m la plaine du Rhône qui s'étend à l'O. Le sommet est formé par un dos d'âne de 2 km de large environ dont l'altitude est comprise entre 1200 et 1300 m. A l'E, des pentes boisées plus douces descendent vers le plateau des Bornes. Le segment le plus important, la chaîne des Pitons et le Grand Salève, est séparé d'un sommet moins élevé, le Petit Salève. L'Arve contourne ce relief par le N vers Genève. Au S de Cruseilles, cette structure se prolonge jusqu'aux gorges du Fier par une suite d'éminences plus basses.

La première description géologique du Salève est l'œuvre de H.-B. de Saussure (Saussure 1779-96, vol.1, 163-201). E. Joukowski et J. Favre publient une synthèse moderne avec un levé cartographique précis mais établi sur une base topographique sans courbes de niveau (Joukowski et Favre 1913). Les cartes géologiques disponibles sont les feuilles Annecy-Bonneville (Charollais *et al.* 1986), Seyssel (Donze et Enay 1972) et Genève (Lombard et Paréjas 1965). Elles ne couvrent pas l'ensemble du massif. Ce travail est en cours, sous la direction de J. Charollais. Une bibliographie géologique détaillée est disponible (Amberger *et al.* 1988).

Du point de vue géologique, le Salève fait partie de la chaîne du Jura (fig. 43). La série sédimentaire mésozoïque débute au Kimméridgien (éventuellement dès le Séquanien) et s'étend jusqu'au Barrémien. Les calcaires dominent largement la lithologie avec quelques alternances marneuses. Le Crétacé supérieur manque et la surface du Barrémien a vu se développer un karst. Le remplissage de cette structure, essentiellement des grès ferrugineux, est attribué au Sidérolithique sans qu'une datation ait pu être établie. Les poudingues de Mornex sont également rattachés au Tertiaire (Oligocène?).

La molasse entoure de toutes parts le massif (Rupélien-Chattien). Les glaciers quaternaires ont laissé des dépôts

importants en plaine et quelques lambeaux morainiques ainsi que des blocs erratiques au sommet (Charollais *et al.* 1988, 5-16; Lombard 1965, 7-12). Les couches ont un pendage faible à l'E, parallèle à la pente générale du coteau. Le flanc O est pratiquement vertical, localement renversé et faillé.

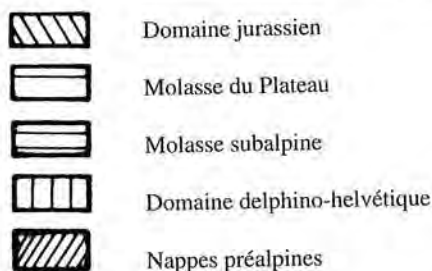
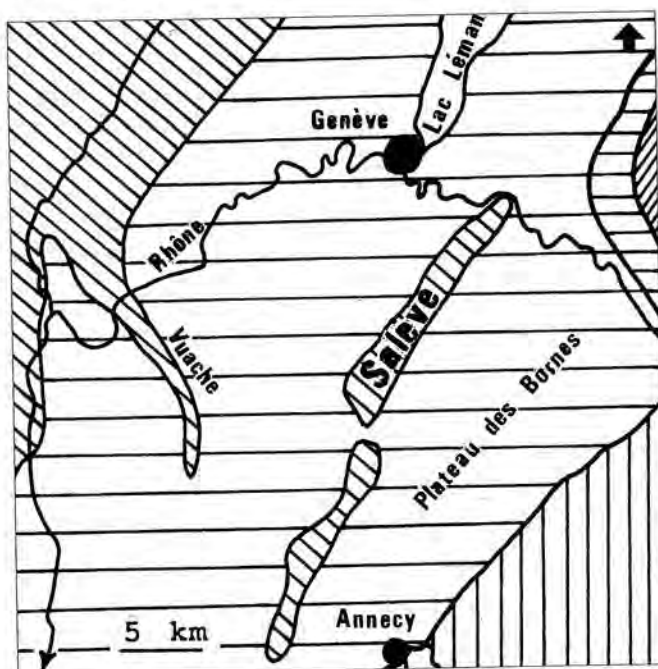


Fig. 42. Carte tectonique simplifiée du Salève.

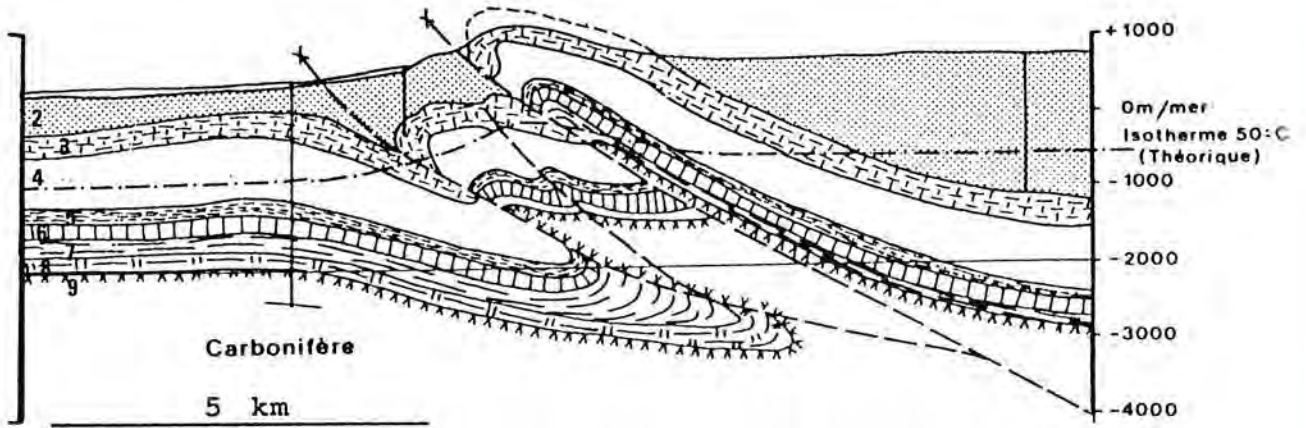


Fig. 43. Profil géologique schématisé à travers le Salève et les terrains adjacents. Extrait du profil géologique schématisé du canton de Genève (Amberger, 1982, p.24-25). Echelle 1:100 000

- |    |                                      |    |  |
|----|--------------------------------------|----|--|
| 1. | Dépôts meubles quaternaires.         | 6. | Jurassique moyen calcaire et marno-calcaire. |
| 2. | Molasse tertiaire.                   | 7. | Jurassique inférieur marneux.                |
| 3. | Crétacé calcaire.                    | 8. | Jurassique inférieur calcaire.               |
| 4. | Jurassique supérieur calcaire.       | 9. | Trias évaporitique.                          |
| 5. | Jurassique supérieur marno-calcaire. |    |  |

La structure du Salève fut initialement décrite comme un plissement anticlinal. Cette structure est considérée actuellement comme une lame chevauchante liée à un accident du socle (fig. 43; Amberger 1982, 24-25; Amberger *et al.* 1988, 23-32). Le premier bombement semble postérieur au Crétacé sup., mais précède le dépôt des grès sidérolithiques. Au début de l'Oligocène un relief important se forme qui provoque l'érosion de l'Eocène et du Crétacé sup., dénudant l'Urgonien. Le bombement se poursuit pendant le dépôt de la molasse chattienne et jusqu'au Pliocène. Des poussées tardives sont responsables du fractionnement en plusieurs segments (Lombard et Paréjas 1965, 32-3).

Le Salève est peu propice à l'établissement humain. Le climat est rude, le sommet difficile d'accès et les pentes raides. La montagne elle-même n'a livré que des traces sporadiques d'occupation sauf en ce qui concerne l'exploitation du minerai de fer (fig. 44). Les grottes de la falaise NO ont néanmoins été fréquentées de tout temps (refuge en période troublée, Montandon 1922, 184-7; Gallay 1973, 55-7; Broise 1974, 86-8). C'est dans le secteur du Pas de l'Echelle, permettant la circulation au travers du massif, que se concentrent la plupart des trouvailles isolées.

Au Paléolithique, avec le retrait des glaciers, l'homme

s'installe au bas des pentes dans les zones de blocs éboulés («station de Veyrier»: Sauter 1973, 48-50; Chaix 1988, 163-8). Au Néolithique, les habitants se fixent sur les bords du lac. L'intérieur du pays et la montagne, semblent délais-

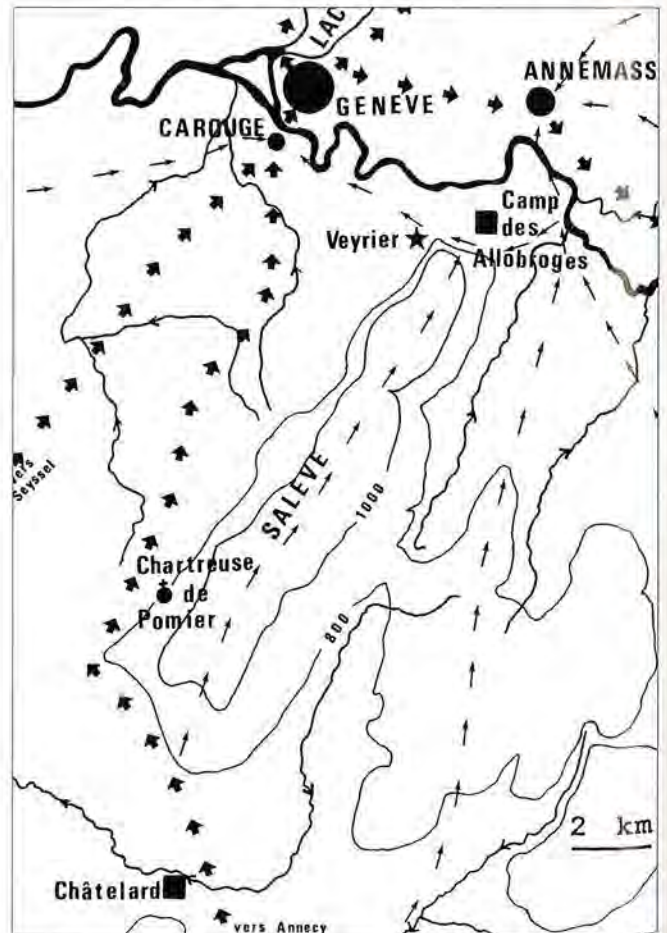


Fig. 44. Carte de situation des principaux sites archéologiques mentionnés dans le texte. 1:200 000.

- \* Station paléolithique
- Camp protohistorique
- Agglomération romaine
- ▣ Voie romaine principale
- Itinéraire romain secondaire
- ⊕ Abbaye médiévale

sés. Plusieurs monuments mégalithiques se trouvent dans la plaine à l'E du Salève (Gallay 1973, 51-53). Les populations de l'âge du Bronze préféreront également les bords du lac.

A la fin de l'âge du Fer, un camp retranché s'installe sur le sommet du Petit Salève, le «Camp des Allobroges» (Petrus 1970, 7-8; Gallay 1973, 53-7; Broise 1984-7, 264-7).

A l'époque romaine, l'occupation de l'intérieur du pays devient plus dense en plaine et autour des bourgades (Broise 1974; Paunier 1981, 279-87). Le Salève est encadré par des axes de circulation. Aucun établissement n'est signalé au sommet ou sur les pentes, mis à part un petit bâtiment romain à l'entrée du hameau de Bas-Mornex (Broise 1984-7, 267-8).

Les vestiges du Haut Moyen Age se limitent à quelques tombes aux points de passage (La Croisette, Broise 1984-7, 269) alors que les nécropoles sont nombreuses dans la plaine et que Genève connaît un éclat particulier à cette époque.

Au Moyen Age, le Salève abritera une fondation monastique importante, la chartreuse de Pomier (1170). Les moines détiendront des droits sur l'ensemble de la montagne. Plusieurs maisons-fortes et châteaux seront bâtis sur les pentes (Guichonnet 1988, 55-56).

Le Salève est fréquenté dès le Paléolithique, mais l'occupation reste sporadique et concerne essentiellement les grottes de la falaise NO (Gallay 1973, 58). La montagne apparaît comme un secteur inhabité dominant une région peuplée. Par contre une intense activité, liée aux mines et à la métallurgie du fer, s'est développée tant au sommet que sur le versant SE. A ce jour, aucune découverte ne permet de dater les vestiges sans ambiguïté. Ils sont communément mis en relation avec le retranchement du Petit Salève et quelques maigres découvertes de la fin de l'âge du Fer (pp. 68-69, site 17). L'itinéraire qui parcourt le sommet porte le nom de «Vy d'Etraz» ce qui pourrait témoigner de son ancienneté.

## Le minerai

C'est la formation communément attribuée au «Sidérolithique» par les géologues qui a fourni le minerai de fer aux anciens métallurgistes du Salève. C'est la seule source possible identifiée dans cette aire géographique. Par ailleurs, les traces d'activité minière observées et les fragments de minerai recueillis parmi les scories confirment cette hypothèse.

Cette appellation recouvre, au Salève, des roches diverses. Les grès quartzeux très purs sont de loin les plus abondants, mais on observe également des grès argileux et des argiles. Localement, le fer, sous forme de concrétions d'oxydes et d'hydroxydes, peut être abondant. La forte proportion de dépôts gréseux est frappante. Il s'agit d'une différence notable avec les gisements sidérolithiques du reste du Jura.

Sur le terrain, le Sidérolithique affleure assez mal, sauf dans les carrières le long de la route entre Cruseilles et Vovray-en-Bornes. Les contacts entre ces roches et leurs encaissements sont rarement visibles. Les limites cartographiées sont donc imprécises. Les débris de Sidérolithique remaniés abondent. Ils sont souvent la seule indication d'un gisement mais il faut tenir compte des déplacements dus tant à l'érosion naturelle qu'à l'exploitation.

Le Sidérolithique est bien représenté à l'extrémité SO du massif. Outre les affleurements de Cruseilles au pied de la montagne, de nombreux pointements occupent environ 20% de la surface entre L'Abergement et Le Plan du Salève. Il sont plus rares au-delà, vers Les Pitons. Une bande s'étend de Cruseilles jusqu'à Vovray. Plus au N, elle se prolonge de manière discontinue. Un autre groupe d'affleurements se situe au NE de La Croisette (Amberger *et al.* 1988, fig. 21).

### Formation des grès du Sidérolithique

L'âge de cette formation n'est pas connu avec certitude. Très fréquemment, les grès se trouvent au-dessus des calcaires du faciès Urgonien. Sur quelques affleurements, les roches sous-jacentes ont été interprétées comme des sédiments du Gault (Albien, Cénomaniens; affleurement de Cruseilles : Douxami 1896; contra : Conrad et Ducloz 1977, 136; bains de Bromines : Moret 1926; Paréjas 1938, 9-10; ravin Saint-Martin : Conrad et Ducloz 1977, 134). Les grès sidérolithiques sont quelquefois surmontés par les «Poudingues de Mornex» dont l'âge est probablement Oligocène inférieur (Paréjas 1938, 23-4; Charollais *et al.* 1988, 16). Plus généralement, la molasse du Chattien se trouve au toit de cette formation (Rigassi 1957, 20-5).

Les grès sidérolithiques sont donc plus anciens que l'Oligocène inférieur et plus jeunes que les sédiments céno-maniens. Par ailleurs, des blocs de calcaire de Seewen (calcaire sublithographique, Turonien à Santonien) ont été observés dans les poudingues de Mornex. On suppose qu'ils proviennent de couches déposées sur le Salève et érodées pendant l'Oligocène. Compte tenu de ces observations, rien ne s'oppose à un âge Eocène supérieur. Cette hypothèse se trouve confortée par les arguments paléontologiques fournis par des découvertes faites ailleurs (Stehlin 1903 et 1909-10).

Le dépôt peut atteindre 40 m d'épaisseur mais il est très irrégulier et même discontinu. Les grès sont très homogènes et ne présentent pratiquement aucune figure sédimentaire, mis à part quelques rares stratifications plus ou moins horizontales. Parfois cohérents, ils sont souvent très mal cimentés et forment des sables (fig. 31.12). Ce sont des grès moyens avec quelques passées microconglomératiques. Ils peuvent contenir une faible quantité d'argiles (kaolinite et illite), des paillettes de muscovite ou des grains verts de glauconie (Conrad et Ducloz 1977, 137-8).

Ces matériaux comblent les dépressions et les cavités de la dalle calcaire de l'Urgonien, légèrement bombée par les premiers mouvements tectoniques. Ces reliefs ont pour origine une érosion karstique. Les grès s'infiltrèrent également dans des fissures et des failles qui traversent parfois les assises sous-jacentes (Joukowski et Favre 1913, 347-8).

Ces grès quartzeux sont communément interprétés comme un dépôt continental de remaniement. Les études menées sur les grains de quartz montrent un dernier épisode de transport fluvial. Le matériel détritique pourrait provenir du démantèlement des sédiments gréseux du Gault déposés dans les régions environnantes (Aubert et Le Ribault 1975, 231-40). Un apport complémentaire plus lointain, lié à

l'érosion du socle du Massif central et des grès et quartzites de sa bordure orientale, est également proposé (Conrad et Ducloz 1977, 141-2).

Toutefois, il nous paraît difficile d'admettre que ces sables se sont déposés après la formation du karst dans l'Urgonien. En effet, pour cela, il faut admettre que les sédiments du Crétacé supérieur aient été complètement érodés et que l'érosion karstique de l'Urgonien ait pu se développer. Or les Poudingues de Mornex, plus jeunes que le Sidérolithique, contiennent des éléments provenant de ces niveaux déposés sur le Salève. De plus, si les sables peuvent aisément être transportés par des inondations (Conrad et Ducloz 1977, 140), il faut envisager un mécanisme d'enrichissement en fer postérieur à leur dépôt et trouver une source pour cet élément, autre que la glauconie du Crétacé supérieur.

Une autre hypothèse est plus séduisante: les sables attribués au Sidérolithique seraient le résultat de l'altération chimique *in situ* des sédiments détritiques du Crétacé (Gault).

N° éch.	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> tot	CaO
<b>Grès sidérolithiques</b>				
DIA 101	61.40	3.57	29.00	0.13
DIA 102	85.68	0.66	11.02	0.03
SLP 151	56.16	5.55	28.67	0.18
MOL 101	80.59	3.32	12.91	0.10
<b>Concrétions amorphes, tout-venant</b>				
SLV 501	73.30	6.74	14.65	0.01
SLV 502	66.36	5.36	21.81	0.02
SLV 503	41.83	5.86	41.63	0.03
SLV 504	63.05	3.59	26.59	0.01
SLV 505	80.31	4.64	10.67	0.02
<b>Concrétions amorphes, broyées</b>				
moyenne	68.14	6.41	18.91	0.01
2 éch.				
<b>Concrétions amorphes, broyées et lavées</b>				
moyenne	67.00	6.00	22.39	0.02
4 éch.				
<b>Concrétions scoriacées</b>				
SLC 351	16.38	5.68	65.25	
SLC 352	7.76	3.96	74.92	
THU 101	15.68	2.64	72.21	
DIA 201	5.28	1.31	80.88	
DIA 202	2.79	0.88	81.76	
MOL 171	5.34	1.73	78.06	

Fig. 45. Principaux caractères chimiques du Sidérolithique du Salève.

Ceux-ci fourniraient aussi bien le quartz que le fer (dissolution de la glauconie). Cette idée avait été proposée précédemment (Collet et Paréjas 1936, 98-9).

Le karst dans l'Urgonien se serait développé sous une couverture perméable et non pas à l'air libre. Un exemple de formation comparable peut être fourni par le paléokarst du Coulon dans le Vaucluse, France (Guendon 1982, 133-59). Seule une étude détaillée de la morphologie du karst du Salève ainsi que des phénomènes d'altération au contact entre le Sidérolithique et les calcaires pourrait confirmer cette hypothèse. Le dépôt des sables serait d'âge Crétacé alors que leur «sidérolithification» pourrait être Eocène.

### Le fer dans les grès du Sidérolithique

Les grès du Sidérolithique du Salève peuvent être très purs, ils ont alors une couleur blanche. Le plus souvent, ils contiennent une quantité appréciable d'oxyde de fer. Il peut imprégner la roche de manière diffuse, ce qui la colore. La teinte reflète l'abondance du fer; elle varie d'un brun clair peu marqué à une coloration lie de vin sombre en passant par le brun foncé et le rouge brique. Quelques échantillons de grès ferrugineux ont été analysés (fig. 45 et 46). Ils présentent des teneurs très élevées en silice, relativement basses en oxyde de fer et contiennent un peu d'alumine. Les autres éléments sont quasiment absents. Il paraît impossible d'utiliser ce matériel comme minéral.

Dans d'autres cas, le fer est concentré en concrétions. Le plus souvent, ce sont des bandes centimétriques indurées, parcourant de manière désordonnée la masse des grès friables. Le fer semble être sous forme amorphe. Un tel matériau aurait pu facilement être extrait et utilisé comme minéral.

La carrière de sable sidérolithique située le long de la route départementale D15 entre Cruseilles et Vovray-en-Bornes en fournit en abondance (lieu dit Les Rasses; coor-

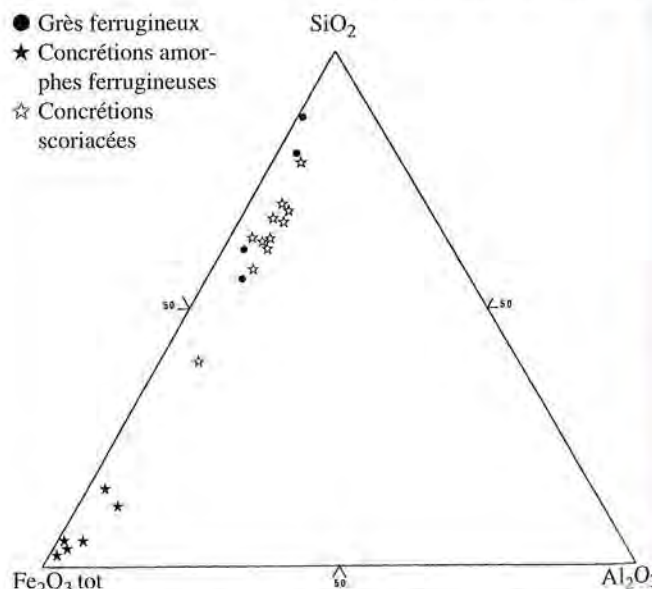


Fig. 46. Composition chimique du Sidérolithique du Salève.

N° lots	poids gr	N° éch.	Fe2O3 %	poids lavé gr	poids lavé %	N° éch.	Fe2O3 %
1	500			355	71		
2	700	SLV 6021	14.98	485	69	SLV 6022	18.23
3	1400	SLV 6031	22.84	1110	79	SLV 6032	25.47
4	1000			650	65		
5	1000			750	75		
6	1000			730	73		
7	1000			780	78		
total	6600			4860	73	SLV 6011	22.58
						SLV 6012	23.28

Fig. 47. Essai de concentration des concrétions ferrugineuses des grès sidérolithiques de Vovray, 74, France.

données: 893 520 / 2124 900 / 880 , fig. 31.12). Les concrétions forment environ 5 à 10% du volume de la roche. Elles sont faciles à récupérer en raison de leur dureté nettement plus élevée que celle des grès. 5 morceaux, non lavés, pris au hasard, ont été analysés (fig. 45 et 46: tout-venant; fig. 31.4).

Ils montrent des teneurs extrêmement variables en fer et contiennent toujours beaucoup de silice. Ces variations sont en rapport avec la présence de sable adhérent aux surfaces ou pris dans les concrétions. Ces analyses montrent que ce matériau, à l'état brut, est très peu favorable comme minerai de fer.

Pour essayer d'améliorer la qualité de ce produit, les concrétions ont ensuite été broyées au marteau. Au cours de cette opération, la taille des fragments a été ramenée à 1 cm<sup>3</sup>. Les parties apparemment riches en fer, dures, ont bien résisté alors que le sable s'est effrité en particules fines. Deux lots ont été homogénéisés et analysés. L'ensemble du matériel a ensuite été lavé dans un baquet. Le résidu de lavage représente environ 70% du poids de départ. Les lots sélectionnés

ont été également analysés après lavage. La teneur en fer reste très basse (fig. 47). En présence d'une telle quantité de silice, ces concrétions ferrugineuses semblent impropres à la fabrication du fer au bas fourneau.

Sur le Salève, on trouve également des concrétions d'hydroxydes de fer cristallisés (fig. 31.5). Elles ont une structure scoriacée. Dans certains cas, on reconnaît la goethite. Elles sont plus rares que les croûtes amorphes et apparemment liées aux faciès argileux. Elles n'ont pas été observées en place. Elles sont beaucoup plus riches en fer (fig. 45 et 46; Annexe 3.2). Ces hydroxydes contiennent toujours de l'eau (env. 10%). Ce sont très vraisemblablement ces concrétions d'hydroxydes qui ont été recherchées et utilisées comme minerai de fer.

### Les autres faciès du Sidérolithique

Les grès quartzeux sont le faciès dominant. Toutefois, il existe aussi des argiles ferrugineuses (Conrad et Ducloz 1977, 134).

En plusieurs endroits, les sols sont argileux et teintés en rouge ou en jaune. C'est le cas à proximité de plusieurs des sites étudiés. Quelques buttes artificielles constituées de ces argiles colorées ont été observées, mais les argiles n'ont pas été observées en place. Les matériaux argileux pourraient provenir de la dissolution des calcaires de l'Urgonien. Il est probable qu'ils se sont accumulés localement à l'interface entre les grès et les calcaires. Un tel bouchon peut avoir facilité la précipitation des oxydes de fer.

Joukowski et Favre (1913, 347) signalent des «minerais de fer pisolithiques» dans la région de Praz Penaz et dans la vallée des Tourches (= Les Torches). Aucun affleurement n'a pu être retrouvé. Des brèches sont également attribuées au Sidérolithique. Ce sont des remplissages de failles et de fissures. Elles sont composées d'éléments calcaires et gréseux, pris dans une matrice riche en quartz, cimentée par de la calcite et des oxydes de fer.



Fig. 48. Panorama du Salève.

## Les sites miniers et métallurgiques

Les vestiges miniers et métallurgiques du Salève n'ont pas échappé aux chercheurs. Au siècle dernier, A. Naville leur consacre un article (Naville 1867). Il a parcouru la région et semble même avoir pratiqué quelques terrassements. Ses indications topographiques sont malheureusement peu claires. E. Joukowski et J. Favre mentionnent le Sidérolithique et son exploitation ancienne dans leur monographie (Joukowski et Favre 1913, 346-9). Leur carte permet de localiser un grand nombre d'amas de scories (17 points figurés). Ils indiquent également de nombreux petits étangs sur la croupe du Salève dont une partie sont d'anciennes minières (15 points).

Depuis lors, ces vestiges n'ont guère intéressé les archéologues. La bibliographie ne fournit que de simples mentions et des généralités sur la sidérurgie ancienne (Blondel 1944, 24-6; Maréchal et Armand, 1962, 61-82; Broise 1974, 114-5 et 152).

La prospection systématique du Salève représente un travail considérable: la surface est de plus de 30 km<sup>2</sup> et de nombreuses zones sont difficiles d'accès (pentes, végétation).

Environ un tiers de la surface, correspondant aux zones les plus favorables, a été parcouru. Il est probable que plus de la moitié des sites existants aient été repérés (fig. 49 et 50).

### Catalogue des sites miniers et métallurgiques du Salève

Seuls les sites métallurgiques et miniers qui ont été identifiés sur le terrain sont numérotés dans le catalogue. Les mentions bibliographiques qu'il n'a pas été possible de vérifier sont simplement indiquées sans numéro.

#### Vovray-en-Bornes

Broise 1974, 115.

Un fourneau aurait été mis au jour sur le territoire de cette commune. Il est vraisemblable que cette découverte ait eu lieu près du village, peut-être au lieu dit Les Faverges.

#### L'Abergement

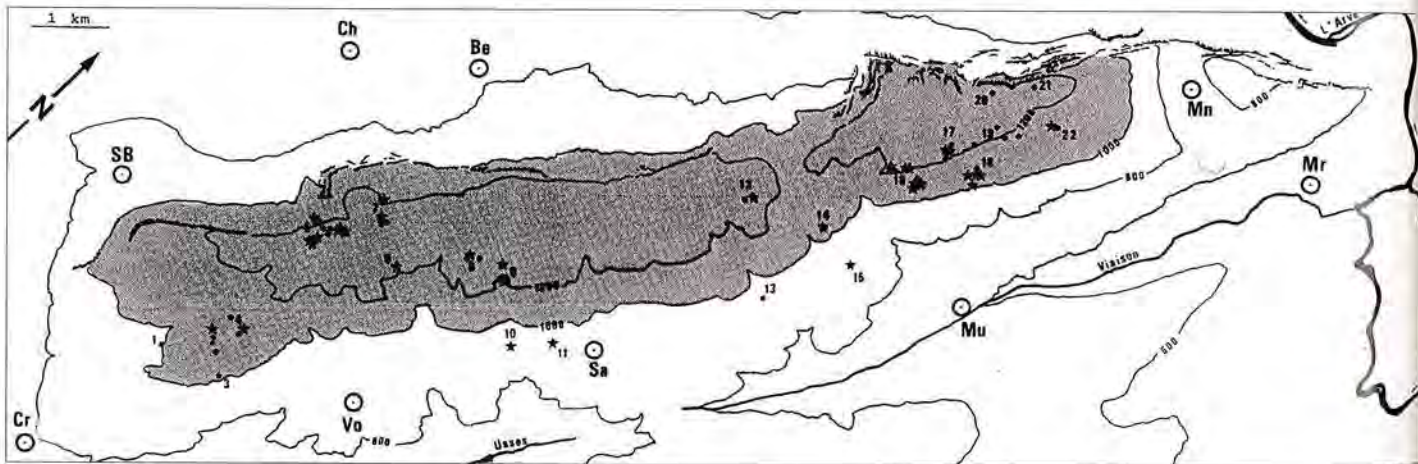
Broise 1974, 115.





Une «fonderie» est mentionnée sous ce nom.

#### 1. La Petite Montagne

Fig. 49 et 50: site 1.

Sur le flanc E de la Combe Isabelle, au lieu dit La Petite



-  Au-dessus de 1000 m
-  Amas de scories
-  Minière et traces d'extraction
-  Villages

- |               |                      |
|---------------|----------------------|
| Be: Beaumont  | SB: Saint-Blaise     |
| Mn: Monnetier | Cr: Cruseilles       |
| Sa: Le Sappey | Mu: La Muraz         |
| Ch: Le Châble | Vo: Vovray-en-Bornes |
| Mr: Mornex    |                      |

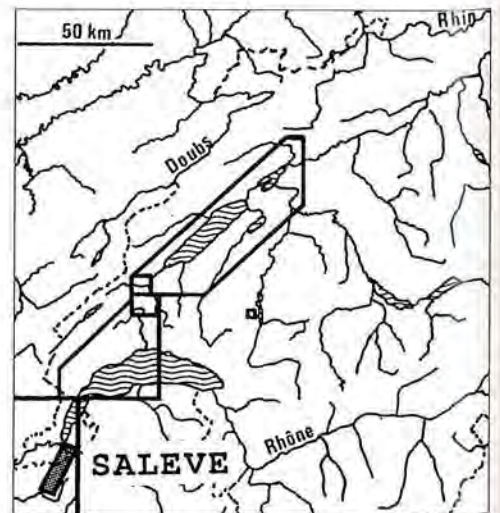


Fig. 49. Carte des sites miniers et métallurgiques du Salève, Savoie, France. Les N° 1-22 renvoient au texte et au tableau de la fig. 50.

N°	Lieu-dit	Commune	X	Y	Z	Description
1	Petite Montagne	Cruseilles	892 150	2124 125	900	1 ensemble d'une dizaine de petites minières 1 tranchée (25 m) parallèle à la pente
2	Chemin de Praz Penaz	Cruseilles	892 425 892 700	2124 700 2124 560	1095 1090	1 amas de scories coupé par le chemin 2 minières quadrangulaires
3	Praz Penaz	Cruseilles	892 900	2124 300	1030	1 minière
4	L'Iselet	Cruseilles	892 825	2125 000	1115	1 amas de scories 1 ensemble de minières chemin partiellement empierré avec des scories source aménagée
5	Les Convers	Saint-Blaise	892 400	2126 725	1200	8 amas de scories 3 ensembles de minières 2 chemins creux (tranchées ?) ruisseau utilisé pour le lavage du minerai ? chemin partiellement empierré avec des scories
6	Les Torchés	Le Sappey	893 475	2127 040	1245	1 amas de scories aménagements liés au lavage du minerai ?
7	La Thuile	Beaumont	892 925	2127 600	1180	1 amas de scories 1 ensemble de minières 2 zones de scories isolées dans la pente
8	Grotte du Diable	Le Sappey	894 025	2127 800	1255	1 amas de scories 2 zones de scories dispersées dans le ruisseau 2 ensembles de minières aménagements liés au lavage du minerai ?
9	Les Douai	Le Sappey	894 500	2128 000	1270	2 amas de scories ? - site non prospecté
10	Clarnant	Le Sappey	895 325	2127 425	850	1 amas de scories
11	Grange Gal	Le Sappey	895 625	2127 800	880	scories dispersées (amas disparu)
12	Le Pommier	La Muraz	896 000	2131 075	1245	1 amas de scories 1 zone de scories dispersées dans des déblais chemin empierré avec des scories en deux points 1 ensemble de minières
13	Chez Jacquet	La Muraz	897 050	2130 325	950	1 ensemble de minières
14	Chez le Tournier	La Muraz	896 825	2131 500	1035	1 amas de scories coupé par les chemins
15	Chez Briard	La Muraz	897 550	2131 400	930	scories dispersées en terrain cultivé
16	La Pile	La Muraz	897 125	2132 875	1215	6 amas de scories 2 ensembles de minières 3 places à charbon
17	Rochers de Faverges	La Muraz	897 325	2133 375	1220	2 amas de scories chemin partiellement empierré de scories 3 étangs (anciennes minières ?)
18	Les Molliets	La Muraz	897 750	2133 450	1100	4 amas de scories 1 ensemble de minières 4 places à charbon
19	Grange Gaby	Mornex Monnetier	897 400	2133 650	1210	1 étang (ancienne minière ?) 4 minières isolées le long du chemin
20	La Grande Gorge	Bossey	897 175	2134 250	1250	1 ensemble de minières
21	Les Treize Arbres	Bossey	897 400	2134 775	1220	1 minière
22	Grange Passet	Mornex Monnetier	898 025	2134 650	1125	scories dispersées dans les chemins et murets 1 étang (ancienne minière ?)

Fig. 50. Localisation et description des sites du Salève.

Montagne, on observe une dizaine de petites dépressions. Elles ont 1 à 2 m de diamètre et leur profondeur ne dépasse pas quelques dizaines de cm. Elles sont disposées sans ordre dans une zone où la pente n'est pas très forte. Une tranchée de 1 m de large, bordée d'une faible épaisseur de déblais, se dirige, selon la plus grande pente, en direction du fond de la combe. On peut la suivre sur environ 25 m. Les matériaux déplacés sont en grande partie composés de Sidérolithique. Il s'agit probablement d'un site d'extraction du minerai de fer.

## 2. Chemin de Praz Penaz

Fig. 49 et 50: site 2.

Renseignement Holliger (Genève).

Le chemin qui mène du sommet de la Combe Isabelle en direction de Praz Penaz coupe, 250 m après le passage du ruisseau, un amas de scories masqué par la végétation. Les scories recouvrent une aire elliptique de 20 m<sup>2</sup>. L'épaisseur maximale de la couche ne doit pas dépasser 50 cm (amas 2.1). A 300 m, au croisement des chemins (point 1091) se

situent 2 excavations quadrangulaires (2 x 3 m et 2 x 2 m). Les déblais sont composés de Sidérolithique.

### 3. Praz Penaz (chalet)

Fig. 49 et 50: site 3.

Le chalet de Praz Penaz ou Pré Peigne, a été récemment détruit. Il occupe un replat dominé par plusieurs barres calcaires. Des grès du Sidérolithique affleurent près de la source proche et ce terrain forme le substrat du pré. A l'extrémité S de celui-ci, se trouve une dépression de 6 m de diamètre et 3 m de profondeur, entaillant une formation argileuse sidérolithique. Les concrétions ferrugineuses sont nombreuses dans les déblais.

### 4. L'Iselet

Fig. 49 et 50: site 4, fig. 51.

Un amas de scories se trouve à 100 m à l'O du chalet de l'Iselet, sur le versant N de la combe (amas 4.1). Très bien conservé, il forme une butte escarpée (env. 40 m<sup>3</sup>). A l'amont, un replat se dessine mais il a été entamé par le chemin. Plusieurs blocs calcaires assez volumineux ont été observés dans la partie supérieure de l'amas. Ne montrant aucune trace de rubéfaction, ils proviennent plus vraisemblablement des travaux de construction du chemin que de la destruction d'un fourneau. Des scories ont été utilisées pour affermir le sol devant le chalet. Elles proviennent sans doute d'un autre amas.

Le fond de la combe est occupé par une dépression complexe correspondant à l'aménagement d'une source. Sur le flanc S, en face du chalet, on observe un ensemble de minières enchevêtrées et d'amas de déblais d'argile rouge. A l'E, plusieurs excavations sont pratiquées dans le calcaire. Il y a deux puits circulaires de 2 m de diamètre et 1 ou 2 m de profondeur. Les 2 grandes excavations quadrangulaires voisines correspondent sans doute à des poches de minerai vidées.

A 250 m à l'O, se trouve une autre source aménagée.

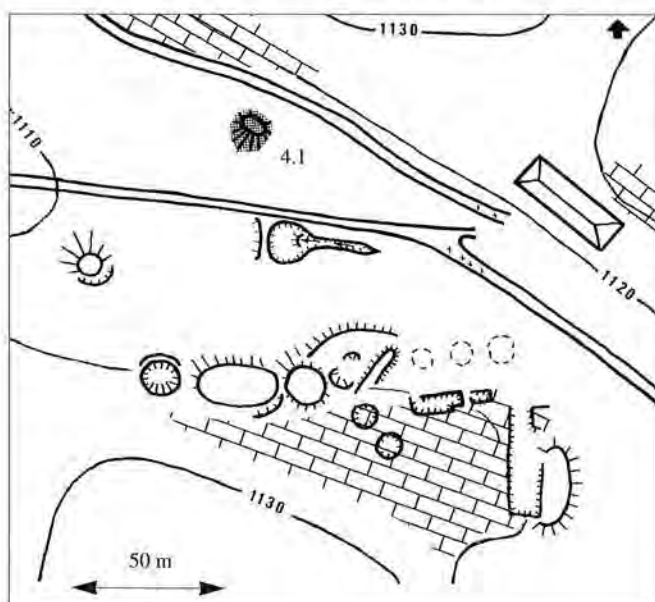


Fig. 51. Schéma du site de L'Iselet (Cruseilles, 74, Fr.). 1:2500.

Une minière partiellement comblée est visible légèrement en contrebas. En amont, la «Goule de l'Iselet» est un long sillon de 2 m de largeur et de profondeur, long de 150 m. Tracé parallèlement à la pente, il peut s'agir d'une structure d'érosion naturelle aussi bien que d'un aménagement artificiel.

### 5. Les Convers

Fig. 49 et 50: site 5, fig. 52-55.

Joukowski et Favre 1913, carte.

C'est le site le plus remarquable du Salève. Sur 14 ha, on trouve 8 amas de scories (env. 1000 m<sup>3</sup>) et 2 champs de minières (fig. 52). Situé sous le Plan du Salève, il domine le flanc NO de la montagne et surplombe la plaine en offrant une vue remarquable sur Genève.

Les amas 5.1, 5.2 et 5.3 sont groupés au N du site (fig. 53). Ce sont trois structures elliptiques de taille différente (env. 80, 180 et 400 m<sup>3</sup>). A chaque fois, la pente est légèrement entamée à l'amont formant une petite plateforme. Quelques petites dépressions subcirculaires sont à peine visibles alentour. L'amas 5.2 a été entaillé récemment pour installer une citerne métallique. L'amas 5.3 est le plus important en volume. La butte forme dans sa partie supérieure un arc de cercle peu marqué entourant la plate-forme. Il est séparé des deux autres par un petit fossé qui rejoint un peu plus bas le lit du ruisseau principal.

Le ruisseau est très fortement encaissé, bordé de matériaux sidérolithiques déplacés formant des talus. Cette topographie très marquée témoigne peut-être d'une action humaine (extraction et/ou lavage du minerai).

La surface du pré situé au S du ruisseau est bosselée et fortement perturbée. Les dépressions se recoupent. Les plus récentes sont deux sillons perpendiculaires à la pente, larges et profonds de 1 à 2 m, que l'on peut suivre sur plus de 100 m (chemins creux ou tranchées d'extraction). Ils coupent plusieurs excavations subcirculaires (2-20 m de diamètre).

Sur le sol, aux abords du chalet, on trouve des scories dispersées. Il s'agit probablement de l'empierrement d'une zone de circulation avec des matériaux rapportés. A 200 m au SE du chalet, une autre butte de scories, l'amas 5.4 forme un relief très net quoique masqué par un bosquet (400 m<sup>3</sup>, fig. 54). Un large replat est aménagé dans la pente en amont de la structure. Au S, l'amas est bordé par de petits monticules formés de déblais de Sidérolithique. A 50 m, se trouvent deux petits amas circulaires, 5.5 et 5.6 (5 m<sup>3</sup>). Ils se trouvent en bordure d'une zone d'extraction. On distingue une dizaine de minières subcirculaires qui se recoupent. Plus au S, d'autres dépressions apparaissent. Un abreuvoir pour les bestiaux a été aménagé à proximité. Le sol présente une coloration rouge due aux matériaux sidérolithiques. Enfin, à l'E du chalet, en contre-bas, deux autres buttes de scories, 5.7 et 5.8, sont visibles (25 et 50 m<sup>3</sup>).

### 6. Les Torches

Fig. 40 et 50: site 6, fig. 56.

Joukowski et Favre 1913, carte.

L'amas de scories 6.1 se trouve à une centaine de mètres au NE du chalet, un peu au-dessus du talus qui surplombe le chemin creux (25 m<sup>3</sup>). La plate-forme supérieure est assez

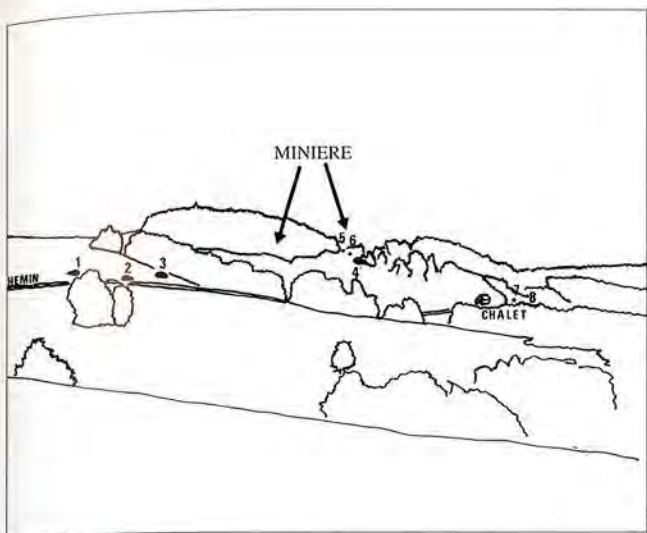


Fig. 52. Panorama du site des Convers, Saint-Blaise, 74, France. Vue depuis le N. Les N<sup>os</sup> indiquent les amas de scories. Le rideau d'arbres qui descend souligne le ruisseau principal.

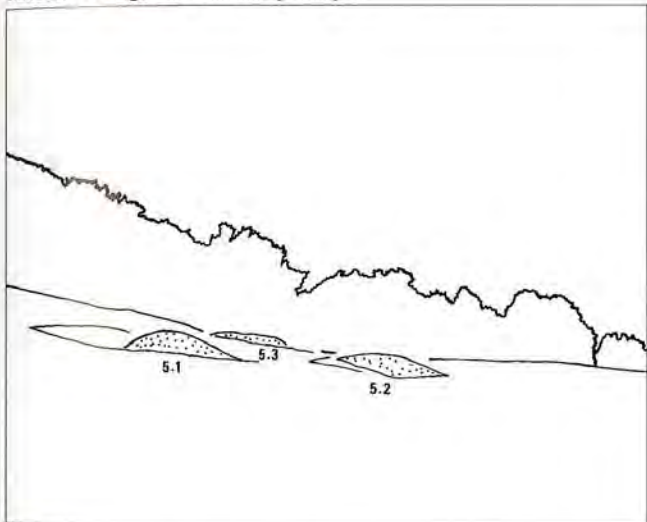


Fig. 53. Vue des amas de scories 5.1, 5.2 et 5.3 du site des Convers. L'amas 5.2 a été partiellement détruit par la mise en place d'une citerne métallique (hauteur: env. 1 m).

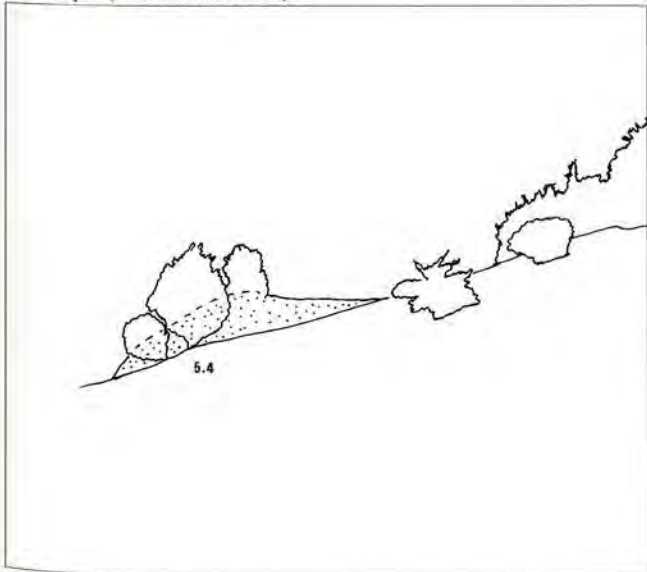


Fig. 54. Vue de l'amas de scories 5.4 du site des Convers. La dénivellation maximum est d'environ 9 m.

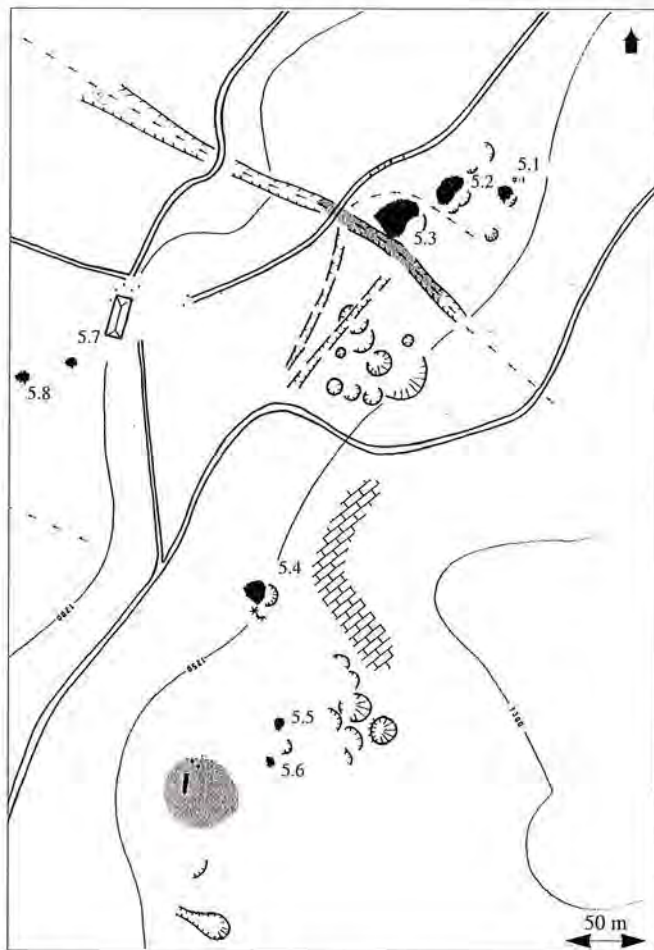


Fig. 55. Schéma du site des Convers (Saint-Blaise, 74, F). 1:5000.

bien marquée. Le fond de la combe principale, en aval du chalet, est barré par une petite levée de terre. A l'O de l'amas de scories, on observe une butte de matériaux sidérolithiques argileux déplacés (env. 20 m<sup>3</sup>, résidus de lavage?).

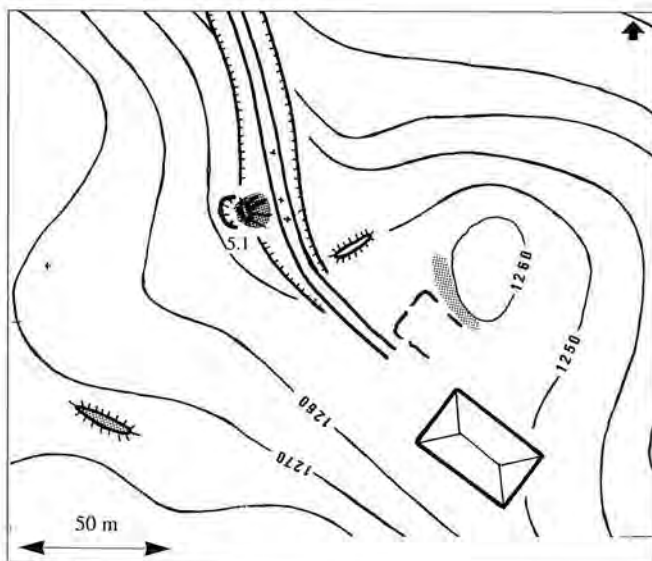


Fig. 56. Schéma du site des Torches, Le Sappey, 74, F. 1:2500.

### 7. La Thuile

Fig. 49 et 50: site N° 7, Fig. 57.

Joukowski et Favre 1913, carte.

L'amas de scories 7.1 se trouve à 100 m en contrebas du carrefour entre la D41 et le chemin qui mène au chalet de La Thuile. C'est une butte importante qui est installée sur un replat (350 m<sup>3</sup>). L'amas est coupé par un fossé. L'épaisseur de la couche de scories est supérieure à 1 m.

Au S de cette structure, se trouve une zone d'extraction. Une dizaine de minières et quelques amas de matériaux sidérolithiques déplacés se superposent. L'exploitation s'est arrêtée sur les barres calcaires qui délimitent la zone. Une centaine de mètres plus bas, en direction du chalet, quelques scories ont été trouvées, mais aucun amas à proprement parler (7.2). Un autre site pourrait se trouver dans les environs (Joukowski et Favre 1913, carte). D'autres scories dispersées ont été observées sur le chemin de La Thuile (7.3).

### 8. Grotte du Diable

Fig. 49 et 50: site 8, fig. 58.

Joukowski et Favre 1913, carte.

Broise, 1974, p. 115, mention «les Pitons»?

A 400 m au SE de la Grotte du Diable, à l'endroit où le chemin passe le ruisseau et s'engage dans la combe, gisent de nombreuses scories (8.1). En amont du gué, une butte de matériaux sidérolithiques déplacés encombre le vallon. 40 m plus au N, à la lisière du sous-bois, se trouve une dépression

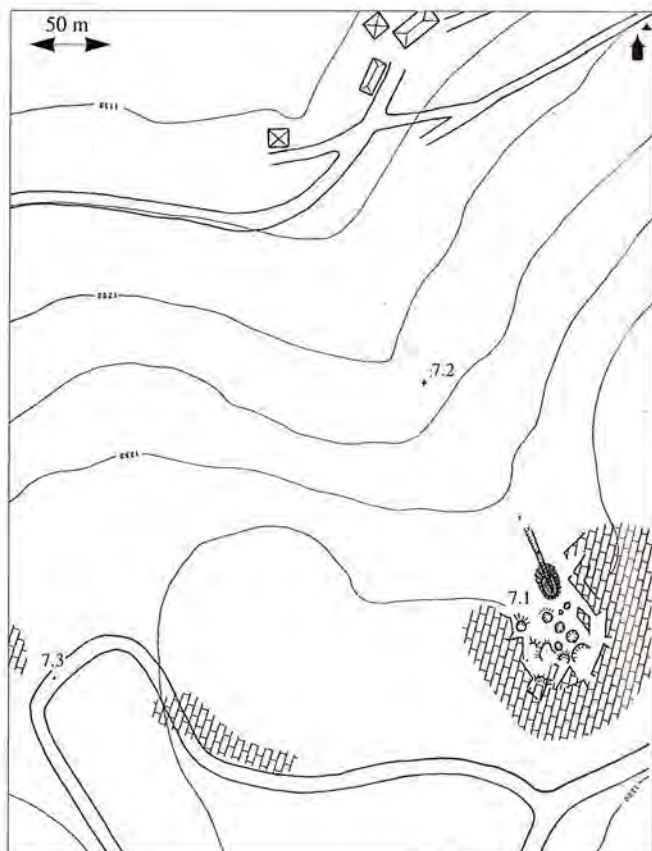


Fig. 57. Schéma du site de La Thuile, Beaumont-Le Chable, 74, F. 1:5000.

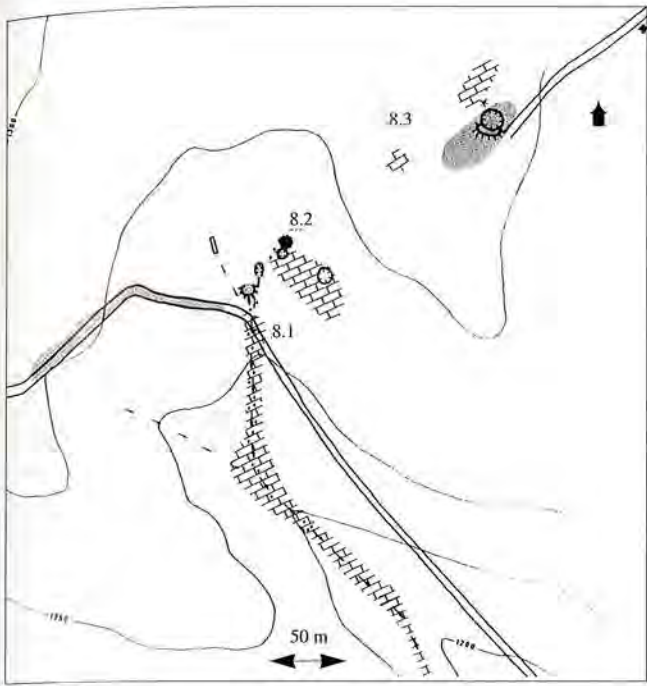


Fig. 58. Schéma du site de la Grotte du Diable, Le Sappey, 74, F. 1:5000.

creusée dans le calcaire et sur le bord de celle-ci, il y a une petite butte de scories (8.2, 2 m<sup>3</sup>).

A 150 m au NE, près du point coté 1278, se trouve une autre minière, nettement définie et bordée par un amoncellement de déblais. Quelques scories ont été découvertes dans les environs immédiats (8.3).

#### 9. Les Douai

Fig. 49 et 50: site 9.

Joukowski et Favre, 1913, carte.

Deux amas de scories ont été signalés dans cette combe vers 1230 et 1160 m d'altitude. La vérification sur le terrain n'a pas été faite.

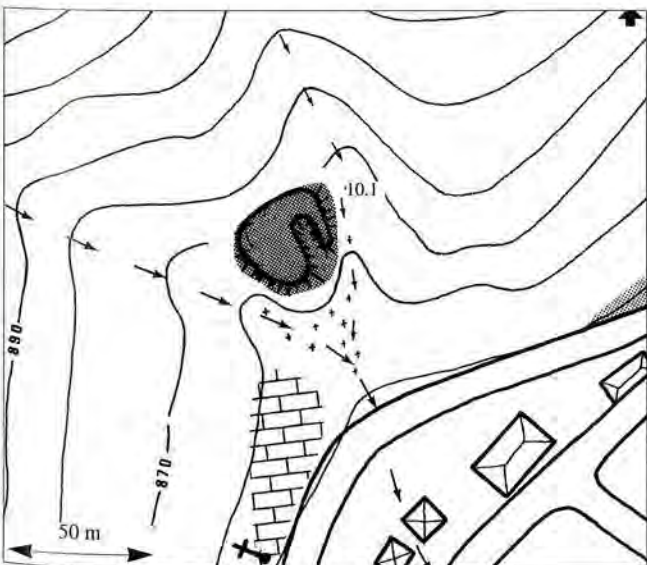


Fig. 59. Schéma du site de Clarnant, Le Sappey, 74, F. 1:2500.

#### 10. Clarnant

Fig. 49 et 50: site 10, fig. 59.

Joukowski et Favre 1913, carte.

Dans la combe qui descend depuis Les Douai vers le hameau de Clarnant, un peu en amont de la route départementale D15, se trouve un gros amas de scories (10.1, 200 m<sup>3</sup>). Il est implanté sur une pente assez forte, au confluent de deux petits ruisseaux. Il semble avoir été fortement érodé, voire excavé. L'épaisseur de la couche de scories est supérieure à 1 m. Le long de la D15, en direction du village, le Sidérolithique affleure.

#### 11. Grange Gal

Fig. 49 et 50: site 11.

Joukowski et Favre, 1913, carte.

Quelques scories dispersées ont été localisées près des bâtiments modernes, mais l'amas signalé n'a pas été retrouvé.

#### Chavanne

Broise, 1974, p.115.

Les étangs situés près du chalet de Chavanne sont aménagés dans le Sidérolithique. Celui-ci affleure au croisement entre la D14 et le chemin du chalet.

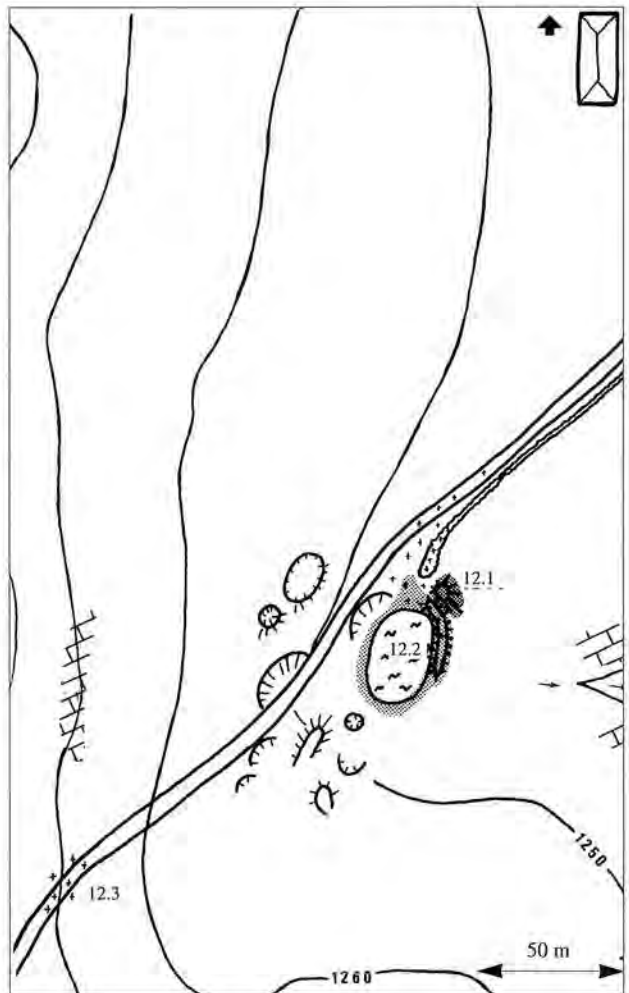


Fig. 60. Schéma du site du Pommier, La Muraz, 74, F. 1:2500.

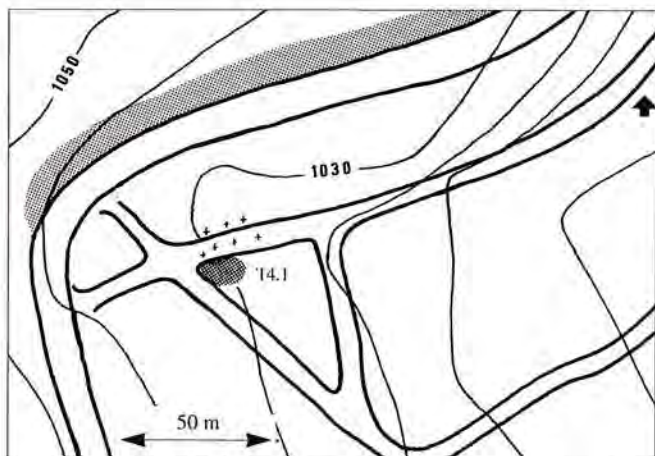


Fig. 61. Schéma du site de Chez le Tournier, La Muraz, 74, F. 1:2500.

### 12. Le Pommier

Fig. 49 et 50: site 12, fig. 60.

Naville, 1867, 353-4; Joukowski et Favre, 1913, carte; Maréchal et Armand 1960; Broise 1974, 115.

Un étang a été aménagé à 200 m au S du chalet de Pommier. Les déblais de ce creusement contiennent une quantité importante de scories et surtout de morceaux de paroi de fourneau. Il ne fait aucun doute qu'un atelier de réduction a été détruit par ces travaux (12.2). Des matériaux sidérolithiques sont également présents. Un autre amas, 12.1, apparemment non touché par les travaux se trouve dans le pré au N de la mare. Cette butte de scories, assez basse, est partiellement recouverte par les déblais. Les scories dispersées sont abondantes sur le chemin en direction du chalet et dans le mur en pierres sèches qui le borde. Une autre concentration de scories est repérable le long du chemin, 150 m plus au S (12.3). Un ensemble de minières et de monticules est situé entre les deux secteurs. Deux dépressions sont bien visibles au N du chemin.

### 13. Chez Jacquet

Fig. 49 et 50: site 13.

En remontant le chemin qui part du point coté 913 sur la route D215, on coupe une bande de Sidérolithique. A cet endroit, la topographie est perturbée par un ensemble de petites dépressions de diamètre métrique. Plusieurs sont caractérisées par un bourrelet de matériaux déplacés. Près de la route départementale D15, des scories ont été observées dans des déblais modernes.

### 14. Chez le Tournier

Fig. 49 et 50: site 14, fig. 61.

L'amas de scories 14.1 se trouve un peu en contrebas de la route de La Croisette (10 m<sup>3</sup>). Il a été recoupé par un chemin forestier. Le talus de la route, permet d'observer le Sidérolithique sableux, riche en concrétions amorphes.

### La Croisette

Broise 1974, p. 115.

Une fonderie est mentionnée sous ce nom.

### 15. Chez Briard

Fig. 49 et 50: site 15.

Joukowski et Favre 1913, carte.

Situé au pied du Salève, dans une zone recouverte de moraine, ce site est cultivé. Il y a des scories dispersées le long du chemin qui mène de Chez le Tournier à La Joie, entre la route et la maison isolée, soit sur une longueur de 250 m.

### 16. La Pile

Fig. 49 et 50: site 16, fig. 62.

A l'E du chalet de La Pile, une combe descend en direction du chalet des Molliets. Tout à l'amont de celle-ci se trouvent deux amas de scories (16.1 et 16.2, 5 et 25 m<sup>3</sup>). Le premier se situe en terrain plat et le second, dans la pente. Plus bas, vers 1150 m, un petit replat est causé par la présence d'une aire de charbonnage circulaire comme on en trouve beaucoup dans les bois de ce secteur du Salève. 100 m plus bas, un autre replat correspond à une seconde zone d'exploitation. Elle compte 3 amas de scories (16.4, 16.5 et 16.6, 5, 10 et 30 m<sup>3</sup>). Plusieurs minières sont étroitement associées à ces structures. Leurs déblais se mêlent aux scories. Deux places à charbon se trouvent à proximité. Une butte de scories allongée se trouve à l'extrémité du plateau de La Pile, près des escarpements calcaires (16.3, 100 m<sup>3</sup>). Les faibles reliefs qui l'entourent font penser à une zone d'extraction. La combe qui prend naissance à La Pile descend jusqu'au chalet des Molliets. A cet endroit, dans le chemin, quelques fragments de scories ont été découverts. Ils peuvent correspondre à l'érosion des sites de La Pile ou à un empierrement.

### 17. Rochers de Faverges

Fig. 49 et 50: site 17, fig. 63.

Joukowski et Favre 1913, 347 et carte, Naville 1867, 354-5, Broise 1974, 115.

Les Rochers de Faverges sont une des curiosités géologiques du Salève. Ces escarpements de grès forment un chaos aux formes inhabituelles. Le toponyme évocateur n'a

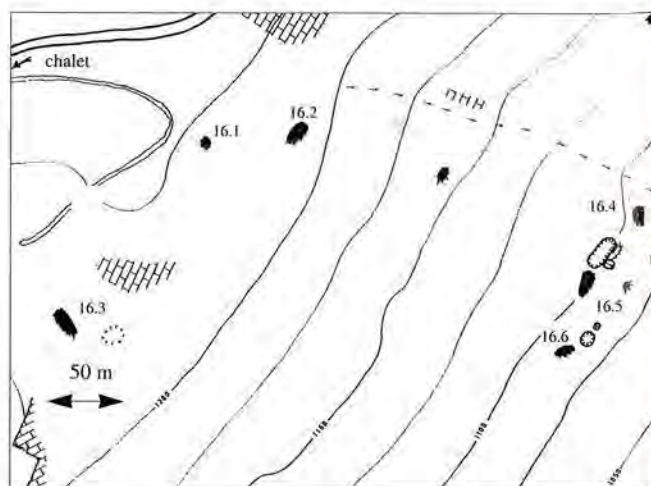


Fig. 62. Schéma du site de La Pile, La Muraz, 74, F. 1:5000

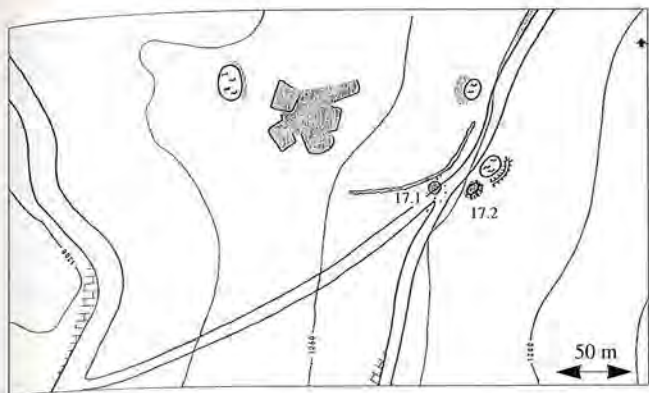


Fig. 63. Schéma du site des Rochers de Faverges, La Muraz, 74, F. 1:5000.

pas manqué d'attirer l'attention des chercheurs et lorsqu'il est fait allusion aux scories du Salève, c'est souvent à ce site que l'on se réfère.

Trois étangs sont proches, l'un en amont des Rochers, les deux autres en aval. Ces pièces d'eau sont déjà mentionnées par Naville. Elles ont certainement été réaménagées au cours des siècles, mais leur origine peut remonter à une extraction du minerai de fer. Il en va de même pour la dépression située plus au N (Grange Tournier).

C'est près du chemin, 50 m sous les Rochers, que se situent les amas de scories. Le premier, a été recoupé par les chemins forestiers (17.1, 5 m<sup>3</sup>). Le long mur en pierres sèches de grande taille est construit sur les scories et semble sans rapport avec les activités métallurgiques. En contrebas du chemin, le second amas est plus volumineux et mieux conservé (17.2, 60 m<sup>3</sup>).

Naville indique qu'une autre butte de scories devait être proche de l'étang situé à l'O des Rochers. Il aurait procédé à des fouilles à cet endroit mais ne donne pas d'information sur les résultats. Il situe également une place à charbon et un autre amas de scories plus en aval.

Enfin, il faut rappeler la découverte au lieu dit Le Crêt de quelques objets de l'âge du Fer (Blondel 1944, 24-5). La trouvaille a été faite lors de l'aménagement de la route. L'auteur rapporte que l'emplacement de la découverte est distant de moins de 100 m des Rochers de Faverges mais ce lieu-dit est difficile à situer précisément, d'autant qu'il recouvre sans doute une grande superficie. Sur la carte de Joukowski et Favre 1913, la distance est d'environ 1 km. Il est impossible d'affirmer que cette découverte est réellement en relation avec le site métallurgique. On ne peut donc en tirer une datation, même approximative.

#### 18. Les Molliets

Fig. 49 et 50: site 18, fig. 64.

Naville 1867, 358, Joukowski et Favre 1913, carte.

Dans la combe qui descend de la Grange Gaby, un peu avant de couper le chemin qui mène aux Molliets, on atteint un replat. A 100 m du lit du ruisseau, se dresse une barre calcaire. En aval de celle-ci, un amoncellement de déblais montre que le terrain a été fouillé jusqu'au rocher. Une autre poche de minerai, située 20 m en aval, a également été vidée

laissant apparaître le calcaire. L'amas de déblais délimite une minière de plus de 4 m de profondeur. Entre ces deux excavations, à hauteur du chemin, se situe un amas de scories (18.1, 20 m<sup>3</sup>). Plus au S, un léger épaulement dans le terrain témoigne de la présence d'un autre amas où les scories sont mêlées à du Sidérolithique remanié (18.2, 10 m<sup>3</sup>).

Sur l'autre rive, 4 charbonnières forment des replats circulaires de terre noire. Dans la plus éloignée, des fragments de scories denses sont mélangés à la poussière de charbon.

Au niveau du gué, on trouve des scories dans les talus du chemin. Une concentration peu nette se situe à proximité (18.3). Plus bas, le chemin entaille le Sidérolithique riche en concrétions ferrugineuses scoriacées.

#### 19. Grange Gaby

Fig. 49 et 50: site 19.

Naville 1867, 354, Broise 1974, 115.

Au-dessous du bâtiment, un étang artificiel pourrait correspondre à une exploitation de minerai de fer. Il a été remanié récemment. A 350 mètres en descendant le chemin vers la Grange Passet, d'autres minières sont visibles (diam. 3 à 5 m). De même, en remontant le chemin qui part vers l'O en direction du sommet de la montagne, on croise plusieurs dépressions circulaires peu marquées. Une scorie isolée a été ramassée entre la grange et l'étang, sur le chemin, mais aucune concentration n'a été repérée.

#### 20. La Grande Gorge

Fig. 49 et 50: site 20.

Dominant les escarpements de la Grande Gorge, sur le coteau N, à quelques mètres du point coté 1253, le Sidérolithique affleure. Plusieurs dépressions dans le bois suggèrent une exploitation.

#### 21. Les Treize Arbres

Fig. 49 et 50: site 21.

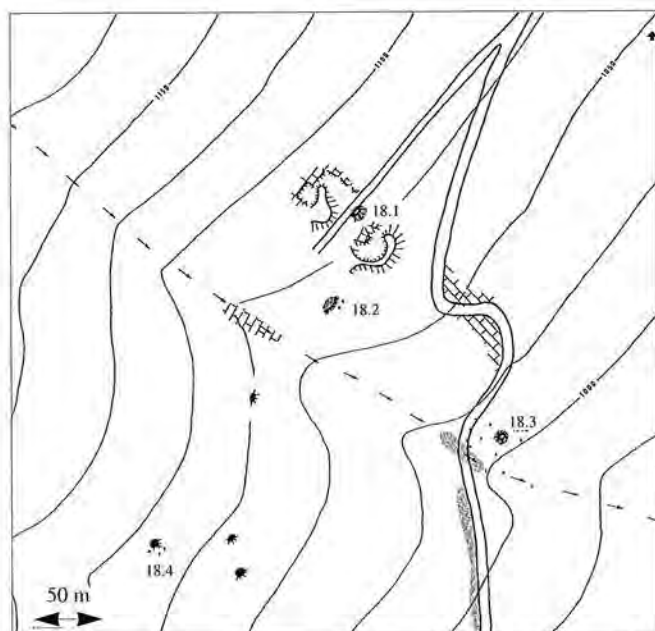


Fig. 64. Schéma du site des Molliets, La Muraz, 74, F. 1:5000.

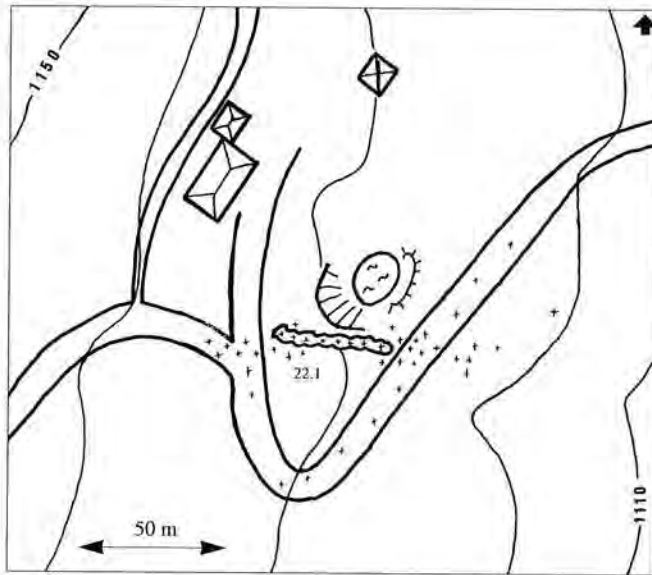


Fig. 66. Schéma du site de la Grange Passet, Mornex-Monnetier, 74, F. 1:2500.

Naville, 1867, 356, Broise 1974, 115.

Au-dessus de la Petite Gorge, 2 étangs sont indiqués par Joukowski et Favre (1913, carte). Actuellement, le calcaire affleure entre le point de vue de l'Observatoire et le restaurant des Treize Arbres. Il est parcouru de poches métriques de Sidérolithique gréseux.

Au S du restaurant, on distingue encore une minière ovale (5 x 10 m).

## 22. Grange Passet

Fig. 49 et 50: site 22, fig. 65.

Naville 1867, 357.

Au-dessous des bâtiments de la Grange Passet, un étang a été aménagé et ses bords cimentés. Bien que seuls les calcaires affleurent à proximité, on trouve des blocs de Sidérolithique épars. La pièce d'eau est très probablement une ancienne minière. Un amas de scories (22.1) a été détruit comme en témoignent les fragments dispersés le long des chemins et dans les tas de pierres alentours. Il s'agissait sans doute d'un amas important mais le volume ne peut être estimé.

## Répartition des sites miniers et métallurgiques du Salève

La prospection préliminaire du Salève a permis de vérifier la plupart des indices fournis par la bibliographie et de répertorier quelques sites supplémentaires, surtout miniers. Il est évident qu'une recherche plus systématique aboutirait à la découverte d'autres vestiges.

Si elle n'est pas complète, la carte de répartition permet déjà quelques remarques (fig. 49). Les sites sont répartis sur les segments des Pitons et du Grand Salève. Une seule exploitation s'est installée sur le replat sommital (12). Les autres occupent les versants. Les sites 5 et 7 sont orientés à l'O, les autres se répartissent sur le flanc E de la montagne: 8 d'entre eux (6, 8, 9, 14, 16, 17, 18 et 22) dans la partie supérieure de la pente; 2 seulement (2 et 4) occupent un replat à mi-pente; 4, enfin, se trouvent au pied de la montagne (Vovray, 10, 11 et 15). Certains ateliers s'accrochent sur des pentes raides, d'autres s'installent en terrain plat.

Il y a toujours moyen de trouver de l'eau à proximité des sites. Ils sont soit dans des ravins humides, soit près de sources. Ces dernières sont d'ailleurs souvent liées à la présence du Sidérolithique et des structures karstiques. Par contre, où que se soit sur le Salève, la quantité d'eau disponible est toujours limitée.

Aucune règle absolue ne semble régir l'orientation ou la position topographique des ateliers. La clef de leur répartition est certainement l'occurrence du minerai. Dans toutes les zones où le Sidérolithique est signalé, des scories ont été trouvées. Dans plusieurs cas, les traces d'exploitation ont pu être identifiées sans équivoque à quelques dizaines ou centaines de mètres des amas de scories. Ainsi s'explique l'absence de vestiges métallurgiques sur l'extrémité NE du massif (Petit Salève). Leur rareté dans les environs de Cruilles résulte du fait que les terrains sidérolithiques n'y sont pas utilisables comme minerai (grès ferrugineux pauvres, pp. 60 et 61).

La plupart des amas de scories visités sont petits (10-100 m<sup>3</sup>, fig. 66). Ces exploitations modestes pourraient être le résultat d'une seule phase d'exploitation, sans doute d'un seul fourneau. Les plus gros amas, encore modestes par leur taille, sont peu nombreux (100-400 m<sup>3</sup>).

Dans de nombreux cas, les amas de scories sont groupés. Ce fait pourrait exprimer une certaine continuité de l'exploitation. Lorsqu'un fourneau est hors d'usage, il est remplacé par un autre, installé non loin de là. Mais ce n'est pas la seule explication possible: il peut s'agir de batteries de fourneaux travaillant en parallèle.

On constate que de nombreux sites sont proches de bâtiments ruraux plus récents (granges). Une partie de ceux-ci ont une origine médiévale (Guichonnet 1988, 55-8). Les clairières dues au charbonnage ont pu attirer les colons à la recherche de pâturages. Cet argument renforcerait l'hypothèse d'une exploitation intense relativement récente, par exemple du Haut Moyen Age, ce qui n'aurait pas laissé le temps à la forêt de reprendre ses droits.

N° site	Lieu-dit	N° amas	hauteur amont m	hauteur aval m	longueur m	largeur m	surface estimée m2	volume estimé m3	
2	Chemin de Praz Penaz	2.1	0	2	3	7	20	10	
4	L'Iselet	4.1	1	3.5	8	8	50	40	
5	Les Convers	5.1	1	4	10	10	80	80	
		5.2	1	1	10	22	170	180	
		5.3	1	5	13	30	300	400	
		5.4	2	9	12	15	150	400	
		5.5	1	1	3	3	7	5	
		5.6	1	1	3	3	7	5	
		5.7	1	2	8	7	45	25	
		5.8	1	3	9	10	70	50	
		6	Les Torches	6.1	0.5	5	8	8	50
7	La Thuile	7.1	1	1.5	17	22	300	350	
		7.2	dispersé						
		7.3	dispersé						
8	Grotte du Diable	8.1	dispersé					> 10	
		8.2	0.5	0.5	2	2	3	2	
		8.3	dispersé						> 5
9	Les Douai	9.1	non prospecté						
		9.2	non prospecté						
10	Clarnant	10.1	0	10	20	15	230	200	
11	Grange Gal	11.1	dispersé						
12	Le Pommier	12.1	1	1	8	4	25	25	
		12.2	dispersé						> 25
		12.3	dispersé						?
14	Chez le Tournier	14.1	0.5	0.5	7	7	40	10	
15	Chez Briard	15.1	dispersé						
16	La Pile	16.1	0.5	1	3	3	7	5	
		16.2	0.5	1.5	5	8	30	25	
		16.3	0.5	1	10	3	25	100	
		16.4	0.5	1	2	3	5	5	
		16.5	0.5	1.5	6	3	15	10	
		16.6	0.5	1	8	5	30	30	
17	Rochers de Faverges	17.1	0.5	0.5	5	5	20	5	
		17.2	0.5	2	4	4	12	60	
18	Les Molliets	18.1	0.5	3	5	5	20	20	
		18.2	0	0.5	2	10	15	10	
		18.3	dispersé						
		18.4	dispersé						
22	Grange Passet	22.1	dispersé					> 50	

16 sites

39 amas de scories

plus de 2000 m3

Fig. 66. Dimensions et volumes des amas de scories du Salève.

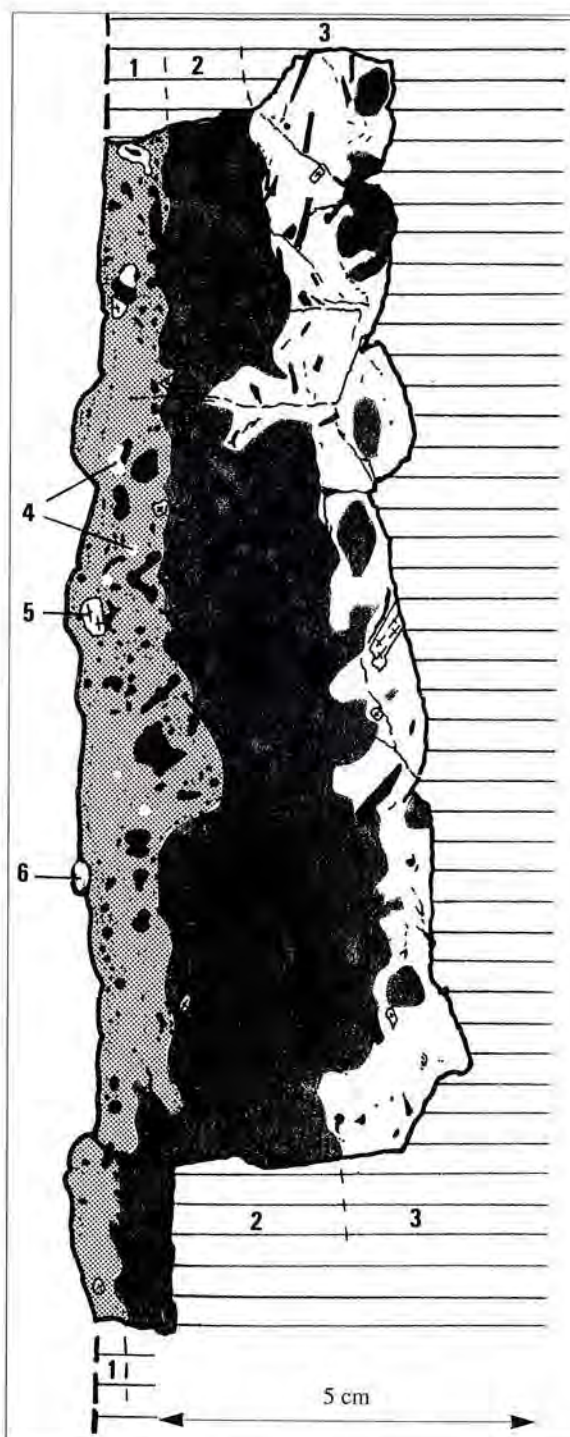
## Les fourneaux

Aucune fouille archéologique n'a, jusqu'à maintenant, apporté de renseignement sur les fourneaux. La bibliographie ne fournit que des mentions et aucune description. Aucune structure de ce type n'a pu être identifiée clairement au cours des prospections récentes. Le seul indice vient du site de La Pile (site 16) où le plus gros amas (amas 16.2) est centré sur un amoncellement de blocs calcaires de 1,5 m de côté partiellement recouvert par la végétation. Il pourrait s'agir des ves-

tiges d'un fourneau effondré. Ailleurs, on ne retrouve que rarement des pierres calcaires. Elles sont généralement de petite taille. Si elles sont parfois rougies, elles ne sont jamais scorifiées.

Par contre, on trouve fréquemment de petits fragments de matériaux argilo-sableux cuits et scorifiés sur une face. Ce sont indéniablement des morceaux de revêtement interne de la cuve du fourneau.

La plupart des sites en ont livré (fig. 76). Quand ce n'est pas le cas, c'est en raison des difficultés d'observations (sco-



Surface exposée au feu scorifiée et vitreuse. Relief faible, moutonné. Elle réagit à l'aimant et est couverte de taches de rouille correspondant à de petites particules de fer à l'état métallique.

Surface opposée irrégulière, friable.

Commentaire de la coupe:

La pâte contient environ 15% de grains de quartz blancs (taille de 0,1 à 2 mm). Dans les zones 2 et 3, les grains ont des bordures nettes, parfois anguleuses alors que dans la zone 1 on ne distingue plus que des taches aux contours diffus (non représentés sur le dessin).

- 1 Zone scorifiée: gris verdâtre. Forte porosité globulaire.
- 2 Zone partiellement fondue: gris noir. Porosité importante, assez large.
- 3 Zone cuite: rouge brique. Porosité allongée, anguleuse correspondant aux empreintes des végétaux (paille?).
- 4 Particule métallique.
- 5 Gros grain de roche siliceuse.
- 6 Amas de rouille collé à la surface exposée au feu, ancienne particule métallique.

Fig. 67. Fragment de revêtement interne d'un fourneau. Ech. SLP 51 (Le Pommier, site 12, amas 12.2, Salève). Vue en coupe.

ries dispersées, végétation dense, etc.). Leur absence ne paraît donc pas significative.

Le site du Pommier (site 12) est celui qui a livré le matériel le plus significatif. Un fourneau a dû être détruit récemment. C'est un sable argileux qui est le matériau de base du revêtement interne. C'est probablement le Sidérolithique qui est utilisé. Des grains, parfois centimétriques, de roches siliceuses ou plus rarement carbonatées, sont mélangés à la pâte ainsi que de très nombreux végétaux dont on observe les empreintes. Celles-ci sont généralement en forme de fibre allongée creuse, ce qui fait penser à de la paille hachée.

L'épaisseur des pièces varie de 2 à 10 cm, ce qui correspond à l'impact de chaleur et non à l'épaisseur réelle du revêtement. En coupe, on observe trois zones successives: scorifiée, partiellement fondue et simplement cuite. La zone scorifiée contient des particules de fer à l'état métallique, généralement en forme de petites billes (fig. 67). En plusieurs cas, on observe des rechapages.

Le site de La Thuile a livré des pièces en tous points comparables (GSAF 1991b, fig. 5/2, Ech. THU 51). Les fragments provenant des autres sites, souvent trop petits pour être correctement étudiés, ne présentent pas de caractère différent. Aucun bloc de roche scorifiée n'a été observé ni aucun élément céramique (tuile, etc.). Le type de soufflerie utilisée dans ces fourneaux reste totalement inconnu.

## Les scories du Salève

La prospection sur le terrain a permis de constituer une collection d'échantillons de scories de nombreux sites métallurgiques du Salève. Le trait commun de l'immense majorité de ces pièces est qu'elles présentent une structure de flux visqueux et horizontal. Ce sont des scories coulées hors du bas fourneau par une ouverture ménagée à la base de celui-ci. Au-delà de ce caractère évident, on trouve une certaine variabilité qui nous amène à décrire plusieurs catégories. Il est évident qu'une simple prospection de surface ne suffit générale-

Surface supérieure en cordons larges aplatis, aspect froissé. La partie supérieure de la pièce s'est fracturée avant le refroidissement complet.

Surface inférieure moultant des charbons de bois (0,5 à 2 cm) et incorporant de nombreux éléments sablo-argileux (0,5 mm).

Structure interne stratifiée, 3 écoulements superposés.

Commentaire de la coupe:

La porosité est sous-évaluée, les bulles les plus petites ne sont pas représentées. Les interfaces entre les écoulements sont soulignées par de grandes bulles aplaties.

1 Zone cristallisée: vert jaunâtre, homogène. Localement, on observe le développement de polygones. Bulles peu abondantes et étroites.

2 Zone vitreuse: noire, homogène. Les bulles sont très abondantes et de taille très variable. Les plus grosses bulles atteignent 1 cm de diamètre.

L'interface entre 1 et 2 est assez diffuse. De nombreuses zones vert jaunâtre, parfois en forme de polygone, sont incluses dans 2.

3 Élément argilo-sableux cuit, grisâtre, avec des grains de quartz blancs.

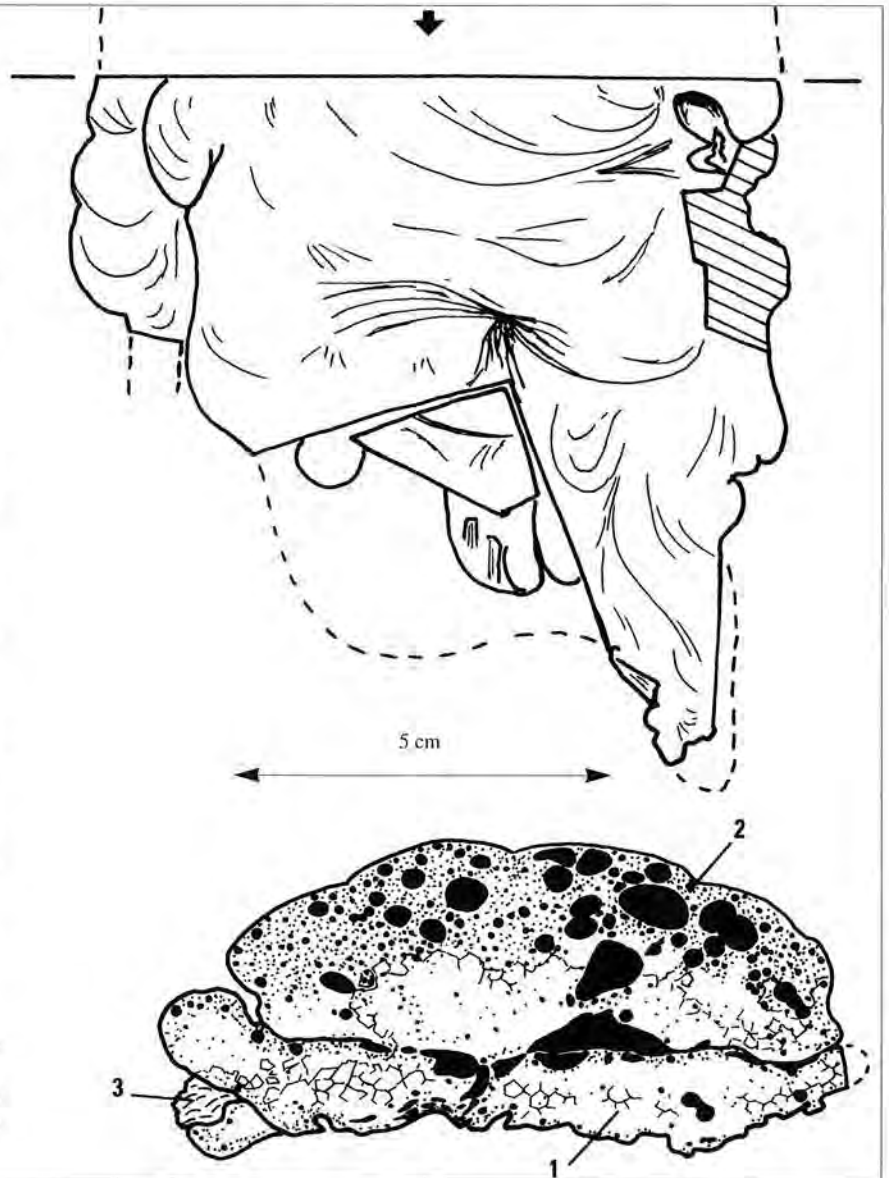


Fig. 68. SVN: scorie coulée vitreuse noire: Ech. CLR 1 (Salève, Clarnant, amas 10.1); vue de dessus et coupe perpendiculaire.

ment pas pour observer, et a fortiori comprendre, l'ensemble des déchets métallurgiques d'un site. En effet, plusieurs fourneaux ont pu être établis au même endroit et leurs déchets se trouveront mélangés en surface. Certains débris sont plus fragiles ou plus petits que d'autres et pourront passer inaperçus.

Par ailleurs, certains amas de scories sont complètement recouverts par la végétation et l'humus ne laissant voir que quelques pièces alors que d'autres sont entaillés ou mis à nu. Il y a donc aussi des différences considérables dans la qualité de l'observation des sites.

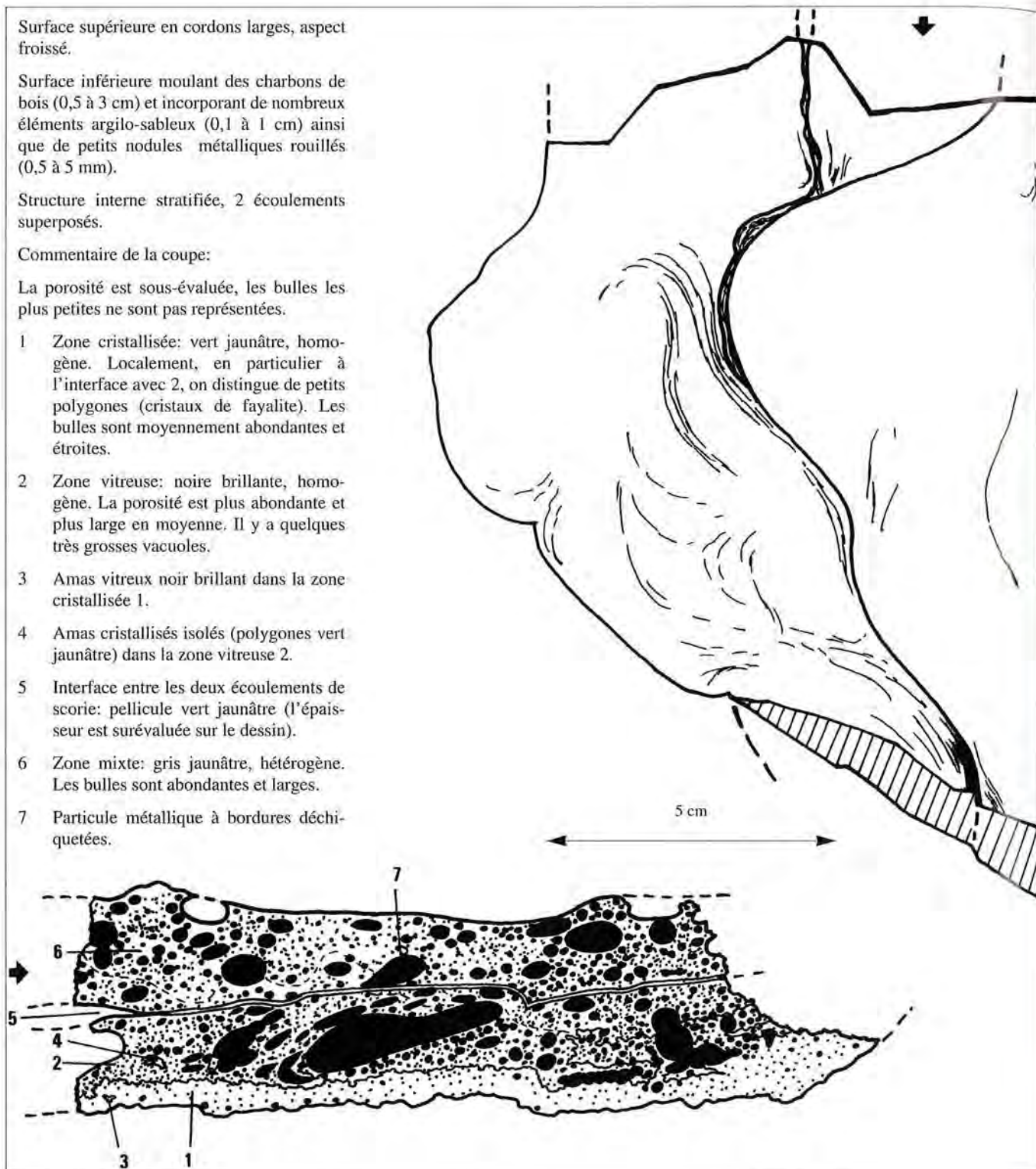


Fig. 69. SVN: scorie coulée vitreuse noire. Ech. SLC 303 (Salève, Les Convers, amas 5.3); vue de dessus et coupe parallèle.

### Les SVN: scories coulées vitreuses noires

Le matériau est très vacuolaire. La porosité atteint facilement 50% du volume. Dans certains cas, les bulles sont jointives. Parfois, la base de la pièce est plus massive. La densité apparente est très faible. Cette catégorie regroupe des coulures de grandes dimensions ( $L > 20$  cm,  $l > 10$  cm,  $h > 10$  cm). La section est généralement circulaire, parfois aplatie. Les pièces composées d'un écoulement unique sont fréquentes, il n'est pas rare de trouver des fragments montrant plusieurs écoulements superposés.

La surface supérieure présente des reliefs faibles et mamelonnés. Le flux est essentiellement exprimé par des rides transversales cintrées qui leur donne un aspect froissé caractéristique. Cette surface est généralement noire avec des irisations. Certaines pièces sont de couleur vert jaunâtre ou même vert sombre. L'aspect est toujours vitreux.

Le relief de la surface inférieure est moyen et crevassé. La scorie moule systématiquement des charbons de bois et incorpore parfois des éléments provenant du sol (sable, argile, etc.). La couleur caractéristique est un vert jaunâtre, parfois avec de belles irisations métalliques.

En coupe, ces scories présentent des zones de textures différentes (fig. 68 et 69). Typiquement, la partie inférieure est peu poreuse et de couleur vert jaunâtre mate. La matière est partiellement cristallisée au moins. La partie supérieure est d'un noir brillant homogène, la porosité s'y développe plus facilement. La pâte est complètement vitreuse. A l'interface, on distingue la formation de polygones jaunâtres dans la masse noire. Des filaments jaunâtre soulignent parfois aussi des interfaces entre deux écoulements (ancienne surface figée, fig. 69). Ces scories ne contiennent que peu d'éléments étrangers: de rares fragments argilo-sableux cuits (paroi et/ou minéral). Le fer métallique, peu fréquent, se présente sous forme de billes sphériques inframillimétriques ou de particules informes pouvant atteindre 5 mm. Sur une coupe, le fer métallique ne représente jamais plus de 1% de la surface. Ces pièces ne réagissent pas à l'aimant.

Ces scories sont visiblement coulées plus ou moins horizontalement. Elles se forment à l'extérieur du fourneau mais systématiquement sur un lit de charbons de bois. Le flux semble très visqueux, le dégazage est très intense au cours d'un refroidissement rapide. La température à laquelle elles s'écoulent doit être très proche de leur point de fusion.

Les spectres de diffraction des rayons X sont presque illisibles, montrant que la pâte est essentiellement vitreuse. Les pics de la fayalite ne sont pas visibles. L'un des deux échantillons analysés contient un spinelle, du quartz et peut-être du fer métallique (Annexe 3.3). Les teneurs en  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{K}_2\text{O}$  sont nettement plus élevées que dans les autres scories du Salève. Le fer est relativement peu abondant; Annexe 3.3).

	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	FeOtot
moyenne	39.97	15.85	37.55
sur			
4 éch.	Si:Al	Si:Fe	
SVN	2.35	0.65	

### Les SGD: scories coulées grises denses

Cette catégorie regroupe des scories qui ont manifestement coulé. Les bulles sont généralement larges, mais peu nombreuses (densité apparente élevée). La pâte est homogène et possède une coloration grise. Elle est essentiellement composée de fayalite cristallisée. La surface supérieure est caractérisée par un écoulement en cordons superposés à section aplatie. La largeur de ces cordons varie beaucoup (1 à 10 cm). Leur surface est lisse et régulière, gris sombre, fréquemment avec des teintes lie de vin. La surface inférieure moule soit un sol sableux et incorpore dans ce cas de petits gravillons, soit un lit de charbons dont elle garde les empreintes. Les teintes sont grises, parfois jaunâtres avec des irisations. En coupe, la masse est gris sombre homogène, parfois gris jaunâtre. Les cristaux de fayalite sont souvent visibles à l'œil nu. La porosité est faible ou moyenne.

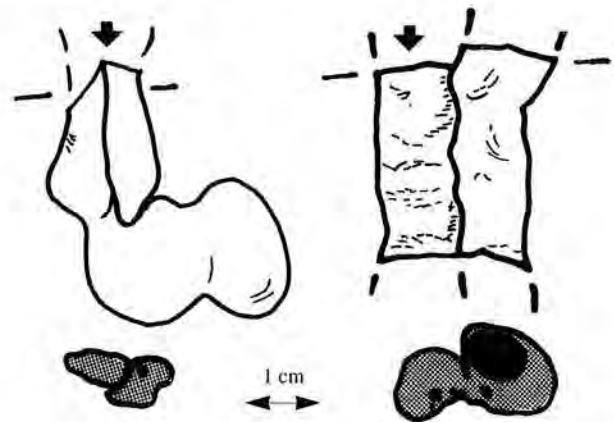


Fig. 70. SGD: scorie coulée grise dense: petites coulures. Ech. MOL 12 et 13 (Salève, Les Molliets, amas 18.1).

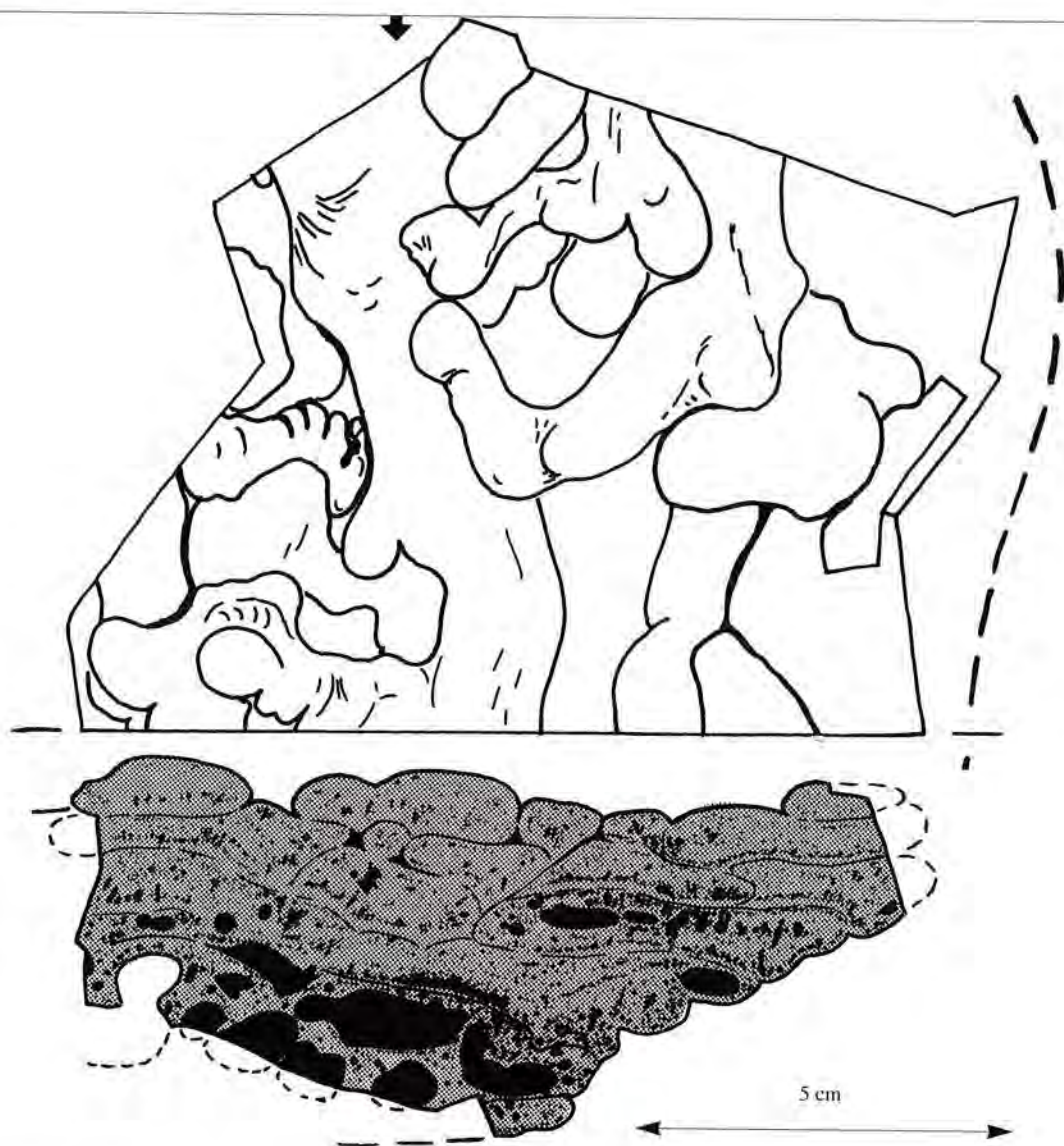
A côté des nombreux fragments indéterminables, souvent en raison de leur petite taille, on peut distinguer plusieurs morphologies caractéristiques.

#### 1) Coulures de petite taille

Les petites coulures sont composées d'un seul ou d'un nombre restreint de cordons (fig. 70). La surface inférieure démontre qu'elles ne font pas partie d'un ensemble plus important (empreintes de charbon, cailloux). Leur largeur n'excède pas 5 centimètres.

#### 2) Coulures en canal

Des cordons superposés, jusqu'à plusieurs dizaines, remplissent un canal creusé. Ils sont soudés les uns aux autres, mais possèdent chacun leur structure propre de refroidissement (fig. 71). L'empilement ne dépasse pas 10 cm. Le profil de canal est soit semi-circulaire soit, plus rarement, anguleux. La largeur des pièces est de 10 à 20 cm. Il est impossible de restituer la longueur et le poids total, mais certaines pièces pèsent plus de 500 gr.



Surface supérieure en cordons lisses, étroits et entrelacés.

Surface inférieure concave, relief faible et crevassé. De nombreux éléments argilo-sableux grisâtres sont incorporés (0,1 à 3 cm). On relève la présence d'un nodule métallique rouillé millimétrique.

Commentaire de la coupe:

Structure interne en amas de cordons superposés. Pâte gris sombre, cristalline. La structure en cordons est très bien développée. Les limites des cordons sont matérialisées par des fines bandes très foncées. L'orientation des bulles souligne la structure. Dans la partie inférieure, des bulles de grande taille se développent.

Fig. 71. SGD: scorie coulée dense grise, coulure en canal: Ech. SGP 1 (Salève, Grange Passet, amas 22,1); vue de dessus et coupe perpendiculaire.

### 3) Coulures en cuvette

Une petite cuvette grossièrement circulaire (diam.  $\pm 25$  cm) est remplie par la coulure (fig. 72). La partie inférieure est très massive et homogène. Elle possède une structure de refroidissement unique radiaire, soulignée par l'orientation des bulles et des cristaux de fayalite. La partie supérieure est composée de cordons superposés. Le tout est soudé en une seule pièce. Entre les deux zones, une cavité horizontale de très grande taille se développe.

L'alimentation de la cuvette se fait par un canal. La partie inférieure de ces scories réagit parfois à l'aimant.

Toutes ces scories sont visiblement coulées horizontalement sur le substrat. Leurs formes révèlent des aménagements éventuels du sol devant le fourneau (canal, cuvette). Le flux semble fluide et chaud. Le dégazage et le refroidissement paraissent lents. Les cordons superposés indiquent des arrivées successives de scorie.

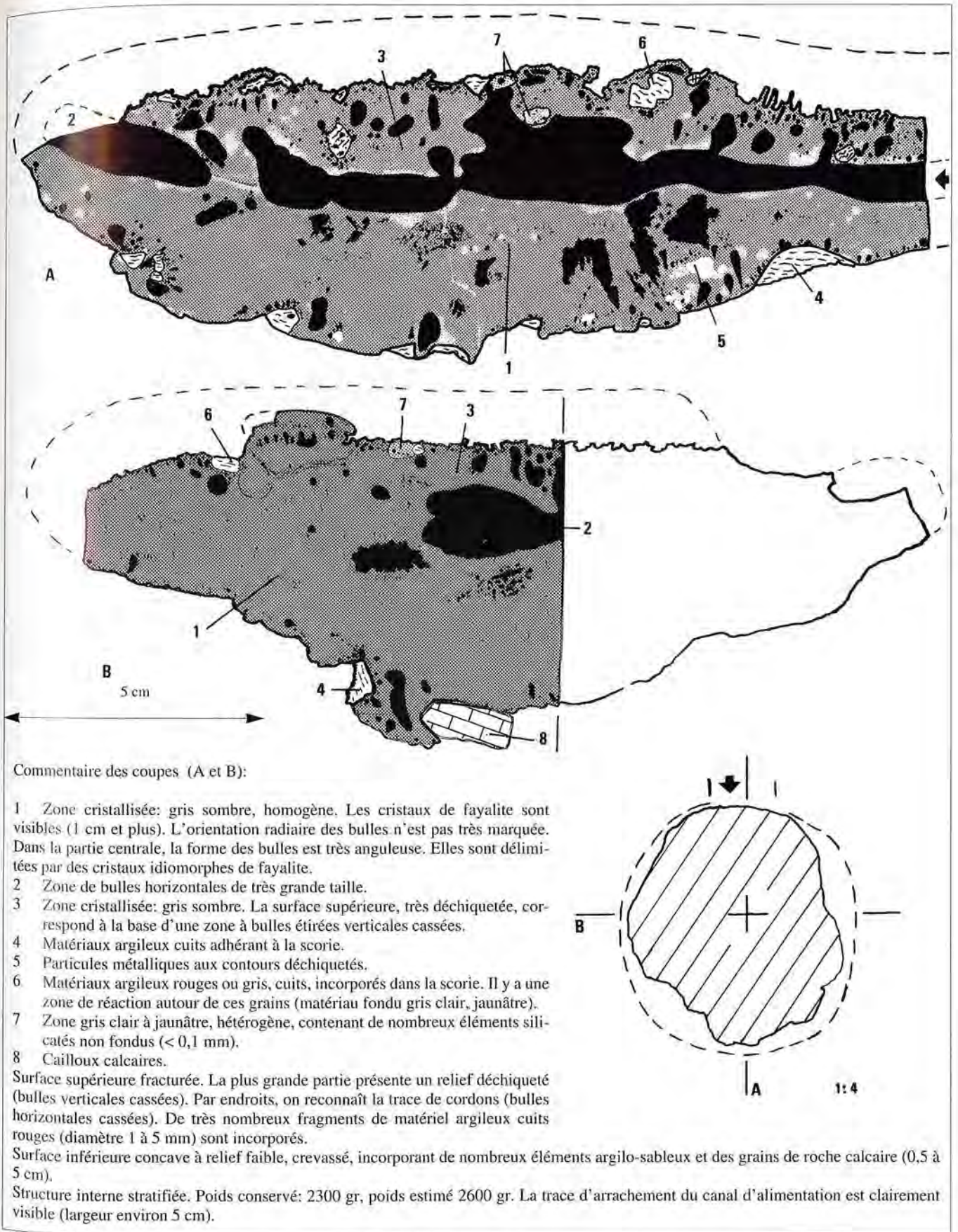


Fig. 72. SGD scorie coulée grise dense, coulure en cuvette: Ech. SLT 1 (Salève, Chez le Tournier, amas 14.1); vue de dessus, coupes perpendiculaire (A) et parallèle (B).

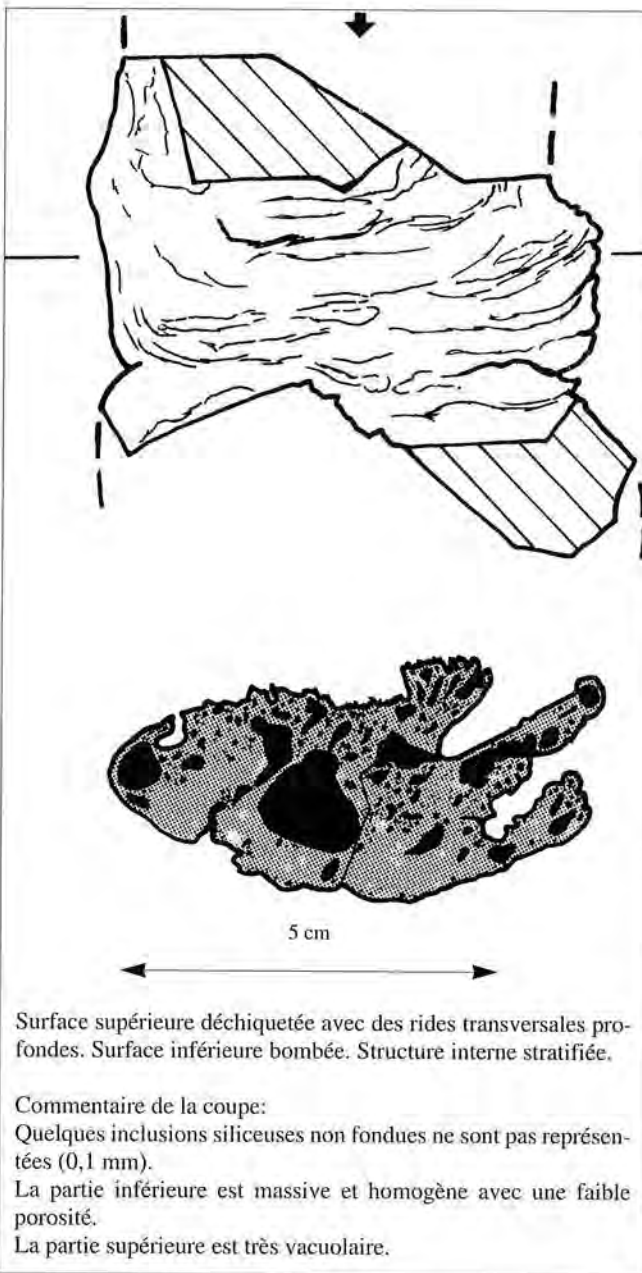


Fig. 73. Scorie coulée grise à texture vacuolaire, coulure épaisse en canal: Ech. SLF 41 (Salève, Rochers de Faverges, amas 17.1).

Il existe aussi des scories coulées grises à texture plus ou moins vacuolaire (fig. 73). Par leur nature, elles sont très proches des scories denses. Elles se distinguent par l'abondance de la porosité qui leur donne une densité apparente plus faible. Le relief de la surface supérieure est crevassé ou même déchiqueté. On observe des rides transversales incurvées profondes. Il s'agit d'écoulement turbulent ou avec une plus forte pente, mais de même nature que les écoulements en cordons plus calmes.

Sur certains fragments, on peut définir une morphologie caractéristique en coulures épaisses dans un canal. Ces pièces ont une surface inférieure bombée et régulière, moulant un canal de 10 cm de large. La surface supérieure porte des rides caractéristiques. La partie inférieure de la coulure

est dense avec une structure de refroidissement unique radiaire. Au-dessus, la porosité est beaucoup plus abondante et désordonnée. Ces pièces sont formées par un seul écoulement qui s'est fait suivant une forte pente dans un canal aménagé dans le substrat.

Les scories coulées denses grises contiennent toujours de la fayalite comme constituant minéral principal. Elle est généralement visible à l'œil nu. La hercynite est fréquente et assez abondante. Quelques échantillons montrent la présence de wüstite et de quartz (Annexe 3.3).

Les analyses chimiques des scories grises denses du Salève montrent qu'elles sont riches en fer et en silice. L'alumine au contraire, ne dépasse jamais 10%. Chimiquement, elles se distinguent nettement des scories vitreuses noires (fig. 74). La présence du wüstite reflète le chimisme général. Les 20 échantillons analysés proviennent de 5 sites différents. Leurs compositions chimiques sont globalement très proches les unes des autres. Les teneurs en éléments mineurs et traces sont toujours basses.

%	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeOtot
moyenne	26.34	7.74	60.31
sûr			
15 éch.	Si:Al	Si:Fe	
SGD	3.79	0.27	

On notera quelques particularités locales: les 5 échantillons du site de la Grotte du Diable, amas 8.1, se distinguent par une forte teneur en Mn (0,67-1,82%; moyenne de l'ensemble 0,39%). C'est sans doute une particularité de la poche de minerai exploitée. Toutefois, dans les deux concrétions d'hydroxydes de fer analysées et provenant des minières situées immédiatement au N de l'amas, cet élément n'est pas particulièrement abondant (Ech. DIA 201 et 202, Annexe 3.2).

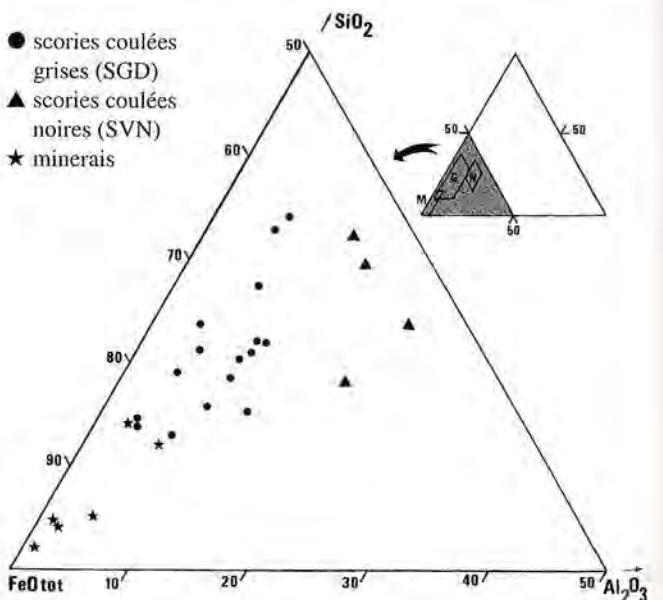
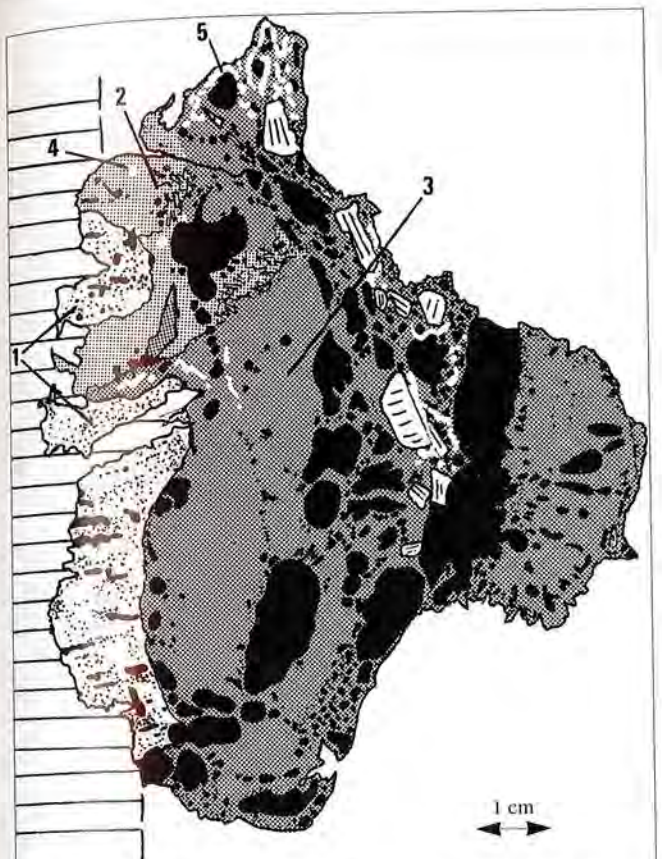


Fig. 74. Composition chimique des scories du Salève.



Les surfaces sont complexes: localement lisses, ailleurs déchi-  
quetées. Les empreintes de charbon sont très nombreuses. Une  
paroi latérale est constituée par le revêtement interne de la cuve.  
Poids conservé: 2500 gr.

Commentaire de la coupe:

La coupe est approximativement perpendiculaire au revêtement  
interne de la cuve.

- 1 Revêtement interne argilo-sableux partiellement fondu gris  
avec grains de quartz résiduels à bordure diffuse (< 0,1  
mm).
- 2 Zone gris jaunâtre partiellement cristallisée.
- 3 Zone gris sombre cristallisée (fayalite).

A l'interface entre 2 et 3 on distingue localement de grands cris-  
taux à bordure floue.

- 4 Petites sphères de fer métallique dans 1 et 2.
- 5 Filaments de fer métallique dans 3.

Fig. 75. Scorie non coulée interne en bloc suspendu. Ech. THU25  
(Salève, La Thuile, amas 7.1). Coupe.

De même, les deux scories du site des Convers, amas  
5.6, présentent une faible anomalie en Cr et Co. Elle est  
confirmée par les analyses de quatre scories coulées  
vitreuses noires provenant des autres amas de ce site. Il faut  
sans doute y voir aussi une particularité du minerai local. Les  
deux concrétions d'hydroxydes de fer de ce site sont égale-  
ment un peu plus riches en Cr et Co que les autres. Dans ce  
cas, il est donc possible de considérer qu'il s'agit d'une ano-  
malie chimique locale due au minerai.

### Les scories non coulées

Si l'immense majorité des scories du Salève présentent  
des caractères évidents démontrant leur écoulement, certains  
fragments ne peuvent être interprétés que comme des pièces  
formées à l'intérieur du bas fourneau (fig. 75).

Plusieurs échantillons se présentent sous la forme de blocs  
massifs sans orientation. Leur taille est généralement grande  
(>20 cm). Le plus fréquemment, les surfaces sont cassées.  
Lorsqu'elles sont conservées, elles présentent des empreintes  
de charbon, des zones lisses et d'autres déchi-  
quetées.

Le caractère déterminant est la présence de revêtement  
interne de la paroi sur une face latérale. Il est incorporé au  
bloc de scorie par l'action de la chaleur. La structure interne  
est très complexe au contact de la paroi partiellement fondue.  
A 2-3 cm de distance, la scorie redevient plus homogène. Les  
charbons sont nombreux et le fer, en filaments ou en gros  
nodules, est abondant. Ces pièces se sont formées à l'inté-  
rieur du bas fourneau, au contact avec la paroi mais pas sur le  
fond. Elles s'apparentent aux «scories internes massives» du  
site des Boulies à Boécourt (Eschenlohr et Semeels 1991,  
82-3).

### Signification et répartition des différentes catégories de scories

Si des différences morphologiques notables existent  
entre les diverses catégories de scories définies dans le para-  
graphe précédent, il faut s'interroger sur leur signification.  
L'étude de l'atelier de Boécourt a démontré qu'une typologie  
basée sur des fragments a des limites.

Sur une même coulure de scorie, on peut observer, si  
l'objet est complet, des aspects très différents (Eschenlohr et  
Semeels 1991, 71-84). Les ramassages de surface ne permet-  
tent pas, à de très rares exceptions près, de retrouver des  
pièces complètes.

Plus significatives, sont les associations de différentes  
catégories de scories sur un même site et la répétition de ces  
associations sur différents sites d'une même région (fig. 76).  
En effet, les détails morphologiques des scories reflètent  
directement la marche du fourneau, les tours de main des  
artisans. Si l'on trouve sur plusieurs sites la même associa-  
tion de formes, il est raisonnable de les interpréter comme le  
résultat d'un même savoir-faire. Parmi les sites prospectés au  
Salève et qui ont fourni une bonne documentation, on  
constate au moins deux associations caractéristiques.

### Amas de scories associant les SVN et les petites coulures SGD

L'amas de Clarnant (10.1) ainsi que la majorité des amas  
des Convers (5.1 à 5.5, 5.7 et 5.8), sont essentiellement  
constitués de SVN variées. Les SGD ne sont présentes que  
sous forme de petites coulures. Les autres catégories mor-  
phologiques caractéristiques ne sont jamais présentes (canal,  
cuvette). Encore faut-il rajouter que les petites coulures  
denses récoltées sur ces sites présentent des aspects bizarres  
et atypiques (formes d'écoulement particulières, couleur gris

N°	Lieu-dit	N° amas	conditions obser- vation	scories coulées								Scories non coulées		Paroi		
				grises				noires				indét.	bloc			
				denses				vacuolaires								
				indét.	petites	canal	cuvette	indét.	canal	indét.	canal					
2	Praz Penaz	2.1	moyennes	XX	X	XX		X								
4	L'Iselet	4.1	moyennes	XX	XX	XX										
5	Les Convers	5.1	mauvaises								X	X			X	
		5.2	bonnes		X						XX	XX			X	
		5.3	bonnes		X						XX	XX				
		5.4	moyennes	X	X						XX	XX			X	
		5.5	moyennes					X			XX	XX			X	
		5.6	moyennes	X	X	X	XX				XX	XX			X	
		5.7	mauvaises													
		5.8	mauvaises									X	X			
6	Les Torchés	6.1	moyennes	XX												
7	La Thuile	7.1	bonnes	X	X	XX		X								
		7.2	mauvaises	X				X					X	X	X	
		7.3	mauvaises	X							X					
8	G. Diable	8.1	moyennes	X	X	XX	XX								X	
		8.2	moyennes	X	X	X									X	
		8.3	mauvaises	X											X	
9	Les Douai	9.1	non visité													
		9.2	non visité													
10	Clarnant	10.1	bonnes		X											
11	Grange Gal	11.1	mauvaises	X							XX	XX				
12	Le Pommier	12.1	moyennes	X												
		12.2	bonnes	X	X	XX	XX							X	X	XX
		12.3	mauvaises	X												
14	C. Tournier	14.1	moyennes	X	X	X	X									
15	Chez Briard	15.1	mauvaises	X	X	X		X			X			X		
16	La Pile	16.1	moyennes	X				X								
		16.2	bonnes	X	XX	XX	XX									X
		16.3	mauvaises	X												
		16.4	moyennes	X	X	X	X	X								
		16.5	moyennes	X	X	X	X	X								
		16.6	moyennes	X	X	X	X	X								
		16.6	moyennes	X	X	X	X	X								
17	R. Faverges	17.1	bonnes	X	XX			XX	XX							
		17.2	moyennes	X	XX			XX	X							
18	Les Molliets	18.1	bonnes	X	X	X		X								
		18.2	mauvaises	X	X	X		X								
		18.3	mauvaises	X	X	X	X	X								
		18.4	mauvaises	X				X					X			
22	Grange Passet	22.1	mauvaises			XX	XX									

Fig. 76. Répartition des différentes catégories morphologiques de scories sur les sites du Salève.

jaunâtre, etc.). Elles possèdent, en outre, un caractère technique propre: la surface inférieure montre qu'elles sont systématiquement coulées sur un lit de charbons de bois dont elles gardent les empreintes. En général, il en va de même pour les SVN mais pas pour la grande majorité des autres SGD. De plus, il faut rappeler qu'une nette différence de composition chimique, en particulier pour la teneur en alumine, permet de distinguer les deux grandes familles de scories du Salève (fig. 74).

Le matériel de ces sites correspond à une technique spécifique de réduction du minerai de fer. La charge du bas fourneau est riche en alumine. Les scories sont évacuées hors de la cuve par écoulement à une température à peine supérieure à leur point de fusion. Les scories se forment sur un lit de charbons dont elles gardent l'empreinte (fig. 77A).

#### Amas de scories associant les différentes catégories de SGD

La grande majorité des autres sites présentent différentes associations de SGD. Les observations faites jusqu'à présent

ne permettent pas de mettre en évidence des subdivisions plus fines à l'intérieur de ce groupe. Tout au plus, remarque-t-on que les sites où les SGD vacuolaires dominent sont ceux où les coulures en cuvette sont absentes. C'est le cas aux Rochers de Faverges (17.1 et 17.2) et aux Molliets (18.1). Cette observation ne porte toutefois que sur trop peu de sites pour avoir vraiment du poids. De plus, le site de La Thuile (7.1) a livré des pièces ambiguës et pourrait être un contre-exemple.

Dans l'état actuel des connaissances, l'ensemble des catégories de SGD, mis à part les petites coulures associées aux SVN, doivent donc être interprétées comme les produits d'une seule technique, sans doute avec des variantes de détail. La charge utilisée est riche en silice et pauvre en alumine. Les scories s'écoulent vraisemblablement de manière continue directement sur le substrat aménagé en cuvette à cet effet (fig. 77B).

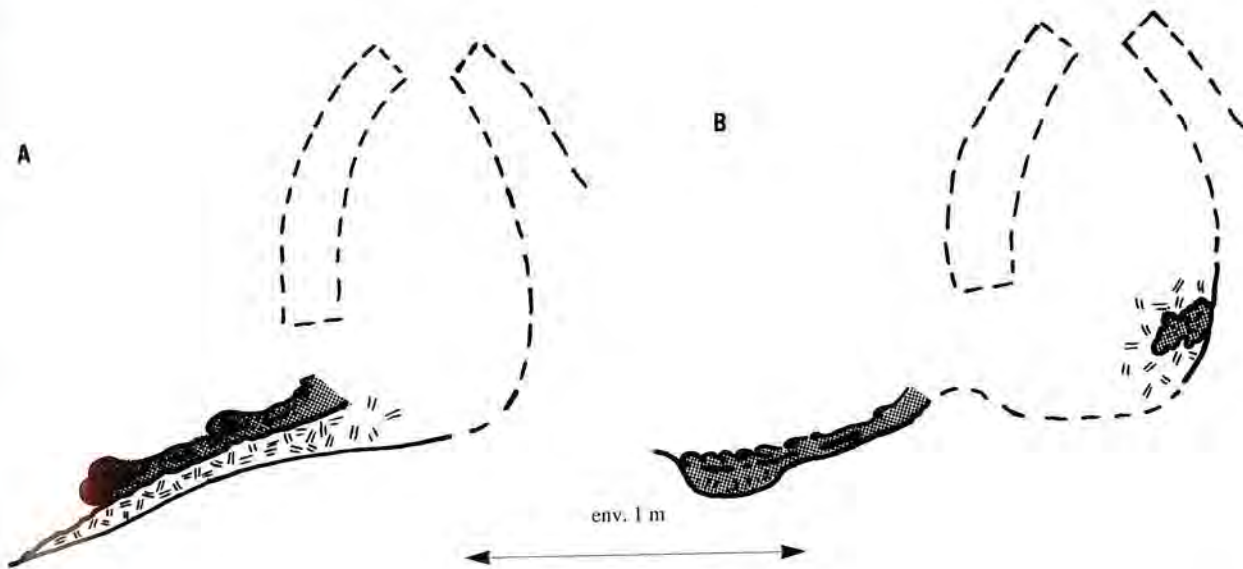


Fig. 77. Schéma des deux techniques de réduction du Salève. A: bas fourneau à scories coulées noires vitreuses (SVN). B: bas fourneau à scories coulées grises denses (SGD).

#### Cas de mélange

Le site de Chez Briard (15.1) est un des rares cas où les scories des diverses catégories coexistent. Il faut rappeler que ce site n'est confirmé que par des scories éparses. Il est situé au pied du Salève, en terrain cultivé, au débouché de plusieurs ravins. Le mélange pourrait être artificiel. Dans le cas de L'Isalet (amas 4.1), les scories vitreuses n'ont pas été découvertes dans l'amas lui-même mais à proximité du chalet. Ce site est sans doute plus complexe qu'il n'apparaît au premier abord.

#### Interprétation de la répartition des différentes catégories de scories

On trouve donc au Salève les traces de deux savoir-faire distincts. Les matières premières utilisées ainsi que les manières de faire fonctionner le bas fourneau sont nettement différentes.

Il ne s'agit pas là seulement d'une réponse aux variations locales de la qualité du minerai. En effet, sur le site des Convers, les amas 5.6 et 5.7 se trouvent à quelques mètres l'un de l'autre et à peu de distance des autres amas (fig. 55). Pourtant, l'amas 5.6 est exclusivement composé de scories grises denses coulées, pauvres en alumine et les 7 autres ne contiennent pratiquement que des scories vitreuses noires, riches en alumine. Par ailleurs, les scories des Convers, amas 5.6 inclus, présentent une anomalie en Co et Cr qui les distinguent du reste des ateliers de réduction du Salève.

Ces données indiquent qu'à partir d'un même minerai de base, on a travaillé volontairement, tantôt avec une charge alumineuse, tantôt non. Ceci met en évidence une différence soit dans la technique de préparation du minerai, soit dans la contamination de la charge pendant l'opération, par ajout de matière ou réaction avec la paroi.

La composition chimique des scories reflète donc, dans ce cas, des différences dans les techniques d'élaboration du minerai ou de réduction. Ceci est confirmé par la répartition des catégories de scories à l'échelle de la région.

## Relations entre le minerai et les scories

### Les analyses chimiques

Les analyses chimiques permettent de différencier clairement les deux principales familles de scories du Salève (Annexe 3.3). Cette séparation est nette pour les principaux constituants:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{FeO}_{\text{tot}}$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (fig. 74). Elle est assez bien marquée pour certains éléments mineurs ( $\text{CaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  et  $\text{MgO}$ ). Pour les autres éléments, et en particulier les traces, elle s'estompe. Les particularités qui apparaissent alors reflètent la provenance des échantillons.

Les rapports Si:Fe sont relativement constants pour les SGD (moy. 0,27:1) et pour les SVN (moy. 0,65:1). Par contre, les teneurs en Al sont difficiles à interpréter. On constate un net enrichissement des SVN, mais les rapports Si:Al sont très variables, même à l'intérieur de chaque famille (min. 1,69:1; max 5,97:1; fig. 78).

Les minerais couvrent la même gamme que les scories. On peut donc déduire que l'on trouve sur le Salève des concrétions d'hydroxydes de fer à partir desquelles il est possible de fabriquer ces scories. Au-delà de cette cohérence globale, l'échantillonnage montre rapidement sa faiblesse. Les analyses sont trop peu nombreuses et les échantillons sont ramassés dans des conditions trop aléatoires.

Les cinq échantillons provenant du site de la Grotte du Diable (DIA 1 à 5) présentent des rapports Si:Al assez élevés et qui sont tous du même ordre de grandeur (moyenne 5:1,

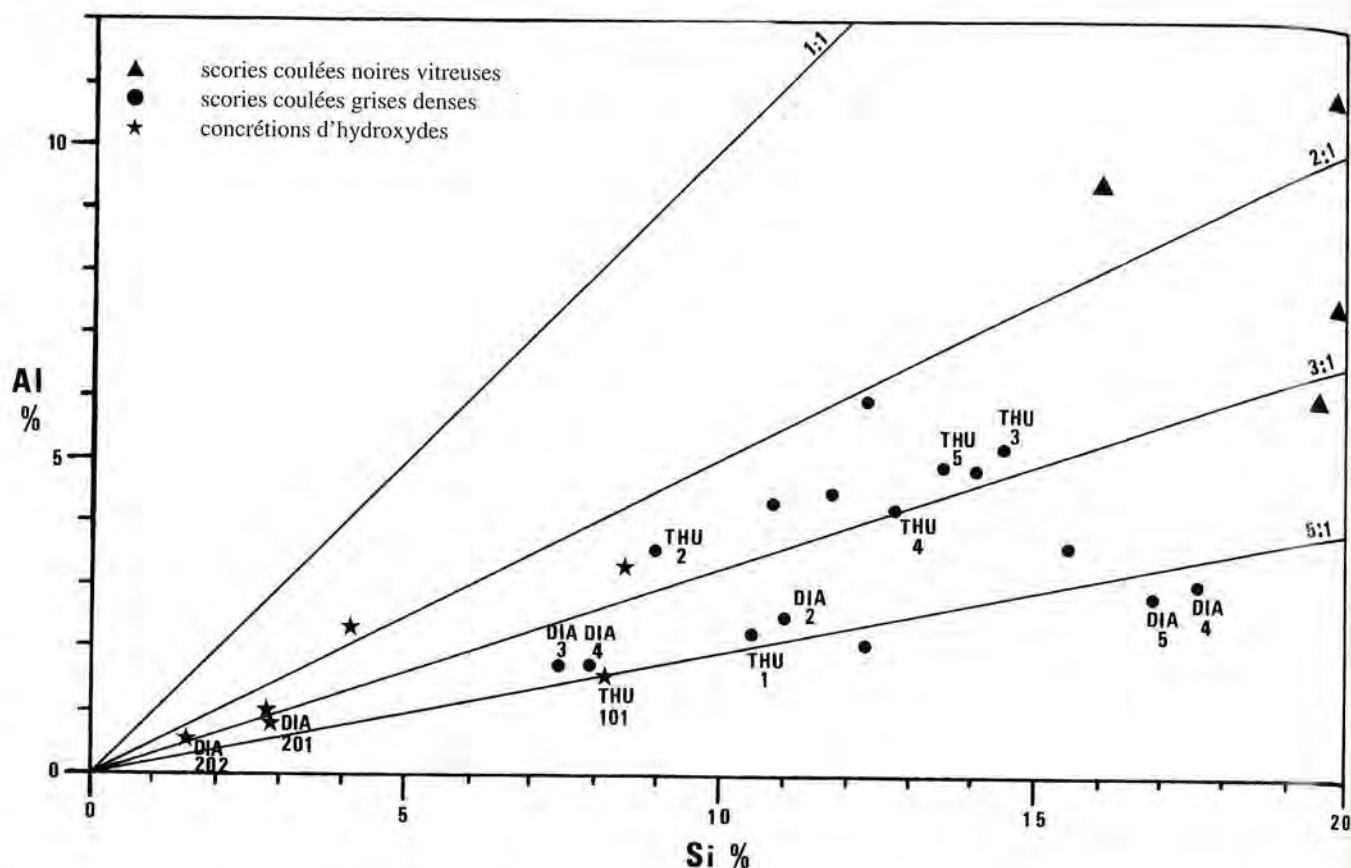


Fig. 78. Rapport Si:Al des échantillons du Salève.  
DIA 1 à 5, 201 et 202: Combe de la Grotte du Diable (site 8). THU 1 à 5, 101: La Thuile (site 7).

fig. 78). Cette cohérence interne du groupe permet de supposer que ces échantillons dérivent d'une même source. La charge du bas fourneau présente un rapport constant Si:Al.

Les concrétions ferrugineuses de ce site (DIA 201 et 202), très riches en fer, ont un rapport Si:Al un peu plus faible (3,21:1). Elles ne peuvent donc pas fournir toute la silice nécessaire. Il faut ici supposer un apport extérieur peu élevé: la gangue, le revêtement interne des parois ou la cendre de charbon. Le résultat du calcul de production pour la site de la Grotte du Diable est donné à la fig. 79,

	Scorie moy.	Minerai moy.
gr/100 gr		gr
Al:	2.37	0.66
Si:	12.18	2.16
Fe:	49.06	65.30
Al:	>359 gr. min	= 100 gr. sco
Si:	>359 gr. min + 4.4 gr.Si	= 100 gr. sco
Fe:	>359 gr. min	= 100 gr. sco + 158 gr.fer
	rendement: 67%	production: 1.58
	chiffres non significatifs	

Fig. 79. Calcul de production pour le site de la Grotte du Diable, Salève. Ces chiffres ne sont pas significatifs.

La production calculée ici serait considérable, la quantité de fer produite étant une fois et demie supérieure à la quantité de scories. C'est la très haute teneur en fer des concrétions analysées qui amène à cette conclusion. Si ce sont réellement elles qui ont été mises dans le fourneau, il faut admettre ces chiffres. Mais il n'y a aucun argument pour le prouver. En effet, si les concrétions sont mélangées, même en faible proportion, à de la gangue, les chiffres vont diminuer fortement.

De plus, l'anomalie positive en Mn des scories de ce site n'est pas confirmée par les analyses de minerai. Enfin, l'échantillonnage est trop limité et les résultats trop dispersés pour utiliser des moyennes de manière valable. Ce calcul n'est donc pas crédible.

La majorité des scories du site de La Thuile (THU 2 à 5) présentent également des rapports Si:Al proches (moyenne 2,75:1). La dernière analyse est nettement différente (THU 1, 4,60:1). Le morceau de minerai ramassé sur place est encore plus siliceux (THU 101, 5,25:1). Ces données ne sont pas assez cohérentes pour être utilisées dans un calcul. Les autres échantillonnages sont trop incomplets pour tenter cette approche (2 scories par amas).

Certains échantillons de minerai du Salève ne contiennent pratiquement que du fer. D'autres sont plus riches en silicium et/ou aluminium. Ces éléments se trouvent dans des minéraux, grains de quartz (Si) ou argiles (Si, Al, K), qui sont pris dans les cavités et les irrégularités de surface des

concrétions d'hydroxydes. Le rapport Si:Al exprime donc, dans une certaine mesure, le rapport quartz / argiles piégés. Il reflète sans doute le faciès du Sidérolithique dont proviennent les concrétions. C'est un facteur «naturel» sur lequel l'homme n'a guère d'influence.

La teneur en fer est inversement proportionnelle à la quantité de minéraux piégés. Ce sont les procédés de concentration et de lavage du minerai qui contrôlent cette quantité. Les échantillons, ramassés en surface près de zone d'exploitation ou d'amas de scories ne peuvent être considérés comme représentatifs de ce qui a été réellement utilisé par les artisans dans les bas fourneaux.

### Réaction avec la paroi et apport de la cendre

Il n'est pas possible de chiffrer une contamination de la charge par la paroi du bas fourneau. Pour cela, il faudrait bien sûr connaître la nature de celle-ci et, d'autre part, détecter un rapport entre deux éléments de la gangue qui soit stable et significatif. Les scories et les minerais du Salève ne présentent pratiquement aucune impureté importante. Utiliser des éléments présents en quantités infimes, comme Mn, Mg ou Ti, entraîne un trop grand risque d'erreur. La réaction avec la paroi est toutefois bien attestée par les observations macroscopiques sur les échantillons.

La nature de la paroi va avoir dans ce cas précis une importance fondamentale. En effet, si la paroi est alumineuse, un apport, même très faible, va avoir une forte répercussion sur le calcul de production. Le minerai ne contenant que des quantités infimes d'Al, il faut beaucoup de minerai pour apporter cet élément à la scorie. Si la paroi en fournit une partie, on utilisera d'autant moins de minerai. On apporte donc beaucoup moins de fer. Le rendement et la production chutent immédiatement. Les fragments de parois retrouvés ont une consistance argileuse. Ils contiennent certainement de l'aluminium, sans doute en proportion plus importante que le minerai. Les chiffres énormes que l'on calcule sans tenir compte de la nature de la paroi s'expliquent ainsi.

La cendre de charbon joue également un rôle. Les concrétions d'hydroxydes de fer ne contiennent pas de Ca alors que, dans les scories, la teneur varie de 1 à 5% de manière apparemment aléatoire. Cet apport peut être mis en relation avec l'environnement calcaire du Salève. La charge minérale a pu être contaminée par des fragments de calcaire. Le revêtement interne des parois du bas fourneau peut en contenir. Enfin, et c'est l'hypothèse la plus probable, le charbon issu des arbres du Salève contient une proportion importante de cet élément. Au cours de l'opération de réduction, le Ca se mêle à la scorie et non au métal.

### Les éléments mineurs et traces

Les éléments mineurs et traces se trouvent en très petites quantités dans tous les matériaux étudiés sauf dans les concrétions ferrugineuses de la carrière de Vovray où les teneurs, parfois élevées, sont extrêmement variables d'un échantillon à l'autre.

$K_2O$  semble être corrélé avec  $Al_2O_3$  (enrichissement dans les SVN). MnO est irrégulier (anomalie DIA). MgO,  $TiO_2$  et  $P_2O_5$  sont bas.

Les scories du site des Convers (site 5) présentent des teneurs en Cr et Co un peu plus fortes que les autres (éventuellement aussi en V). Le spectre des traces des minerais et celui des scories sont très différents. Suivant les éléments, on observe soit un enrichissement, soit un appauvrissement dans les scories par rapport aux minerais (fig. 80).

On constate une augmentation des teneurs en éléments «lithophiles» et une diminution pour les «sidérophiles». Les éléments intermédiaires, V et Cr, subissent une faible augmentation. Ils ne sont pas réduits au cours de l'opération et donc celle-ci s'est déroulée à des températures relativement faibles.

L'absence totale du Cu, dans les scories et surtout dans les minerais, est une caractéristique du Salève. Dans les autres régions, les minerais contiennent quelques ppm de cuivre. Par contre, les teneurs nulles en Ag, Sb et Sn, sont, elles, beaucoup plus habituelles.

enrichissement:	$TiO_2$ , MgO, $P_2O_5$ Zr, Y, Sr, Rb, Ba, V Cr MnO
faible + pépite	
appauvrissement:	As, Pb, Zn, Ni, Co
absent:	Cu, $Na_2O$

Fig. 80. Comportement des éléments mineurs et traces dans les scories du Salève par rapport aux minerais supposés.

## L'ancienne industrie du fer dans la région du Salève

### Problème de datation des ateliers de réduction

Deux techniques de réduction du minerai de fer ont laissé des traces sur le sommet du Salève. Il semble probable qu'elles ne sont pas contemporaines et correspondent à deux phases d'exploitation distinctes. Les seuls indices fournis par l'archéologie sont les traces d'occupation de la fin de l'âge du Fer. La fréquentation de la montagne à cette période peut-elle être en relation avec l'exploitation du minerai?

Existe-t-il une exploitation à l'époque romaine? Aucune indication ne semble confirmer cette hypothèse.

Une industrie datant du Haut Moyen Age est également envisageable. Elle serait contemporaine du développement général de la sidérurgie dans l'ensemble de l'arc jurassien. Les scories du Salève, en particulier les SVN, présentent des similitudes avec les résidus de cette époque trouvés dans les régions voisines. Cet argument n'est toutefois pas suffisant, car les vestiges des autres époques sont encore trop mal connus.

Au Moyen Age, il n'y a pas de témoignage d'une activité métallurgique notable dans la région. Mais ils n'ont pas

non plus été recherchés! Les archives de la Chartreuse de Pommier, pourraient, sur ce point, fournir quelques informations intéressantes (Charvet 1967, 187-92).

En tout état de cause, pour faire avancer les connaissances dans le domaine de la chronologie, il suffirait de peu de chose: quelques datations radiométriques de charbon. Dans cette région, ce devrait être impérativement la prochaine étape de la recherche.

### La production

Les deux phases d'exploitation que l'on peut mettre en évidence ont laissé des volumes de déchets importants (fig. 66 et 81).

Si les sites à SGD sont de loin les plus nombreux, ils sont en général nettement moins volumineux que les autres. En revanche, 1 m<sup>3</sup> de SGD a certainement un poids bien supérieur au même volume de SVN.

Phases d'exploitation	Nombre de sites	Volume de scories m <sup>3</sup>
1 (?) SGD	23	800
2 (?) SVN	8	1300

Fig. 81. Volume de scories des deux phases d'exploitation du Salève.

Les masses de déchets produits au cours de chacune des deux phases d'activité semblent donc à peu près du même ordre de grandeur. Il est, par contre, impossible de cerner la durée de ces deux périodes.

L'approvisionnement en minerai n'a jamais dû être un problème sur le Salève. Le Sidérolithique abonde et il contient de nombreuses concrétions ferrugineuses suffisamment riches pour être utilisables. L'extraction en minière est certainement la technique la mieux adaptée aux gisements peu profonds et meubles.

L'eau est une denrée rare au sommet du Salève. Les ressources hydrauliques infimes interdisent d'imaginer qu'elles purent être utilisées comme source d'énergie. Mais ce n'est pas le seul rôle de l'eau dans le processus métallurgique. Il faut de l'eau pour construire et réparer les fourneaux et pour éteindre la soif des travailleurs. Les filets d'eaux qui circulent dans les ravins, les faibles sources, voire les mares stagnantes, peuvent couvrir ces besoins. Par contre, il faut de l'eau pour laver le minerai et cette opération est d'autant plus facile à mener que l'on dispose d'une eau abondante. Sur le Salève, cela a certainement posé problème.

La consommation de bois, sous forme de charbon a dû être importante. Elle est extrêmement délicate à chiffrer. En utilisant des estimations majorées, on arrive aux chiffres de la fig. 82 (Eschenlohr et Serneels 1991, 105-6). Avant l'exploitation sidérurgique, la montagne devait être entièrement couverte de forêt ce qui représente environ 40 km<sup>2</sup>, soit 4000 ha. D'après cette estimation, le Salève n'a donc pas pu être totalement déboisé par l'activité métallurgique.

Volume de scories connu	> 2000 m <sup>3</sup>
Volume de scories estimé	3000 m <sup>3</sup>
Poids de scorie estimé	3000 t
Poids de charbon (x 4)	12000 t
Poids de bois (x 5)	60000 t
Volume de bois (x 0.7)	42000 m <sup>3</sup>
Superficie de forêt (x 0.005)	210 ha

Fig. 82. Estimation de la consommation de bois par la sidérurgie du Salève.

Par contre, autour des ateliers, des clairières de plusieurs hectares durent être défrichées. Relayé par des activités pastorales, ce déboisement a pu se maintenir. Il est intéressant de relever que dans de nombreux cas, les amas de scories se situent à proximité de bâtiments agricoles modernes mais dont l'existence remonte éventuellement au début du Moyen Age (Guichonnet 1988, 56-8). Ces établissements ont peut-être profité des espaces ouverts par l'exploitation métallurgique. Toutefois, les exemples d'amas de scories en pleine forêt sont, eux aussi, nombreux.

Enfin, la production totale de fer ne peut pas être chiffrée sur la base de nos données d'analyses. Pour cela, il serait nécessaire de définir le minerai réellement utilisé. Seule une fouille archéologique permettrait de le faire. L'estimation basée sur les échantillons du site de la Grotte du Diable, extrêmement élevée, ne doit pas être retenue (fig. 79). Pour avoir un ordre de grandeur, la donnée la plus fiable est celle du volume de scories reconnu sur le terrain, soit 2000 t environ. En se référant à des estimations très grossières, on peut admettre que le fer récupéré correspond à une valeur entre 10 et 30% du poids des scories produites soit 200 à 600 t de métal. Il faut bien souligner que la qualité de cette estimation est extrêmement médiocre: la prospection est incomplète et les données analytiques sont insuffisantes pour faire aboutir le calcul de production! Enfin, aucun argument ne permet de fixer l'âge et la durée de cette industrie.

Dans l'état actuel des connaissances, le Salève apparaît comme une zone de production sidérurgique d'importance moyenne. Toutefois, le tableau que l'on peut en dresser demeure très incomplet à bien des points de vue.

Le Salève fut une région de production primaire de fer d'importance moyenne. L'extraction minière est démontrée et les ateliers de réduction sont nombreux. La répartition des sites semble subordonnée à celle des poches de minerai.

Deux méthodes différentes de réduction sont attestées. Elles ne sont probablement pas contemporaines. La datation ne repose que sur des éléments incertains. L'exploitation pourrait débuter à la fin de l'âge du Fer et éventuellement se prolonger sans changement technique à l'époque romaine (phase ancienne: SGD ?). Une modification de la technique marquerait la sidérurgie du Haut Moyen Age (phase récente: SVN ?).

Par ailleurs, aucune trace de métallurgie secondaire n'a pu être mise en évidence sur la montagne. Le produit brut des bas fourneaux devait être exporté hors de la zone de production primaire.

## Les régions de Genève et Annecy

### Le Sidérolithique de la chaîne du Reculet et du Vuache

La chaîne jurassienne du Reculet et du Vuache borde la cuvette genevoise à l'O et au S (fig. 85). On y signale de rares affleurements de Sidérolithique. Ces pointements ne sont pas forcément exploitables mais leur existence reste un indice. Dans la plupart des cas, ce sont des sables ferrugineux qui ont été observés ainsi que des argiles (bolus). On signale tout de même des concrétions ferrugineuses à Collonges et surtout à Sarzin (fig. 83 et fig. 85, N° 7-9 et 14; Schardt 1891, 11 et 150).

Une petite exploitation de minerai de fer est mentionnée sur le versant NO de la chaîne du Reculet, entre Lélex et le Crêt de la Neige, (fig. 83 et fig. 85, N° 4; «près des chalets de Malay», Schardt 1891, 115-6; Krummenacher 1971, 252). Ce minerai est décrit comme un remplissage filonien d'oxydes de fer. Les deux filons, de 30 et 80 cm de puissance, ont été excavés en deux points (altitude 1290 et 1325 m). L'âge de cette exploitation n'est pas confirmé.

Plusieurs indices toponymiques attirent également l'attention au pied de la chaîne entre Collonges et Thoiry (Farges, Ferruaz, plusieurs Martinet, moulin Favre).

### Les vestiges métallurgiques anciens de Genève et du Genevois

A l'époque de La Tène finale, Genève est une bourgade tournée vers le lac, au pied d'un oppidum. Avec la domination romaine, elle s'affirme comme un carrefour commercial important et la ville se développe. A la suite des invasions alamanes au cours de la seconde moitié du III<sup>e</sup> siècle, la population genevoise se retire sur la colline fortifiée. Au milieu du V<sup>e</sup> siècle, Genève devient la capitale des Burgondes puis le siège d'un évêché (Sauter 1973a, 27-9; 1973b, 30-6; Paunier 1981, 5-17).

Des scories ont été retrouvées près du port gaulois, formant une couche compacte (fig. 84). Une autre «fonderie», de la même époque, a été reconnue à l'emplacement de l'ancien observatoire. Cet atelier se trouvait à l'intérieur d'une cabane. Dans les deux cas, on note la présence de fragments de creuset pour fondre le métal. La fonderie d'époque romaine de la rue des Chaudronniers 16 est un atelier de métallurgie du cuivre (Bonnet 1986, 55-8). D'autres mentions de vestiges de métallurgie pourraient se rapporter à l'époque romaine. Elles témoignent du travail de différents métaux. Le fer n'est pas individualisé et aucun indice ne permet de reconnaître ou d'exclure la réduction du minerai.

Dans les campagnes du Genevois, l'occupation du sol devient dense dès le début de notre ère. La population rurale

1	Col de la Faucille	Krummenacher 1971, p.251	sables et argiles sidérolithiques molasse (Oligocène)
2	Carrières de Villeneuve	Schardt 1891, p.107	argiles bleuâtres
3	Ferme Trompette	Krummenacher 1971, p.252	sables et argiles sidérolithiques
	Carrières "entre Thoiry et Ecorans"	Schardt 1891, p.109	argiles
4	Crêt de la Neige	Schardt 1891, p.115 Krummenacher 1971, p.251	filons d'oxydes de fer
5	entre le Crêt de la Neige et le Reculet	Krummenacher 1971, p.251	sables et argiles sidérolithiques
6	E. de Fenières	Krummenacher 1971, carte	
7	Collonges, carrière N	Schardt 1891, p.110 Arikian 1964, p.36	sables et argiles sidérolithiques bloc de minerai scoriacé
8	Collonges, carrière S	Schardt 1891, p.110 Arikian 1964, p.36	sables et argiles sidérolithiques
9	Collonges, S du village	Schardt 1891, p.110-1	sables sidérolithiques
10	Chevrier, carrière	Schardt 1891, p.134 Arikian 1964, p.36 Vernet 1962, p.47-57 Martini 1965, p.71-2	sables ferrugineux sidérolithiques concrétions ferrugineuses
11	Chevrier, route	Arikian 1964, p.36	sables ferrugineux sidérolithiques
12	Château d'Arcine	Schardt 1891, p.144	sables et argiles rouges
13	Malpaz (Chaumont)	Schardt 1891, p.147 carte géologique Seyssel	sables ferrugineux sidérolithiques
14	Sarzin (Mont Musièges)	Schardt 1891, p.150 carte géologique Seyssel Martini 1965, p.73-4	sables ferrugineux concrétions ferrugin. pisiformes
15	Ferrières (Montagne de Mandallaz)	carte géologique Seyssel	Sidérolithique
16	Montrottier	Martini 1965, p.72-3	sables et argiles sidérolithique
17	Extrémité N du Semnoz	Schardt 1891, carte	Sidérolithique ?

Fig. 83. Mentions du Sidérolithique le long de la chaîne du Reculet-Vuache.

se maintient malgré les incursions barbares. A Meyrin GE; fig. 84), lors de la construction du CERN, une fosse avec des cendres, des scories et des pierres calcinées a été observée dans un établissement gallo-romain (fabrication de céramique?). Les découvertes de Carouge GE, «débris d'armes et d'instruments en fer», ne démontrent pas l'existence d'un atelier (Blondel 1940, 62-3).

L'établissement agricole de Sézegnin (Avusy, GE; fig. 84), est un des rares habitats datés de la fin du IV<sup>e</sup> au début du V<sup>e</sup> siècle. Le fond de cabane N° 40 et les fosses voisines, ont livré «une grande quantité de scories, de lingots et d'outils manufacturés» en fer. Cette structure peut être interprétée comme un atelier de forgeron (présence de métal en cours de travail: outils, lingots).

Près de Veigy (Viry, 74, F, fig. 84), au lieu dit Les Mermes, une «scorie de fer» a été trouvée dans une gravière en compagnie d'objets romains.

Le Pays de Gex voit se développer une industrie médiévale. Au cours des XIV<sup>e</sup> et XV<sup>e</sup> siècles, une mine est en activité près de Saint-Jean-de-Gonville et une seconde près de Divonne-les-Bains (Braunstein et Chapelot 1983, 41). La première mention pourrait correspondre à l'indice géologique de Fénières (N° 6), à ceux qui en sont proches (N° 2-5) ou encore à un gisement disparu. Le second est à rapprocher des affleurements du col de la Faucille (N° 1). Il n'est pas possible de fixer plus précisément ces mentions tirées des archives. A la même époque, un, puis des «fourneaux» et un «martinet» sont situés à Mijoux et à Divonne (Braunstein et Chapelot 1983, 41). Un autre «martinet» est installé à Gex (Pelet 1978, 281 note 4.14).

### Le Sidérolithique de la Montagne de Mandallaz

Le segment jurassien du Salève se prolonge vers le SO au-delà de Cruseilles jusqu'à Lovagny. Le Sidérolithique est présent au pied du versant E de la Montagne de Mandallaz (feuille Seyssel 677). Les affleurements encadrent le village de Ferrières dont le nom ne peut être dû au hasard (fig. 83 et 85, N° 15). D'autres toponymes sont portés sur les cartes

dans les environs immédiats: «Terre Rouge», «Chez les Favres» et «Les Lavorels». Il est très probable qu'une industrie métallurgique se soit développée dans ce secteur. En l'absence de prospection de terrain et d'étude d'archives, il est impossible de proposer une datation. Il faut également mentionner les affleurements de terrains éocènes de la Montagne d'Age. Des concrétions ferrugineuses ont cependant été observées près de Montrottier (Martini 1965, 72-3).

### Les vestiges métallurgiques anciens de la région d'Annecy

Une agglomération secondaire se forme à l'époque romaine sur le site d'Annecy, en relation avec le développement du réseau routier. Pendant le Haut Moyen Age, c'est une paroisse rurale à laquelle un bourg médiéval fortifié succédera (Broise 1984, 17-22). Sept «fonderies ou forges» sont répertoriées à Annecy. Des scories et des outils ont été découverts au cours de fouilles (Broise 1974, 115, 152 et pl. 14; Broise 1984, 69). Une métallurgie artisanale urbaine est donc attestée. C'est vraisemblablement une industrie de transformation et rien n'indique la réduction du minerai de fer.

Dans la campagne environnante l'occupation est dense à l'époque romaine mais on ne mentionne des scories que sur 2 sites de la commune de Mésigny (74, F), aux lieux dits Les Esserts et La Bovière (Broise 1984, 252).

## Conclusion

Les traces d'activités artisanales urbaines, tant à Genève qu'à Annecy à la fin de l'Age du Fer et pendant l'époque romaine, pourraient être en relation avec la phase ancienne de l'exploitation. Toutefois, ces deux agglomérations sont, à l'époque romaine, reliées à un vaste réseau de communications permettant un approvisionnement en métal. La forge de Sézegnin, datée du Haut Moyen Age est un indice intéressant mais aucune relation formelle ne peut être établie avec la phase récente d'exploitation du minerai de fer sur le Salève.

Genève (GE)	forge ?	AdF	port (rue de la Madeleine)	Paunier 1981, 85-7 Blondel 1926, 74-7
	forge ?	AdF	vicus (ancien observatoire)	Paunier 1981, 83-4 Blondel 1943, 32-3
	forges ?	R	autres	Blondel 1932, 59-62 Broise 1974, pl.12
Meyrin (GE)	céramique ?	R	villa ? (CERN)	Blondel 1956, 117-22 Paunier 1981, 150
Sézegnin (GE)	forge	HMA	habitat et nécropole	Privati 1983, 45-7 Privati 1986, 76
Veigy (GE)	?	R ?	gravière	Revue savoisienne 1906, 184
Annecy (74)	7 forges ?	R	vicus	Broise 1974, pl.14
Mésigny (74)	?	R	villa (Les Esserts)	Broise 1984, 252
	?	R	villa (La Bovière)	Broise 1984, 252

Fig. 84. Mentions de vestiges métallurgiques (scories) dans les environs de Genève.

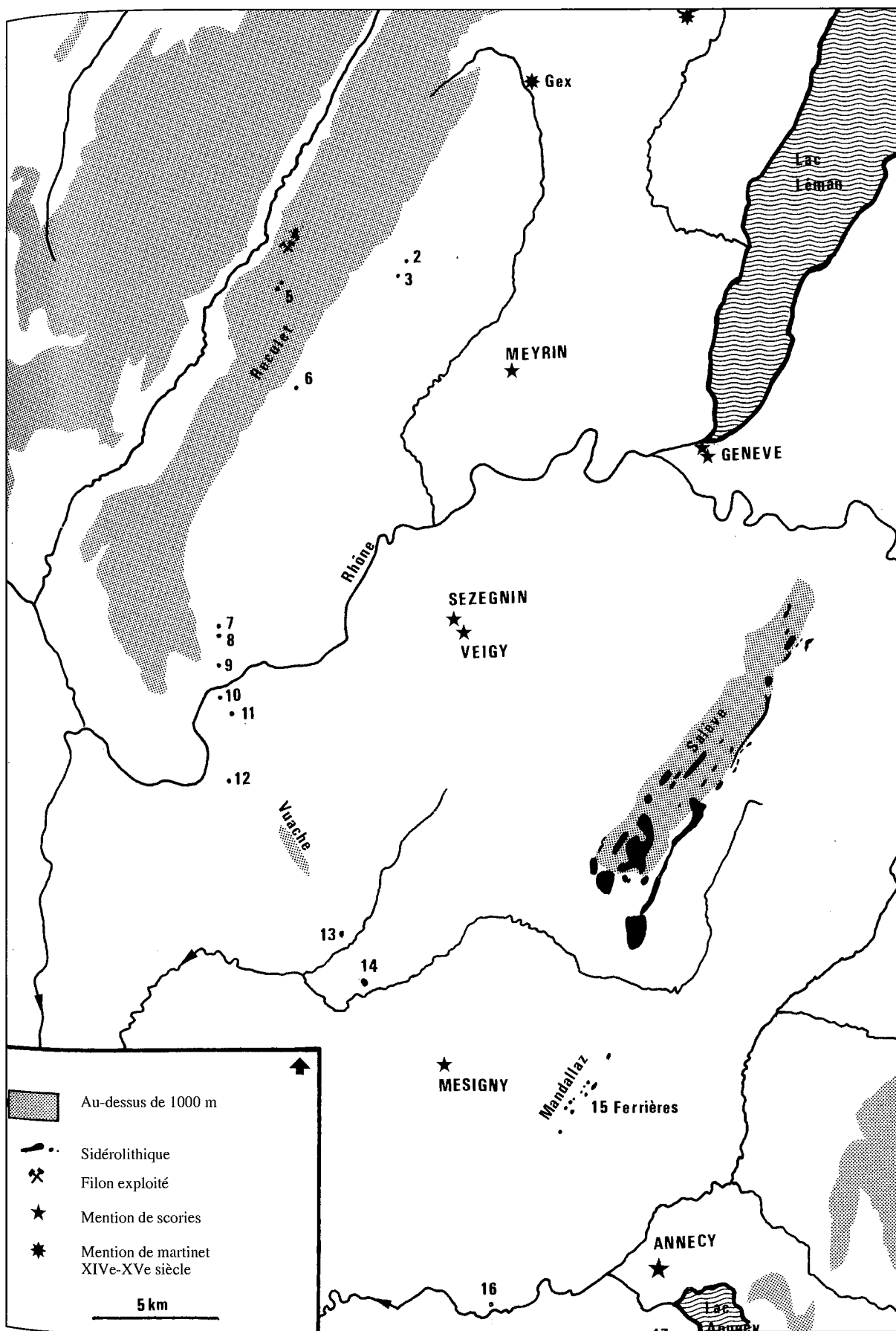


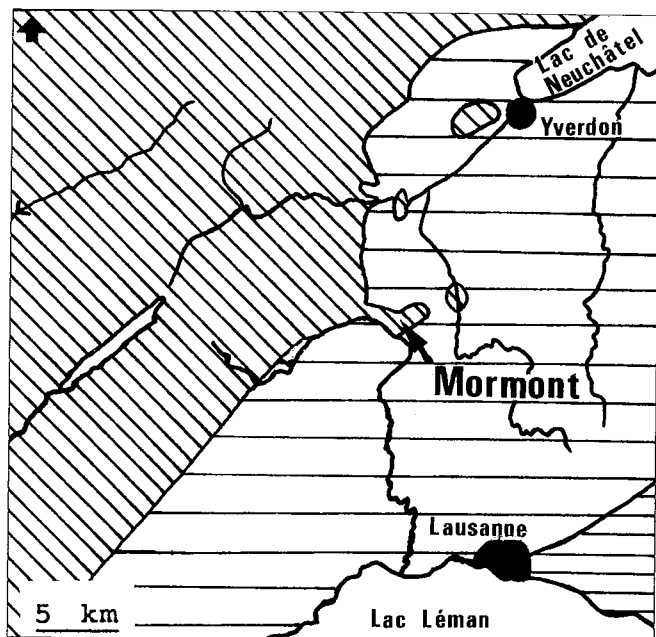
Fig. 85. Minerais potentiels et mentions de scories dans la région genevoise.

## 5

# LE DISTRICT SIDÉRURGIQUE DU MORMONT

(VAUD, SUISSE)

**A**MI-CHEMIN entre Lausanne VD et Yverdon VD, le Mormont est un relief qui sépare la plaine de la Venoge de celle de l'Orbe (fig. 86). Il est situé au pied de la première chaîne du Jura mais est orienté perpendiculairement à l'axe principal de celle-ci. Les pentes sont assez raides formant localement des falaises. Son altitude ne dépasse guère les 600 m. Il est coupé en deux par le ravin d'Entreroches.






-  Domaine jurassien
-  Molasse du Plateau
-  Molasse subalpine

Fig 86. Esquisse tectonique de la région du Mormont. 1:500 000.

Depuis la ville médiévale de La Sarraz (497 m), à l'O du Mormont, le relief s'élève en direction du NO, jusqu'à 900 m d'altitude. Plus haut, la pente s'accroît jusqu'à la crête de la chaîne orientale du Jura (1300 m, Dent de Vaultion 1482 m). Vers le N, les gorges du Nozon, fortement encaissées, coupent le paysage. Au S, la Venoge coule dans la plaine.

Les premiers géologues vaudois, Chavannes, Jaccard et d'autres, s'intéressèrent de près au Mormont. La découverte, en 1852 et dans les années qui suivirent, de plusieurs crevasses sidérolithiques fossilifères fut un événement important. Les cartes géologiques couvrant cette zone furent publiées bien plus tard (Feuilles Cossonay 1222, Custer 1935; Jorat/Echallens 1203, Bersier 1952 et Orbe 1202, Aubert 1963).

Le Mormont est un anticlinal ENE compartimenté par plusieurs failles obliques principales. Elles délimitent une structure en horst avec un rejet vertical évalué à 60 m. Les mouvements tectoniques ont aussi une composante horizontale. Des failles secondaires découpent l'ensemble en de nombreux panneaux. Le flanc SE est formé par les calcaires blancs du faciès Urgonien. Les calcaires jaunes et les marnocalcaires du Barrémien occupent l'autre versant. La pierre jaune de l'Hauterivien apparaît à l'extrémité O.

Les mêmes couches forment le pied de la première chaîne jurassienne, plus ou moins masquées par un placage morainique d'épaisseur variable. La molasse affleure au fond de la vallée de la Venoge et sur les coteaux entre Orny et Orbe.

Avant l'époque romaine, les traces d'occupation de la région restent sporadiques. Au NE, dans la région située entre Rances et Vuiteboeuf, de nombreuses sépultures de l'âge du Fer sont connues (Hallstatt final, La Tène ancienne). Le site d'Yverdon est déjà occupé à l'âge du Fer. Au S, la région de Lausanne est également un centre actif pendant toute la période de La Tène (Kaenel 1990, 313-29).

A l'époque romaine, le peuplement s'intensifie (Paunier 1982). La voie romaine qui unit Yverdon-Eburodunum à

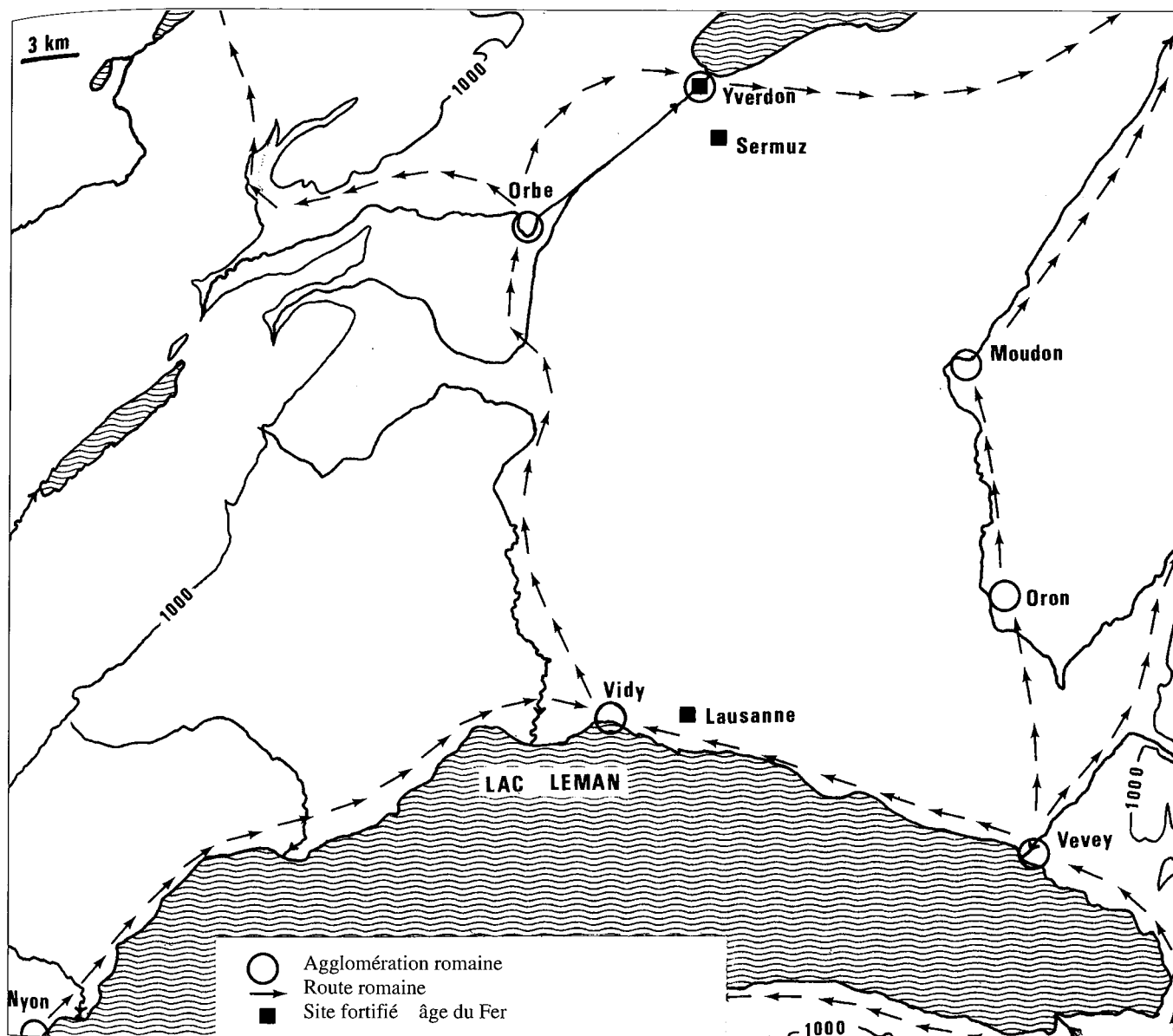


Fig. 87. Carte de situation des principaux sites archéologiques mentionnés dans le texte. 1:200 000.

Lausanne-Loussonna traverse le Mormont par le ravin d'Entre-roches (borne milliaire, Mottas 1986; fig. 87). Le relais routier d'Orbe-Urba se trouve à moins de 10 km. De nombreux établissements ruraux occupent les terres fertiles de la boucle de la Venoge, des collines du Gros-de-Vaud et du versant E de la basse plaine de l'Orbe (Viollier 1927, carte). Certaines *villae* sont de vrais palais (Orbe-Boscéaz, von Gonzenbach 1974). Des traces de centuriations ont également été relevées dans la région (Pichard et Andrès-Colombo 1987).

Les nombreux cimetières du Haut Moyen Age se répartissent à peu près comme les établissements romains et semblent indiquer une certaine continuité de l'occupation rurale (Weidmann 1987). Au cours du V<sup>e</sup> siècle, l'abbaye de Romainmôtier sera fondée (Reymond *et al.* 1988, 10-19).

Toutes époques confondues, le relief du Mormont lui-même, ainsi que les pentes du Jura au-dessus de 650 m, ne

livrent que très peu de traces d'occupation autres que les vestiges des activités métallurgiques et minières (Weidmann 1987, 28-31).

## Le minerai

Le Sidérolithique du Mormont a fait l'objet de nombreuses études anciennes. Ce sont les fossiles contenus dans ces terrains qui motivèrent les recherches (De la Harpe et Gaudin 1854; Gaudin et De la Harpe 1856; Jaccard 1869; Schardt 1880; Stehlin 1903 et 1909-10). Par la suite, les observations des géologues vaudois contribuèrent à établir l'origine sédimentaire du Sidérolithique, s'opposant ainsi aux vieilles hypothèses magmatiques. Après la Première Guerre mondiale, ce terrain fut étudié comme minerai potentiel (Schardt 1923).

**Les affleurements de la colline du Mormont et du pied du Jura**

Dans le secteur du Mormont, le Sidérolithique occupe des fissures, des crevasses et des cavités karstiques creusées dans les roches du Crétacé supérieur. C'est dans les calcaires blancs du faciès Urgonien qu'elles sont le mieux développées (versant SE de la colline, entre le village et la gare d'Eclépens, fig. 88 et 91, N° M1 à M5). Ces gisements furent

découverts à l'occasion des travaux d'extraction de la pierre. Actuellement, le Sidérolithique est encore visible dans les anciennes carrières près de la gare et l'exploitation moderne recoupe régulièrement de nouvelles poches. Une crevasse, non localisée, est mentionnée au sommet de la colline.

Sur le versant NO également, plusieurs poches sont connues (fig. 88, 91 et N° M6 à M7). Elles sont encaissées dans les calcaires jaunâtres et les marno-calcaires du Barrémien.

N°	Nom d'usage	coordonnées			Bibliographie	Mode de gisement	
		X	Y	Z			

Secteur du Mormont							
1	carrière de Cinq Sous I	531 250	167 050	470	carte géol. Cossonay Custer 1928, p. 21 Vernet 1963, pp. 313-331	plusieurs crevasses	peu de pisolithes
2	grande carrière	531 100	167 300	540	Pelet 1993, carte	plusieurs crevasses	pisolithes
3	cimenterie	531 750	167 775	495	carte géol. Cossonay Vernet 1963, pp. 313-331	crevasse	pisolithes pisolithes
4	gare d'Eclépens	532 075	167 850	480	Gaudin et La Harpe, 1856, pp. 402-3 Jaccard 1869, p.67 Custer 1928, p.21 Bersier et Badoux 1937, pp. 169-77 Vernet 1963, pp. 313-331 Charollais, Badoux et al 1990, p. 98	plusieurs crevasses	pisolithes
5	Sur Chaux	532 225	168 075	495	Gaudin et De la Harpe 1856, p. 403	crevasse	pisolithes
6	carrière du Four à Chaux d'Enteroches	531 330	168 525	465	La Harpe et Gaudin 1854, pp. 117-9 Custer 1928, p.21 carte géol. Cossonay Pelet 1993, carte	plusieurs crevasses	pisolithes
7	Tioleire	532 335	168 775	450	Gaudin et De la Harpe 1856, p. 403	plusieurs crevasses	?
	sur le plateau du Mormont				Chavannes 1854, pp. 201	crevasse	?

Secteur La Sarraz-Moiry-Juriens							
8	Les Alleveys	528 450	168 550	545	Gaudin et De la Harpe 1856, p. 403 Chavannes 1854, p. 201	crevasse	pisolithes
9	La Bossena	525 625	168 675	655	Pelet 1993, pp. 87-88	mine	?
10	Haut des Champs	526 700	168 125	585	Pelet 1960a, p. 53	épars	pisolithes
	route entre Moiry et Croy				Schardt 1880, p. 631	?	?

Secteur Goumoens-le-Jux							
11	Lit du Talent	534 775	169 000	550	Schardt 1880, pp. 632- 635, pl.2	couche diaclases	pisolithes
	à	534 860	169 860	500	Schardt 1923, pp. 127-150 Custer 1928, p. 21 carte géol. Echallens Gabus 1953, 25 p. Kosak 1971, 36 p. Vernet 1963, pp. 313-331		
	Sondage à Chavornay 1912				Schardt 1923, pp. 134-5	couche ?	?

Fig. 88. Liste des occurrences de Sidérolithique dans la région du Mormont (voir fig. 91).

A l'E de La Sarraz, seule la crevasse des Alleveys est signalée par les géologues (fig. 88 et 91, N° M8). Elle se trouve dans les calcaires blancs. A la Bossena I, on connaît deux boyaux karstiques vidés (N° M9). Il s'agit d'anciennes exploitations minières. Au N du village de Ferreyres, dans les champs, on trouve des pisolithes sidérolithiques (N° M10). Le Sidérolithique est également mentionné de manière imprécise «entre Moiry et Croy» (Schardt 1880, 631). Dans ce secteur, de nombreux blocs peuvent être recueillis au sein des amas de scories épars dans la forêt, mais il n'est pas observable en place.

Les crevasses du Mormont sont fréquemment subverticales. Elles sont découpées par des mouvements tectoniques horizontaux. Les roches encaissantes peuvent être fraîches ou, au contraire, très altérées. Des traces de dissolution du calcaire et de karstification sont bien visibles, mais ces phénomènes ne font qu'élargir des diaclases d'origine tectonique. Dans ces crevasses, le Sidérolithique est un remplissage qui s'est fait par le haut (chute de blocs) et sous l'action de l'eau (tri granulométrique). Les comblements présentent des figures sédimentaires complexes avec des variations de faciès à petite échelle.

Le faciès le plus fréquent est constitué d'argiles (bolus). La teinte de ces matériaux est variable, généralement rouge brique, localement jaune, verte ou bleue. Des sables gris, bruns et jaunâtres les accompagnent en lentilles parfois importantes (Bersier et Badoux, 1937). On trouve des brèches à éléments crétacés cimentés par des argiles.

Le Sidérolithique a livré une faune datée du Bartonien jusqu'au Ludien (Stehlin 1903 et 1909-10, Hofstetter 1962). Les remplissages ne sont pas tous contemporains. Les bolus rouges ne contiennent qu'une faible proportion de pisolithes (1-10%). Quelques lentilles riches (30-50%), ont été observées à la base des crevasses.

Dans la région du Mormont, la plus grande partie du Sidérolithique est le résultat d'un remplissage karstique. Les matériaux proviennent du remaniement d'un sol ferrallitique formé à l'Eocène et des produits de dissolution des sédiments calcaires et éventuellement gréseux du Crétacé. Quelques observations pourraient indiquer la présence de sédiments superficiels (dune éolienne, Bersier et Badoux 1937).

#### Les affleurements dans le lit du Talent

Mentionné pour la première fois par Jaccard, le gisement de Sidérolithique de Goumoens-le-Jux, dans le lit du Talent, est le plus important en volume de la région (Jaccard 1869, 67; fig. 88 et 91: M11).

Sous la couverture tertiaire et quaternaire, les gorges du Talent entaillent le soubassement calcaire urgonien entre les cotes 550 et 500. Ces roches forment un faible bombement anticlinal, sans doute dans le prolongement de la structure du Mormont. Quelques affleurements montrent le Sidérolithique stratifié, au toit des calcaires et sous la molasse. Le

niveau est discontinu et de puissance variable (1,4 à 12 m; Ailleurs, il remplit des diaclases d'origine tectonique plus ou moins verticales de 10 à 30 cm de large (Gabus 1953).

La partie supérieure de la couche est composée de bolus jaune pauvre en pisolithes et riche en grains de quartz. Un bolus rouge sombre constitue la partie inférieure. Il contient des pisolithes en proportions variées (5-50%). Les accumulations importantes sont toujours limitées (lentilles métriques, 10-30 cm de puissance). Elles se situent généralement au milieu du bolus rouge. Le quartz, en grains fins, est toujours visible à l'œil nu. Les remplissages de diaclases sont également constitués de bolus rouge. Parfois, des pisolithes ferrugineux sont pris dans la masse.

Les affleurements des gorges du Talent démontrent que des matériaux sidérolithiques se sont déposés au-dessus des calcaires urgoniens, éventuellement en milieu aqueux. Ces sédiments sont le résultat du remaniement d'un sol ferrallitique plutôt que ce sol lui-même. Les matériaux proviendraient des zones émergées du Jura. L'abondance du quartz suggère un apport résultant de la destruction des sédiments gréseux du Crétacé. L'extension de cette couche sous les sédiments molassiques est inconnue. Le caractère discontinu de ce gisement interdit de le rattacher aux autres occurrences de la région. En conséquence, l'estimation de tonnage proposée par Schardt est beaucoup trop élevée (Schardt 1923, 134-5). Il faut toutefois mentionner les deux sondages effectués en 1912 près de Chavornay VD qui rencontrèrent une couche ferrugineuse d'une dizaine de mètres au-dessus des calcaires urgoniens (cote -195 m, Schardt 1923, 134-5). De même, un affleurement de Sidérolithique est mentionné, dans une position comparable, à l'E de Yverdon (Chevressy, p. 151 et 154-155). Il n'est pas d'argument pour prouver une continuité du gîte sur une telle surface.

#### Le fer dans le Sidérolithique

Les matériaux sidérolithiques de la région du Mormont présentent donc leur variété habituelle (pp. 37-41; fig. 31). A priori, seuls les bolus à pisolithes sont susceptibles d'avoir été utilisés comme minerai de fer. Les bolus du Mormont sont des roches généralement indurées et compactes. Pour cette raison, ce sont plutôt des argilites que des argiles. Les hydroxydes de fer imprègnent complètement la roche et lui donnent sa teinte. La goethite est le constituant minéral dominant mais on note aussi la présence d'hématite. Les minéraux argileux présents sont une kaolinite riche en fer et une montmorillonite. L'illite n'apparaît qu'en traces (Vernet 1963, 317-9). Des grains de quartz sont toujours visibles.

Les pisolithes du Mormont sont en général de taille modeste, n'excédant pas celle d'une noix et beaucoup plus petits en moyenne. Leurs formes, globuleuses, sont parfois irrégulières. Ils possèdent une enveloppe externe lisse et lustrée. On n'observe que très rarement une structure interne concentrique bien développée. Le plus souvent, l'enveloppe extérieure englobe un noyau argileux qui ne diffère pas sensiblement du bolus.

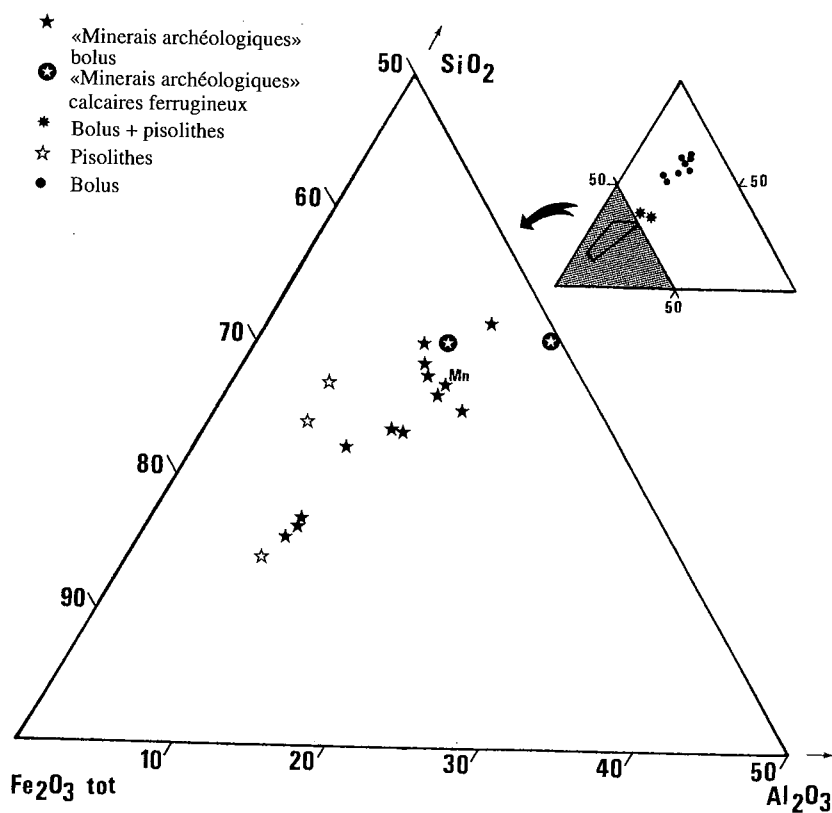


Fig. 89. Composition chimique du Sidérolithique de la région du Mormont.

Quelques lames minces d'échantillons provenant de Goumoens-le-Jux ont été étudiées (Gabus 1953 et Kosak 1971). Elles montrent des pisolithes dont le cœur est semblable au bolus environnant et tout aussi riche en grains de quartz. Seule la bordure est une croûte d'hydroxydes de fer. Certaines observations pourraient indiquer une formation *in situ* des pisolithes.

Les analyses complètes sont données dans les Annexes 4.1 et 4.2. Les principaux caractères chimiques sont résumés dans les fig. 89 et 90.

%	SiO2	Al2O3	Fe2O3 tot	CaO
<b>Pisolithes</b>				
moyenne 3 éch.	20.87	6.90	60.61	2.28*
<b>Bolus tout-venants</b>				
moyenne 8 éch.	53.49	19.98	14.72	1.28*
<b>Minerais archéologiques</b>				
moyenne 13 éch.	21.49	10.66	58.47	1.58
<b>Minerais archéologiques calciques</b>				
moyenne 2 éch.	7.27	4.45	14.59	38.93

Fig. 90. Principaux caractères chimiques du Sidérolithique de la région du Mormont.

\* Les écarts entre les valeurs sont très importants.

Les pisolithes de Goumoens-le-Jux (M11) et de Ferreyres (M10), séparés de leur gangue argileuse, ont des compositions chimiques voisines pour les constituants principaux. Seul le calcium, absent dans le premier gisement est présent en faible quantité dans le second. Ils présentent des teneurs en fer nettement plus élevées que les bolus tout-venants prélevés sur les affleurements (M1, M8 et M11). Ces derniers, avec moins de 15% de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>tot sont vraiment pauvres.

Incontestablement, les pisolithes sont un minerai de fer acceptable, alors que les bolus pauvres paraissent inutilisables. Toutefois, les poches riches en pisolithes sont rares et de faible volume et les roches sont dures et ne se décomposent pas dans l'eau. Il est donc impossible de les enrichir par lavage. Les essais de concentration, à l'eau et par attaque acide, menés par d'autres auteurs le démontrent (Schardt 1923, 135-6; Gabus 1953, 16-7; Kosak 1971, 19). Pour récolter les pisolithes, il faut casser la roche et trier à la main!

Dans les amas de scories, des fragments de minerais ont été récoltés, au cours des fouilles de P.-L. Pelet (fig. 90, minerais archéologiques). Ces sites n'ont livré que des fragments de bolus pauvres en pisolithes (1-5%). Macroscopiquement, aucun critère précis ne les distingue des échantillons frais. Par contre, ils présentent des teneurs en fer nettement plus élevées (58,5% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>tot). Ces matériaux seraient utilisables comme minerai.

La preuve archéologique de leur utilisation est fournie à maintes occasions. Plusieurs fragments portent les traces d'un chauffage préliminaire indiscutable (grillage, éch. BEL 131). Sur le site de la Bossena 1 (site 21), c'est tout un dépôt de minerai abandonné près du fourneau qui fut retrouvé en

place (Pelet 1993, p. 60). Aux Bellaires, les fragments de minerai se trouvaient mélangés aux scories et une aire de «grillage» a été mise en évidence par la fouille.

Deux échantillons provenant des fouilles de Prins-Bois 2 (site 5.2, éch. PRI 251 et 252), se sont avérés être des fragments de roche calcaire. Les surfaces présentent des traces de bolus adhérent et pris dans les irrégularités. On voit très nettement une altération qui se développe depuis les bords. A l'intérieur, la roche calcaire est également très altérée, rougeâtre. Des fissures et cavités sont envahies par les argiles. La composition chimique globale est très différente et les teneurs en fer sont assez basses (15%). Ces blocs faisaient partie d'un remplissage bréchiq ue ou des épontes du gisement. En faible quantité, ces calcaires ferrugineux ne vont pas modifier le comportement de la charge au cours de la réduction. Comme minerai, ils demanderaient une température de fusion très élevée. En juste proportion, ils pourraient jouer avantageusement un rôle de fondant.

Une autre analyse se détache du lot (BEL 173, Bellaires 1, site 25.1). Sa teneur en MnO est très élevée (25%). Dans le Sidérolithique, cet élément est souvent présent mais en quantité plus faible (<1%). Toutefois, sur de nombreux échantillons, on observe des enduits noirâtres de pyrolusite. A Montcherand VD, des teneurs très élevées ont été également mesurées (p. 147).

### Le Sidérolithique comme minerai de fer

L'ensemble des analyses montre la complexité du Sidérolithique avec ses variations de faciès et ses particularités locales. Les principales différences trouvent une explication soit dans la nature des matériaux analysés soit dans leur origine géographique.

Les teneurs en fer des bolus pauvres en pisolithes des gisements du Talent sont trop basses pour qu'ils soient utilisables (M11, Annexe 4.1). Les concrétions ne peuvent pas être concentrées par lavage à l'eau. Les lentilles riches en pisolithes ne représentent qu'un faible volume. Même dans ce cas, les teneurs les plus élevées ne dépassent guère 40% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>tot (GOU 3 et Schardt 1923, 133, analyse incomplète). Tout porte à croire que ce gîte n'a pas pu être exploité.

Les analyses chimiques des échantillons de Goumoens-le-Jux ne montrent pas d'anomalie particulière. L'absence complète du Ca dans ces roches est une caractéristique que l'on ne retrouve pas dans les gisements voisins. La teneur en Cr est assez élevée dans les pisolithes.

Trop peu d'échantillons proviennent des crevasses du Mormont pour faire un réel bilan (M1-7, Annexe 4.1 : éch. GAR 101 et 102). Le bolus semble être très pauvre en fer. Le lavage des pisolithes est difficile en raison de la cohérence des matériaux argileux. La plupart des poches sont aveugles et ne sont connues aujourd'hui que grâce à l'extraction de la pierre. L'exploitation ancienne n'a pu être possible qu'en de rares cas.

Le gisement des Alleveys est mal documenté: seul le bolus a été analysé et il est très pauvre en fer (M8, Annexe 4.1: éch. ALV 101). Aucun autre affleurement n'est actuellement accessible à l'O de La Sarraz.

Les échantillons provenant des sites archéologiques sont majoritairement des bolus riches en fer mais pauvres en concrétions. Ils atteignent des teneurs suffisantes pour être utilisables (Annexe 4.2). On notera la présence de bolus riches en Mn et de calcaires ferrugineux. Aucun affleurement ne permet d'observer un matériel comparable en place. Les seuls témoignages proviennent des ateliers de réduction et des mentions anciennes. La composition chimique ne présente pas de caractère anormal. Les éléments traces sont assez bas à l'exception du V (800-2900 ppm).

La qualité du Sidérolithique comme minerai de fer n'est donc pas partout la même dans la région du Mormont. Au contraire, il semble que seul le pied du Jura à l'O de La Sarraz ait pu fournir une matière première adéquate. Cela expliquerait pourquoi l'immense majorité des ateliers de réduction sont installés dans ce secteur alors qu'ils sont absents à proximité des gisements actuellement visibles.

Dans cette région, plus que la simple présence du Sidérolithique, c'est sa qualité comme minerai de fer qui serait le facteur déterminant l'implantation des ateliers de réduction. Cette hypothèse se trouve confortée par les résultats des analyses de scories (pp. 112-115).

Il convient cependant de faire quelques réserves concernant cette hypothèse. En effet, notre échantillonnage est encore trop peu abondant pour cerner toute la complexité du Sidérolithique du Mormont et des environs. De plus, quelques sites font exception à la règle, en particulier celui de Tilériaz, situé sur le versant E de la colline du Mormont (site 43). Enfin, la plupart des poches de Sidérolithique du Mormont ont été mises au jour par l'exploitation moderne de la pierre; il est possible que, dans un lointain passé, ces terrains n'affleuraient pas du tout.

Cette dernière remarque ne s'applique de toute façon pas au gisement du lit du Talent. Pour celui-ci, aucun témoignage ne vient renforcer l'hypothèse d'une exploitation à une quelconque époque.

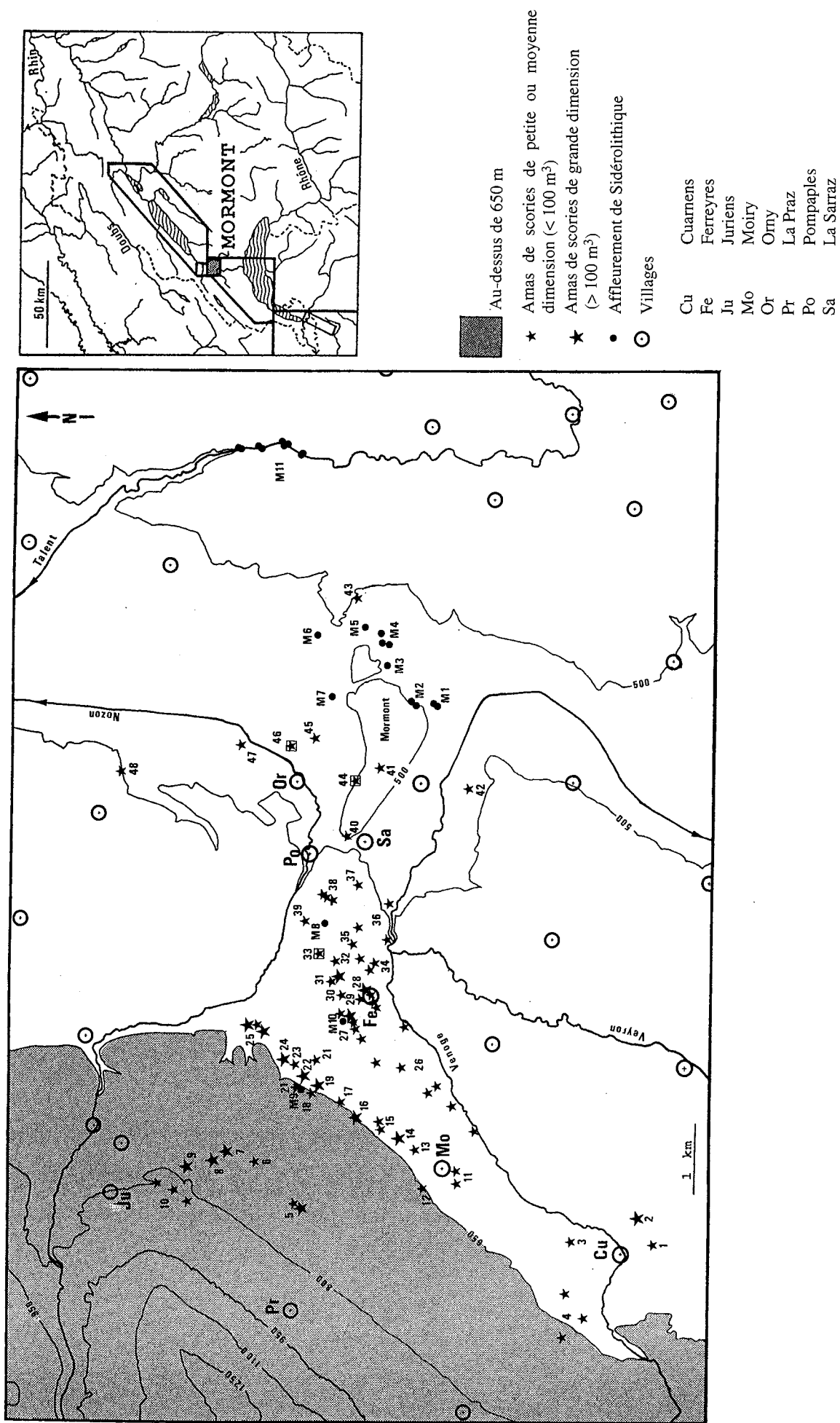


Fig. 91. Cartes des sites métallurgiques et des affleurements de Sidérolithique dans la région du Mormont.

Les numéros M1 à M11 renvoient à la figure 88.

Les numéros 1 à 46 renvoient à la figure 92.

N°	Nom d'usage	Commune	coordonnées			volume estimé	mode de gisement scories	Date / nombre jours	Référence Pelet 1993 page	anal chim
			X	Y	Z					

**Secteur Cuarnens**

1	Pré Penard 1	Cuarnens	523 625	163 775	625		éparses	M ?	115	X
2	Pré Penard 2	Cuarnens	523 775	163 925	625		éparses	M	115	
3	En Prêle	Cuarnens	523 575	164 875	630	XX	éparses		115	
4	Les Mousses	Cuarnens	522 500	164 675	640	aff. ?	isolées	XVIIe?	115	
	Gravière	Cuarnens	522 200	165 250	670		isolées		115	
	Lucheran	Cuarnens	522 800	165 035	640		isolées		115	

**Secteur La Praz - Juriens**

5	Prins Bois 1	Juriens	524 050	168 800	750	XXX	groupées	R / 1 ? / 23	118 et 79 1960a	X
	Prins Bois 2	Juriens	524 037	168 975	752	X	groupées		60-62	X
6	En Barnel 2	Romainmôtier	524 625	169 675	745	XX	éparses		121	
7	En Barnel 1	Romainmôtier	524 875	169 900	740	XXX	éparses		121	X
8	Rosset 2	Juriens	524 625	170 187	750	XXX	éparses		118	X
9	Rosset 1	Juriens	524 700	170 375	750	XXX	éparses	R	118, 1960a	X
10	Rauvin (ferme)	Juriens	524 025	170 565	825	Forge?	isolées		118	
	Rauvin (carrefour)	Juriens	524 125	170 450	815	Forge?	isolées		118	
	Rouge Bou	Juriens	524 425	170 825	810		isolées		118	

**Secteur Moiry - Bellaires**

11	Iséraz	Moiry	524 575	166 575	635		isolées		120	
	Sud du village	Moiry	524 350	166 600	630		isolées		120	
12	La Cressonnière	Moiry	524 425	167 037	635	X	éparses		120	
13	Longchamp	Moiry	524 930	167 210	625	X	éparses		120	
14	Fontaines des Forges	Moiry	525 025	167 450	630	XXX	groupées	R ?	120, 1960a	X
15	Voualève 1	Moiry	525 175	167 740	635	X	groupées		120	X
	Voualève 2	Moiry	525 225	167 750	630	X	groupées		120	
16	Carolines	Moiry	525 325	168 050	645	XXX	groupées		120	X
17	Bossena 2	Ferreyres	525 450	168 275	645	X	éparses		116	
18	Bossena 1	Ferreyres	525 625	168 675	655	X	groupées	HMA / 1	57-60 1960a	X
19	Petits Lacs 3	Ferreyres	525 800	168 580	635	XXX	éparses		117	X
20	Petits Lacs 4	Ferreyres	525 700	168 825	655	XX	groupées		117	
21	Petits Lacs 2	Ferreyres	526 000	168 700	630	X	éparses		117	
22	Petits Lacs 1	Ferreyres	525 875	168 800	645	XXX	groupées		117	
23	Les Piauliauses	Ferreyres	526 050	169 020	635	XX	éparses		117, 1960a	
24	Echilly	Romainmôtier	526 150	169 100	635	XXX	éparses		121	
25	Bellaires 1	Romainmôtier	526 525	169 575	620	XXX	groupées	AdF / 2 R / 8 HMA / 6	12, 29-42, 48-53	X
	Bellaires 2	Romainmôtier	526 575	169 525	615	X	groupées	R / 1	12-15, 42-45	X
	Bellaires 3	Romainmôtier	526 550	169 450	620	XXX	groupées	R / 2 HMA / 2	15-16, 46-48 53-57	X

**Secteur Moiry - Ferreyres**

26	En Pertuis	Moiry	525 150	166 350	580		isolées		120	
	La Lécherette 3	Moiry	525 505	166 775	580		isolées	R ?	120	
	La Lécherette 1	Moiry	525 650	167 000	590		isolées		120	
	La Lécherette 2	Moiry	525 750	166 900	580		isolées		120	
	Les Terres Rouges	Moiry	526 060	167 425	580		isolées		120	
	En Esserton	Ferreyres	526 625	167 400	550		isolées		118	
	En Rogenex	Ferreyres	526 100	167 780	575		éparses	? et M	117	
	En Orjus	Ferreyres	526 400	167 925	585		isolées		117	

N°	Nom d'usage	Commune	coordonnées			volume estimé	mode de gisement scories	Date / nombre fours	Référence Pelet 1993 page	anal chim
			X	Y	Z					
<b>Secteur Ferreyres</b>										
27	Haut des Champs 1	Ferreyres	526 800	168 150	585	XX	éparses		116, 1960a	
	Haut des Champs 2	Ferreyres	526 625	168 150	580	X	éparses		116, 1960a	
	Haut des Champs 3	Ferreyres	526 650	168 100	585	X	éparses		116, 1960a	
	En Isérable	Ferreyres	526 750	168 275	590		isolées		117	
28	route de Moiry	Ferreyres	526 850	167 750	560		isolées		117	
	Les Eterpis	Ferreyres	526 925	167 825	560		isolées		117	
	ferme Magnenat	Ferreyres	527 075	167 975	560		isolées		117	
	jardin de la Poste	Ferreyres	527 050	167 950	560		isolées		117	
	Maison Favre	Ferreyres	527 100	168 025	570	XXX	groupées	HMA / 1	117, 1960a	X
	Au Montet	Ferreyres	527 150	168 125	570		isolées		116	
29	Cimetière	Ferreyres	527 000	168 025	560	Forge	isolée			
30	Le Tignon	Ferreyres	527 000	168 205	585	X	éparses		117	X
31	Morandin 1	Ferreyres	527 350	168 320	570	XXX	groupées		116-117	X
	Morandin 2	Ferreyres	527 280	168 410	575	X	éparses		117	
32	Les Fourmilières	Ferreyres	527 580	168 430	575	X	groupées		116	
33	Trésis des Alleveys	La Sarraz	527 575	168 625	585	Forge	éparses	R	117-118	
34	En Donchires 1	Ferreyres	527 370	167 900	555	Forge?	éparses	R ?	116	X
	En Donchires 2	Ferreyres	527 465	167 810	545	Forge?	éparses		116	
	En Melley	Ferreyres	527 550	168 050	555	Forge	éparses		116	
35	En Combattions	Ferreyres	527 750	168 150	555	XX	éparses		116, 1960a	X
36	Corbarex	Ferreyres	528 000	168 075	540		isolées		117	
	La Tine de Conflens	Ferreyres	527 825	167 625	510		isolées		117	
	La Bruyère	La Sarraz	528 325	167 650	490		isolées		119	

<b>Secteur Pompaples - La Sarraz - Mormont</b>										
37	Les Buis	La Sarraz	528 575	168 140	520		isolées		119	
38	Maillefer 1	La Sarraz	528 400	168 350	530		isolées		118, 1960a	X
	Maillefer 2	La Sarraz	528 500	168 400	530		isolées		118, 1960a	X
	Maillefer 3	La Sarraz	528 625	168 450	520		isolées		118, 1960a	X
39	Saint Loup	Pompaples	528 125	168 850	530	X	groupées		121, 1960a	X
40	Mormonnet	La Sarraz	529 388	168 100	510		déplacées	M	118-119	
41	Mormont	La Sarraz	530 350	167 825	530		isolées		119	
42	Les Trois Noyers	Eclépens	530 087	166 500	470		isolées	M	115	
43	Tilérie	Eclépens	532 760	168 150	500	XXX	éparses		116	

<b>Secteur Orny</b>										
44	Es Faveyres	Orny	530 100	168 200	470		isolées	R ?	121, 1960a	
45	Les Vignes d'Orny	Orny	530 750	168 700	495	Forge	isolées		121, 1960a	X
46	Sur le Mont	Orny	530 625	169 050	465	Forge	isolées	R	121	
47	Montolivet	Orny	530 625	169 775	450		isolées		121, 1960a	
48	La Grand-Ferrire	Arnex	530 230	171 450	475		isolées		115	

Fig. 92. Localisation et description des sites métallurgiques de la région du Mormont. voir carte fig. 91.  
Les noms d'usage sont ceux utilisés par Pelet 1993.

Volumes estimés:

X	petite exploitation:	± 300 m <sup>2</sup> de scories éparses ou	± 100 m <sup>2</sup> de scories groupées
XX	exploitation moyenne:	± 500 m <sup>2</sup>	± 250 m <sup>2</sup>
XXX	grande exploitation:	± 1000 m <sup>2</sup>	± 400 m <sup>2</sup>

Datation: AdF: Age du Fer R: Romain R ? : Romain ou postérieur (tuiles)  
HMA: Haut Moyen-Age M: Moderne

## Les sites métallurgiques et miniers

Les scories des environs du Mormont sont déjà mentionnées au siècle dernier par F.-L. Troyon qui les met en relation avec le toponyme de Ferreyres (Troyon 1860, 358). Quelques échantillons furent récoltés par C.-T. Gaudin à la même époque (Pelet 1993, p. 6).

La découverte, en 1954 par P. Decollogny, des amas de scories de Prins-Bois 1 sera le point de départ des recherches récentes (Pelet 1960a). En 1959, les premières fouilles ont lieu sur ce site en même temps que les premières prospections dans la région. C'est au professeur P.-L. Pelet que revient le mérite d'avoir compris tout l'intérêt de ces découvertes.

Grâce à des fouilles minutieuses, de 1963 à 1970, et à des prospections extensives, il nous livre un panorama complet de cette région (Pelet 1973, ouvrage qui a fait l'objet d'une nouvelle édition, revue et augmentée, en 1993). C'est aussi à lui que l'on doit la conservation d'une collection importante d'échantillons de scories et de divers matériaux, en particulier des fragments de tuyères (Musée cantonal d'archéologie et d'histoire, Lausanne). Les deux bas fourneaux mis au jour à Bellaires 3 ont été conservés *in situ* sous un abri.

La quasi-totalité des sites miniers et métallurgiques de cette région ont été décrits par P.-L. Pelet dans plusieurs publications importantes (Pelet 1960a, 1960b, 1970, 1973 et 1993). Par commodité, les principales informations ont été résumées ici (fig. 91 et 92).

Les sites ayant fait l'objet de fouilles archéologiques ou de nouvelles découvertes sont brièvement décrits dans ce chapitre. Nos propres prospections, qui n'ont pas été systématiques, n'ont pas permis de reconnaître des sites supplémentaires. Les résultats nouveaux proviennent donc de l'exa-

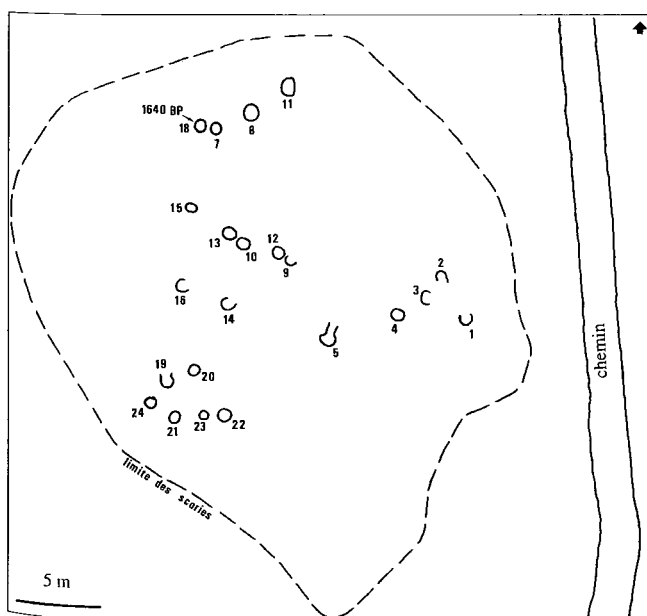


Fig. 93. Plan du site de Prins-Bois 1, fouilles P. Decollogny et P.-L. Pelet 1959. D'après Pelet 1960a. 1:400. Les fourneaux sont numérotés, les autres structures ne sont pas représentées.

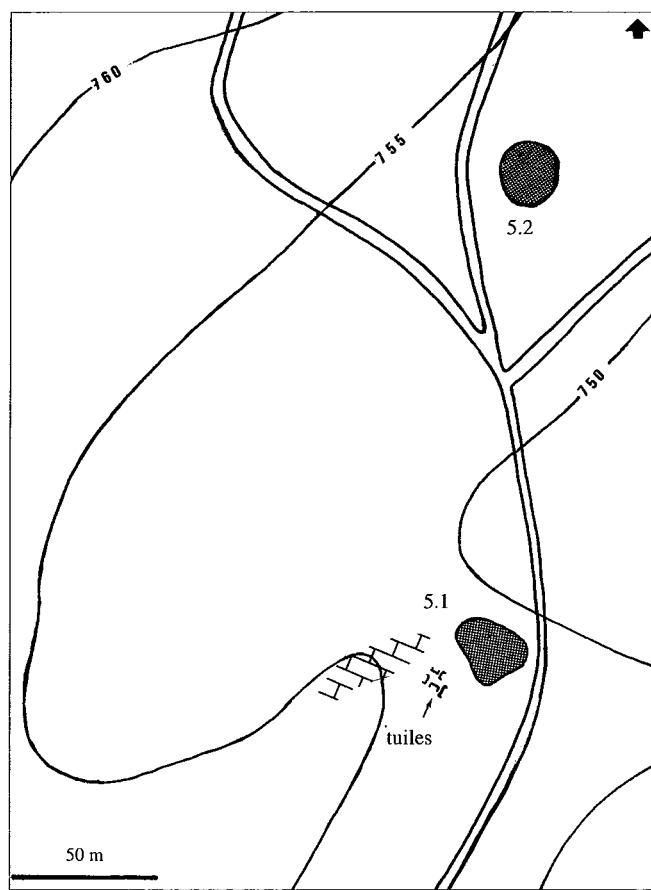


Fig. 94. Schéma des sites de Prins-Bois, Juriens VD. 1:2500.

5.1: Prins-Bois I      5.2: Prins-Bois I

men des scories et des analyses chimiques. Ces données apportent de nouveaux éléments pour l'interprétation spatiale de la zone sidérurgique.

Aucune fouille archéologique importante n'a été entreprise dans ce secteur depuis les recherches de P.-L. Pelet. Seul l'atelier de réduction de La Lèchère à Montcherand, situé à une dizaine de kilomètres à vol d'oiseau, a fait l'objet d'une étude complète (Abetel 1992, chapitre 6).

### 1. Prins-Bois 1

Fig. 91 et 92: site 5; fig. 93 et 94.

Pelet 1960a; Pelet 1960b; Pelet 1993, 78-79.

Le site de Prins-Bois 1 fut découvert, en 1954, par P. Decollogny. Avec P.-L. Pelet, ils entreprennent des fouilles en 1959. Le site ne fut que partiellement dégagé. La stratigraphie et les relations spatiales, complexes, restent incertaines. De même, les fourneaux, relativement mal conservés et difficiles à comprendre, ne peuvent pas faire l'objet d'une étude technologique.

Les scories couvrent une superficie d'environ 670 m<sup>2</sup> (fig. 94). Quatre amas d'une hauteur approchant 2 m sont juxtaposés. Ils se trouvent sur le versant d'une petite éminence où affleurent les calcaires et qui domine une combe humide.

Une galerie percée dans le calcaire aurait été observée à 300 m de là (lieu dit Les Champs Neufs). A 40 m au SO du site, sur une superficie de 50 m<sup>2</sup>, une concentration de tuiles romains a été observée. Les fouilles ont mis au jour 24

fourneaux mal conservés, la plupart construits en scories glaisées (fig. 93). Le volume total des déchets est estimé à 250 m<sup>3</sup>.

Le fourneau 19 présentait un système de ventilation assez particulier constitué par un canal de 80 cm de long situé à l'amont et aboutissant à la tuyère. Celle-ci débouchait au fond du fourneau (Pelet 1960a, fig. 18).

Du charbon provenant du four 18 a été daté au <sup>14</sup>C (1640 BP ± 100, 278-517 AD cal. 1σ; 158-602 AD cal. 2σ). Ce fourneau n'est ni le plus jeune, ni le plus vieux de l'atelier. Il faut noter également la présence de tuileaux romains sur le site et à proximité.

## 2. Prins-Bois 2

Fig. 91 et 92: site 5.

Fig. 94 et 101: fourneau 23

Pelet 1993, 16 et 60-62.

Le site fut découvert en 1967 par C. Bonnard et fouillé en 1968 par P.-L. Pelet. Il n'est distant que de 175 m du site de Prins-Bois 1. Les scories couvrent environ 400 m<sup>2</sup> et un seul fourneau fut découvert. C'est une petite exploitation.

La présence de quelques tuileaux dans la construction est le seul élément de datation. Les caractères techniques du fourneau incitent à le rattacher aux autres appareils du Haut Moyen Age (V<sup>e</sup>-VI<sup>e</sup> siècles).

## 3. Carolines

Fig. 91 et 92: site 16; fig. 95.

Pelet 1993, 120.

Le site des Carolines est une des exploitations importantes du secteur du pied du Jura vaudois (env. 1500 m<sup>2</sup>, 500 m<sup>3</sup> de déchets métallurgiques). Il fait partie de l'alignement de sites entre Moiry et les Bellaires. Les calcaires urgoniens affleurent, mais le Sidérolithique n'est pas visible. Le site se trouve sur la rive NE d'un ancien talweg peu marqué. L'ancien chemin passe juste en dessous de l'amas principal et la route moderne au-dessus (fig. 95).

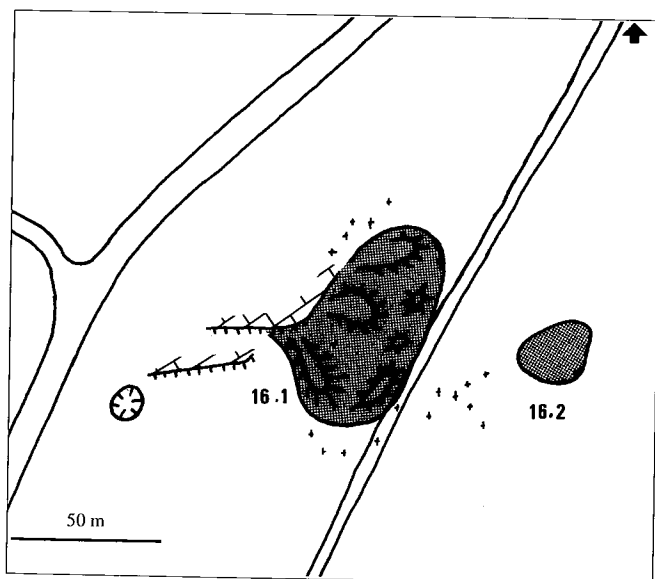


Fig. 95. Schéma du site des Carolines, Moiry VD. 1:2500.

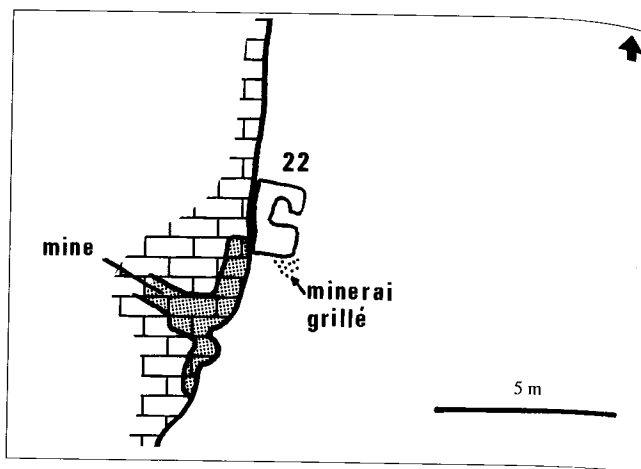


Fig. 96. Plan du site de Bossena 1. D'après Pelet 1993, fig. 103, 1:200.

Les scories sont réparties en 6 buttes groupées et adossées à un petit escarpement calcaire (16.1). Les plus élevées atteignent une hauteur de 1,5 m. Elles encadrent 3 dépressions pouvant correspondre à des aires de travail. Une autre concentration de scories, moins nette, se situe à 30 m à l'E de l'amas principal (16.2). Elles ne forment pas de relief. Entre les deux zones, on ne trouve que des fragments de scories dispersés. Il n'y a pas de continuité. La complexité et la répartition des zones de rejet font penser que plusieurs fourneaux ont été en activité à cet endroit successivement. La zone la plus récente se trouve sans doute au S du site.

Une dépression circulaire et des déblais sont visibles à l'O. Ces structures ne sont vraisemblablement pas contemporaines du site. D'autres déblais, clairement modernes, bordent la route. Ils ne contiennent pas de scories. Aucune fouille n'a été entreprise à cet emplacement. Les prospections de surface n'ont livré aucun élément de datation.

## 4. Bossena 1

Fig. 91 et 92: site 21, fig. 96 et 101: fourneau 22.

Pelet 1993, 16, 56-60.

Ce site a été fouillé par P.-L. Pelet en 1968. Il fait partie de la ligne d'amas de scories entre Moiry et les Bellaires, dans une zone où ceux-ci sont particulièrement nombreux. Il n'y a pas moins de 5 sites dans un rayon de 500 m.

Le fourneau est adossé à une paroi calcaire verticale de 3 m de haut (fig. 96). A la base de celle-ci, on peut voir le départ d'un boyau karstique de 40 cm de diamètre. Le comblement, charbon, scories, minerai, etc., a été enlevé sur quelques mètres. Un pilier de soutènement se trouvait à l'intérieur (Pelet 1993, 87-88). Il s'agit sans aucun doute d'une exploitation minière. Une autre structure similaire se trouve 50 m au N.

Les parois du fourneau incorporent un grand nombre de tuileaux. Technologiquement, cette installation est intermédiaire entre les fourneaux romains et ceux du Haut Moyen Age. Une étude dendrochronologique démontre qu'une partie du bois utilisé comme combustible a été coupé en 609/610 ap. J.-C. (Abetel 1992, 89; rapport du Laboratoire romand de dendrochronologie de Moudon, 3/R 1228, 1983).

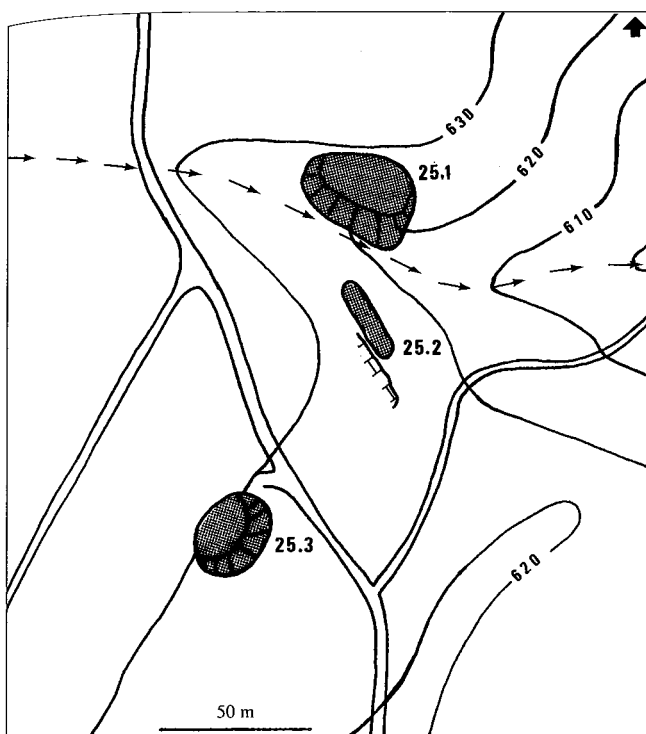


Fig. 97. Schéma des sites des Bellaires, Romainmôtier VD. 1:2500. D'après Pelet 1993, fig. 5.

### 5. Bellaires 1

Fig. 91 et 92: site 25; fig. 97 et 98

Fig. 99 et 101: fourneaux 1 à 16

Pelet 1993, 12, 29-42 et 48-53.

Au lieu dit les Bellaires, plusieurs amas de scories ont été repérés (fig. 97).

Le site de Bellaires 1 fut une exploitation importante. Le volume de déchets est imposant (600 m<sup>3</sup> de déchets, 300 m<sup>3</sup> de scories). Les vestiges de 16 fourneaux et foyers ont été identifiés (fig. 98). Quelques traces, trop fugaces, pourraient indiquer un nombre encore plus élevé.

La dernière phase d'exploitation fut particulièrement importante (300 m<sup>3</sup> de déchets, 150 m<sup>3</sup> de scories). Après un nivellement général, 5 grands fourneaux s'installent sur les déblais plus anciens et occupent le sommet du talus (1 à 4 et 6).

S'il n'est pas possible de prouver que ces fourneaux ont travaillé successivement ou simultanément, il est clair que l'ensemble récent date du Haut Moyen Age (VI<sup>e</sup>-VII<sup>e</sup> siècles). La stratigraphie indique que les fours plus anciens se sont succédé plutôt que côtoyés. Les rares éléments de datation laissent entrevoir une occupation débutant à l'âge du Fer et se prolongeant pendant toute l'époque romaine (fig. 99). Les 9 ateliers se trouvent ainsi répartis sur une petite dizaine de siècles.

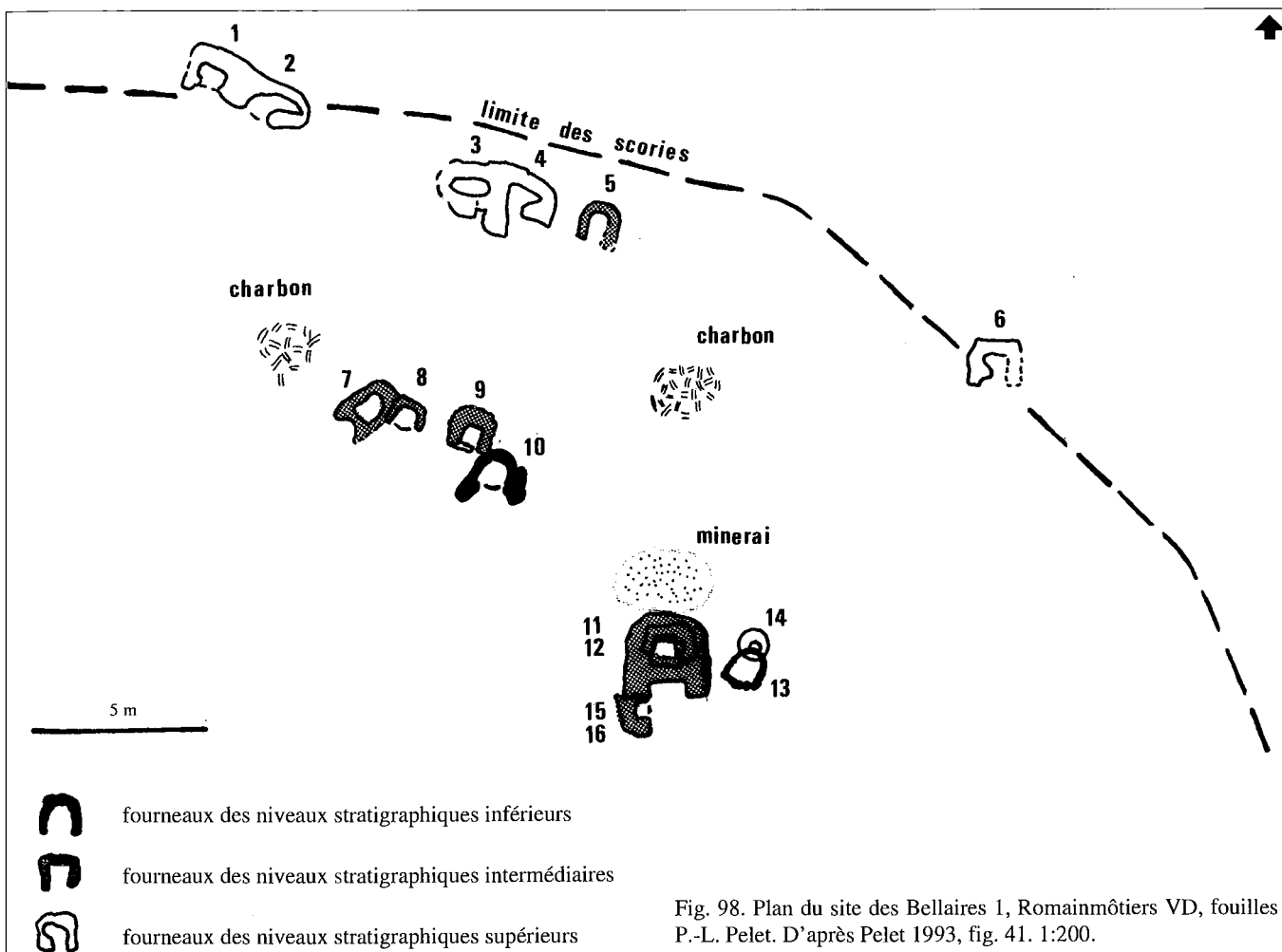


Fig. 98. Plan du site des Bellaires 1, Romainmôtiers VD, fouilles P.-L. Pelet. D'après Pelet 1993, fig. 41. 1:200.

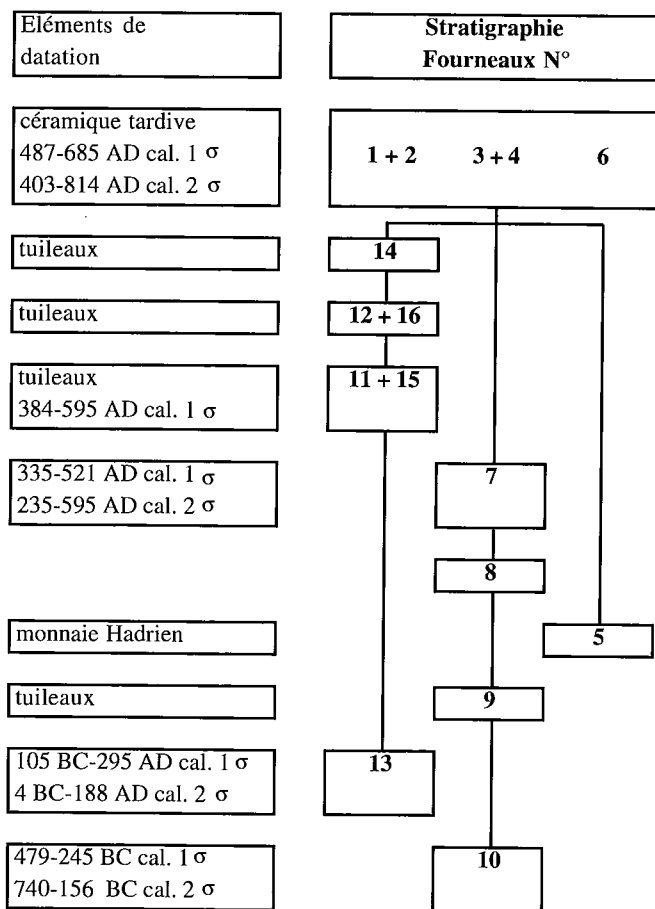


Fig. 99. Datation des fourneaux des Bellaires 1.

La plupart des fourneaux sont clairement destinés à la réduction du minerai. Les foyers annexes 15 et 16 ont une autre fonction (p. 103). Les autres aménagements se limitent à quelques empierrements, des murets ainsi que deux dépôts de charbon et une aire de «grillage» du minerai. Aucune trace d'habitat n'a été relevée sur le site ni aux environs.

#### 6. Bellaires 2

Fig. 91 et 92: site 25; fig. 97: 25.2.

Pelet 1993, 12-15 et 42-45.

L'amas de scories de Bellaires 2 est nettement moins important (40 m<sup>3</sup> de déchets). Le fourneau (N° 17) a été complètement détruit. La date <sup>14</sup>C est très vague (1650 BP  $\pm$  100, 268-509 AD cal 1  $\sigma$ ; 148-596 AD cal 2  $\sigma$ ).

#### 7. Bellaires 3

Fig. 91 et 92: site 25; fig. 97: 25.3 ; fig. 100,

Fig. 101: fourneaux 18-21.

Pelet 1993, 15-6, 46-48 et 53-57.

Le site de Bellaires 3 est estimé à 500 m<sup>3</sup> de déchets (250 m<sup>3</sup> de scories), c'est donc une exploitation importante.

Les structures les plus récentes sont deux fourneaux jumelés, 19 et 20, très proches de ceux du site de Bellaires 1. Ce sont eux qui ont produit 80% des scories.

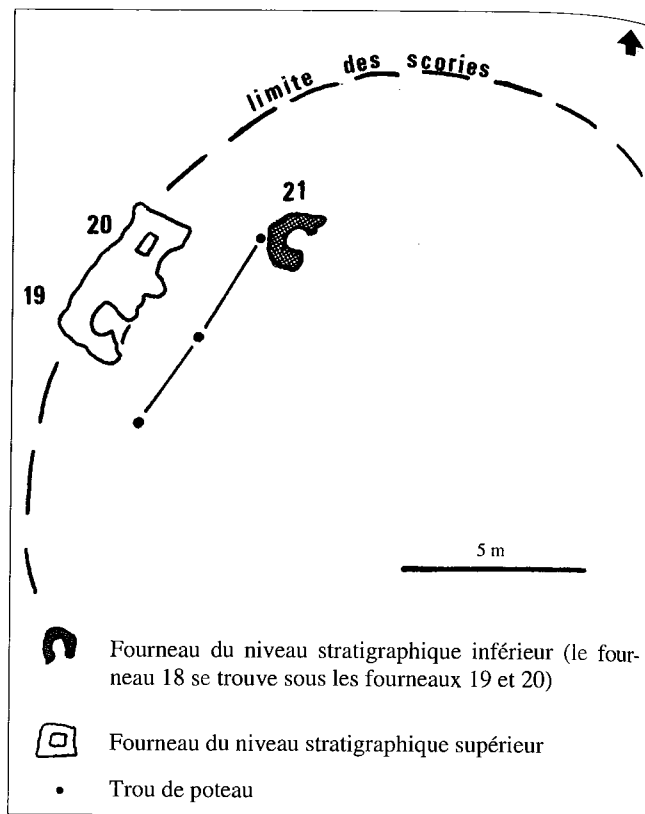


Fig. 100. Plan du site de Bellaires 3, Romainmôtier VD, fouilles P.-L. Pelet. D'après Pelet 1973, carte 7. 1:200.

Deux fourneaux plus anciens existent, 21 et 18. Ce dernier, situé sous 19 et 20, n'a pas été fouillé. Les quelques tessons romains livrés par ce site se rapportent à la phase d'exploitation ancienne.

Un bâtiment moderne abrite actuellement les fours 19 et 20. Grâce à cette protection, ces deux appareils exceptionnellement bien conservés sont encore accessibles aux chercheurs et au public.

#### 8. Village de Ferreyres (Maison Favre)

Fig. 91 et 92: site 28.

Pelet 1960a, p. 53 et 1993, p. 117.

La maison Favre se trouve à la sortie NE du village (propriété Affolter). Des scories ont été observées à l'arrière du bâtiment. A 1 m de profondeur, elles forment une couche compacte. Vers le village, on en trouve, éparées, en plusieurs points.

Des travaux d'aménagement ont eu lieu en 1989 et un fourneau a été détruit (M. Affolter, communication orale à P.-L. Pelet). Les charbons prélevés dans les déblais ont été datés (<sup>14</sup>C, Archéolabs, rapport ARC9 / R706C: 1320  $\pm$  50 BP, 658-756 AD cal. 1 $\sigma$ ; 625-838 AD cal. 2 $\sigma$ .)

## Les fourneaux

Une cinquantaine de fourneaux de réduction ont été fouillés dans la région du Mormont. Parmi ceux-ci, une petite vingtaine sont suffisamment documentés (état de conservation, qualité de la fouille). Ils sont décrits de manière complète dans la monographie de P.-L. Pelet à laquelle on se référera pour les détails (Pelet, 1993). Cette étude technologique aboutit à un classement qui n'est pas fondamentalement remis en cause.

### Les fourneaux construits, à scories coulées

La grande majorité des fourneaux de réduction connus dans la région du Mormont font partie de la grande famille des fourneaux construits, à scories coulées. Il est possible de distinguer des sous-groupes et de mettre en évidence des particularités techniques propres à chaque appareil (fig. 101).

Les parois sont épaisses (30-80 cm) construites en partie avec des matériaux cohérents (pierres calcaires ou quartzofeldspathiques, fragments de scorie ou tuileau) et en partie en argile. Elles présentent souvent un chapage interne argileux mais fréquemment les autres matériaux sont en contact avec le feu. Les fourneaux sont souvent adossés à un talus ou à une paroi rocheuse.

La forme du fond est très variable et souvent irrégulière (fer à cheval, rectangle, trapèze, ellipse). La plus grande dimension est comprise entre 70 et 150 cm. La forme de la cuve n'est connue que pour un nombre restreint d'appareils. Elle est généralement en forme de coupole ou de cloche, c'est-à-dire que le gueulard est toujours plus petit que le fond et que certaines parois sont incurvées.

Ces fourneaux sont munis d'une porte s'ouvrant en direction de la pente naturelle du terrain. Elle occupe parfois un côté entier. Dans 3 cas, elle est barrée par un rebord peu élevé (équivalent à une «dame»).

Des fragments de tuyère ont systématiquement été trouvés en relation avec ces appareils, parfois en place. Ce sont des pièces en céramique, percées d'un trou (diamètre 8-2,5 cm). Plusieurs catégories ont été distinguées (pp. 104 et 105). Dans certains cas, des tuyères de forme différente sont associées à un même fourneau. Il est parfois possible de leur attribuer des positions: une tuyère latérale et une autre dans la porte. La tuyère latérale est généralement située à 20-30 cm au-dessus du fond de la cuve.

À l'intérieur de cette famille de fourneaux, P.-L. Pelet propose des subdivisions et retrace de manière cohérente, une évolution technique, voire chronologique (Pelet 1993, pp. 71-78).

#### *Le groupe récent*

L'ensemble des fourneaux des niveaux stratigraphiques supérieurs de Bellaires 1 (1-4, 6) et de Bellaires 3 (19-20) sont très proches les uns des autres malgré des particularités propres à chaque appareil (fig. 101). Ils datent du Haut Moyen Âge (VI<sup>e</sup>-VI<sup>e</sup> siècles). Compte tenu de leur excellent état de conservation, ils permettent de définir un véritable

type de fourneau. Les bas fourneaux mérovingiens de Boécourt JU sont très proches (Eschenlohr et Serneels 1991, 49-67).

Ils sont comparables en taille et en forme, avec des fonds elliptiques et des cuves en cloche asymétrique («poire» l: 70-140 cm; l: 45-55 cm; h: 130-160 cm?). Les fourneaux sont groupés par deux (jumelés). Ils sont munis d'une porte et d'une double soufflerie. À ce groupe se rattachent plusieurs appareils isolés: 6 (Bellaires 1, niv. sup.), 22 (Bossena 1, fond quadrangulaire, emploi de tuileaux) et 23 (Prins-Bois 2, pas de soufflerie latérale) Si la ressemblance est moins frappante, le regroupement est justifié par l'étude des caractéristiques techniques.

#### *Le groupe intermédiaire*

Ce groupe est nettement plus artificiel que le précédent. Les appareils qui le composent présentent des différences notables. Ils ne permettent pas de définir des types. Les données chronologiques permettent d'attribuer ces appareils à l'époque romaine au sens large.

Les fourneaux 11 et 12 sont très semblables. Le fond est trapézoïdal (env. 80 cm de côté) bordé sur 3 côtés de tuileaux. Une bordure de 38 cm de haut barre le quatrième côté (partiellement détruite dans le four 11). L'ouverture située au-dessus sert à la ventilation. L'évacuation des scories coulées pose un problème. Une seconde soufflerie, latérale, n'est pas attestée mais ne peut être exclue. Ces deux fourneaux sont associés étroitement à des foyers ouverts de dimensions beaucoup plus modestes situés à proximité immédiate (15 et 16, p. 103 et fig. 103).

Le fourneau 7 a un fond en forme d'un fer à cheval, pavé à l'aide de dalles de gneiss. Les parois en argile renforcée de scories, sont incurvées. Des fragments du gueulard ont été trouvés à l'intérieur de la cuve. Un rebord de 15 cm barre le 4<sup>e</sup> côté et supportait une tuyère. Une seconde soufflerie n'est pas attestée mais ne peut être exclue.

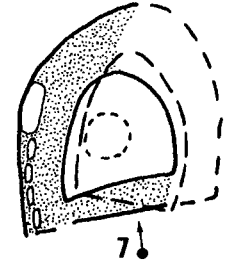
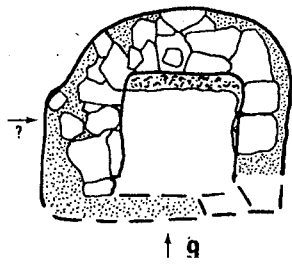
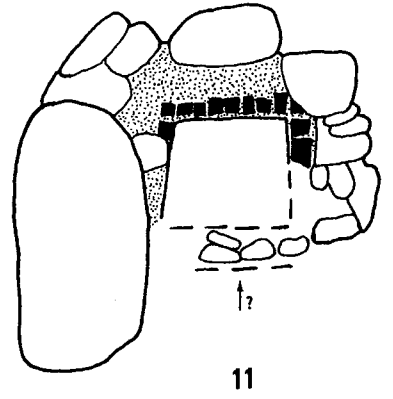
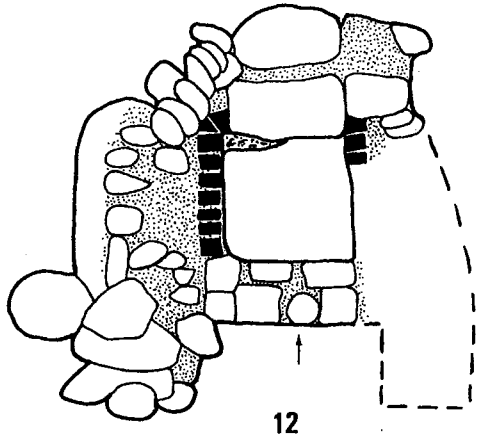
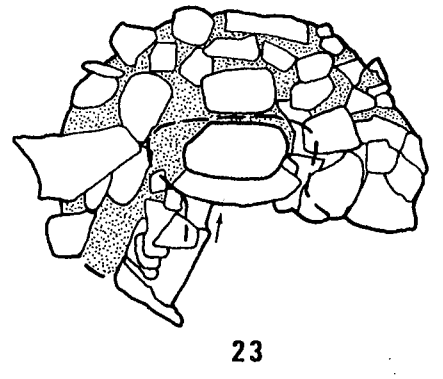
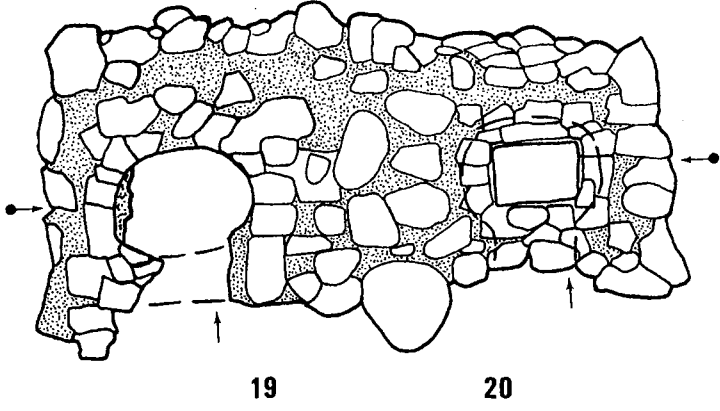
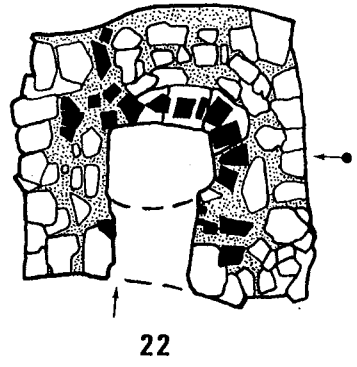
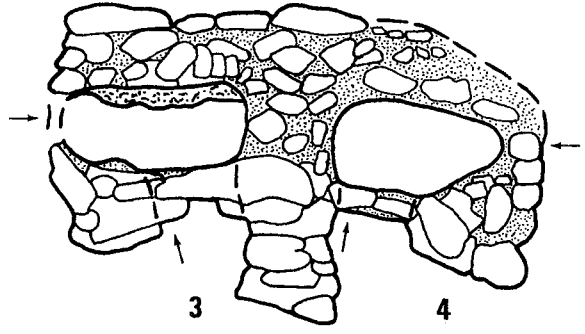
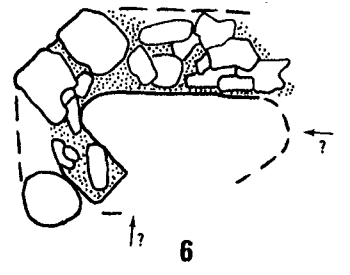
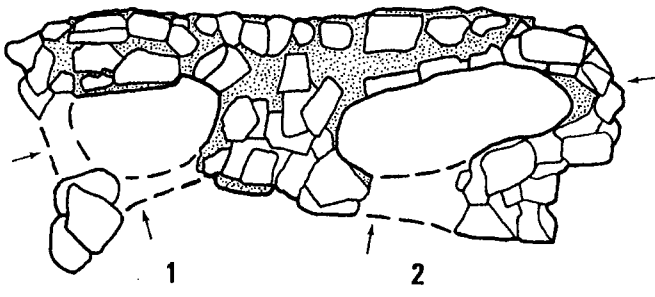
Le fourneau 9 est de forme quadrangulaire. Le revêtement interne de la cuve est en dalles de gneiss recouvertes d'une forte scorification. Une ouverture est ménagée dans un angle du fourneau sans doute pour permettre l'écoulement des scories. Ce four était probablement muni d'une double soufflerie.

#### *Le groupe ancien*

Seuls deux fourneaux du site de Bellaires 1 constituent ce groupe (10 et 13). Stratigraphiquement, ils se trouvent à la base de la séquence et les datations <sup>14</sup>C confirment leur ancienneté. Ils apportent la preuve de l'existence d'une industrie du fer préromaine. Les vestiges sont malheureusement dans un état de conservation très médiocre. Toute tentative de reconstitution ou de comparaison reste hypothétique. En particulier, il nous semble impossible de prouver l'utilisation d'une ventilation naturelle.

#### *Remarque sur les fourneaux de Prins-Bois 1*

24 fourneaux ont été découverts à Prins-Bois 1 (Pelet 1960a et 1973, 143-5). L'état de la documentation ne permet pas de comparaison poussée. Ils semblent tous se rattacher à



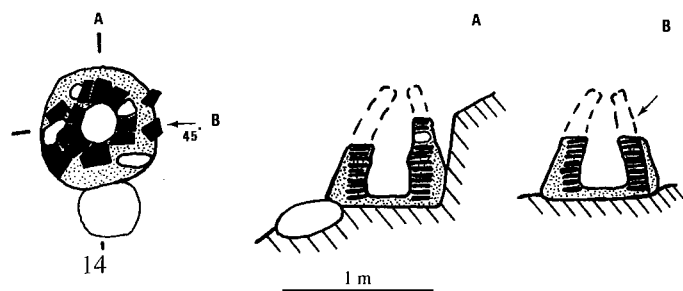


Fig. 102. Fourneau 14, Bellaires 1. Plan et coupes. D'après Pelet 1973, fig. 19. Légende en pied de page.

la même grande famille des bas fourneaux construits, à scories coulées. La plupart des fourneaux sont encastrés dans le talus. Ils sont construits en pierres et en scories en proportions variables. Les fonds sont subcirculaires (diamètres 70-100 cm). Plusieurs fours pourraient être jumelés (7+18, 10+13, 9+12).

Une trentaine de fragments de tuyère ont été découverts (Pelet 1960a, 68-75, fig. 21-3). Le fourneau 19 était pourvu d'un curieux conduit aboutissant à un bec de tuyère en place (Pelet 1960a, 70-1, fig. 13).

### Le four 14 de Bellaires 1

Le fourneau 14 est la plus jeune installation du niveau stratigraphique intermédiaire de Bellaires 1. Il date probablement du Ve siècle.

Au point de vue technologique, il est complètement différent de tous les autres appareils de la région (fig. 102). Les parois sont construites en argile renforcée de quelques débris. Le revêtement intérieur est constitué de tuileaux de réemploi. Le fond est circulaire et étroit (diam. 30 cm). La cuve conique se rétrécit vers le haut, les fragments du gueulard donnent une ouverture de 11 cm. La partie inférieure est totalement close. On restitue une tuyère inclinée à 45° débouchant dans la cuve à 40 cm au-dessus du fond.

Le fonctionnement de ce fourneau est complètement énigmatique. Comment évacuer la scorie? Comment extraire l'éponge de fer? S'il s'agit clairement d'un appareil destiné à un travail sidérurgique, on peut même douter que ce soit un fourneau de réduction.

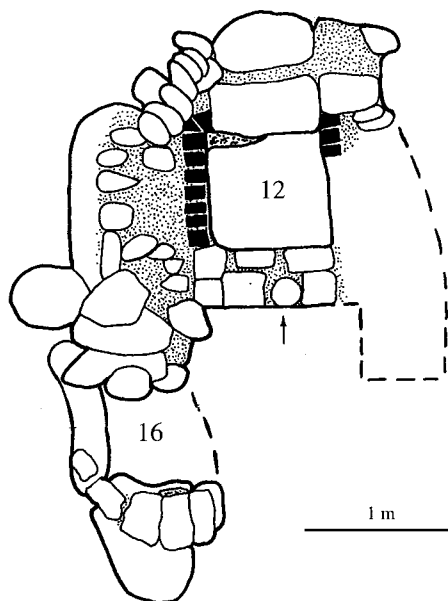


Fig. 103. Le bas fourneau 12 et le foyer 16, Bellaires 1. D'après Pelet 1973. Légende en pied de page.

### Les foyers

Le foyer 16 est une construction légère sans superstructure conservée (fig. 103). Des murets entourent sur 3 côtés une plaque d'argile rougeie (65 x 55 cm). Le dernier côté est ouvert. La soufflerie ne peut pas être reconstituée.

Ce foyer est attenant au fourneau 12. Il s'appuie sur le mur latéral gauche, en aval. Les ouvertures sont disposées perpendiculairement l'une à l'autre, ouvrant sur le même espace de travail. Les 2 appareils sont clairement en relation. Il pourrait s'agir de foyer de raffinage («four à recuire») destiné à retraiter le produit du bas fourneau immédiatement après la réduction. Cette hypothèse n'a pas pu être confirmée par l'étude des scories associées.

Le foyer 15 est comparable à 16 et se trouvait juste en dessous de lui. Il est associé au fourneau 11. Les 2 ateliers, 12+16 et 11+15, reproduisent la même organisation spatiale. Elle est nettement différente de celle des autres structures de production du fer de la région et ne connaît pas de parallèle strict dans la littérature. Elle reste mal comprise.

Le four 5 est le plus difficile à interpréter. Les vestiges conservés sont similaires aux traces laissées par 15 et 16,

◀ Fig. 101. Plans des bas fourneaux construits à scories coulées de la région du Mormont. D'après Pelet 1973.

Légendes communes aux figures 101, 102, 103 et 144.

- |   |               |   |                   |
|---|---------------|---|-------------------|
|  | Pierre        |  | Tuyère en place   |
|  | Tuileau       |  | Tuyère probable   |
|  | Terre, argile |  | Tuyère incertaine |
|  | Scorification |   |                   |

Bellaires 1: 1, 2, 3, 4, 6, 7, 9, 11 et 12

Bossena 1: 22

Bellaires 3: 19 et 20,

Prins-Bois 2: 23

	groupe récent													groupe intermédiaire										groupe ancien	
fourneau	1	2	3	4	6	19	20	22	23	14	12	16	11	15	7	17	8	18	21	5	9	13	10		
inconnu												X		X				X							
conduit large																X			X			X	X		
en entonnoir étroite											X		X			X	X						X		
en entonnoir large	X	X	X	X	X	X	X		?	X															
cylindrique										X					X	X				X	X				
ogivale massive						X	X	X								X			X						
ogivale ultracourte						X	X									X									
oblique										X															

Fig. 104. Répartition des tuyères des bas fourneaux de la région du Mormont. Les dispositifs découverts en place sont indiqués à la fig. 101.

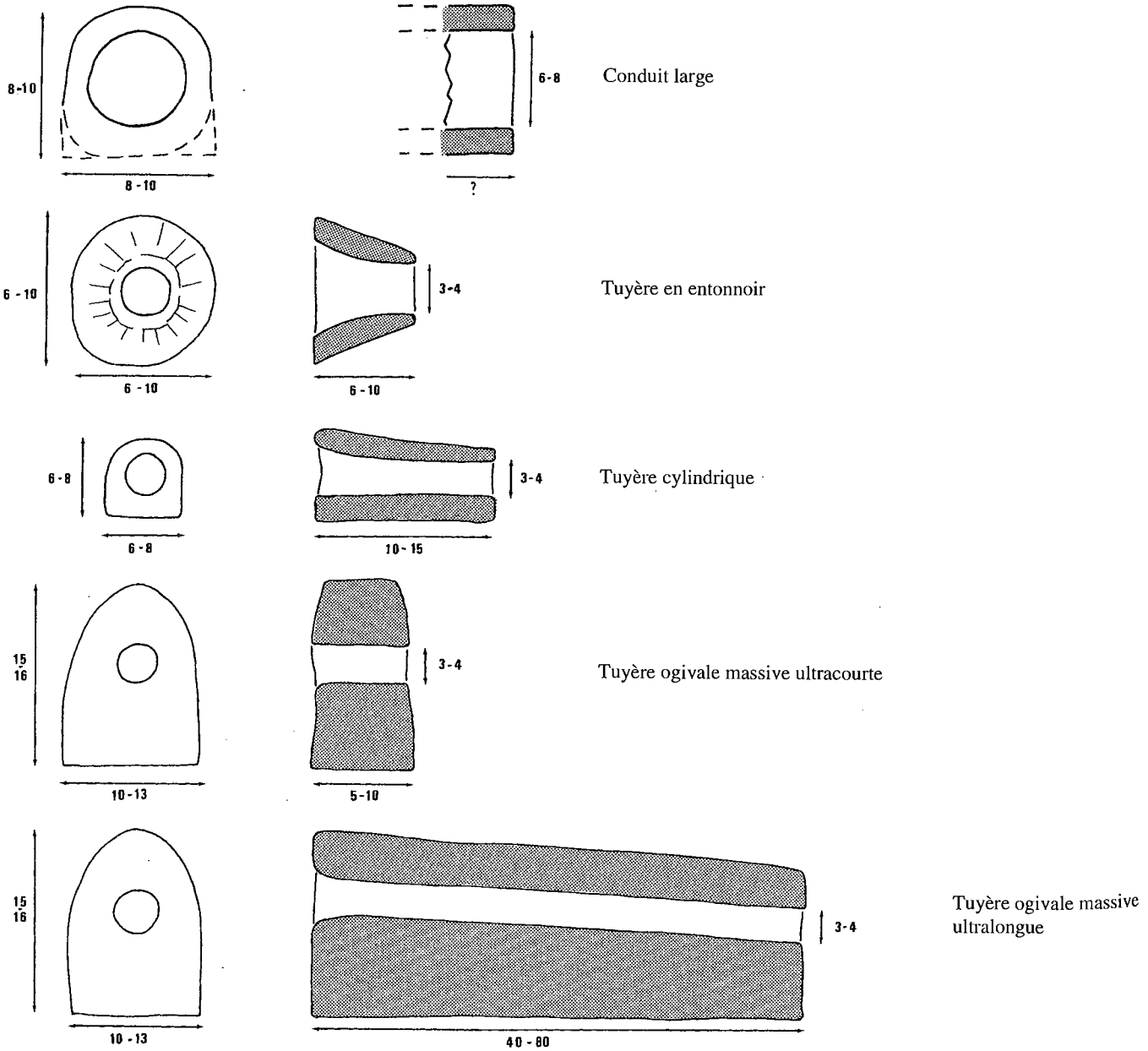


Fig. 105. Schémas des principales catégories morphologiques de tuyères de la région du Mormont. D'après Pelet 1973. Dimensions en cm. Env. 1:4.

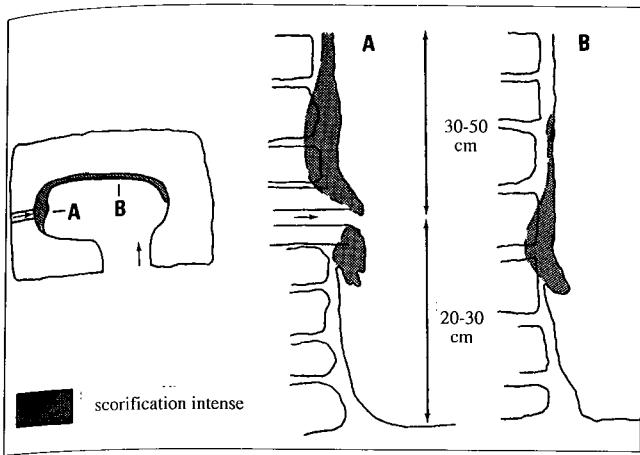


Fig. 106. Schéma de la scorification des parois dans les bas fourneaux récents.

mais il est isolé. Il pourrait s'agir d'un bas fourneau de réduction en très mauvais état aussi bien que d'un foyer de raffinage. Parmi les scories qui lui sont associées, on relève la présence d'un gros bloc non coulé massif qui s'est formé sur le fond et contre la paroi arrière (Pelet 1993, pp. 33-34). La trace de l'arrachement est visible. Cette pièce devait être assez proche de la tuyère. Elle est exceptionnelle et représente plutôt un accident qu'un résidu typique. Elle ne permet pas de clarifier la fonction du four 5.

### La ventilation

Tous ces fourneaux sont munis de tuyères, c'est-à-dire de pièces en céramique percées qui permettent d'amener de l'air à l'intérieur de la cuve. Dans quelques cas, elles ont été trouvées en place. Généralement, et en particulier à Bellaires 1, c'est dans les zones de rejets que des fragments ont été découverts et attribués d'après leur position stratigraphique. Plusieurs catégories

morphologiques peuvent être distinguées (fig. 105). Leur répartition sur les sites est complexe (fig. 104).

Des conduits larges sont seuls associés aux fourneaux les plus anciens (10 et 13). Le diamètre interne du trou a été considéré par P.-L. Pelet comme un critère permettant de séparer ventilation artificielle et naturelle. Ce seul argument paraît trop incertain mais cette question doit rester ouverte. Les fourneaux du niveau stratigraphique intermédiaire utilisent des tuyères très variées. Pour un même appareil, il y a souvent des tuyères de plusieurs types. Le fourneau 14, avec sa tuyère oblique est une exception. Aucune tuyère ne peut être mise en relation avec les foyers 15 et 16, mais on ne peut exclure cette possibilité.

Les fourneaux récents de Bellaires 1 (1, 2, 3, 4 et 6) n'utilisent que des tuyères en entonnoir de grand diamètre mais l'étude des structures permet de restituer une double ventilation. Les tuyères occupent des positions différentes dans le fourneau: une tuyère latérale haute (20-30 cm au-dessus du fond) et une tuyère frontale, probablement basse (Pelet 1992).

Dans le cas des fourneaux 19 et 20 de Bellaires 3, cette reconstitution est certaine. A la Bossena 1, il en va de même (four 22). Par contre, à Prins-Bois 2, le fourneau 23 ne possédait pas de soufflerie latérale.

La modification de la forme des tuyères semble répondre au souci des artisans de perfectionner leurs installations.

### Les parois

Au cours de la réduction, les parois de la cuve subissent un fort impact de chaleur auquel elles doivent résister. De plus, en fondant partiellement, elles participent dans une certaine mesure, à la réaction. La scorification des parois est extrêmement variable. Il peut s'agir d'une fine pellicule aussi bien que d'une épaisseur de plus de 20 cm. Il n'y a pas de relation claire entre la nature de la paroi et l'épaisseur de la scorification. Par contre, on remarque que la disposition de la

La partie scorifiée forme un bourrelet au bas d'une paroi.  
La surface exposée au feu présente un relief mou mais assez accentué. Elle est noire avec des zones centimétriques rouillées et magnétiques (nodule métallique, voir 5).

Commentaire de la coupe:

- 1 Zone scorifiée: gris verdâtre, très hétérogène: on devine des domaines aux contours irréguliers et de nombreuses inclusions (grains de quartz). Les bulles sont abondantes et étroites.
- 2 Gros grain de quartz non fondu.
- 3 Zone partiellement fondue: gris noir. Les bulles globulaires sont très abondantes et de taille variable. Elles montrent un dégazage vertical.
- 4 Zone cuite: rouge brique. Les bulles sont anguleuses, déchiquetées. On distingue des grains de quartz dans une matrice argileuse.
- 5 Nodule métallique.

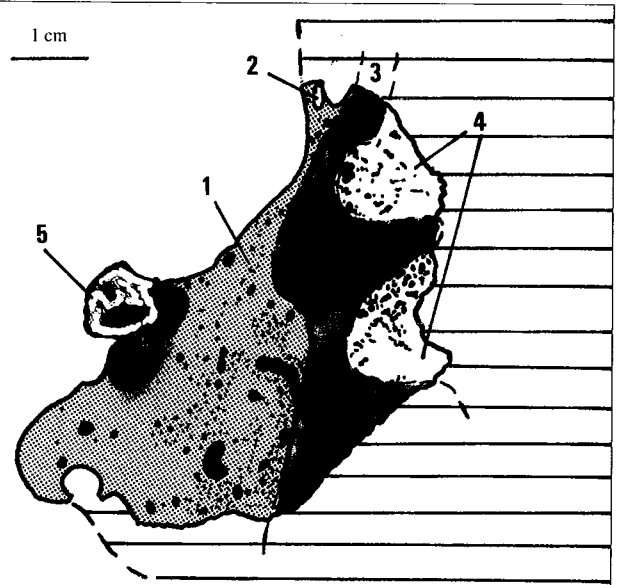


Fig. 107. Paroi de four: revêtement interne argileux. Ech. BOS 21 (Bossena 1, site 18).

scorification n'est pas aléatoire. Elle permet de reconstituer la géométrie de la zone «chaude» à l'intérieur du fourneau qui est en relation avec le dispositif de soufflerie.

Dans les fourneaux récents, les mieux conservés, c'est sur la paroi opposée à la porte et au-dessus de la tuyère latérale que l'épaisseur de matériaux fondus est la plus forte (fig. 106). Le fond n'est que cuit ou rougi, mais jamais fondu. On observe que la scorification des parois s'arrête à 20-30 cm au-dessus du fond. Dans certains fourneaux plus anciens, la scorification descend plus bas sans toutefois jamais recouvrir

le fond (9 et 12). La zone «chaude» occupe donc une position plus basse dans la cuve.

Le revêtement interne est la partie la plus soignée de la construction. Si la nature des matériaux utilisés varie d'un fourneau à l'autre: tuiles, pierres de toutes sortes et même scories de réemploi, ils sont toujours choisis avec soin. Presque systématiquement, la paroi est recouverte d'une pellicule argileuse (1-5 cm). Toutefois, les matériaux cohérents divers ont souvent été mis à nu et fondus (fig. 107 à 109). Seul le calcaire est rare.

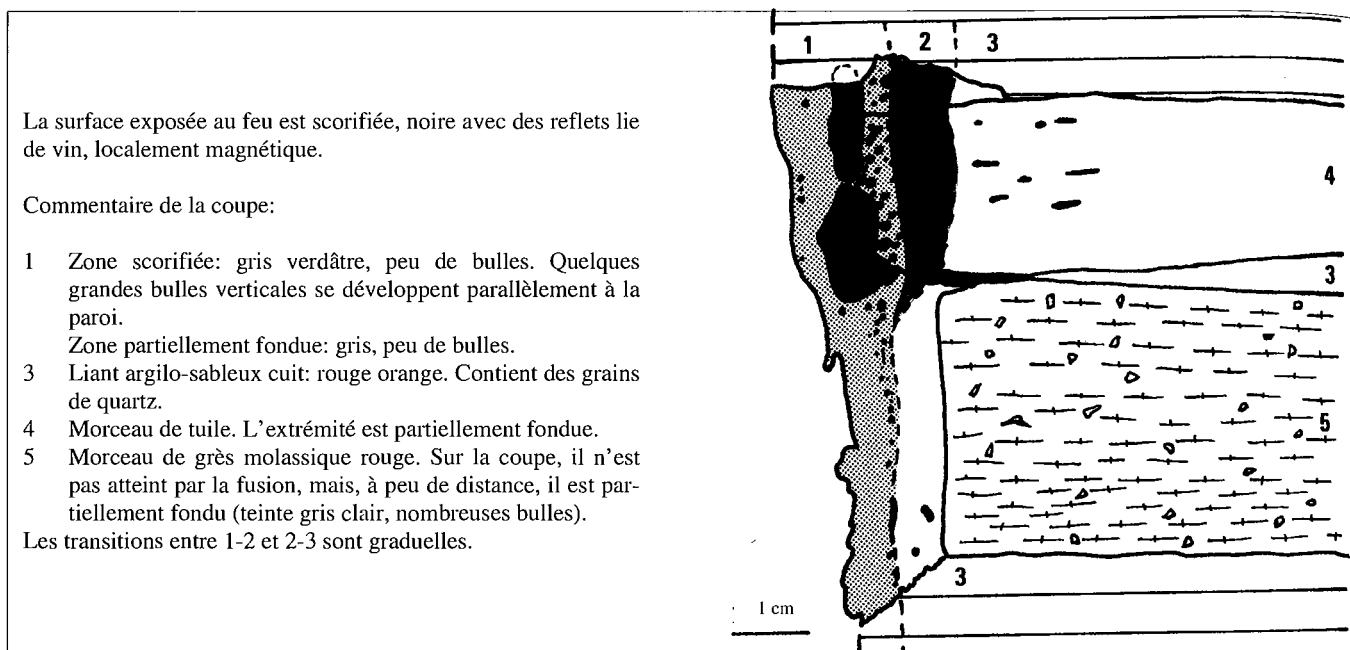


Fig. 108. Paroi de fourneau: revêtement interne argileux et morceaux de tuile et de grès partiellement fondus. Ech. BOS 26 (Bossena 1, site 18).

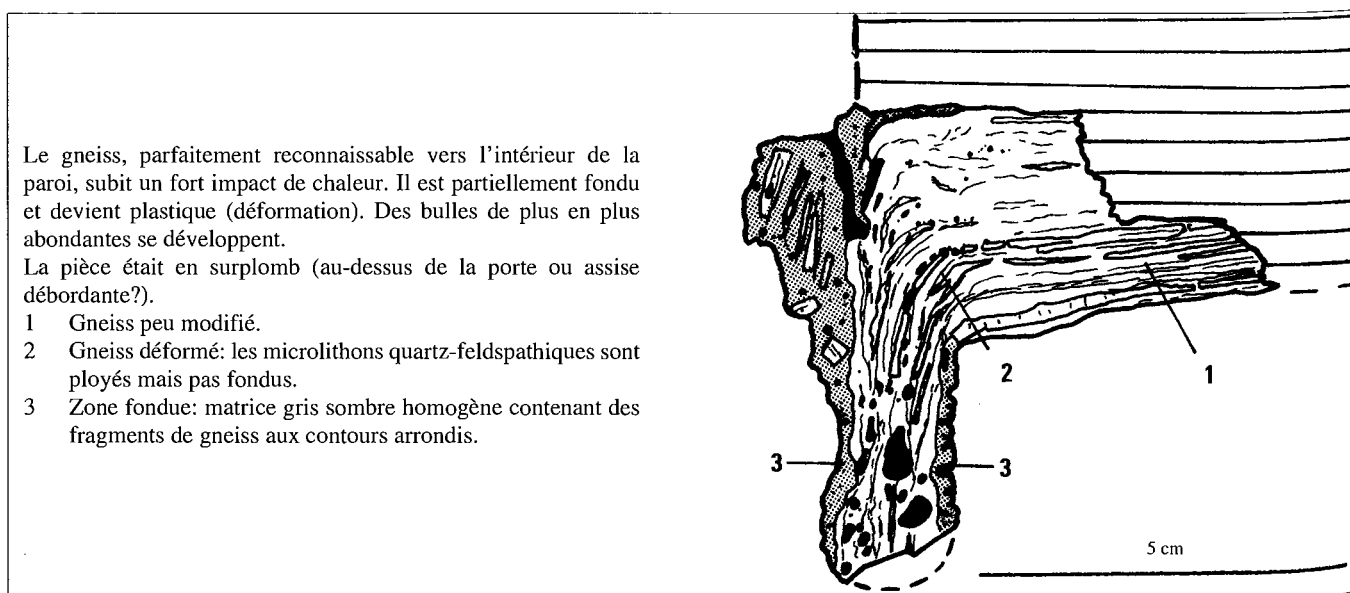


Fig. 109. Paroi scorifiée: morceau de gneiss partiellement fondu. Ech. PRI 291 (Mormont, Prins-Bois 2, site 5.2).

Toutes les surfaces sont cassées.

Commentaire de la coupe:

- 1 Gneiss peu modifié par la chaleur.
  - 2 Zone fondue: gris clair. Bulles étirées, moyennement abondantes, de taille moyenne. Nombreux grains silicatés non fondus.
  - 3 Zone fondue: gris sombre. Bulles étirées, moyennement abondantes, de taille moyenne. Quelques grains silicatés non fondus.
  - 4 Zone fondue: gris clair, localement jaunâtre. Bulles moins abondantes mais beaucoup plus larges, sans orientation.
- Entre 2 et 3, nombreux morceaux de gneiss partiellement fondus.  
 Dans la zone 3, quelques gros grains de roche non fondus.
- 5 Métal: filaments diffus dans la masse.
  - 6 Zone de silicates fondus: blanc-beige. Contours diffus. Peu de bulles.
  - 7 Grains de gneiss non fondus.

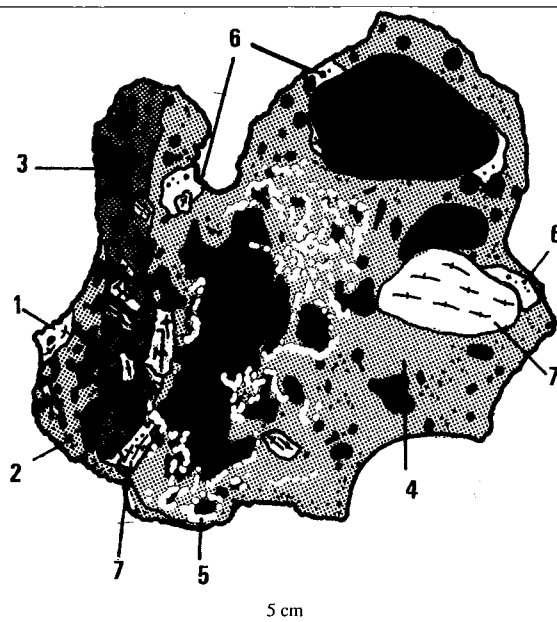


Fig. 110. «Scorie de paroi»: Ech. CAR 3 (Mormont, Carolines, site 16). Coupe. La polarité de l'échantillon est impossible à définir.

Dans certains cas, la paroi originale n'est plus reconnaissable et bon nombre de blocs ayant l'apparence de la scorie ne sont que des fragments de revêtement interne transformés («scorie de paroi», fig. 110). L'abondance des grains non fondus de roche silicatée ou calcaire est un bon indice de leur nature. Il est probable que ces objets soient des morceaux détachés de la paroi pendant la réduction ou cassés postérieurement, lors du nettoyage de l'intérieur de la cuve.

Les analyses chimiques ne sont pas du tout représentatives du produit de la fusion de la gangue. Elles témoignent seulement d'une forte contamination entre la paroi et la charge (Annexe 4.4 à 4.8: éch. VOU 1, BEL 181, 182, 184, 186, 187?, 189, 190, 191, CAR 3, 5 et TIG 2). Elles sont généralement moins riches en aluminium que les scories (Si:Al = 1:5; fig. 117).

Fréquemment, les parois scorifiées et les scories de paroi contiennent du fer à l'état métallique. Il se développe en filaments diffus dans les zones fondues, au contact avec des bulles irrégulières et des morceaux de charbon (fig. 110). On trouve aussi des nodules à texture spongieuse, adhérent à la surface exposée au feu (fig. 107) et de minuscules billes.

Sous certains aspects, ces pièces rappellent les «scories internes massives» décrites à Boécourt (Eschenlohr et Sernels 1991, 82-3). Les pièces de la région du Mormont montrent souvent un mélange plus intime de la matière. Ceci tient sans doute à la nature du revêtement interne argileux des bas fourneaux de la région du Mormont, plus fusible que le sable de Boécourt.

## Les scories de réduction

La collection d'échantillons constituée par P.-L. Pelet a été complétée par des ramassages de surface sur de nombreux sites métallurgiques de la région du Mormont. Malgré le fait que bon nombre de sites se trouvent en forêt, la fragmentation est toujours forte. Il n'est guère possible de reconstituer la forme ou le volume des pièces. La grande majorité des fragments étudiés sont des scories coulées présentant une structure de flux caractéristique. Elles se subdivisent en plusieurs catégories.

## Les SVN: scories coulées vitreuses noires

Les SVN de la région du Mormont sont assez proches des SVN du Salève (pp. 73-75). Elles sont très riches en bulles donc très légères (porosité 30-70%).

Ce sont des coulures irrégulières à écoulement unique ou en nombre restreint (fig. 111 et 112). Les dimensions sont moyennes (max: l = 20 cm, l = 10 cm, h = 10 cm, le plus souvent moins de 5 cm d'arête).

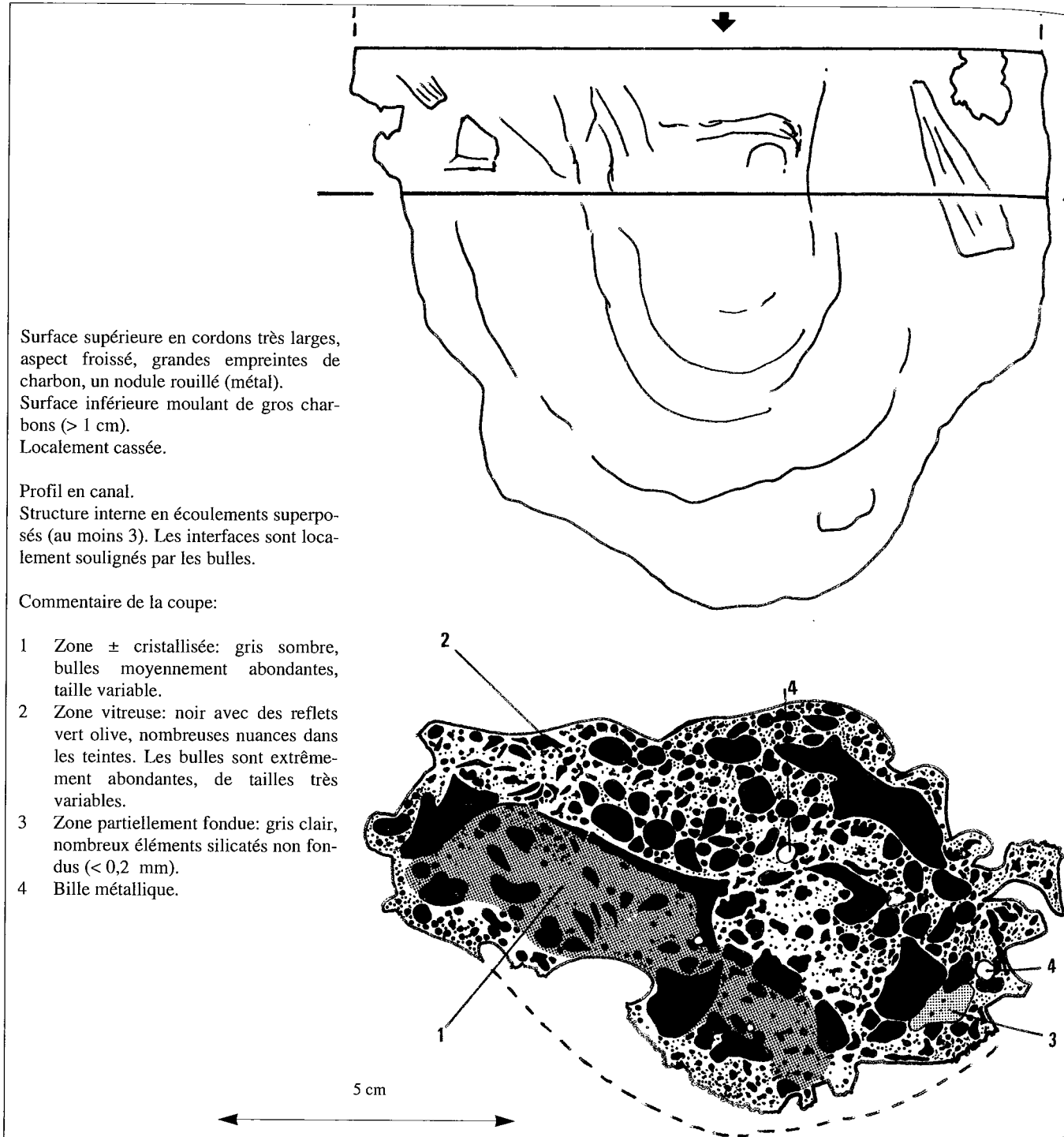


Fig. 111. SVN: scorie coulée noire vitreuse, hétérogène; Ech. AFF 2 (Mormont, Maison Favre, site 28): vue de dessus et coupe.

La surface supérieure présente un faible relief et un aspect froissé. La pellicule supérieure est en général cassée. Cette fracturation pourrait être précoce et due à un très fort dégazage lors du refroidissement. La surface inférieure est rarement caractéristique (seulement lorsqu'elle incorpore des grains de sable ou d'argile). Les empreintes de charbons sont rarement observées. Ces scories sont sombres, généralement noires avec toutes sortes de nuances de teinte, parfois irisées. L'aspect est vitreux.

En coupe, elles sont hétérogènes. Des domaines aux formes irrégulières se distinguent soit par la nuance de coloration soit par la texture. Ils sont répartis de manière apparemment désordonnée. Ces scories contiennent aussi un grand nombre d'éléments étrangers aux formes tantôt anguleuses, tantôt arrondies (fragments argilo-sableux, grains de quartz, charbon, etc).

Le fer métallique est fréquent. Il forme des billes (0,1-5 mm) ou des nodules irréguliers (1-10 mm) qui sont répartis dans la masse de manière aléatoire. Il est peu abondant (< 1%) et ces pièces ne réagissent pas à l'aimant.

Les SVN sont clairement coulées mais il est souvent difficile de définir la position de refroidissement (horizontale / inclinée; sur charbon / sur sol; substrat aménagé / non aménagé). Aucune règle ne se dégage des observations. Le flux est extrêmement visqueux et difficile.

La pâte est essentiellement vitreuse. Les spectres de diffraction des rayons X montrent que les cristaux sont peu abondants (Ech. BOS 2, CAR 1 et AFF 2; Annexes 4.5, 4.7 et 4.8). Le quartz, toujours présent, est probablement résiduel. La fayalite et la hercynite ont été détectées une seule fois (AFF 2).

Surface supérieure en cordon large, aspect froissé, rides profondes, écoulement désordonné.

Surface inférieure assez régulière, localement aspect froissé; incorpore de nombreux fragments argilo-sableux, empreintes de charbons.

Profil grossièrement circulaire.

Commentaire de la coupe:

- 1 Zone plutôt vitreuse hétérogène: teintes variables, gris jaunâtre, bulles moyennement abondantes et larges. Contient de nombreux éléments silicatés incomplètement fondus (0,1-0,5 mm).
  - 2 Zone vitreuse: noire, bulles abondantes et étroites.
- La limite entre 1 et 2 est diffuse.
- 3 Élément ± anguleux partiellement fondu contenant de très nombreuses micro-inclusions de métal (<0,1 mm). Minerai?
  - 4 Morceau de gneiss partiellement fondu.
  - 5 Nodule métallique informe.
  - 6 Charbon.

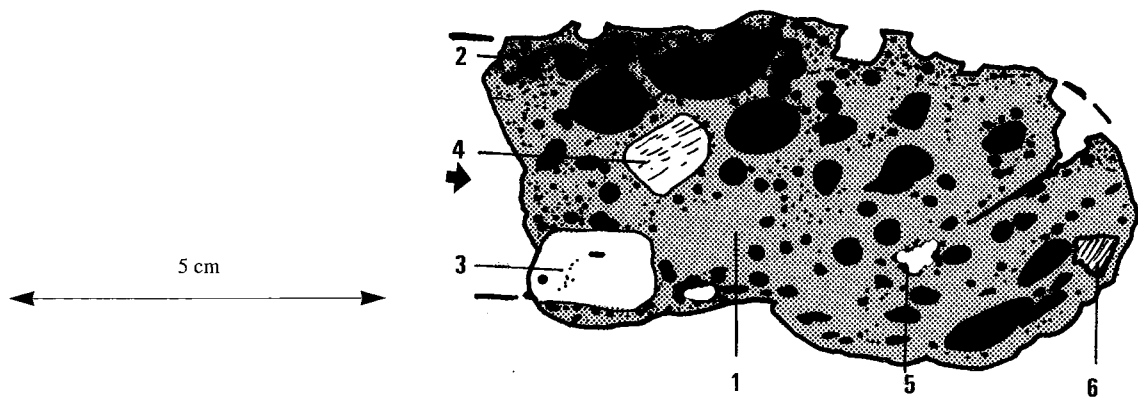
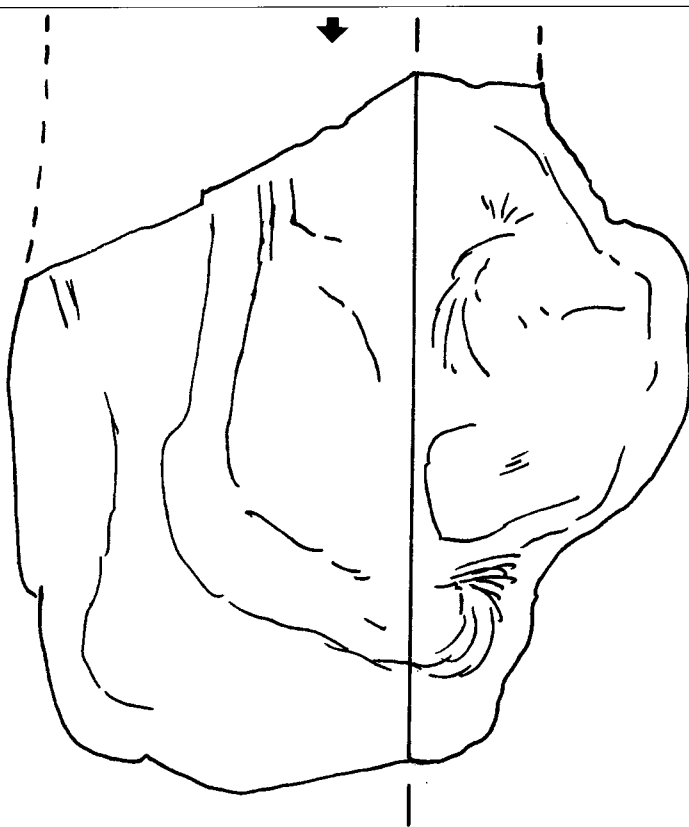


Fig. 112. SVN: scorie coulée noire vitreuse, hétérogène; Ech. BOS 2 (Mormont, la Bossena 1, site 18). Vue de dessus et coupe.

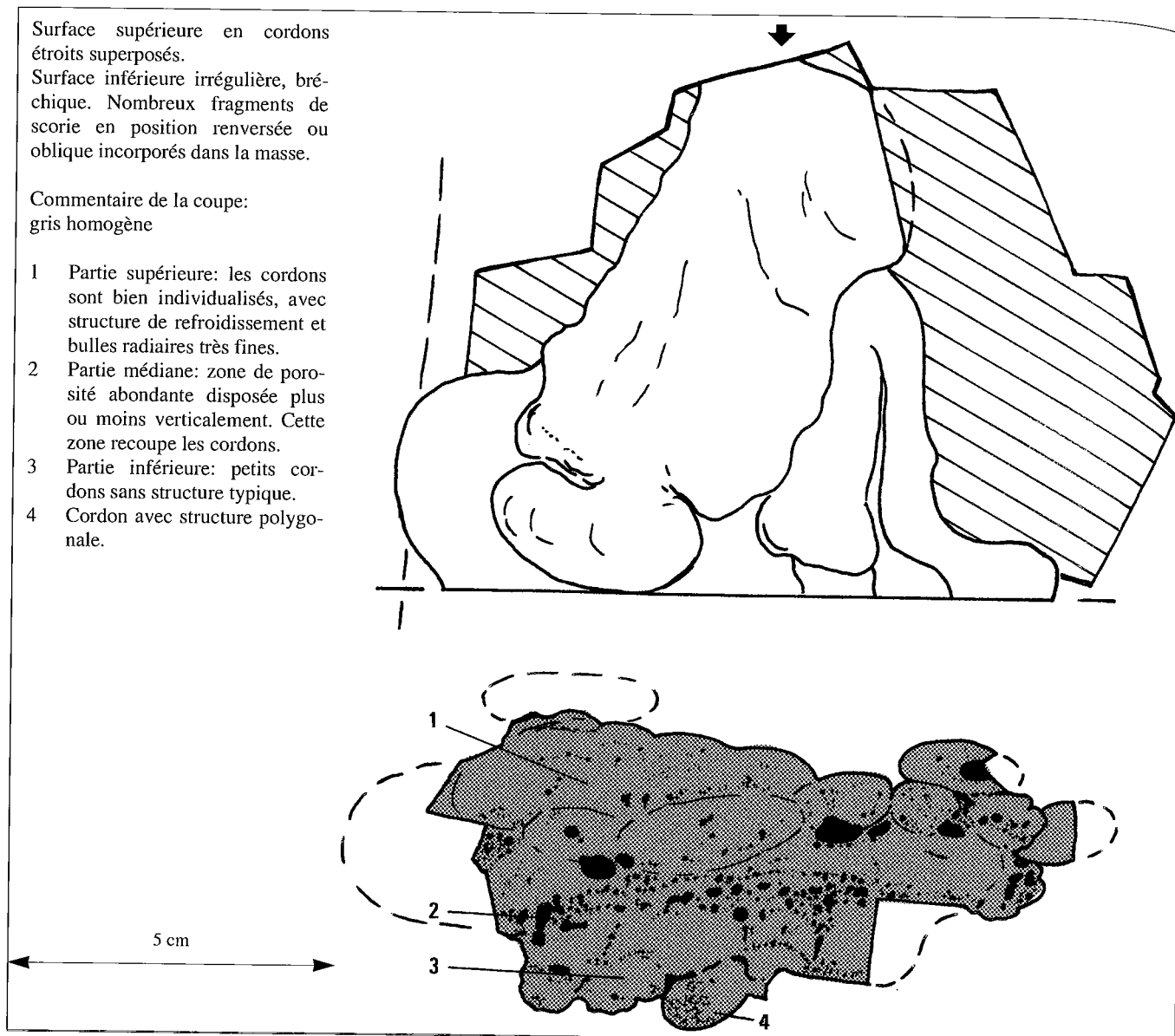


Fig. 113. SGD: scorie coulée grise dense, coulure en canal; Ech. CAR 12 (Mormont, Carolines, site 16). Vue de dessus et coupe.

Les analyses chimiques des SVN montrent des teneurs élevées en alumine et en silice (Annexes 4.4 à 4.8, fig. 117). Le fer est présent à tous les degrés d'oxydation (Fe, FeO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) en proportions très variables. La teneur globale est très basse. Les rapports entre les éléments principaux sont stables.

Les éléments mineurs et traces ne montrent pas de différences notables avec les autres scories de réduction de la région.

%	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeOtot
moyenne	43.81	17.41	29.43
sur			
34 éch.	Si:Al	Si:Fe	
SVN	2.16	0.92	

### Les SGD: scories coulées grises denses

Ce sont des scories manifestement coulées dont la densité apparente est élevée (faible porosité). La pâte est gris sombre homogène et cristalline (fayalite). Elles sont proches des SGD du Salève (pp. 75-78).

L'écoulement se fait en cordons assez étroits superposés (1-5 cm). Le relief de la surface inférieure est moins marqué. Des empreintes de charbon et des inclusions de grains de roche ou d'argile cuite, sont fréquentes. La masse est gris sombre, parfois avec des teintes jaunâtres diffuses ou localisées à des domaines restreints. Les cordons présentent des structures de refroidissement individuelles, mais elles ne sont pas toujours nettes. Le fer métallique est rarement visible. Les SGD ne sont pas magnétiques.

Il est difficile de définir des catégories morphologiques comme au Salève. Le matériel est souvent beaucoup plus

fragmenté et les SGD sont nettement plus rares. Il est frappant de constater que les coulures de la région du Mormont sont le plus souvent désordonnées.

On observe des petites coulures (fig. 115) et des coulures en canal (fig. 113). Quelques échantillons sont en forme de plaque (fig. 114). Le matériel ne permet pas de faire une véritable classification. Le flux est relativement peu visqueux. Il ne semble pas toujours horizontal et est souvent perturbé. Le substrat ne semble pas avoir été aménagé au préalable.

Du point de vue chimique, les SGD sont nettement plus riches en fer que les SVN (fig. 117, Annexes 4.4 à 4.8). De même, elles sont plus pauvres en silice et en alumine. A l'intérieur du groupe, les rapports entre les éléments sont constants. Le rapport Si:Al est pratiquement le même que celui des SVN. Les minéraux détectés à l'aide des rayons X sont la fayalite et un spinelle (Ech. CAR 2, BEL 304 et ROS 202; Annexes 4.4, 4.6 et 4.7). Ce dernier possède un spectre intermédiaire entre la galaxite et la hercynite. Le quartz est détectable dans 2 échantillons.

%	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeOtot
moyenne	31.41	13.12	46.88
sur			
6 éch.	Si:Al	Si:Fe	
SGD	2.13	0.41	

### Les scories intermédiaires

De nombreuses pièces présentent des caractères légèrement différents des SGD. La porosité est plus abondante et répartie de manière moins ordonnée. La pâte est plus claire, jaunâtre ou hétérogène. Les inclusions sont plus nombreuses,

le fer plus abondant. Les reliefs et les formes sont moins réguliers. Tous ces caractères sont très relatifs et il est impossible de séparer clairement des groupes. Les caractères chimiques sont eux aussi intermédiaires entre les SGD et les SVN. Ces échantillons assurent la transition entre les deux catégories. Dans le triangle FeOtot-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, elles se projetteraient dans une aire correspondant aux SGD et aux SVN réunies (fig. 117).

### Les scories non coulées

Les scories non coulées sont rares dans cette région (< 5%). Elles correspondent le plus souvent à des blocs informes présentant de nombreuses inclusions ou empreintes de charbon de bois. Les surfaces sont fréquemment envahies par la rouille. Elles contiennent toujours du fer métallique en abondance et réagissent à l'aimant. Ces pièces se forment à l'intérieur du fourneau, dans la masse de charbon.

### Répartition des différentes catégories de scories de réduction

Les scories de réduction sont présentes sur la plus grande partie des sites de la région du Mormont (fig. 92). Les autres cas sont évoqués plus loin (pp. 118-120).

Les scories de paroi et les fragments de paroi scoriacés sont fréquents. Tous les sites ont livré des matériaux argilo-sableux modifiés. Ce n'est que par accident que les matériaux cohérents (pierre, tuileau) sont mis en contact avec le feu. Ces circonstances sont cependant fréquentes et les exemples sont nombreux. Les artisans n'ont pas scrupuleusement veillé à l'entretien des appareils, probablement parce que cela ne perturbait pas notablement le processus.

Fragment 8 x 7 cm. Le sens de l'écoulement n'est pas déterminable.

Surface supérieure plate et régulière, en majeure partie fracturée (déchiquetée).

Surface inférieure mamelonnée, lisse. Quelques éléments argilo-sableux.

Commentaire de la coupe:

- 1 Zone très poreuse: la taille des bulles décroît vers la surface. Leurs formes sont très irrégulières.
- 2 Zone cristallisée: gris dense. Localement, les aiguilles de fayalite sont visibles. La porosité est constituée de grandes bulles perpendiculaires à la surface inférieure. Des domaines gris jaunâtre, de forme dentelée, sont visibles (10%).

Sur une autre coupe des nodules irréguliers de métal sont visibles à l'interface entre 1 et 2 (1-5 mm).

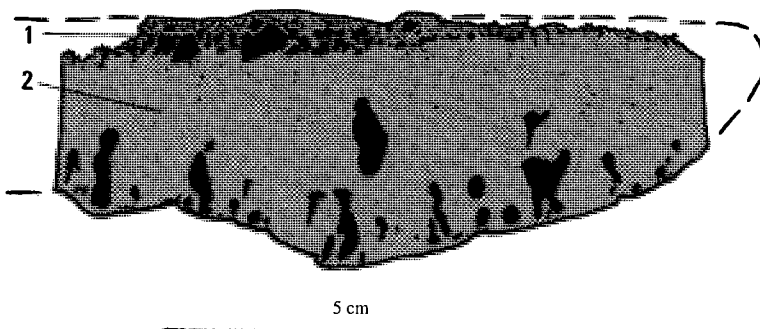


Fig. 114. SGD: scorie coulée grise dense, en plaque? Ech. CAR 2 (Mormont, Carolines, site 16). Coupe.

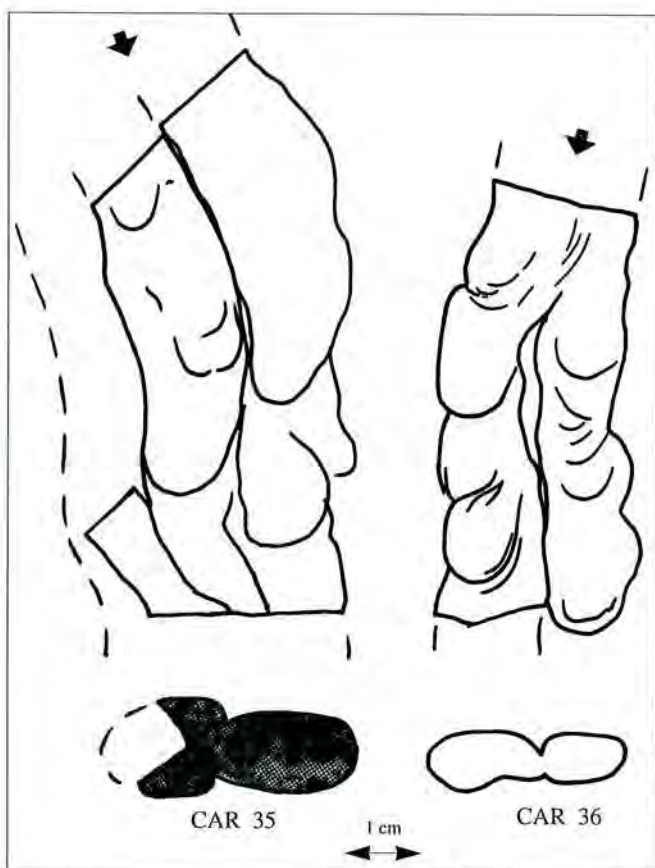


Fig. 115. Petites coulures, les Carolines, site 16.  
CAR 35: SGD CAR 36: SVN

Les SGD, les SVN et les scories intermédiaires se rencontrent sur tous les sites de la région du Mormont. Dans tous les cas, les SVN sont largement dominantes. Moins de 10% des fragments récoltés sont des SGD. Sur les sites où un seul fourneau a été découvert (Prins-Bois 2 et Bossena 1), les SVN forment la quasi-totalité des rejets. Dans les deux cas, quelques fragments de SGD typiques ont été observés.

A Bellaires I où des fourneaux différents du point de vue de l'architecture ont été fouillés, il n'a pas été possible de mettre en évidence des différences d'aspect ou de chimisme entre les scories. Cette constatation est paradoxale mais elle est le reflet de l'état actuel de la recherche. Le nombre d'analyses provenant de ce site reste toutefois limité. Il est actuellement impossible d'attribuer le matériel à l'un ou l'autre fourneau.

Malgré de nombreux siècles d'industrie et l'utilisation de bas fourneaux variés, aucune distinction n'est apparue. Par analogie avec le site de Boécourt JU (Eschenlohr et Serneels 1991, 71-83), on pourrait interpréter les morphologies de SGD et SVN comme des variations liées à la dynamique de l'écoulement. Des différences chimiques, en particulier la teneur en Fe, sont cependant nettes au Mormont, contrairement à Boécourt. L'explication est donc trop simple. L'étude basée sur des fragments ramassés en surface atteint ici ses limites. Au Salève, certains amas présentent la même association de scories où les SVN dominent.

Les analyses chimiques ne permettent pas de faire apparaître de sous-groupe géographique à l'intérieur de la région. Pour l'ensemble de la zone, les variations sont du même ordre de grandeur que sur un seul site. La source de minerai est donc unique, c'est-à-dire que l'ensemble des points exploités présentent les mêmes caractères chimiques.

## Relations entre le minerai et les scories de réduction

### Les analyses chimiques

Les échantillons de minerais argileux provenant des sites archéologiques présentent des rapports assez constants entre les éléments principaux et l'abondance de Al en est la caractéristique la plus marquante. Par contre, ce sont des corps relativement pauvres en Fe ( $Fe_2O_3$ tot < 60%).

Minerais archéologiques		
13 éch.	Si:Al	Si:Fe
minimum	1.48	0.12
moyenne	1.89	0.25
maximum	2.57	0.40

Les scories de réduction sont elles aussi riches en Al et pauvres en Fe. Le rapport Si:Al des SGD (2,13) et des SVN (2,16) est stable et proche de celui des minerais (1,89). La gamme de variation est la même (fig. 116). Par rapport aux minerais, les scories ne sont qu'à peine enrichies en Si. Il y a une cohérence globale entre les minerais archéologiques et les scories de réduction. La teneur en fer des SVN est nettement inférieure à celle des minerais alors que chez les plus riches des SGD, elle est du même ordre de grandeur que dans les moins bons minerais.

Par contre, les pisolithes ramassés aux environs de Ferreyres (éch. FER 151 et 171, Annexe 4.1) sont nettement plus siliceux (Si:Al proche de 4:1). Ils n'ont probablement pas été utilisés seuls, comme le laissent supposer les résultats des fouilles.

D'un site à l'autre, il n'y a pas de différences notables entre les minerais (mis à part les roches carbonatées ferrugineuses de Prins-Bois 2). Les moyennes sont donc utilisables (fig. 90).

Pour les scories, il en va de même en ce qui concerne le rapport Si:Al. Seuls 4 échantillons de scories, analysés précédemment (Pelet 1993, p. 147), sortent du lot avec des rapports très bas (1 à 1,5:1). Ils proviennent tous du secteur de La Sarraz (Maillefer, 38 et Saint-Loup, 39). Cette particularité, liée à l'origine géographique des échantillons, indique peut-être une variation locale de la nature du minerai. L'échantillonnage ne couvrant pas suffisamment cette région, cette hypothèse ne peut être confirmée.

Le rapport Si:Fe varie en fonction de la catégorie morphologique, mais pas de l'origine géographique. Les SGD sont plus riches en fer que les SVN.

Les parois sont de natures variées et peu d'échantillons ont été analysés récemment (CAR 3 et 5, TIG 2 et VOU 1,

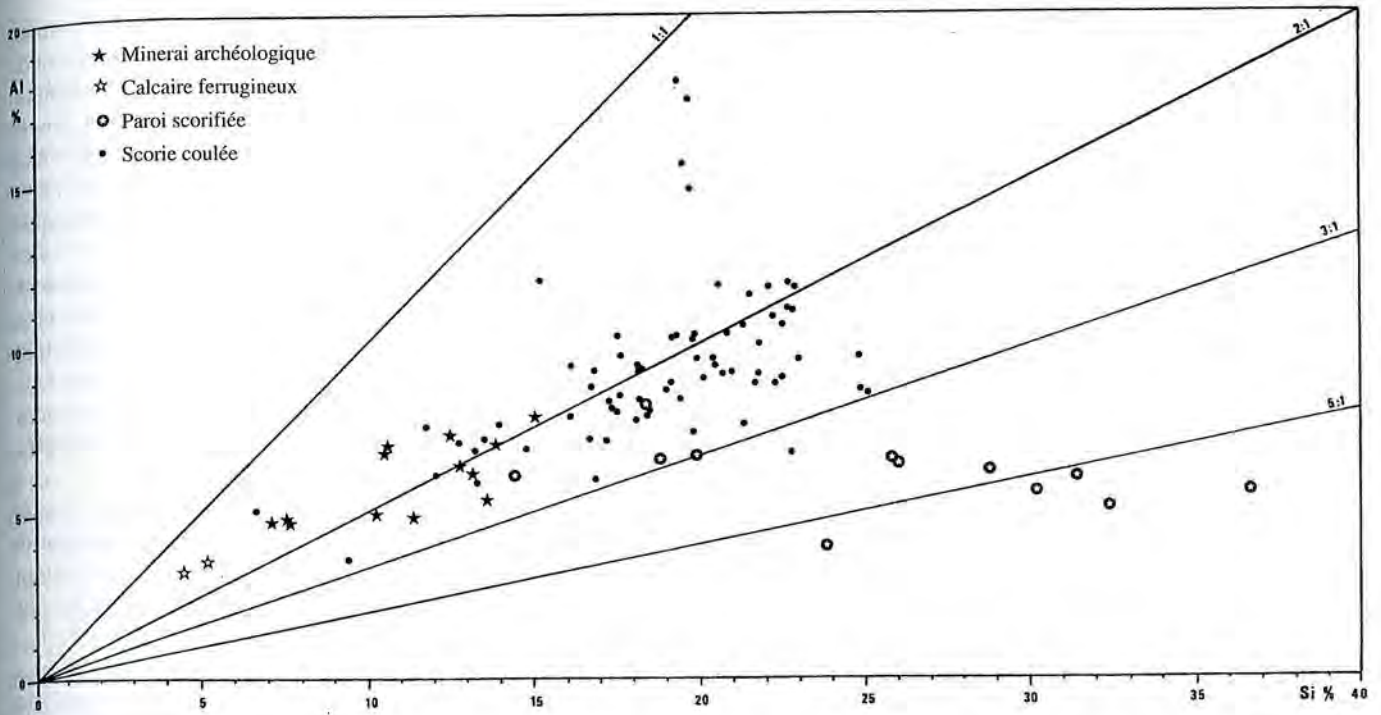


Fig. 116. Rapport Si:Al des échantillons du Mormont. Les analyses de Pelet 1973 sont également reportées.

Annexes 4.4 à 4.8). Plusieurs fragments de paroi scorifiée, prélevés en place ont été analysés (Pelet 1993, p. 147). En tout état de cause, ces matériaux sont toujours plus siliceux que les minerais et une contamination se marquera forcément par un enrichissement relatif en Si. On ne peut guère tirer de conclusion plus précise. Pour cela il faudrait travailler à l'échelle d'un site ou d'un fourneau, ce que l'échantillonnage ne permet pas.

**Calcul de production**

Un calcul de production peut être effectué sur la base des données analytiques (pp. 17-19), Serneels sous presse a). Les analyses de P.-L. Pelet ne sont pas prises en compte puisque les objets n'ont pas pu être étudiés macroscopiquement. Cela permet aussi d'éviter les problèmes liés à l'utilisation de

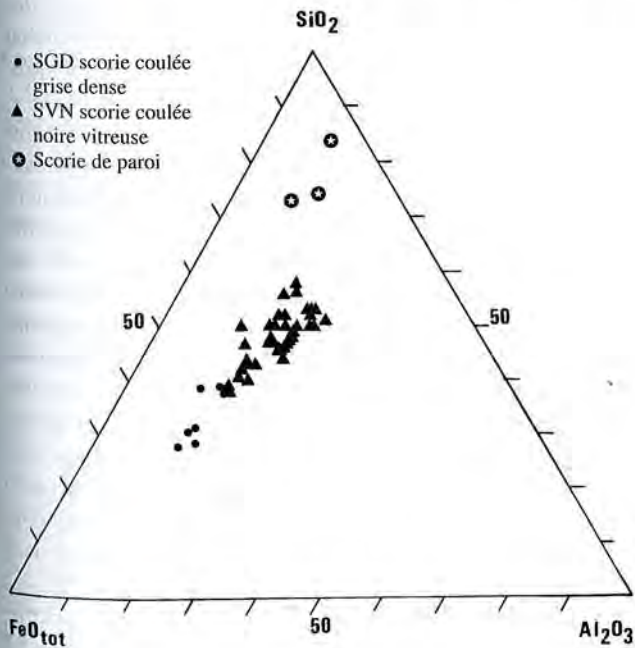


Fig. 117. Composition chimique des scories du Mormont. Les échantillons analysés par P.-L. Pelet ainsi que ceux dont l'identification morphologique est incertaine ne sont pas reportés.

gr/ 100gr	moyenne toutes scories	moyenne SVN archéologiques	moyenne SGD	moyenne minerais
Al:	9.04	9.64	7.02	5.98
Si:	19.01	20.84	14.85	11.25
Fe:	26.73	23.23	36.79	45.14
Moyenne de toutes les scories:				
Al: ->	151 gr.min			= 100 gr.sco
Si: ->	151 gr.min + 2 gr.Si			= 100 gr.sco
Fe: ->	151 gr.min			= 100 gr.sco + 41.5 gr.Fe
rendement:	0.60			production: 0.41
Moyenne des SVN				
Al: ->	161 gr.min			= 100 gr.sco
Si: ->	161 gr.min + 2.7 gr.Si			= 100 gr.sco
Fe: ->	161 gr.min			= 100 gr.sco + 49.4 gr.Fe
rendement:	0.68			production: 0.49
Moyenne des SGD				
Al: ->	117 gr.min			= 100 gr.sco
Si: ->	117 gr.min + 1.7 gr.Si			= 100 gr.sco
Fe: ->	117 gr.min			= 100 gr.sco + 16 gr.Fe
rendement:	0.30			production: 0.16
rendement = Fer produit / Fer contenu dans le minerai				
production = Fer produit / Scorie produite				

Fig. 118. Calcul de production pour les sites de la région du Mormont. Apport de la paroi purement siliceux.

méthodes d'analyse différentes. Il faut rappeler que l'échantillonnage porte sur une région entière et non sur un seul site.

Les moyennes et les rapports sont acceptables. Cependant le fer est très variable. Il faut donc proposer plusieurs variantes du calcul (fig. 118).

Quels que soient les chiffres retenus, la production de fer est possible. Les SGD fournissent la plus petite quantité de fer et le plus faible rendement. Si l'ensemble des scories produites au cours d'une opération de réduction sont des SGD, la rentabilité de l'opération est très faible. Compte tenu du fait que les SGD sont toujours mélangées aux SVN, même sur les sites à fourneau unique, cette hypothèse ne doit pas être retenue.

Les différences entre les calculs basés sur la moyenne générale et sur les seules SVN sont relativement faibles. L'ordre de grandeur est conservé (rendement: 50-70% et production: 300-500 kg fer / 1 tonne scorie). Pour affiner ce chiffre, il faudrait connaître les quantités de SVN et de SGD effectivement produites au cours d'une même opération. On constate que le rendement est élevé, ce qui est indispensable compte tenu de la faible teneur des minerais. La production est également assez forte. Les artisans du pied du Jura sont donc arrivés à tirer parti au mieux d'un minerai apparemment médiocre.

### Influence de la nature de la paroi sur le calcul

Les chiffres de la fig. 118 sont issus d'un calcul qui se base sur un apport de la paroi uniquement sous forme de Si. Toutes les parois connues dans la région ont un chimisme plus complexe. En particulier, elles contiennent une certaine proportion d'Al, mais les analyses chimiques sont trop peu nombreuses et non représentatives pour utiliser cette donnée dans le calcul (parois contaminées).

Dans un premier temps, on ne peut aborder cet aspect que d'un point de vue théorique, en utilisant des données chimiques moyennes (fig. 119). En utilisant un rapport Si:Al très élevé de 1:1 (kaolinite pure), il est impossible de résoudre le système. Avec une formation argileuse normale (3,3:1), l'apport en Al de la paroi n'est pas négligeable. Le rendement ainsi que la production diminuent assez nettement. Avec une composition granitique (4,5:1), ce phénomène s'atténue.

Pour des raisons de calcul, on constate que plus l'apport est siliceux, plus la production est élevée. En effet, pour chaque Al apporté par la paroi, c'est autant de minerai que l'on n'utilise pas et donc de fer qui n'est pas apporté au système.

Les analyses ne portent que sur des échantillons de paroi fortement modifiée. La contamination par la charge est toujours forte comme en témoignent les teneurs en fer. Dans ces corps, le rapport Si:Al est extrêmement variable (min. 2,17:1; max. 5,68:1). Ces analyses indiquent toujours une tendance fortement siliceuse.

Ces analyses et les observations de terrain, permettent de considérer l'hypothèse d'une paroi argileuse (3,3:1) comme raisonnable. Le résultat final, basé sur cette hypothèse, est

même sans doute légèrement sous-évalué. En tenant compte de l'apport d'une paroi argileuse, on calcule un rendement de 50% environ, ce qui est indispensable pour traiter un minerai pauvre comme celui du Mormont. La production reste élevée (350 kg fer pour 1 t scories). Cette estimation est légèrement supérieure à celle proposée précédemment (Pelet 1973, 183-4). L'ordre de grandeur est le même. Ce chiffre est celui qu'il faut retenir.

Cet exemple met clairement en évidence que la nature de l'apport de la paroi doit être défini avec grande précision pour pouvoir mener à bien un calcul de production. L'influence de ce paramètre n'est pas négligeable, loin de là. A l'échelle d'une région, ce qui oblige à une certaine généralisation, cette démarche est donc relativement mal adaptée. Elle ne peut fournir que des ordres de grandeur.

Dans le cas précis, on constate que les faibles teneurs en fer du minerai ne sont pas un obstacle à une production de métal au cours de la réduction. Les scories qui en résultent, en particulier les SVN, sont très riches en silice et en alumine. Elles sont largement sous-saturées en oxydes de fer.

Dans le système  $Al_2O_3-SiO_2-FeO_{tot}$  (fig. 117), les analyses se projettent aux environs du domaine de la cordiérite ferrique. Dans ce secteur, les températures théoriques de fusion sont les plus basses possibles (< 1100°C). Dans la vallée thermique entre les domaines de la mullite et de la tridymite, par contre, les températures s'élèvent rapidement et certaines analyses se projettent au-delà de la courbe des 1400°C.

Les liquides siliceux sont de toutes façons moins fluides que ceux plus riches en fer en raison de la polymérisation des tétraèdres de silice (VDE 1981, 2-7). Il est donc probable que pour obtenir la séparation entre le métal et ce liquide silicaté, il a été nécessaire de travailler à de hautes températures, supérieures à 1300°C. L'aspect visqueux caractéristique des SVN serait le reflet de ce phénomène. La présence de métal fondu sur plusieurs sites de la région est également un argument en faveur de ces hautes températures (pp. 115-117).

Le groupe étant formé de scories provenant de nombreux sites différents, il est difficile de déceler une organisation stricte. On remarque que certaines analyses se projettent relativement loin des courbes cotectiques du diagramme  $SiO_2-Al_2O_3-FeO_{tot}$ . L'aire couverte par les projections est assez large, mais elle recoupe les courbes de manière nette. La composition chimique des scories est donc une caractéristique liée à la nature de la charge et pas seulement aux températures atteintes (pp. 14-17).

scorie	RENDEMENT			PRODUCTION		
	moy.	SVN	SGD	moy.	SVN	SGD
paroi argileuse Si:Al = 3.3:1	0.54	0.60	0.17	0.31	0.35	0.07
paroi granitique Si:Al = 4.5:1	0.57	0.64	0.24	0.35	0.42	0.11
paroi sans Al	0.60	0.68	0.30	0.41	0.49	0.16

Fig. 119. Influence de la nature de l'apport sur le calcul de production pour les minerais et scories de la région du Mormont. Apport silico-alumineux.

### Les éléments mineurs et traces

L'apport de la cendre de charbon doit également être pris en compte. Le principal constituant en est le Ca. Peu abondant dans les minerais archéologiques (moy.: 1,58%), il est nettement enrichi dans les scories. C'est le seul élément mineur à présenter un histogramme des teneurs extrêmement étalé. La distribution paraît aléatoire.

Les échantillons de paroi modifiée sont les plus pauvres en Ca. Ils indiquent que ce n'est pas la paroi qui apporte cet élément.

Les échantillons provenant des sites de Prins-Bois 2 (5.2) et de Voualève 1 (15) présentent toutefois des teneurs en Ca qui sont systématiquement élevées (> 4%). C'est également le cas pour MgO, MnO et Sr, plus abondants dans ces échantillons que dans les autres.

Ils constituent un sous-groupe analytique mais les deux sites se trouvent dans des secteurs géographiques différents, éloignés de plusieurs kilomètres l'un de l'autre. Il est donc peu probable que la raison de cette parenté soit l'exploitation d'une même poche de minerai ayant une composition chimique spéciale. La découverte de blocs de calcaire ferrugineux enrobés de bolus sidérolithique à Prins-Bois 2 pourrait fournir une explication. Des morceaux de calcaire, présents naturellement dans le remplissage sidérolithique, n'auraient pas été scrupuleusement rejetés. Cette explication ne permet pas de comprendre l'enrichissement parallèle des scories en MgO, MnO et Sr, éléments peu abondants dans les calcaires analysés (Annexe 4.1). Ces variations paraissent minimes. Elles peuvent être accidentelles et ne prouvent pas l'utilisation consciente d'un fondant calcaire comme c'est le cas à Montcherand (pp. 146-147).

Le Mn présente également une distribution particulière. La plupart des échantillons de scories contiennent moins de 0,5% de MnO, mais des teneurs nettement plus élevées sont observées. Outre les sites de Voualève et Prins-Bois 2 où cet excès est systématique, 8 sites sont concernés (MnO > 1%). TIG 1 (Le Tignon, 30) et DON 1 (Donchires, 34) ont des teneurs énormes (MnO > 16%).

Dans le Sidérolithique, le Mn est très irrégulièrement concentré. Il s'accumule localement en placages d'oxydes noirâtres. La teneur n'est pas du tout homogène à l'échelle du gisement. Dans les poches du Mormont, de tels niveaux à Mn peuvent être observés. Parmi les blocs de minerai analysés provenant du site des Bellaires, il y a en un exemple (BEL 173, Annexe 4.6 = Pelet 1993, p. 91, N° 5). Les teneurs observées dans les scories d'autres sites montrent que cet élément n'a pas dissuadé les artisans d'utiliser une telle matière première (p. 147).

Le V est abondant mais variable dans les échantillons du Mormont (scories 600-2300 ppm; minerais 100-3000 ppm). Les autres éléments chimiques sont relativement pauvres.

Les teneurs en mineurs et traces des minerais sont nettement différentes de celles des scories. On constate un enrichissement ou un appauvrissement suivant les cas (fig. 120).

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

Fig. 120. Comportement des éléments traces et mineurs dans les scories de la région du Mormont.

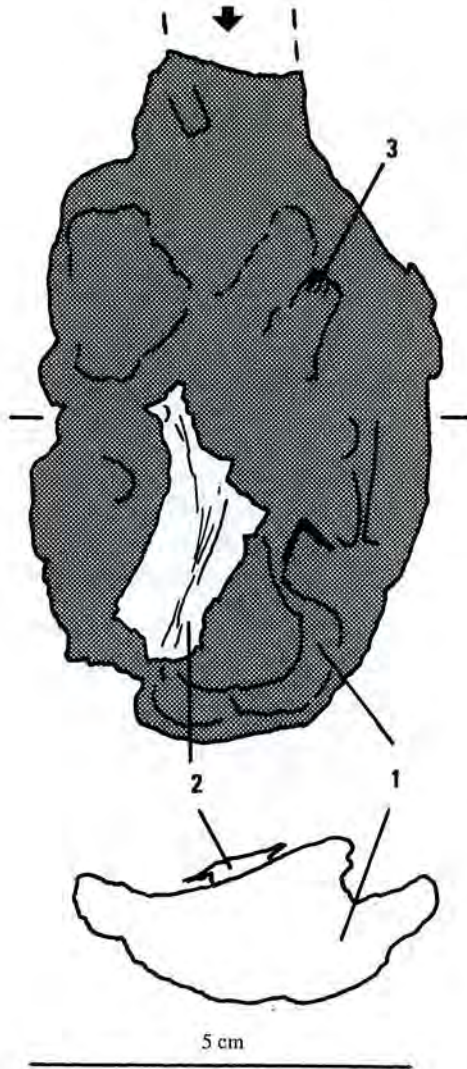
### Le métal associé aux scories de réduction

Les fouilles de P.-L. Pelet ont permis de récolter quelques fragments de métal sur les sites de réduction. Ils sont très rares. Ils se répartissent en deux catégories morphologiques distinctes: des coulures et des morceaux informes (fig. 121). Une véritable étude métallographique reste à faire.

Les coulures sont des pièces très intéressantes (fig. 122-124). Leur forme montre que le point de fusion a été atteint et

site	forme	poids	% C	% P	référence
Bellaires 1	coulure		0.42	0.29	Pelet 1973
			2.26	0.47	Pelet 1973
			2.98	0.61	Pelet 1973
	coulure	440	1.71	0.52	Pelet 1973
		390			Fig. 123
		225			
		30			
		115			
Bellaires 2	coulure	50	3.42	1.30	Pelet 1973
		180			
		200			
		100			
		180			
Bellaires 3	coulure	340			Fig. 122
		90			
		70			
Prins-Bois 1	coulure		2.57	1.48	Pelet 1960a
Prins-Bois 2	coulure	420			Fig. 124

Fig. 121. Les déchets métalliques associés aux scories de la région du Mormont.



- 1 Fonte: les surfaces sont peu oxydées. Elles gardent les empreintes de charbons. La surface supérieure est bosselée.
- 2 Pellicule de scorie (SVN). Les contours sont fracturés. Elle adhère au métal par place. La surface supérieure est d'aspect froissé.
- 3 Empreinte de charbon de bois.

La coulure n'est pas tout à fait complète. Poids conservé 340 gr.

que le métal a été liquide. Le pourcentage de carbone est élevé (Pelet 1960a, 103-10; 1993, pp. 97-98). Il s'agit de morceaux de fonte. De la scorie coulée (SVN) est toujours collée sur les coulures. Ces matériaux sont produits au cours de la réduction. Ils sont présents sur 4 des 5 sites fouillés et ont été trouvés dans les zones de rejet. La raison pour laquelle ces coulures de fonte ont été rejetées par les artisans ne peut être démontrée. Il est probable que ce métal ne pouvant pas être traité de la même manière que le gros de la production, il a été considéré comme un déchet inutilisable.

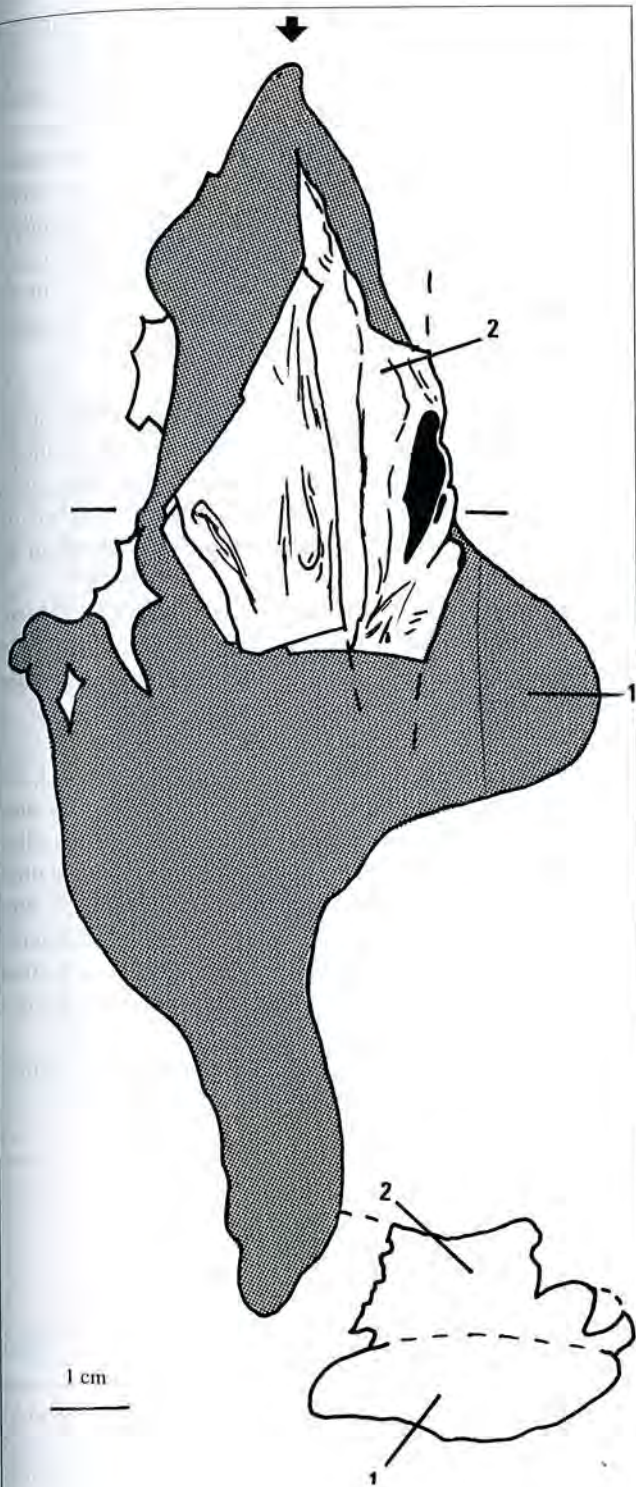
Les fourneaux produisaient également du métal moins riche en C (1 analyse à 0,42% C). Des pièces non coulées proviennent des 3 sites des Bellaires. Ce sont des agglomérats informes. La texture est hétérogène, souvent vacuolaire, et le métal est associé à une grande quantité de scories.

Le métal est fréquent dans les scories sous forme de petites inclusions. Il se présente en nodules globulaires (1-5 cm), en filaments et en petites billes (0,01-1 cm).

Les déchets métalliques confortent l'idée que les artisans de la région ont travaillé à de hautes températures. Ces fourneaux ont produit de la fonte liquide, au moins accidentellement. Ces découvertes ne permettent cependant pas de formuler une hypothèse sur l'aspect physique du produit de la réduction. Aucune pièce moulée n'est présente ce qui semble indiquer que le but de l'opération n'était pas de tirer parti de cette propriété de la fonte. Les pièces plus pauvres en carbone sont peu denses. Le métal n'est pas compact et il est mélangé à de la scorie et des restes de charbon. La texture est spongieuse. Mais, encore une fois, il s'agit de rebuts et non de produits au sens propre.

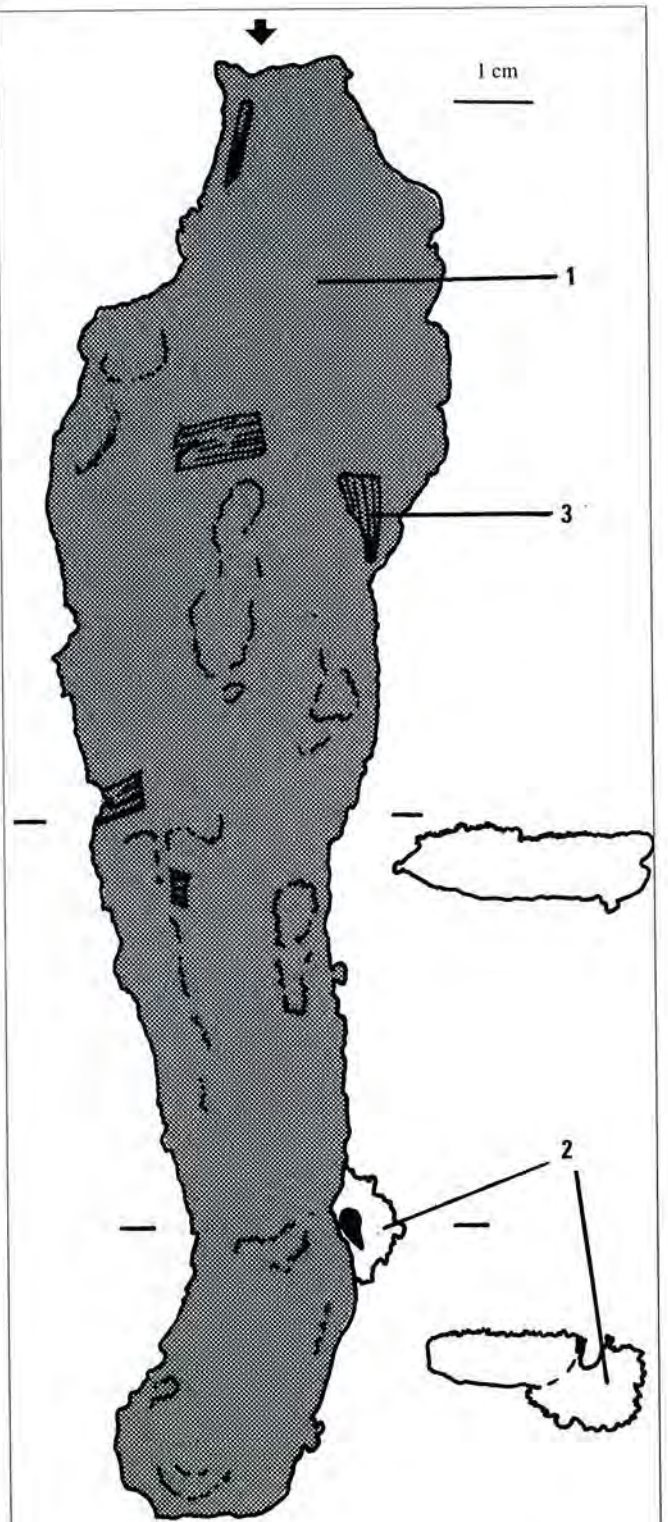
A ce stade de la recherche, une véritable étude métallographique de ces pièces serait le seul moyen de faire avancer les connaissances.

Fig. 122. Coulure de fonte. Bellaires 3 (25.3).



- 1 Fonte: les surfaces sont faiblement oxydées, régulières, plates.  
 2 Scorie coulée SVN: elle s'est refroidie sur la fonte et y adhère. La surface supérieure est d'aspect froissé, noire. La cassure est d'aspect vitreux, très vacuolaire.  
 La coulure semble complète. Poids total: 440 gr.

Fig. 123. Coulure de fonte. Bellaires 1 (25.1).



- 1 Fonte: les surfaces sont peu oxydées. La surface supérieure est grumeleuse.  
 2 Scorie (SVN): aspect vitreux, noir, vacuolaire.  
 3 Charbon consolidé par les oxydes de fer

La pièce est complète. Poids total: 340 gr.

Fig. 124. Coulure de fonte. Prins-Bois 2 (5.2).

## Les vestiges post-réduction

Les sites fouillés par P.-L. Pelet ne livrent que très peu d'informations sur les phases de travail qui suivent la réduction. Seules les activités liées à l'extraction, à la concentration et à la réduction du minerai sont clairement attestées.

A Bellaires 1, les 2 foyers, 15 et 16, associés aux fourneaux 11 et 12 ont une autre fonction que la réduction (fig. 103). Il s'agit probablement d'un travail d'élaboration du métal (raffinage?). Faute de déchets spécifiques associés clairement à ces structures, il n'est pas possible de le définir plus précisément. On ne peut exclure que des scories en forme de calotte, aient été présentes dans les déblais (Pelet, com. pers.). En tout état de cause, elles ne pouvaient qu'être peu nombreuses.

Le fourneau 5, très mal conservé, est ambigu. La très grosse scorie, trouvée dans les déblais au-dessous du four et qui s'adapte parfaitement sur le fond de l'appareil est une exception. Elle n'est pas typique du travail post-réduction. Les arguments font donc défaut.

Seuls 6 sites ont livré du matériel métallurgique attribuable aux travaux post-réduction. Il est toujours peu abondant (fig. 125).

Le site de Trésis-des-Alleveys (33) est le plus caractéristique. Dans une petite clairière, des fragments de tuiles et des céramiques romaines témoignent d'un habitat. Quelques scories informes sont mêlées aux débris. Elles se distinguent clairement des scories de réduction des ateliers voisins. Une calotte de taille moyenne fait partie du lot. Cet établissement se trouve au plein centre de la zone sidérurgique.

Non loin de là, dans le cimetière de Ferreyres (29), une calotte a été trouvée par Ch. Affolter, hors de tout contexte. A la sortie E du village de Ferreyres (34), une calotte aty-

pique a été récoltée avec des SVN par P.-L. Pelet sur le site de Donchires. Elle se distingue nettement du point de vue chimique, en particulier par sa teneur en fer (DON 3, Annexe 4.8).

Deux autres, beaucoup plus caractéristiques, proviennent du lieu dit En Melley, à quelques centaines de mètres au N. Les 3 autres lieux de trouvaille se trouvent en périphérie de la zone sidérurgique, l'un au N (10) et les deux autres à l'E (45 et 46). Une scorie en calotte typique et très riche en fer provient de l'un d'entre eux (Vignes-d'Orny, fig. 126). Les autres déchets sont moins caractéristiques.

Ces ensembles sont intéressants parce que provenant de la zone géographique de production primaire du fer. Malheureusement, ils ne se prêtent pas à une étude minéralogique et chimique approfondie en raison du très petit nombre de pièces significatives. De plus aucune fouille ne porte sur ce type de site.

Si de rares traces de travail post-réduction existent bien, elles ne peuvent témoigner du traitement sur place de l'ensemble de métal brut produit. Dans un rayon de quelques km, plusieurs sites ont livré un matériel important.

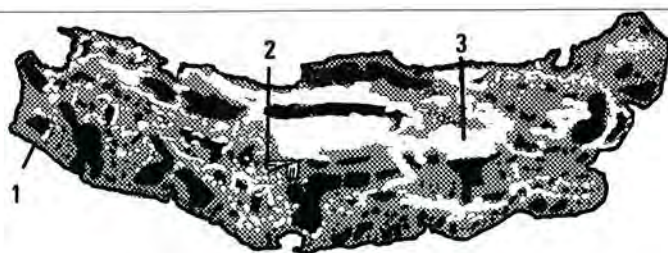
Mis à part le cas de Bellaires 1 où un doute subsiste, les travaux post-réduction n'ont laissé de traces que sur des sites où la réduction n'est pas attestée. Encore ces traces sont-elles très discrètes. En aucun cas, on ne trouve d'accumulation importante de scories caractéristiques. Sur 2 sites, peut-être 3, ces vestiges sont liés à des traces d'habitat d'époque romaine. Ce n'est jamais le cas pour les ateliers de réduction bien attestés. Au site 46, Sur-le-Mont, ils sont associés à des vestiges de métallurgie du bronze.

Il ne semble donc pas y avoir, dans un voisinage immédiat, d'atelier spécialisé dans le traitement post-réduction.

N°	site	Catégorie de déchets métallurgiques								Remarque
		réduction	informe	paroi	calotte					
					N°	L cm	l cm	h cm	poids gr	
10	Rauvin		1 frgt	2 frgts	RAU 1 2 frgts	6	5	2.0	80	1 tesson romain (I.d. Cosson)
29	Cimetière de Ferreyres				FCI 1	11	11	3.5	575	
33	Trésis-des-Alleveys		8 frgts	15 frgts	ALV 1 1 frgt plat 3 frgts	8	6	3.0	250	tuiles et tessons romains et monnaie de Commode 1-3e ap. J.-C.
34	Donchires En Melley	XXX			DON 3 MEL 1 MEL 2	8 11 7	8 9 7?	5.0 3.0 2.5	700 410 180	
45	Vignes-d'Orny		XXX	1 frgt	ORN 1 1 frgt plat	10	10	2.5	340 80	
46	Sur-le-Mont		XX							tuiles et tessons romain et déchets de bronze

Fig. 125. Répartition des vestiges liés au travail post-réduction dans la région du Mormont.

Scorie en forme de calotte. Complète.  
 Poids conservé 340 gr.  
 Surface supérieure concave avec une bosse au centre. Oxydation superficielle (surface rouillée, brun jaunâtre). Fortement magnétique.  
 Surface inférieure régulière, faible relief. Oxydation superficielle (brun rougeâtre). Fortement magnétique.



Commentaire de la coupe:

La porosité est assez étroite. Les bulles sont disposées parallèlement aux surfaces avec souvent une alimentation depuis le bas. La structure radiaire est plus développée sur une autre coupe.

- 1 Scorie grise très sombre. Faible porosité étroite.
- 2 Petits fragments de charbon.
- 3 Fer à l'état métallique, très abondant. Dans la partie médiane, il forme des zones compactes sans porosité. En périphérie, le fer est disséminé en filaments et en gouttelettes dans la scorie grise, en particulier autour des pores.

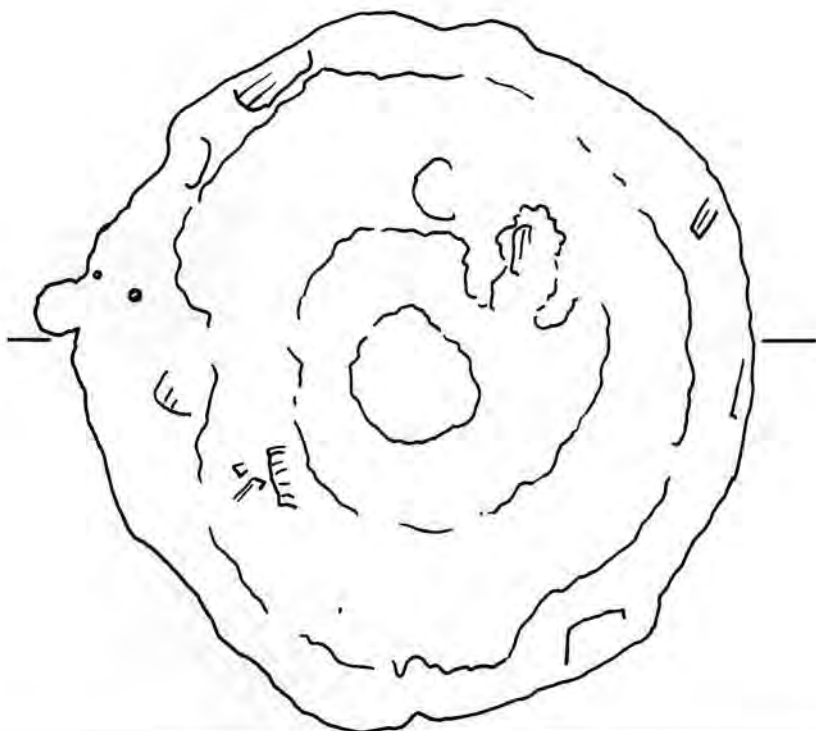


Fig. 126. Scorie en forme de calotte. Ech. ORN 1, Vignes-d'Orny (45).

## Les mâchefers modernes

En différents points de la zone sidérurgique du Mormont, des produits scorifiés présentant de nombreuses analogies avec les mâchefers de forge moderne, ont été identifiés (Abetel 1992, 62 et fig. 28). Ces produits sont assez divers mais se laissent distinguer des scories de réduction anciennes.

Certaines pièces sont d'aspect très hétérogène. Typiquement, la densité apparente des fragments est assez faible. Les pièces sont fragiles et peu épaisses. Les formes sont tout à fait quelconques: ce sont des assemblages de lobes globuleux et contournés (fig. 127). Il est impossible de les orienter ou de définir une polarité. Aucune structure de flux n'est visible mais le matériel a subi une fusion au moins partielle. Des empreintes laissées par le combustible sont souvent identifiables sur toutes les faces de la pièce. Les surfaces sont tantôt noires et brillantes, tantôt grises ou couleur lie de vin et mates. Elles sont toujours piquetées d'inclusions et d'élé-

ments étrangers pris dans la masse. En particulier, on observe des résidus cendreux blanchâtres. En coupe, la structure est très désordonnée. La porosité est abondante et de taille très variable. On reconnaît une matrice silicatée gris sombre, sans doute fayalitique. Elle est généralement hétérogène, montrant des nuances de teinte et de texture.

Les inclusions sont très nombreuses et très variées. Les charbons sont fréquents, parfois minéralisés par des oxydes de fer (rouille). Dans certains cas, il s'agit clairement de charbon de bois mais de nombreux exemples font penser à des morceaux de houille brûlée ou même de coke. Ils sont accompagnés de nombreux petits cailloux et de grains de sable siliceux plus ou moins fondus. Le fer métallique est présent en filaments ou en petits nodules.

D'autres pièces sont beaucoup plus homogènes. Elles sont plus lourdes et fréquemment magnétiques. Leur forme n'est pas mieux définie. En coupe, on observe une matrice gris sombre fayalitique assez homogène, mais les inclusions restent fréquentes (grains silicatés, charbon de bois, houille, fer métallique).

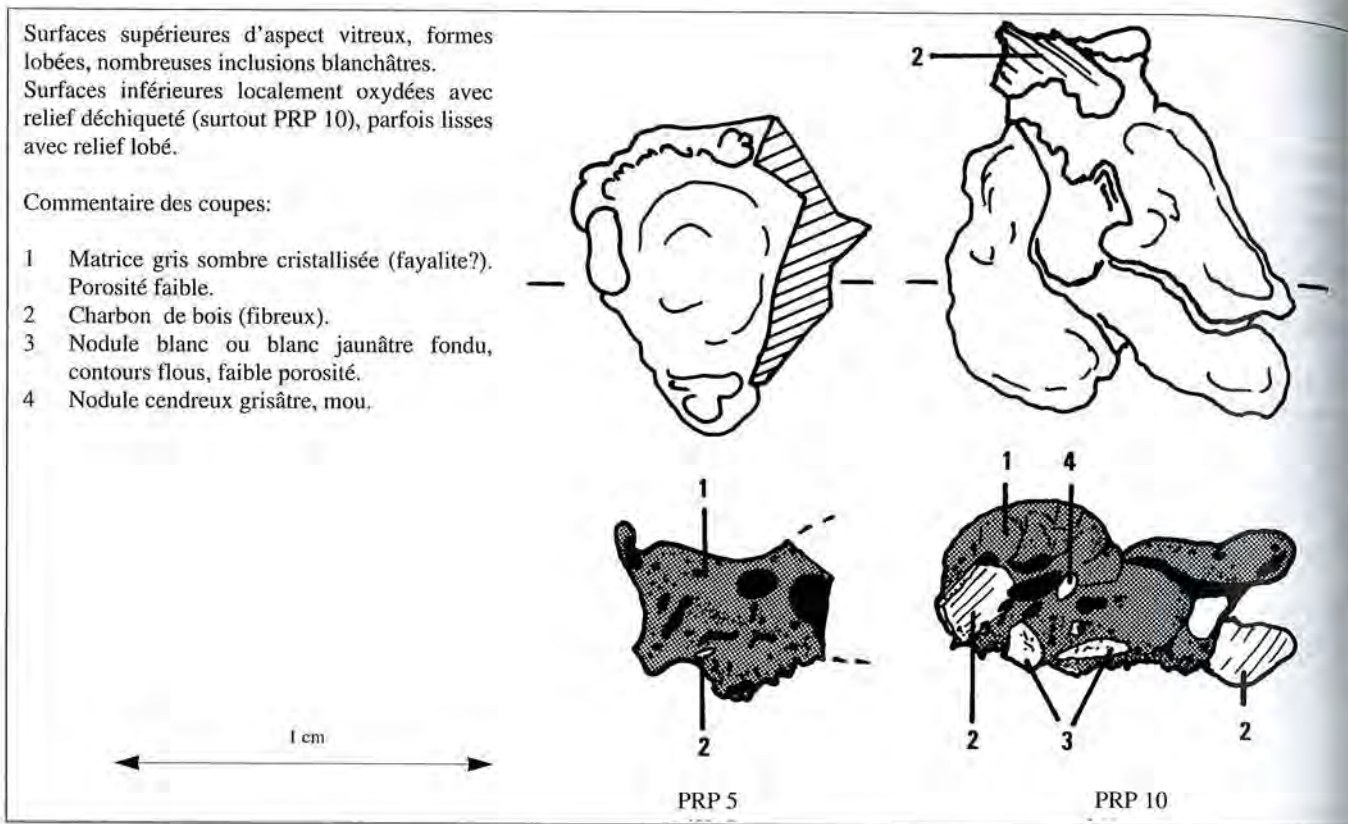


Fig. 127. Mâchefer informe. Pré-Penard 2, Cuarnens, site 2.

PRP 5: mâchefer homogène. PRP 10: mâchefer hétérogène.

On trouve ces produits sur les sites de Pré-Penard 2 (1), des Trois-Noyers (42) et de Mormonnet (40). Tous trois sont à la périphérie de la zone sidérurgique (fig. 91 et 92). Mormonnet, en particulier occupe une position anormale, au pied du Mormont. Ces débris ont sans doute été apportés là pour affermir le sol ou combler l'ornière d'un chemin. A Rogenex (26), du mâchefer est mélangé à des SVN peu caractéristiques. Ce site est assez mal attesté. Il résulte probablement aussi d'un apport moderne.

Sur le territoire de la commune de Cossonay, un peu au S de la zone étudiée, 5 pièces de scories ont été récoltées en 1986 dans des conditions imprécises. La localisation de la trouvaille est incertaine. Trois d'entre elles présentent une forme de calotte très irrégulière. Mis à part cette forme générale spécifique, leur aspect extérieur et leur structure interne sont comparables à ceux des mâchefers informes (fig. 128). Dans plusieurs cas, des morceaux de houille sont clairement identifiables, dans d'autres on a affaire à du charbon de bois.

Les échantillons de Pré-Penard 2 et de Cossonay (PRP 1-5 et COS 1-5, Annexe 4.3) ont des compositions chimiques extrêmement déroutantes. Ils ne forment pas de groupe cohérent. Les variations, sur un site et entre les deux sites, sont énormes. Ceci est à mettre en relation avec l'hétérogénéité du matériel analysé. Toutefois, on les distingue sans peine des autres produits scorifiés de la région. Le spectre des éléments mineurs et traces n'a rien de commun (par exemple le Cu pour PRP, le Sr pour COS et V pour les deux sites).

Les très hautes teneurs en fer ainsi que les rapports Si:Al très élevés des échantillons de PRP interdisent d'y voir des produits de la réduction du Sidérolithique. A l'inverse, dans les analyses de Cossonay le fer est trop bas.

Cette étude sommaire montre que ces produits peuvent être différenciés des scories anciennes. La présence de morceaux de charbon de terre est un autre argument de poids. S'il est probable que ces résidus aient quelque chose à voir avec la métallurgie du fer, il est certain que ce sont les résidus d'une technologie moderne.

Les mâchefers informes présentent des analogies certaines avec les résidus qui se forment au fond du foyer de forge moderne. Pour les mâchefers en forme de calotte, ce n'est pas le cas. Les faibles teneurs en fer pourraient même indiquer des produits d'origine autre que métallurgique. Ces matériaux ne peuvent guère être datés plus précisément. Ils proviennent peut-être de l'activité des forges des villages voisins.

Ce genre de «pollution» n'est pas toujours facile à détecter. En particulier, les compositions chimiques seules ne fournissent pas une information suffisante. Il faut également pouvoir étudier morphologiquement les pièces et les comparer à une large collection de référence. Dans nos premières publications, essentiellement fondées sur l'étude des spectres d'éléments traces, les produits scorifiés de Pré-Penard et Cossonay ont été interprétés comme formant un groupe analytique distinct, ce qui est exact. Par contre, ils étaient mis sur le même pied que les scories de réduction anciennes des sites voisins, ce qui était une erreur (Abetel et Serneels 1987 et 1988).

Surface supérieure grossièrement concave. Nombreux morceaux de houille brûlée. Localement, forte oxydation. Les reliefs sont globuleux. Surface inférieure irrégulière, nombreuses empreintes et morceaux de houille.

Commentaire de la coupe:

- 1 Pâte gris clair très hétérogène. De nombreux domaines aux contours flous se distinguent par des nuances de teintes. Nombreuses inclusions non fondues.
- 2 Morceau de houille.
- 3 Petite bille de métal.



Fig. 128. Mâchefer en forme de calotte. Ech. COS 1, Cossonay (VD).

## L'ancienne industrie du fer dans la région du Mormont

### Datation des sites métallurgiques

Les fouilles archéologiques fournissent des données chronologiques relativement abondantes mais très inégalement réparties.

A ce jour, aucun vestige ne peut être rattaché à la période de Hallstatt. Par contre, à la fin de l'âge du Fer, l'exploitation sidérurgique a déjà débuté. Le fourneau le plus ancien de

Bellaires 1 date de cette époque. Sur ce site, les débuts semblent modestes; ailleurs, aucune information n'est disponible. L'exploitation préromaine existe, mais son ampleur est inconnue.

A l'époque romaine, plusieurs ateliers fonctionnent (Bellaires 1, 2 et 3, Prins-Bois 1 et probablement Rosset 1). On ne perçoit pas de changement à l'intérieur de cette large tranche de temps. Il est impossible de quantifier la production à cette période. Plusieurs forges romaines existent mais leurs activités semblent limitées aux besoins locaux.

Avec le Haut Moyen Age, l'industrie s'intensifie. La majorité des fourneaux sont datés de cette période. Ils sont

plus volumineux et produisent des quantités de déchets supérieures à leurs prédécesseurs. Cette période marque un véritable saut quantitatif.

Aucune découverte ne se rapporte à la période du Moyen Age proprement dit. Les mâchefers qui résultent du travail du fer à la forge sont récents, probablement post-médiévaux, mais les arguments chronologiques sérieux manquent pour les dater.

Les données chronologiques mettent bien en valeur l'intensification de la production pendant le Haut Moyen Age, par contre, elles ne permettent pas de comprendre l'évolution de la répartition des sites aux diverses périodes. L'étude des scories n'est pas d'une grande aide dans cette région. Il n'a pas été possible de distinguer les scories des différentes époques par des critères morphologiques ou chimiques (mis à part les mâchefers modernes). Les variations que l'on observe sont techniques (minerai calcique / non calcique; réduction / post-réduction).

### La production

Dans la région du Mormont, les ateliers de réduction sont de taille variable. Les déchets d'exploitation forment des accumulations de quelques m<sup>3</sup> à quelques centaines de m<sup>3</sup>. Mais, en général, ces quantités sont difficiles à estimer car les amas de scories sont le plus souvent très étalés. Les véritables buttes dont le volume peut être mesuré sont rares. Les fouilles de P.-L. Pelet peuvent, dans une certaine mesure, servir d'étalon (Pelet 1993, 89, 97-99 et 122). Les prospections récentes apportent un complément d'information. Les données sont résumées dans la fig. 129 et les estimations pour chaque site apparaissent à la fig. 92.

Le site de Bellaires 1 est un des gros ateliers de la région. L'estimation proposée est de 600 m<sup>3</sup> de déchets divers, soit 300 m<sup>3</sup> de scories. La zone sidérurgique compte 14 ateliers de cette ampleur. Les sites moyens correspondent à un volume d'environ 100 m<sup>3</sup> de déchets, (50 m<sup>3</sup> de scories). P.-L. Pelet distingue 6 sites de cette importance. Les petites entreprises, 15 au total, correspondent en moyenne à 40 m<sup>3</sup> de déchets, soit 20 m<sup>3</sup> de scories (par exemple Prins-Bois 2). Elles sont probablement le résultat de l'activité d'un seul fourneau. Les autres sites, matérialisés par des scories isolées, n'entrent pas dans ce calcul.

L'ordre de grandeur de la production totale est de 5000 m<sup>3</sup> environ de scories pour l'ensemble de la région. La moitié de ce volume, au moins, est attribuable à la production du Haut Moyen Age.

1 m<sup>3</sup> de scories (SVN) pèse environ 1 t (Pelet 1993, p. 97: 1 m<sup>3</sup> scories = 980 kg, expérience confirmée récemment). Donc, d'après les calculs basés sur les compositions chimiques des scories et des minerais (fig. 119), la production totale de fer est de 1500-2000 t.

L'approvisionnement en minerai a sans doute été un facteur limitant la production de la zone sidérurgique. Aujourd'hui, le minerai qui a été utilisé anciennement est introuvable. Les pisolithes du Sidérolithique de la colline du Mormont ne semblent pas pouvoir faire l'affaire. Seuls les bolus très ferrugineux du pied du Jura à l'O de La Sarraz, ont

ateliers	nombre	volume unitaire m <sup>3</sup>	volume total m <sup>3</sup>
grands	14	300	4200
moyens	6	50	300
petits	15	20	300
total	35		4800

Fig. 129. Estimation des volumes de scories de la région du Mormont.

été utilisés. Cent ans de recherche géologique dans ce secteur se résument à une vague mention (Schardt 1880, 631) et à la découverte de la poche fossilifère des Alleveys (Gaudin et De la Harpe 1856, 403). De plus, le remplissage de cette dernière est pauvre en fer (Annexe 4.1, éch. ALV 101).

Le volume de minerai utilisé n'est par ailleurs pas énorme, en tout cas au regard de critères modernes. C'est entre 6500 à 8000 t (3000 à 4000 m<sup>3</sup>) de matériel, probablement tout-venant, qui a été fondu.

Le minerai n'était pas lavé puisque c'est le bolus lui-même qui était utilisé. Au plus, était-il trié et concassé. Les besoins en eau de l'industrie ancienne sont donc très limités. Ils sont facilement couverts par les petits ruisseaux qui irriguent la zone.

L'étude des charbons de bois provenant des ateliers de réduction fouillés porte sur la fin de la période romaine et le Haut Moyen Age (Pelet 1993, 99-103). Les bois utilisés sont en majorité jeunes ce qui semble indiquer une exploitation intense de la forêt. Les essences dominantes sont le hêtre et le chêne alors que les résineux sont absents. Cette répartition peut trahir un choix volontaire en fonction de critères techniques (préférence pour les charbons forts).

D'autres exemples montrent que les résineux peuvent fort bien être utilisés avec succès (Boécourt JU: Eschenlohr et Serneels 1992, 19-25; Lajoux JU: Schweingruber 1976). Il est plus probable que les résineux n'aient pas été présents dans la forêt charbonnée. Les artisans n'ont donc pas été chercher leur combustible à une altitude où le sapin devient une des essences dominantes (plus de 1000 m).

Compte tenu de la faible productivité des sols rocailleux de la région, la superficie touchée par l'exploitation paraît importante. Le cœur de la zone sidérurgique, le triangle Moiry - Les Bellaires - La Sarraz, correspond à une superficie d'environ 500 ha. Au N, se trouve l'obstacle difficilement franchissable des gorges du Nozon. Au S, la plaine de la Venoge était probablement déjà défrichée à l'époque romaine.

Volume des scories	5000 m <sup>3</sup>
Poids des scories	5000 t
Poids du charbon (x 4)	20000 t
Poids du bois (x 5)	100000 t
Volume du bois (x 0.7)	70000 m <sup>3</sup>
Superficie de la forêt coupée (150 m <sup>3</sup> /ha)	500 ha = 5 km <sup>2</sup>

Fig. 130. Estimation de la consommation de bois pour la réduction dans la région du Mormont.

Par contre, à l'O, les pentes du Jura devaient porter une forêt abondante malgré la présence de quelques habitats anciens aux alentours de la cote 800. L'absence des résineux parmi les charbons suggère une limite d'altitude inférieure à 1000 m. Dans ce cas de figure, les pentes de la montagne représentent une superficie de quelque 25 km<sup>2</sup> supplémentaires. Leur exploitation implique toutefois un transport du combustible de l'ordre de quelques km.

Il est peu probable que les artisans se soient trouvés à court de combustible si l'on tient compte des ressources régionales. Par contre, le déboisement des abords immédiats d'un atelier a pu être la cause de son abandon temporaire, les artisans ne revenant au même endroit qu'après régénération de la forêt (20-50 ans).

Enfin, l'exploitation du Haut Moyen Age, massive et répartie sur 3 siècles seulement, a pu marquer profondément le paysage comme le suggèrent les particularités de la forêt actuelle (Pelet 1993, 99-103). Elle est peut-être la cause de l'abandon général de la zone au Moyen Age bien que l'épuise-

ment des gisements de minerai et la concurrence des nouvelles mines de la région de Vallorbe aient pu jouer un rôle. Enfin, dès le XII<sup>e</sup> siècle, l'utilisation de l'énergie hydraulique pour actionner les soufflets a également incité les sidérurgistes à déplacer leurs ateliers vers les rivières.

### Relations spatiales entre les différents sites

L'implantation des ateliers de réduction semble être essentiellement dictée par la présence d'un minerai exploitable. Les amas de scories de réduction sont absents aux environs du gisement de Sidérolithique du lit du Talent (fig. 131). Celui-ci, volumineux et facile à détecter, n'a pas pu passer inaperçu. Par contre, il n'est pas assez riche pour être exploité. Sur la colline du Mormont, l'exploitation moderne de la pierre a révélé l'existence de nombreuses poches de Sidérolithique. Ces gîtes n'étaient pas forcément accessibles dans le passé et, de plus, ce matériel semble peu favorable en général. Un seul atelier de réduction clairement identifié, s'est installé dans les parages (Tilérie, site 43).

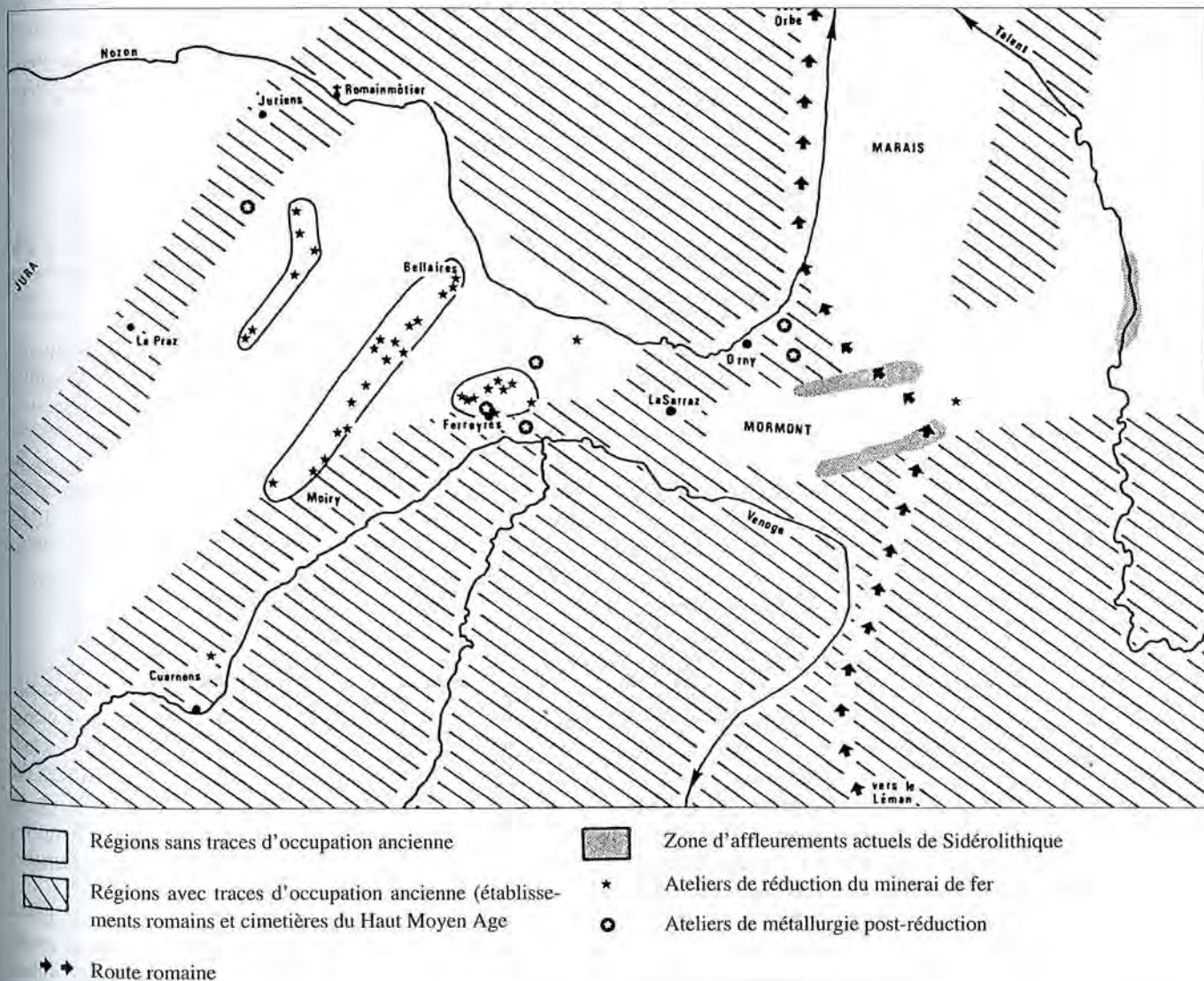


Fig. 131. Schéma de l'organisation de la zone sidérurgique du Mormont. Echelle 1:100000.

Plus à l'O de La Sarraz, le Sidérolithique a existé mais il n'a pas pu être observé en place. L'analyse des blocs récoltés lors des fouilles montre clairement qu'il fut utilisé. Chimiquement, il est assez différent des autres dépôts de la région, en particulier avec une teneur en fer globale plus élevée malgré la faible quantité de pisolithes contenus. C'est dans ce secteur du pied du Jura que se trouvent la plupart des ateliers de réduction. Ces sites ne sont pas répartis de manière aléatoire. Ils sont regroupés en trois zones d'importance inégale. Ils entretiennent des relations différentes avec les gîtes comme avec les habitats anciens.

Le groupe le plus important, formé de 20 amas de scories, est réparti sur une bande de 300 m de large, entre le village de Moiry et les gorges du Nozon (Les Bellaires). Cette disposition régulière n'est pas le fruit du hasard. Sur le terrain, on observe un petit escarpement calcaire qui rompt la pente par place, il s'agit d'une faille de faible rejet vertical. Cet accident tectonique était sans doute localement rempli de minerai. A la Bossena (site 21), il a permis d'atteindre des boyaux karstiques comblés par des matériaux argileux sidérolithiques.

Un autre groupe de 6 ateliers se trouve plus au NO. Le minerai utilisé est sensiblement de même nature que pour le groupe précédent. Sans pouvoir l'exclure, on ne peut certifier qu'ils ont exploité des poches distinctes. En particulier, les scories riches en CaO et MnO de Prins-Bois 2 (site 5, groupe NO) sont très proches de celles de Voualève 1 (site 15, groupe central). N'a-t-on pas pu transporter le minerai vers une zone plus riche en combustible? La distance, qui n'est que de 1 à 2 km, n'est pas excessive.

Enfin, 9 ateliers sont groupés au N du village de Ferreyres (groupe SE). Dans ce secteur, P.-L. Pelet relève la présence de pisolithes sidérolithiques dans les champs cultivés. C'est probablement l'indice de la présence de poches de minerai. Toutefois, les analyses de ces pisolithes (Annexe 4.1, éch. FER 151 et 171) montrent de faibles proportions d'alumine alors que les scories de ce secteur ne se distinguent en aucune manière de celles des autres emplacements. Si ces pisolithes ont été utilisés, c'est mélangés avec leur gangue argileuse et non pas seuls. Dans ce cas également, on ne peut exclure un transport de matière première sur une faible distance. La recherche du combustible expliquerait ce déplacement des ateliers. Toutefois, on remarque également, dans les deux cas, un rapprochement en direction des zones habitées.

Le groupe NO se trouve pratiquement entre les villages de La Praz et de Juriens où l'on signale des établissements gallo-romains ainsi qu'un cimetière du Haut Moyen Age (Viollier 1927).

A Ferreyres également, il y a des traces archéologiques d'occupation ancienne (Viollier 1927, Pichard et Andrès-Colombo 1987). C'est aussi dans cette zone que les témoignages de travail post-réduction sont les plus nombreux (cimetière de Ferreyres 29, Trésis-des-Alleveys 33, Donchires et En Melley 34).

Dans les environs de Cuarnens, les données sont trop imprécises pour proposer une interprétation des quelques sites qui se trouvent sur la rive gauche de la Venoge (scories

isolées, aucune analyse). Dans ce secteur, les terrains quaternaires recouvrent le substrat calcaire. Il est peu probable que du minerai puisse affleurer. Sur l'autre rive, par contre, on n'a clairement affaire qu'à des déchets modernes. Il n'y a pas de relation évidente entre les sites métallurgiques et les habitats ruraux anciens (Felka et Loï Zedda 1982).

Dans le secteur d'Orny, il n'y a aucun amas de scories de réduction caractéristique. On trouve surtout des témoignages du travail post-réduction en connexion avec les habitats romains.

Le cœur de la zone sidérurgique est donc situé le long de la faille minéralisée (alignement Moiry-Les Bellaires). Deux groupes d'ateliers de réduction, moins importants, sont proches de zones habitées (Ferreyres et clairière de Juriens). Quelques ateliers sont excentrés, probablement en relation avec de petites poches de minerai (Tilérie et Saint-Loup).

Les habitats situés à proximité de la zone de métallurgie primaire livrent des traces de travail post-réduction (Ferreyres, clairière de Juriens, Orny). Celles-ci restent rares et dispersées. Elles indiquent qu'une petite partie de la production a pu être traitée sur place. La plus grande part a donc été exportée sous forme brute vers les habitats ruraux, les villages ou les villes des régions voisines.

Les informations chronologiques montrent que l'ensemble de la zone était en activité à l'époque romaine. Pendant le Haut Moyen Age, l'exploitation est plus intense mais reste régie par la même organisation spatiale.

## La façade lémanique entre Nyon et Lausanne

Entre la première chaîne du Jura et les bords du lac Léman, la région comprise entre Nyon (VD) et Lausanne (VD) n'a fourni que peu de vestiges. Au pied du Jura, aux alentours des 1000 m d'altitude, affleurent les calcaires du Malm et quelques lambeaux de Crétacé inférieur. Plus bas, la molasse tertiaire est couverte par le placage glaciaire (cartes géologiques: 1241 Marchairuz, Falconnier 1949; 1242 Morges, Vernet 1973; 1243 Lausanne, Weidmann 1988; 1222 Cossonay, Custer 1935).

### Les indices miniers

Entre le col de la Faucille et le Mormont, le Sidérolithique n'est pas clairement identifié. Les calcaires urgoniens affleurent cependant en plusieurs points et ces roches sont susceptibles de contenir des remplissages karstiques du Sidérolithique (Arzier, Longirod et Saint-George). A la Roche de la Baume, près de Saint-George, dans des remplissages de fissures, on note la présence de concrétions ferrugineuses (Falconnier 1931, 17).

Les calcaires roux du Valanginien supérieur pointent également de manière discontinue sous la couverture morainique. Le faciès enrichi en fer de la Limonite du Valanginien n'est pas connu dans ce secteur (p. 41). Quelques concrétions ferrugineuses peuvent être présentes (Lagotala 1920, 13-14).

Si aucun minerai potentiel n'est identifié, on ne peut affirmer qu'il n'y en a pas (fig. 132 et 133). Une concession minière du XVI<sup>e</sup> siècle, obtenue par un sidérurgiste de Clarens-sur-Vich, laisse entendre que des mines de fer furent exploitées dans l'arrière-pays de Nyon (Pelet 1978, 83-86). D'autres documents du XIX<sup>e</sup> siècle attestent l'existence d'un gisement à l'O de Saint-Cergue (Pelet 1970b, 103-104). La description du minerai reste très floue. Il est probable que l'on ait affaire à une poche de Sidérolithique puisqu'il est fait allusion à des grès ferrugineux et à des pisolithes.

### Les traces de métallurgie extractive (réduction)

Les toponymes révélateurs, Ferrière ou Faverge, évoquent des activités sidérurgiques (réduction ou post-réduction). On en relève une dizaine dans la région (Pelet 1978, 16). Quelques-uns désignent des usines médiévales, connues par ailleurs. Les autres sont délicats à interpréter.

A ce jour, aucun vestige convaincant lié à la réduction, en particulier aucun amas de scories, n'est connu dans la région. Pour toute la période précédant le XV<sup>e</sup> siècle, il n'y a

donc aucun argument matériel en faveur de l'existence d'une industrie extractive.

Le haut fourneau de Genolier (Pelet 1978, 171-184) et l'atelier réduction médiéval de Clarens-sur-Vich (Pelet 1978, 83-86), dans l'arrière-pays de Nyon, sont probablement en relation avec le gisement des environs de Saint-Cergue. Aucune source ne permet cependant de l'affirmer.

Dans ce secteur, une exploitation plus ancienne est également envisageable. Elle devrait être recherchée aux environs immédiats du gîte. Selon des actes du XVII<sup>e</sup> siècle, il pourrait y avoir des amas de scories sur la commune d'Arzier, aux lieux dits Pré-du-Four et Petite Ennaz (Pelet 1960a, 101).

A Berolle, lieu dit En Mion et à Longirod, lieu dit Les Faverges, les évidences sont insuffisantes (Pelet 1993, 115 et 122).

L'entreprise de Romainmôtier, mentionnée dans des archives du XVI<sup>e</sup> siècle, fut probablement équipée d'un fourneau de réduction primitif travaillant selon la méthode directe (Pelet 1978, 155-6). L'origine et la nature du minerai traité par cet atelier ne peuvent être précisées (Sidérolithique du pied du Jura, Limonite du Valanginien des Clées ou de la vallée de Joux, autre?).

N°	Nom d'usage	X	Y	Référence	remarque
----	-------------	---	---	-----------	----------

#### INDICES MINIERS

<b>Saint-Cergue</b>					
M1	Couvaloup	496 750	144 500	Pelet 1970b, pp. 103-4	Sidérolithique ?
	La Trélasse	497 500	145 250	Pelet 1970b, pp. 103-4	Sidérolithique ?
	La Combe Grasse	499 500	145 875	Pelet 1970b, pp. 103-4	Sidérolithique ?
<b>Saint-George</b>					
M2	Roche de la Baume	510 000	152 400	Falconnier 1931, p. 17	Sidérolithique ?

#### VESTIGES DE METALLURGIE

<b>Arzier</b>					
1	Pré du Four	498 250	147 750	Pelet 1960a, p. 101	scories ?
2	Petite Ennaz	502 250	149 000	Pelet 1960a, p. 101	scories ?
<b>Genolier</b>					
3	La Caisserie	506 500	144 000	Pelet 1978, pp. 171-184	haut fourneau, XVI <sup>e</sup> s.
<b>Vich</b>					
4	Clarens	508 700	141 250	Pelet 1978, pp. 83-86	atelier de réduction, XV <sup>e</sup> s.
<b>Nyon</b>					
5	Place du Château			Pelichet 1974, pp. 22-23	scories
	Bel-Air			Morel et Amstad 1990	scories de fer et de bronze
	La Morache			Christe 1983, p. 290	scories de fer et de bronze
<b>Longirod</b>					
6	Faverges	510 500	150 500	Pelet 1993, pp. 119-120	scories ?
<b>Etoy</b>					
7	La Romanèche	522 250	149 250	Pelet 1993, p. 122	mâchefer moderne
<b>Berolle</b>					
8	En Mion	515 900	156 200	Pelet 1993, p. 115	scories ?
<b>Montricher</b>					
9	Chatel / Arrufens	517 100	163 500	Pelet 1993, pp. 16, 62-64	scories
<b>Lausanne</b>					
10	Vidy - Mosaïque				scories et forge
	Vidy, Chavannes 26			Paunier et al. 1987, p. 36	scories et métallurgie Pb

Fig. 132. Liste des indices miniers et des mentions de scories de la région comprise entre Nyon, Lausanne et le Mormont (fig. 133).

### Les traces de métallurgie de transformation (post-réduction)

Les autres entreprises métallurgiques dont témoignent les documents historiques, à partir du XV<sup>e</sup> siècle, ne semblent être que des ateliers de travail post-réduction, des forges villageoises en général (Pelet 1978, carte).

Plusieurs sites archéologiques ont livré des scories, en

particulier les deux agglomérations romaines principales de la région, Nyon et Vidy. Les vestiges ne témoignent que de travaux post-réduction: forge et éventuellement raffinage du fer (fig. 132 et 133). Un dépouillement systématique de la documentation permettrait certainement d'allonger la liste des trouvailles qui ne se veut pas exhaustive.

Les traces de métallurgie apparaissent toujours dans des contextes d'habitat.

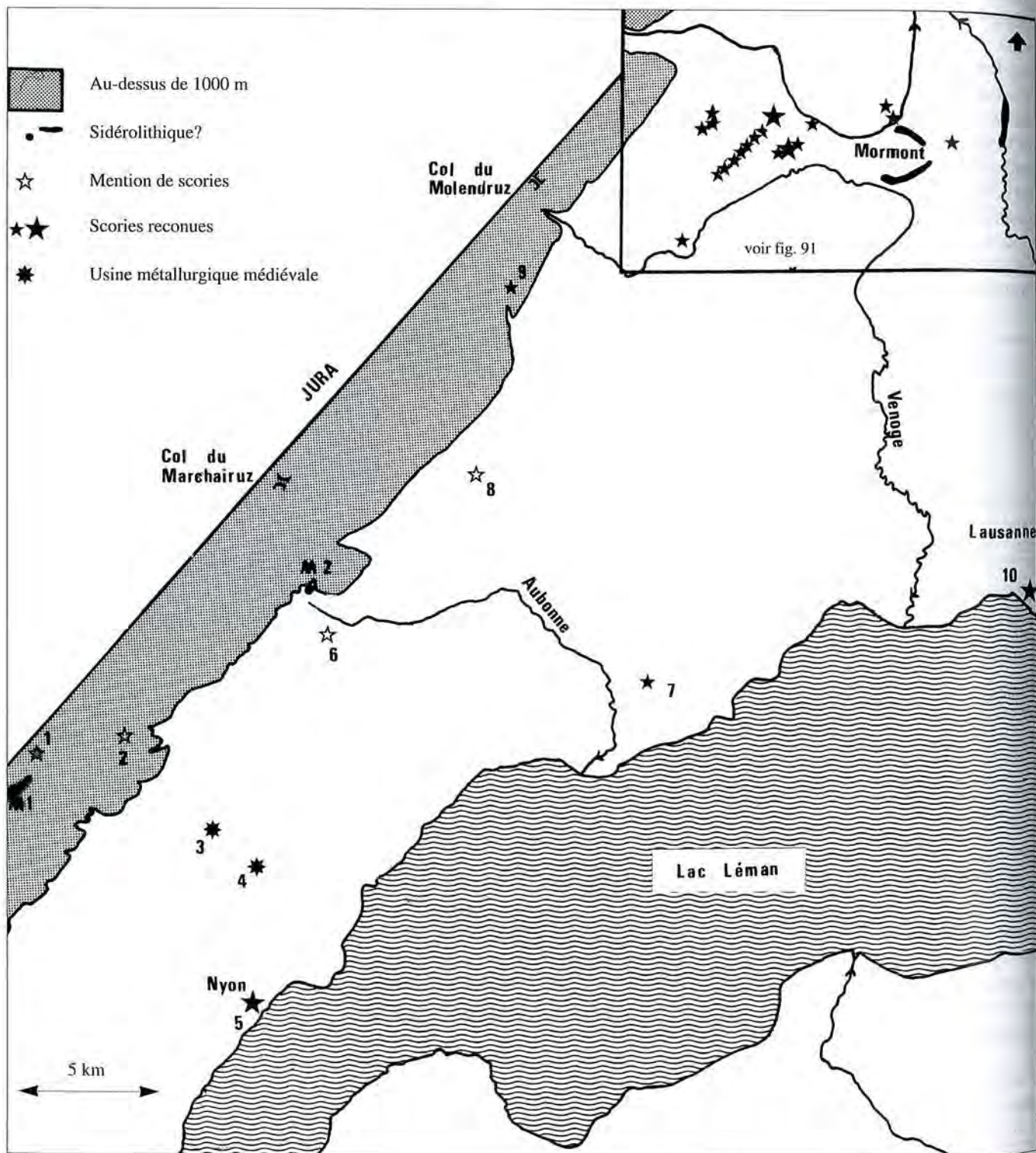


Fig. 133. Carte des indices miniers et des mentions de scories de la région comprise entre Nyon, Lausanne et le Mormont (fig. 133). 1:200000.

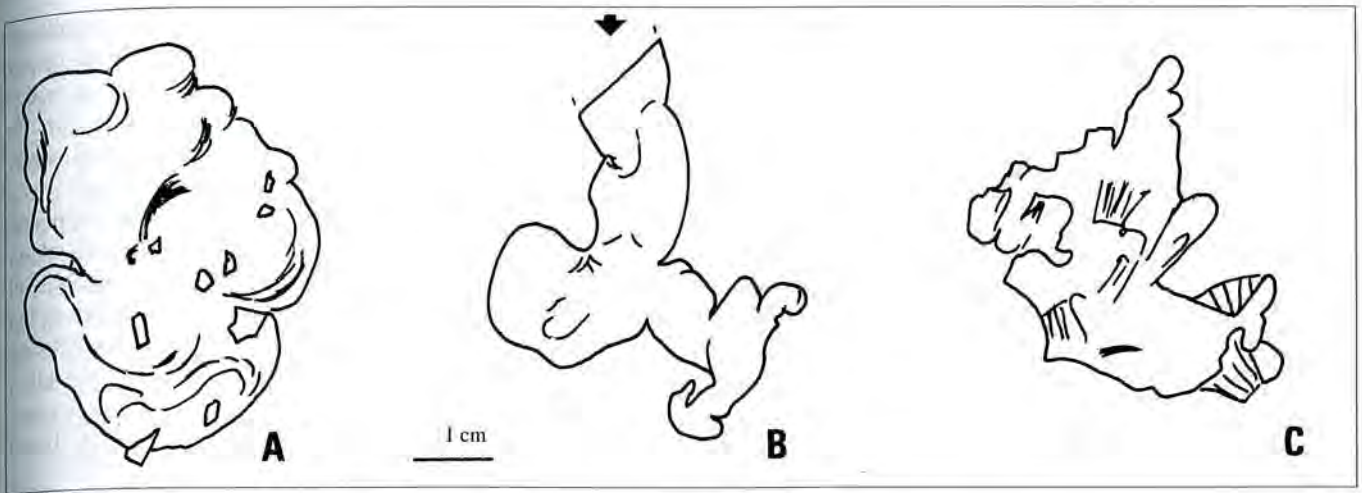


Fig. 134. Matériaux scorifiés divers provenant de la forge située sous la mosaïque de Vidy - Lausanne VD.  
 A: Scorie en goutte argilo-sableuse. SAS. B: Petite coulure SGD. C: Petite scorie non coulée. SGD.

*Nyon VD*

Fig. 132 et 133, N° 5.

Colonia Julia Equestris / Nyon fut fondée en 46/44 av. J.-C. La ville romaine, prend forme autour d'un centre monumental dès le milieu du I<sup>er</sup> siècle ap. J.-C. Malgré son rôle politique de colonie, elle ne connaîtra pas un développement aussi important que la ville d'Avenches. Les invasions alamanes semblent avoir touché la cité et les traces d'occupation postérieures ne sont que sporadiques. Les pierres des monuments seront récupérées, entre autres pour fortifier le castrum de Genève (SSPA 1989, Bridel 1982).

Des vestiges métallurgiques ont pu être reconnus en plusieurs points. Des scories proviennent du remplissage de l'égout collecteur principal (place du Château; Pelichet 1974, 22-3). Les fouilles de Bel-Air ont également livré des scories de fer associées à des débris de métallurgie du bronze et des foyers (Morel et Amstad 1990). A l'extérieur de la ville ancienne, au lieu dit La Morache, les fouilles ont mis au jour plusieurs bâtiments interprétés comme faisant partie d'une zone artisanale. Des scories de bronze et de fer y ont été retrouvées (Christe 1983, 290). Ces vestiges n'ont pas été réétudiés dans le cadre de ce travail, mais les mentions tirées de la bibliographie permettent de penser que l'on a affaire uniquement à une métallurgie de transformation.

*Etoy VD*

Fig. 132 et 133, N° 7.

Deux échantillons de matériaux scorifiés proviennent de la villa romaine de La Romanèche à Etoy (ramassage de surface). Ce sont des matériaux relativement pauvres en fer. L'aspect extérieur et les analyses chimiques permettent de les identifier probablement comme des mâchefers de forge moderne (Annexe 4.9, éch. ETO 1 et 2). L'activité métallurgique ancienne n'est donc pas clairement démontrée dans cette villa.

*Châtel sur Montricher VD*

Fig. 132 et 133, N° 9.

Au-dessus du village de Montricher, se trouve un promontoire offrant des facilités défensives naturelles (Pelet

1993, 16 et 62-64). L'extrémité du plateau a été occupée à l'âge du Bronze puis à la fin de l'Empire romain (IV<sup>e</sup>-V<sup>e</sup> siècles ap. J.-C).

A l'intérieur de l'enceinte, les couches archéologiques sont très détériorées. Des scories étaient éparpillées sur tout le site sans relation avec des structures particulières. Les quantités restent très faibles (estimation maximum 3 m<sup>3</sup>). Il s'agit bien de scories métallurgiques mais les pièces conservées ne sont guère caractéristiques. Il n'y a pas de calotte entière, peut-être des fragments. Quelques pièces présentent des structures de flux peu nettes. Il n'y a pas de données chimiques suffisantes. Vraisemblablement, il n'y eut, à cet endroit, qu'une simple forge. Divers outils en fer pourraient en témoigner. La réduction n'est pas clairement attestée mais ne peut pas être exclue.

La présence de minerai de fer n'est pas certaine aux alentours. Des calcaires roux du Valanginien sont signalés au bas de la Combe de la Verrière (alt. 980 m; Atlas géologique Suisse, 1222) et plus haut, sous le refuge antique (alt. 1200; Nolthenius 1920, carte). La Limonite n'est pas décrite comme telle, mais son existence n'est pas exclue quoique l'on se trouve à la limite de l'extension géographique de ce faciès (p. 41). Le Sidérolithique n'est pas connu dans le secteur mais des pisolithes auraient été ramassés sur le site (P.-L. Pelet, com. pers.). Des environs de Montricher, proviendraient également deux autres scories, probablement des calottes qui n'ont pas pu être réétudiées (Pelet 1993, 121).

*Vidy - Lausanne VD*

Fig. 132 et 133, N° 10.

Le vicus de Lousonna s'est installé au bord du lac Léman, dans un secteur probablement inoccupé précédemment mais certainement fréquenté comme l'attestent les nombreuses nécropoles protohistoriques de la région lausannoise (Kaenel 1977 et 1990, 314-324). Fondé à la fin du I<sup>er</sup> siècle av. J.-C., l'établissement connaît une période de prospérité de plus de deux siècles. C'est un vicus à vocation commerciale et artisanale, lieu de transbordement des marchandises qui transitent par le lac. Après les invasions de 259-260,

l'activité renaît, en particulier dans le quartier O (Paunier *et al.* 1987). Aux IV<sup>e</sup> et V<sup>e</sup> siècles, la population migre vers la colline de la Cathédrale à Lausanne, plus facile à défendre.

Au cours des fouilles liées à la construction de l'autoroute, des ateliers de potiers ainsi que des vestiges témoignant de l'activités de bronziers et de forgerons furent découverts (scories, outils). Le vicus semble donc aussi vivre du travail artisanal. Les chantiers de fouilles plus récents confirment ces observations.

### 1 Mosaïque (Vidy):

Sous la mosaïque mise au jour en 1960, se trouvait un atelier de forgeron dont témoignaient de nombreuses scories. Quelques échantillons provenant de ce secteur ont pu être examinés.

Plusieurs fragments sont des éléments argilo-sableux scorifiés sur une face et cuits sur l'autre. Le matériau est surtout argileux avec des gravillons arrondis et des empreintes de végétaux. Ce sont des fragments de paroi de foyer typique. Sur l'une des pièces, on reconnaît l'emplacement de l'amenée d'air du soufflet (trou à vent).

On trouve également des gouttes centimétriques plus ou moins agglomérées, constituées de matériaux argilo-sableux fondus (scories en goutte; fig. 134A). Quelques pièces sont nettement plus grosses mais de constitution comparable. On relève la présence d'une série de toutes petites coulures de scories de 5-6 cm de long et 1-2 cm de diamètre (fig. 134B). D'autres pièces se sont formées au sein de la masse de charbon de bois et en gardent les empreintes (fig. 134C). Il y a

Surface supérieure concave, gris brunâtre. Les reliefs sont assez onduleux. Les empreintes de charbon de bois sont bien marquées et fréquentes.

Surface inférieure convexe, brun rougeâtre. La rouille se développe en plusieurs points. Les reliefs sont déchiquetés. La scorie moule un lit de très petits charbons de bois.

L'orientation de la tuyère ne peut pas être fixée.

#### Commentaire de la coupe:

La partie inférieure de la pièce est riche en toutes petites bulles ± anguleuses. Quelques unes se développent selon une disposition radiaire aux surfaces. De très petites inclusions métalliques semblent liées à cette zone poreuse.

La partie supérieure est beaucoup plus dense.

- 1 Bulle radiaire.
- 2 Zone riches en grains silicatés partiellement fondus. Les contours de la zone sont diffus. Quelques grains restent bien individualisés et anguleux.
- 3 Nodule de métal fortement oxydé. Il est accolé à un gros morceau de charbon. Ils sont tous deux entourés par une fine bordure de matériaux brunâtres, probablement des produits d'oxydation du métal.
- 4 Petit morceau de charbon.
- 5 Zone cristallisée, grise sombre, localement légèrement jaunâtre. Les aiguilles de fayalite plurimillimétriques sont visibles, surtout dans la partie centrale de la pièce. La matrice grise contient en plusieurs points de petites zones gris sombre de forme globulaire de quelques mm de diamètre (zones riches en oxydes de fer?).

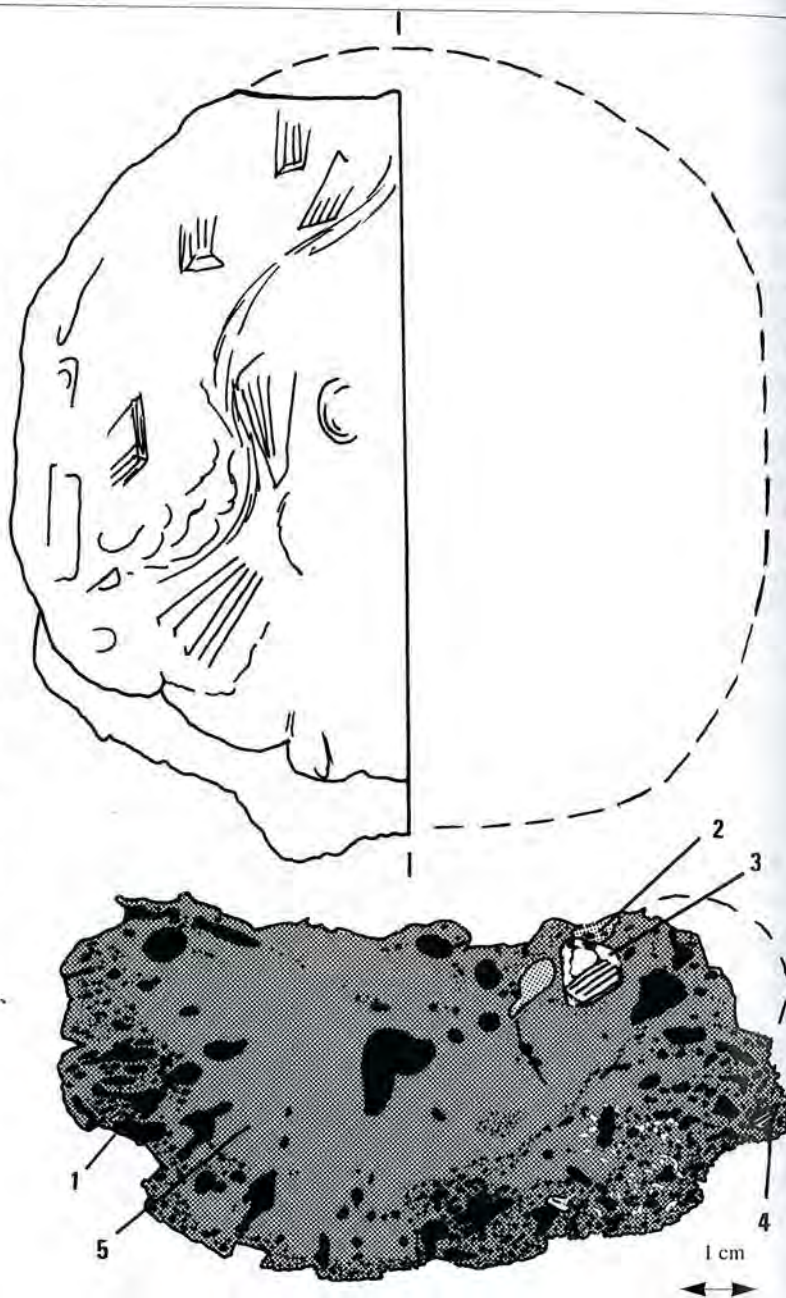


Fig. 135. Scorie en forme de calotte. Ech. VID 3 (Lousomma-Vidy, route de Chavannes 26).

aussi quelques débris métalliques informes et oxydés. Certains montrent des traces de scorie et de charbon qui indiquent que ce sont des chutes de travail métallurgique.

Les scories analysées sont de petites calottes ou fragments de calotte (diam. 5-10 cm). Elles sont hétérogènes et charbonneuses, plutôt pauvres en métal (Annexe 4.9, éch. VID 27 à 30 et 102). Du point de vue chimique, le groupe n'est pas cohérent.

Cet assemblage est typique d'un travail post-réduction. Le matériel ne livre guère d'indice pour préciser ce travail. Tout au plus, constate-t-on que les scories en forme de calotte sont plutôt petites et hétérogènes. Le matériel conservé n'est par ailleurs pas forcément représentatif de la trouvaille.

## 2 Chavannes 26 (Vidy)

Au cours de la fouille, en 1983-84, route de Chavannes 26, deux bâtiments d'habitation ont été mis en évidence. Un petit foyer, avec des traces de travail du plomb a été fouillé dans la cour du bâtiment ouest et des scories métallurgiques ont été trouvées (Paunier *et al.* 1987, 39).

Le matériel comporte des fragments de parois, des scories informes et quelques fragments de scories en forme de calotte (Annexe 4.9, éch. VID 1 à 12). L'une d'entre elles est complète (éch. VID 3, fig. 135). Elle présente une forme

typique presque hémisphérique. Elle est très massive et complètement cristallisée (cristaux de fayalite en chaîne et dendrites de wüstite).

Moins typiques et surtout moins abondantes que sous la mosaïque, les scories de Chavannes 26 semblent également témoigner d'une activité de forge au sens large. Elles n'ont cependant pas forcément été produites là où elles ont été retrouvées. Aucune structure archéologique n'atteste le travail de forge. Par ailleurs, le nombre de scories est très restreint.

L'un des échantillons, informe, présente des teneurs en Pb et Sn anormalement élevées (annexe 4.9, Ech. VID 10). Il pourrait être en relation avec le foyer de retraitement du plomb qui a été découvert. Les compositions chimiques des scories de Vidy présentent des variations considérables (fig. 136). Les échantillons de Chavannes et ceux de la mosaïque ne se distinguent pas du point de vue chimique. Leur nombre est trop restreint pour trouver une cohérence. Les analyses sont beaucoup plus proches des autres scories en forme de calotte étudiées (Annexes 6.1 à 7.2) que des scories de réduction (Annexes 3.1 à 5.8). Les éléments de paroi, reconnaissables macroscopiquement sont plutôt riches en  $\text{SiO}_2$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et pauvres en  $\text{FeO}_{\text{tot}}$ . Le rapport Si:Al varie de 4,6:1 à 6,4:1. Il est donc toujours plus élevé que dans les scories de réduction.

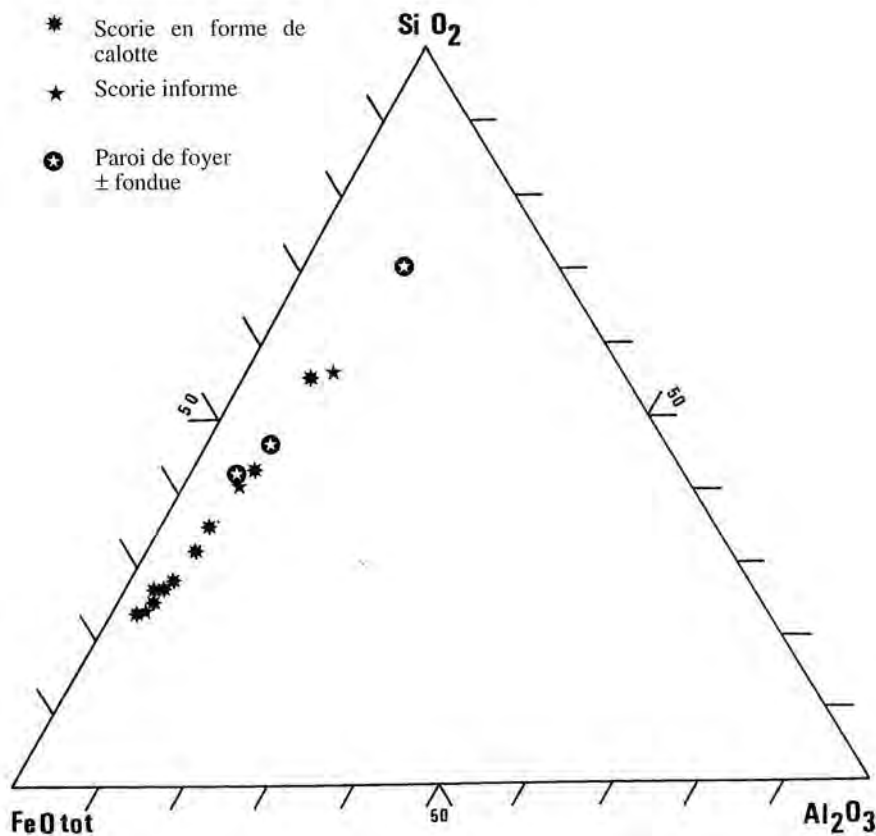


Fig. 136. Compositions chimiques des matériaux scorifiés de Vidy VD.

Les teneurs en CaO des scories sont parfois très élevées (influence du charbon de bois?). Les éléments traces varient beaucoup. Le V et le Cr, caractéristiques du Sidérolithique et abondants dans les scories de réduction du Mormont, sont très bas. Le Co et le Ni, qui passent dans le métal lors de la réduction sont eux élevés. L'échantillon VID 5, avec de fortes teneurs en Ni et Cr, semble sortir du lot. Il est aussi relativement riche en Cu mais pas assez pour être interprété comme une scorie résultant de cette autre métallurgie. Des anomalies de ce type sont aussi relevées dans les analyses d'Yverdon et d'Avenches (Annexes 6.1 et 6.2).

Par elles-mêmes, les données chimiques ne permettent pas de formuler des hypothèses plus précises (type de travail, origine de la matière première).

### 3 Autres trouvailles faites à Vidy

Une fosse contenant des résidus métallurgiques a été identifiée au S du forum (fosse 2, secteur 3; Kaenel *et al.* 1980, 94). Le matériel étudié n'est guère significatif. Il comporte des résidus de travail du bronze et du fer, probablement post-réduction.

D'autres trouvailles de scories dispersées sont mentionnées dans la partie O du vicus (Kaenel *et al.* 1980, 142).

Enfin, les travaux récents sur la propriété Sagrave, tou-

jours dans la zone O du vicus, ont également permis de découvrir des éléments scorifiés (May-Castella et Berti 1992, com. pers.). L'étude de ce matériel devrait se poursuivre.

### Les ateliers de réduction du Mormont et les forges de Vidy

Dans l'arrière-pays de Nyon, une industrie extractive médiévale est très probable. Elle a éventuellement pu être précédée par une exploitation antique. Ailleurs, la réduction du minerai n'est pas attestée. Les ressources naturelles ne semblent d'ailleurs pas présentes.

Le travail du métal est connu dans les établissements urbains romains. A Vidy, en particulier, l'activité des forges semble plus développée qu'ailleurs. Ce vicus commercial et artisanal a pu jouer un rôle dans la distribution des objets finis en fer. Il est tentant d'associer cette activité de transformation avec le district de production primaire des environs du Mormont. Il n'y a malheureusement pour cela aucun argument matériel, en particulier chimique. A l'époque romaine, Vidy est en relation avec les régions voisines. Les biens et les matériaux, même pesants, circulent facilement. Le métal en usage n'est pas forcément produit dans la région la plus proche.

## 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

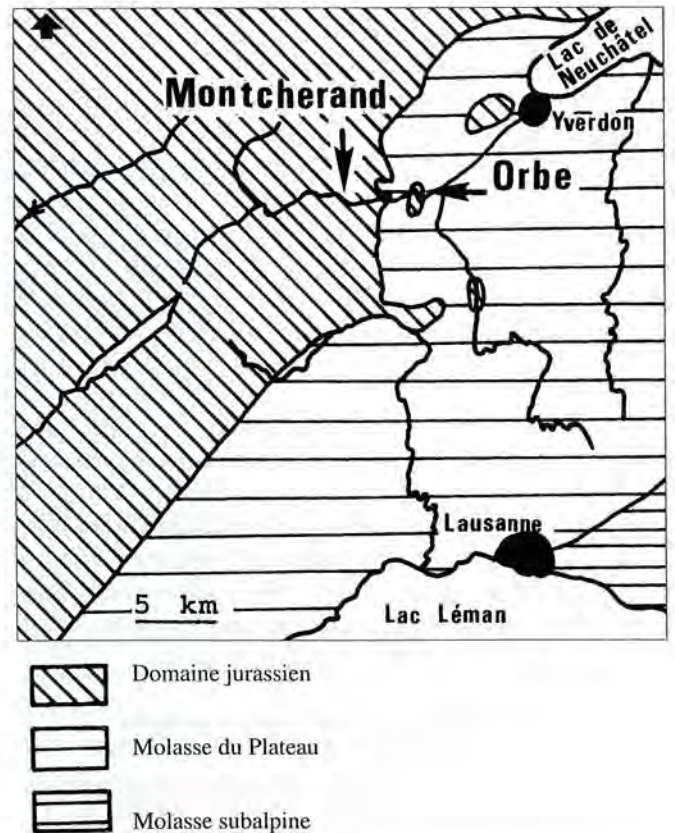


Fig. 137. Esquisse tectonique de la région d'Orbe-Montcherand.

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 omnispport	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

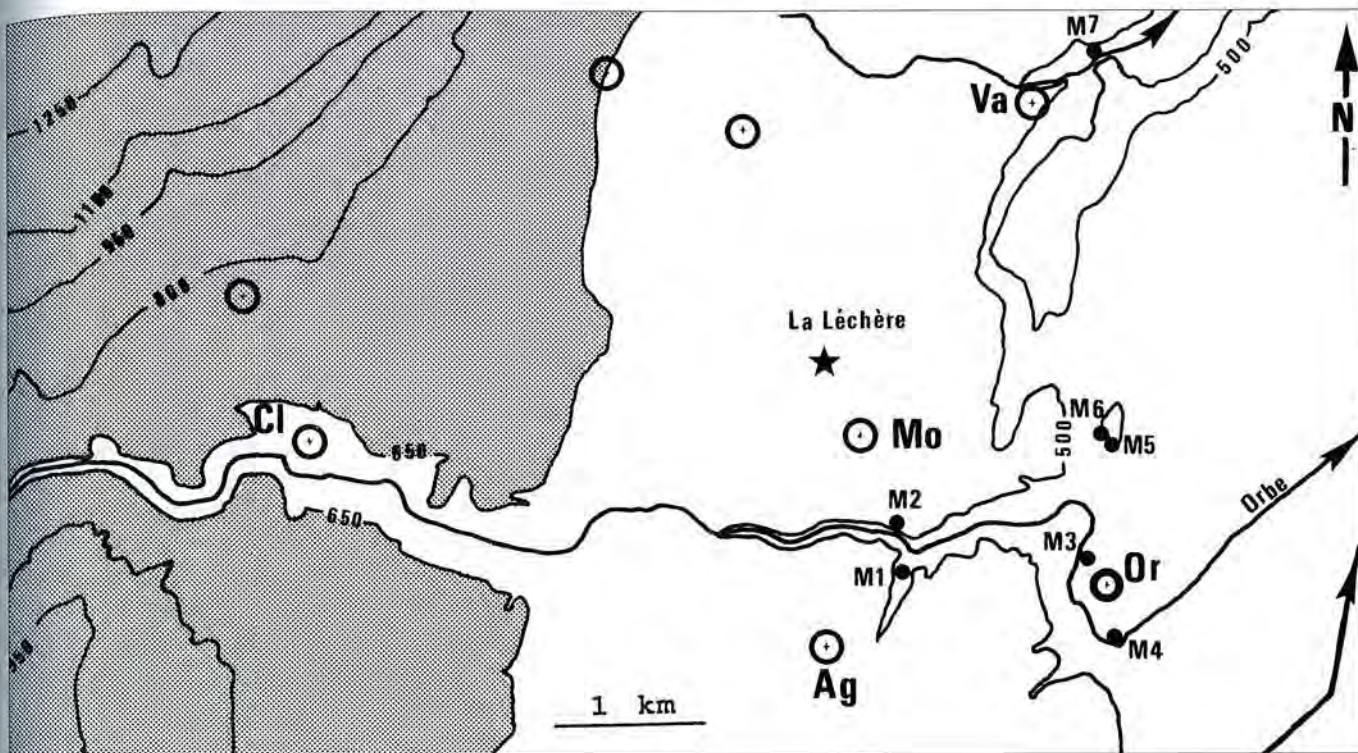


Fig. 139. Carte des sites miniers et métallurgiques de la région d'Orbe-Montcherand.

- Minerais      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 minerais. 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

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 minerais 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

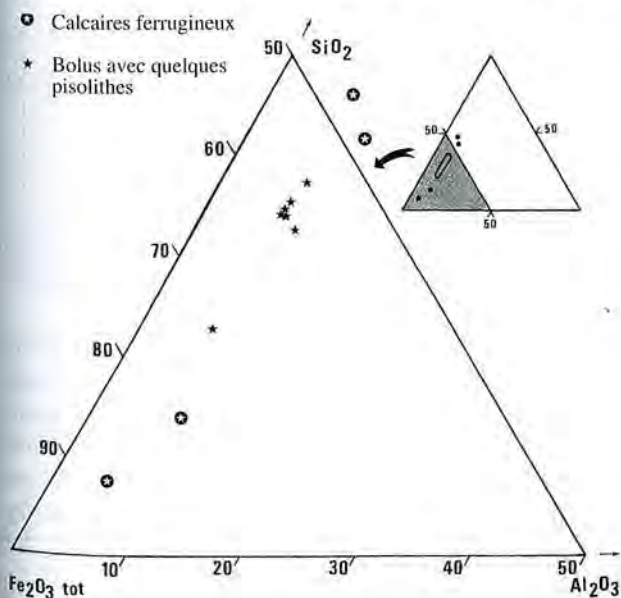


Fig. 140. Composition chimique des minerais «archéologiques» de Montcherand - La Léchère.

	SiO2	Al2O3	Fe2O3 tot	CaO
<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.

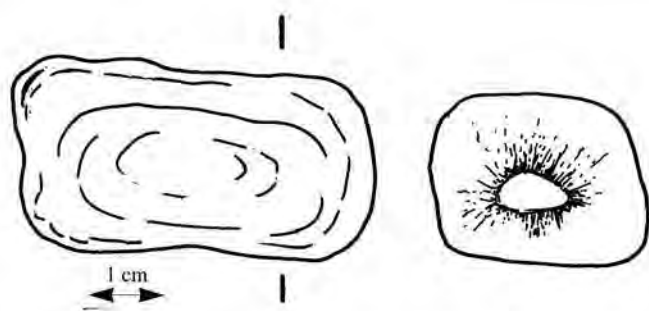


Fig. 142. Rognon d'hydroxydes de fer, marcassite oxydée? Ech. CLE 101 (Les Clées VD). La structure radiaire du sulfure primaire semble être conservée.

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).

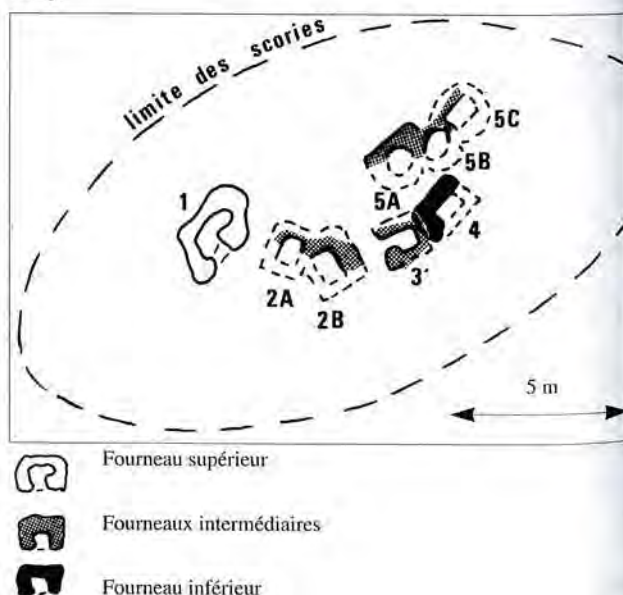


Fig. 143. Plan schématique du site de La Léchère, Montcherand VD, fouilles M. Klausener. D'après Abetel 1992. 1:200.

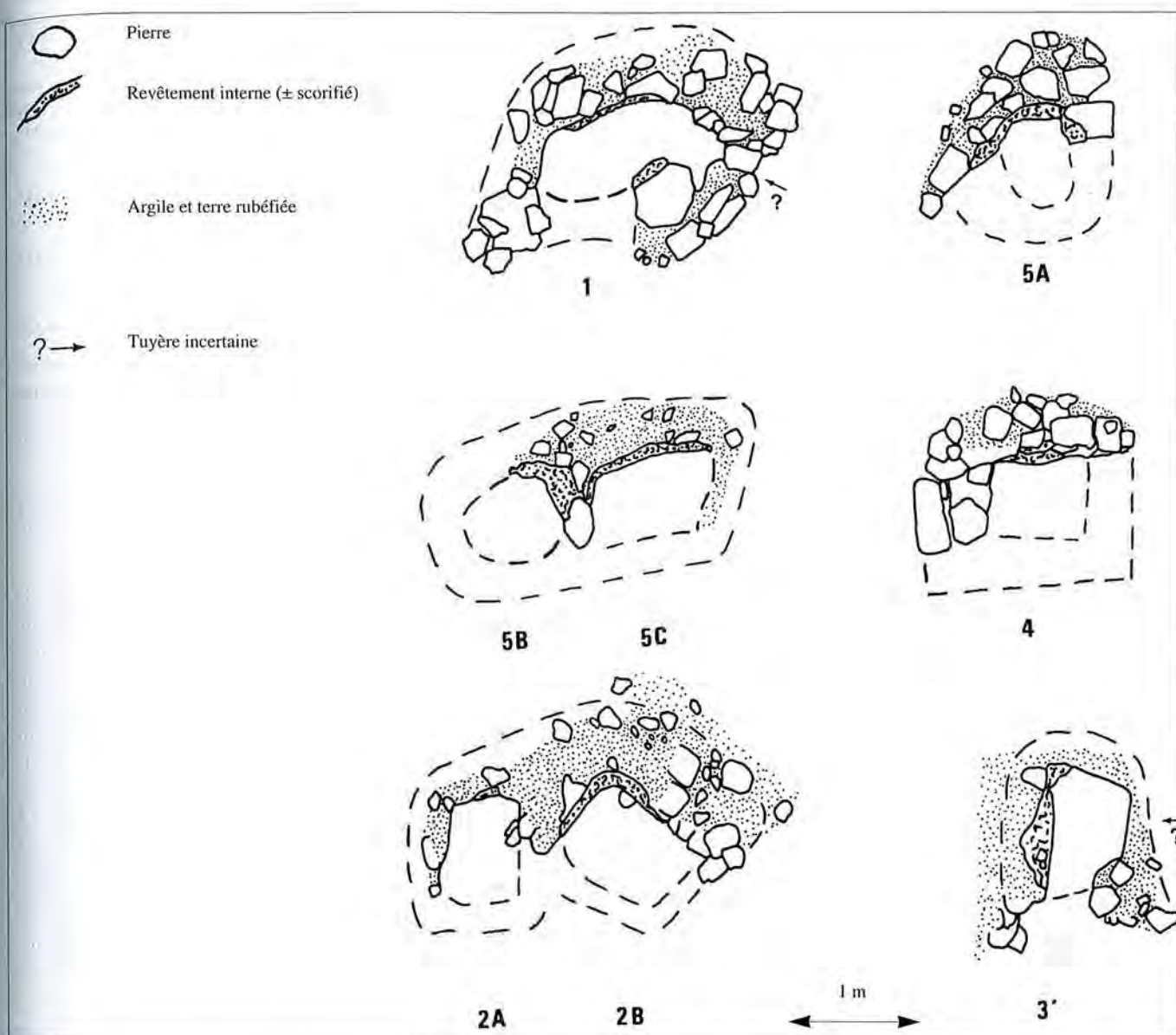


Fig. 144. Bas fourneaux construits à scories coulées du site de Montcherand - La Léchère. D'après Abetel 1992.

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,

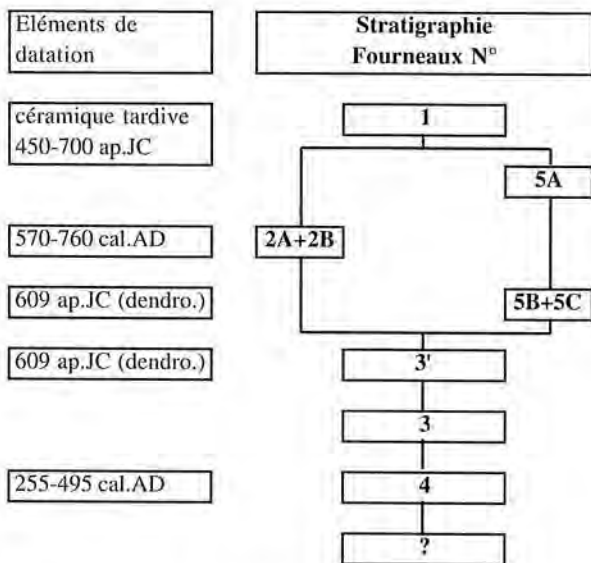


Fig. 145. Datation des fourneaux de Montcherand.

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
	tot					
<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.

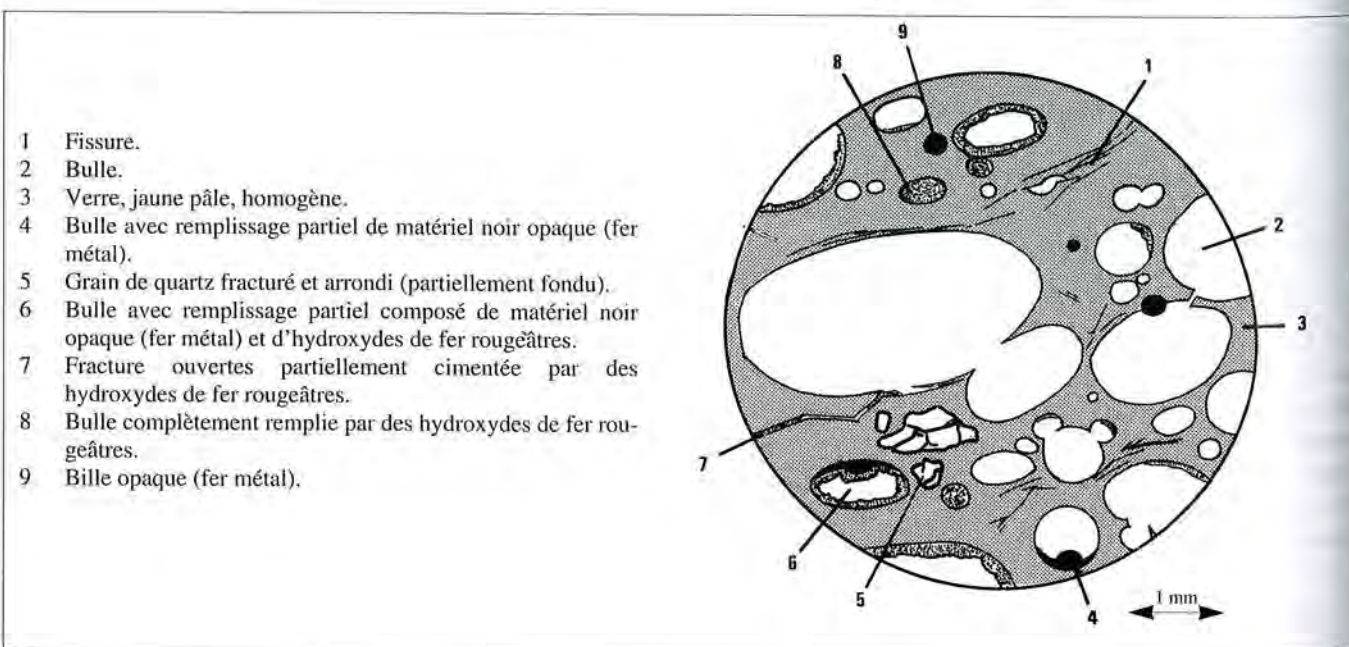


Fig. 147. SVN: scorie coulée vitreuse noire, en forme de tuyau: Ech. MON 28. Aspect de la texture microscopique.

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.

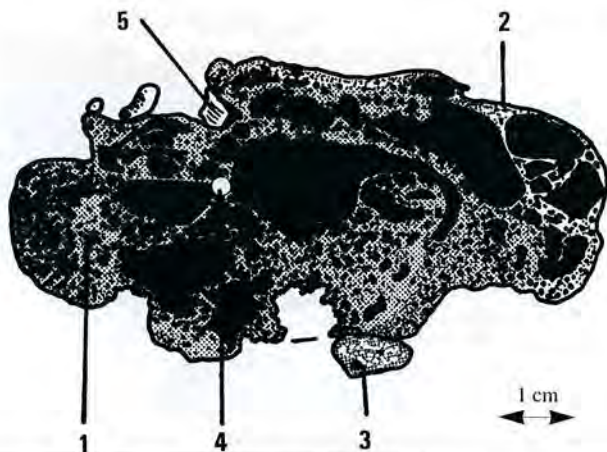


Fig. 148. SIJ: scorie intermédiaire jaune, en forme de tuyau. Ech. MON 81 (Montcherand): vue de dessus et coupe.

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 débuter à l'intérieur.

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

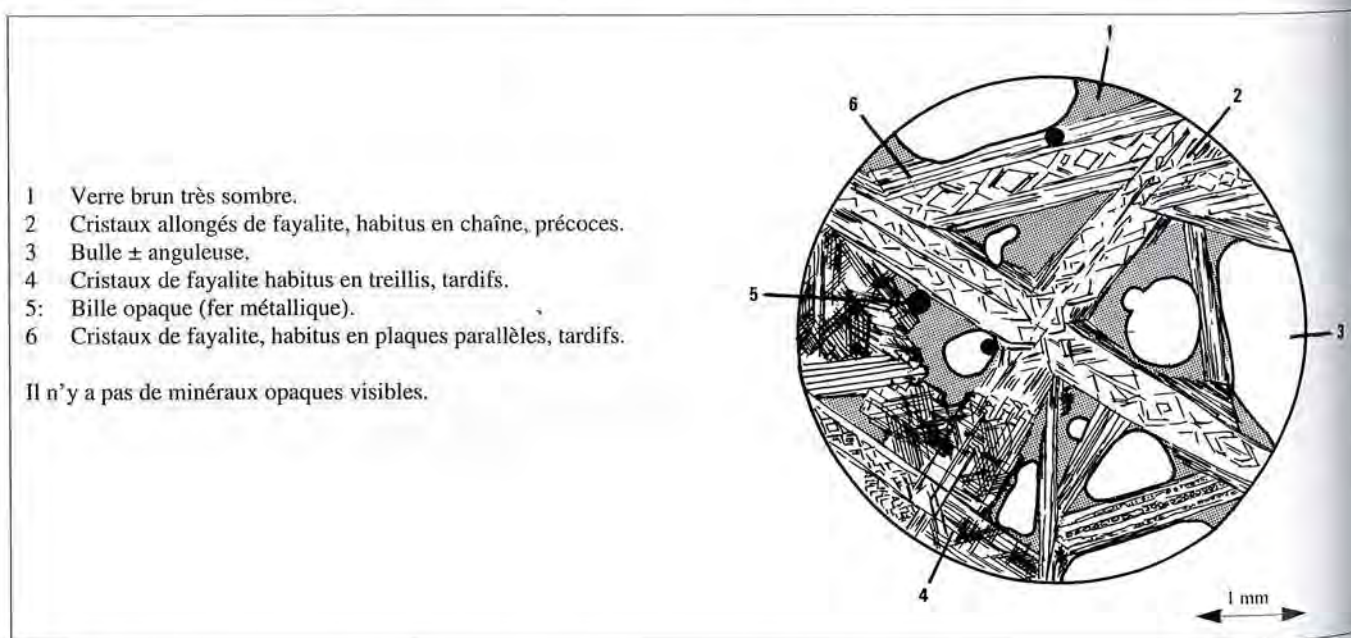
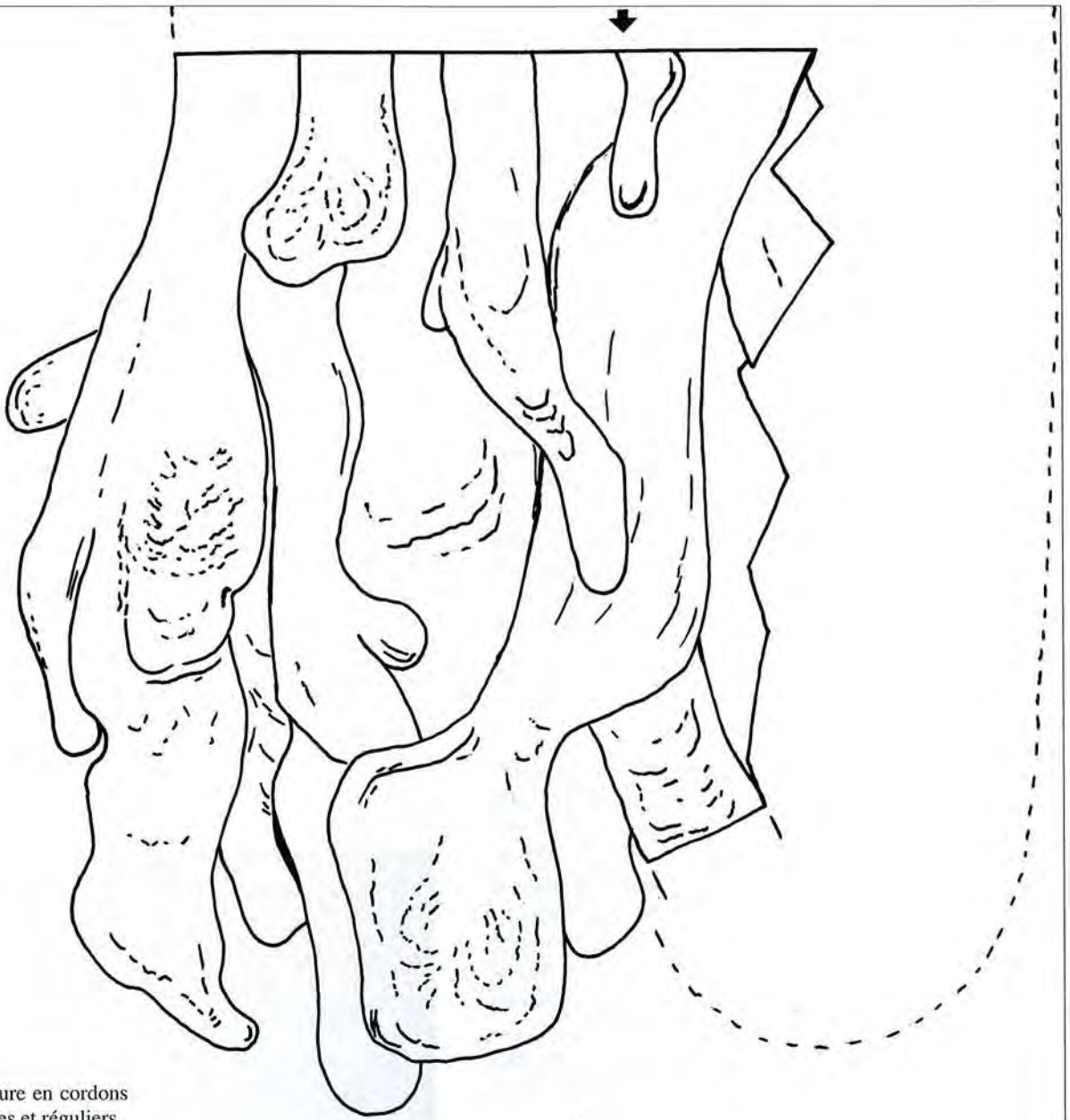


Fig. 149. SIJ: scorie intermédiaire jaunâtre. Ech. MON 36. Aspect de la texture microscopique.



Surface supérieure en cordons superposés, lisses et réguliers. Surface inférieure régulière avec quelques inclusions de petits cailloux.

Commentaire de la coupe:

- 1 Zone cristallisée: gris sombre. Les bulles, peu abondantes, soulignent la structure de refroidissement des cordons.
- 2 Grande vacuole centrale allongée.
- 3 Grains de sable adhérant à la surface inférieure.
- 4 Petit élément argileux cuit, pris dans la scorie.

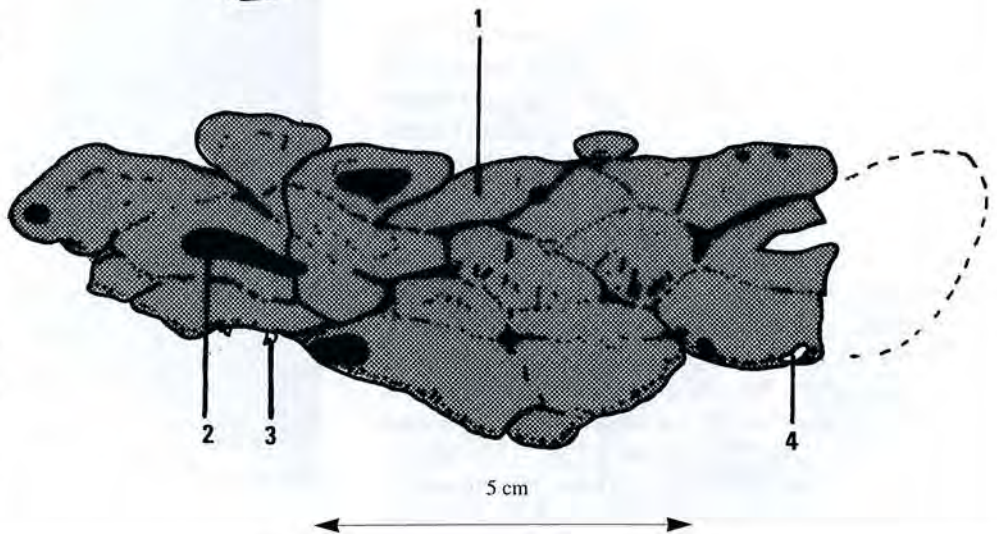


Fig. 150. SGD: scorie grise dense, en amas de cordons. Ech. MON 67 (Montcherand). Vue de dessus et coupe.

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

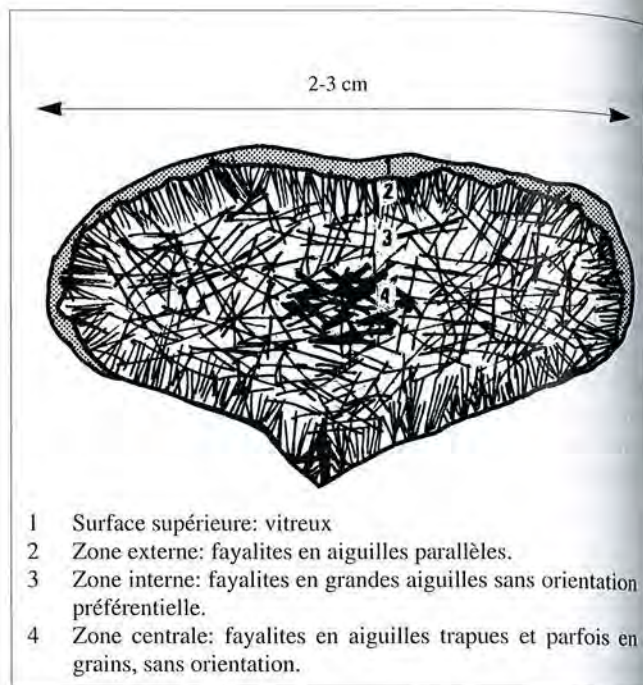


Fig 151. Schéma de la texture microscopique d'un cordon de scorie SGD de Montcherand.

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

- 1 Verre interstitiel incolore ou légèrement jaunâtre.
- 2 Cristal de fayalite, forme de Hopper.
- 3 Cristal de spinelle (Fe-hercynite) quadrangulaire en bordure d'un grain de fayalite (contemporain).
- 4 Cristal de fayalite, en branche.
- 5 Cristal de spinelle (hercynite) en bordure d'un grain de fayalite. Au contact avec le verre interstitiel, on observe le développement de cristallites squelettiques brun sombre.
- 6 Cristal de rhönite en losange aplati. Les grains sont fréquemment groupés en amas en forme d'étoile. Ils apparaissent dans des zones vitreuses relativement étendues.
- 7 Pore globulaire.



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.

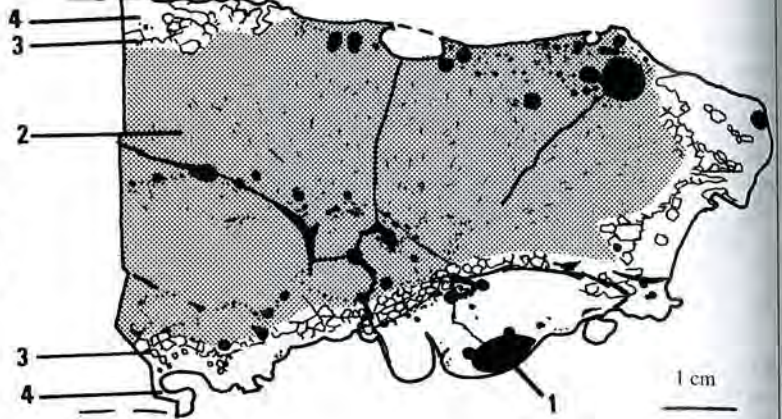


Fig. 155. SBD: scorie dense à reflets bleus. Ech MON 51. Coupe.

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 (spinelle 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.

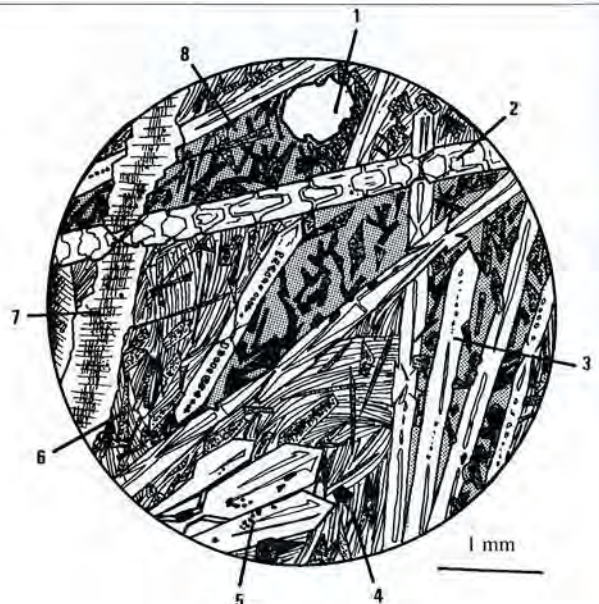


Fig. 157. SBD: scorie dense à reflets bleus, plaque épaisse. Ech. MON 50. Aspect de la texture microscopique.

- 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).

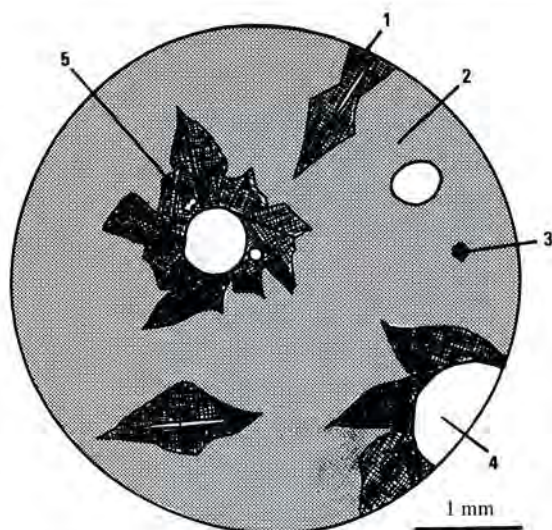


Fig. 158. SBD, scorie dense à reflets bleus, bloc informe vitreux. Ech. MON 71. Aspect de la texture microscopique.

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.

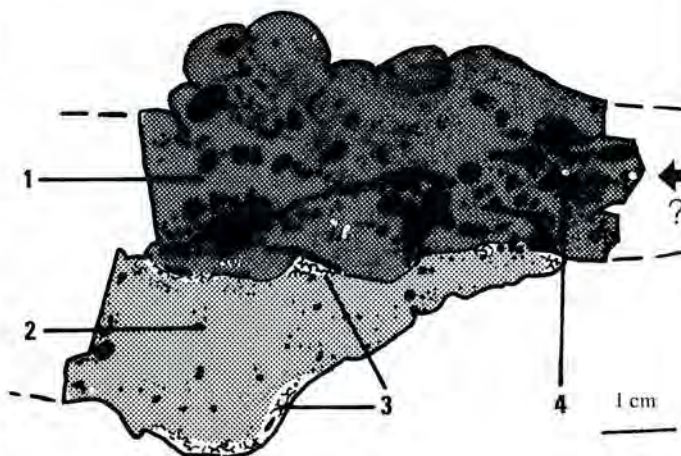


Fig. 159. Scorie composite associant deux textures différentes: SVJ et SGD. Ech. MON 38 (Montcherand). Coupe.

wüstite?). La phase vitreuse est moyennement abondante et très riche en calcium. Ces phases ont été étudiées à la microsonde (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 boursoufflée. 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-

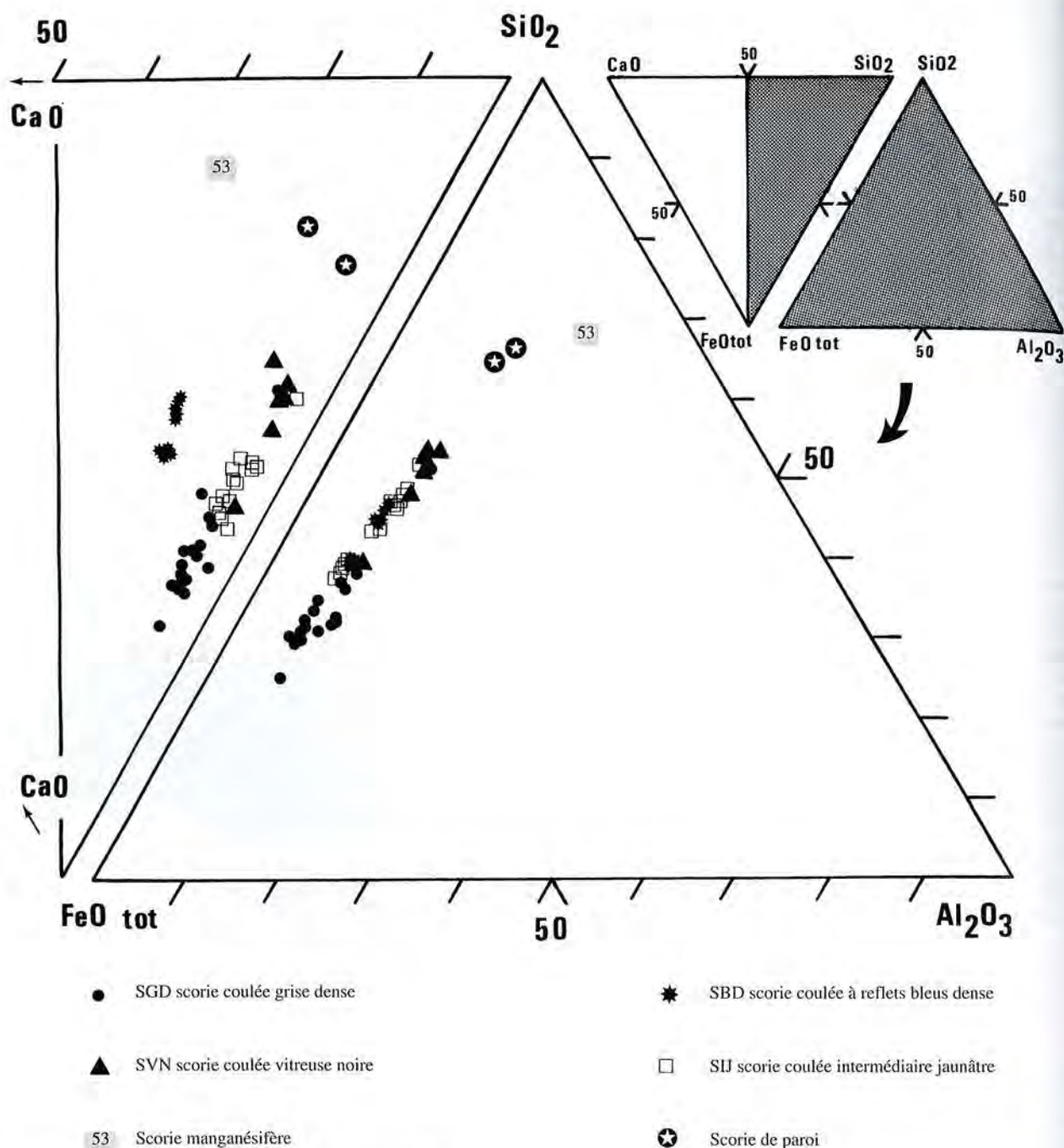


Fig. 160. Composition chimique des scories de Montcherand.

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 knobéélite  $FeMnSiO_4$ ).

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.

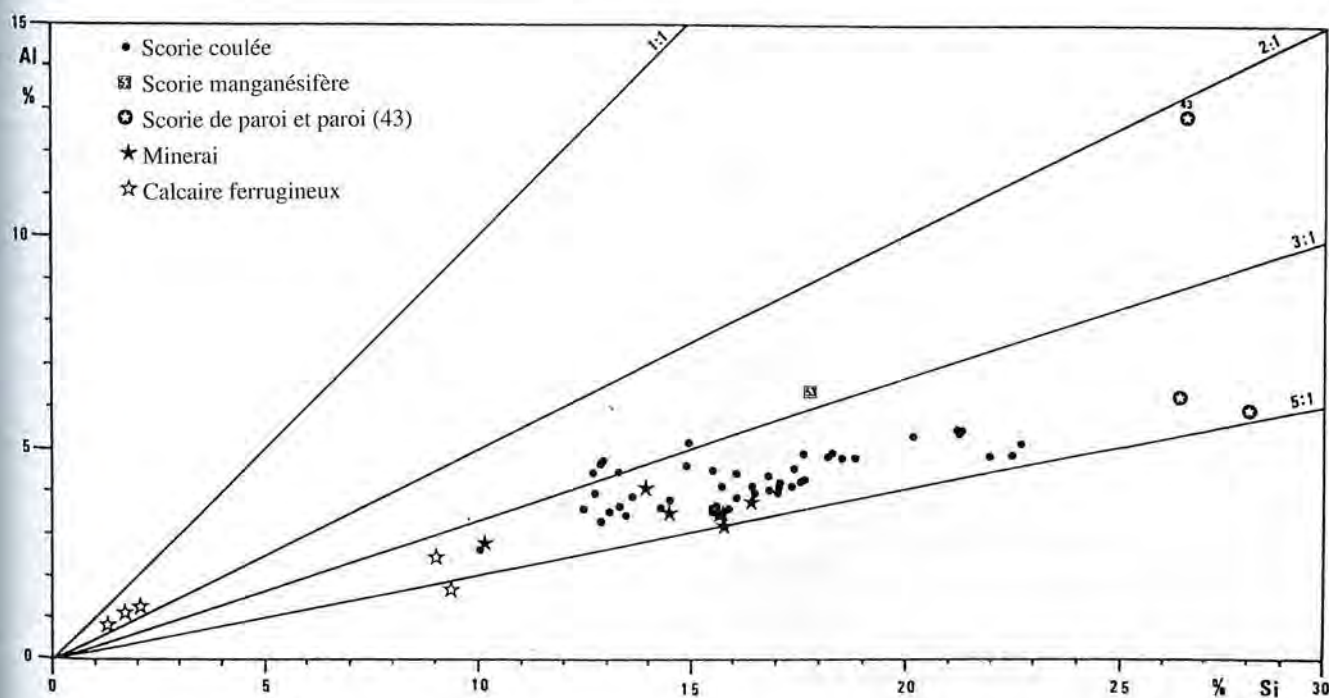


Fig. 161. Rapports Si:Al des échantillons de Montcherand.

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 élé-

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 SII). 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 SII 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  $\text{CO}_2$  (charbon),  $\text{H}_2\text{O}$  (hydratation) et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (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 préhistoire, 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 Age, 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 Age, la sidérurgie va se développer dans l'arrière-pays montagnoux 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 Age, 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.

## LES TROUVAILLES DE SCORIES DANS LA RÉGION DES LACS DE NEUCHÂTEL ET DE BIENNE

(VAUD, NEUCHÂTEL, BERNE ET FRIBOURG, SUISSE)

**L**ES lacs de Neuchâtel et de Biemme occupent une dépression de 60 km de long sur 5 km de large, au pied de la première chaîne du Jura (fig. 165). Cette vallée se prolonge en direction du NE par la plaine de l'Aar, plus étroite. Cette rivière rejoint plus loin le Rhin.

Cette dépression forme un axe de circulation majeur, tant terrestre que fluvio-lacustre, à travers le Plateau suisse.

Les rives NO des lacs sont abruptes et rocheuses, dominées par des sommets dépassant 1400 m. Seules quelques gorges, taillées par les rivières permettent de gagner les vallées internes du Jura. De l'autre côté des lacs, vers le SE, le relief est beaucoup plus doux, constitué de collines (moins de 700 m) et de plaines basses (Seeland et plaine de la Broye, 440 m). Le cours supérieur de l'Aar et celui de la Sarine permettent de gagner le pied des Alpes vers le SE.

La première chaîne du Jura est constituée de terrains calcaires et marneux du Jurassique et du Crétacé. Cette dernière période géologique est particulièrement bien représentée le long du lac de Neuchâtel. Les molasses tertiaires constituent les faibles reliefs du Plateau. La couverture morainique est localement importante. Les parties basses sont occupées par des alluvions post-glaciaires et des dépôts tourbeux quaternaires. Les cartes géologiques 1:25000 ne couvrent pas tout ce secteur (Val-de-Ruz 1144; Neuchâtel 1164; Murten 1165; Bieler See 1145).

Les bords des trois lacs furent intensément occupés durant la préhistoire (Néolithique et âge du Bronze). Les nombreuses stations lacustres seront abandonnées au cours du premier âge du Fer. A partir du début de la période de La Tène, les traces d'occupation se font à nouveau plus nombreuses. Juste avant la conquête romaine, le peuplement est dense (Kaenel 1990, 303-329). A cette période, deux sites importants occupent les extrémités du lac de Neuchâtel et il existe plusieurs emplacements fortifiés dans la région (fig. 166).

Les Romains établiront la capitale de l'Helvétie à Avenches (env. 8 av. J.-C.). Le réseau routier et les agglomérations se développent (Fellmann 1992, 144-5). Le peuplement rural est dense sur le Plateau et le long des rives des lacs alors que l'arrière-pays montagneux est délaissé. Les invasions alamanes du milieu du III<sup>e</sup> siècle semblent avoir fortement éprouvé la ville d'Avenches qui ne s'en relèvera pas vraiment. Au Bas Empire, on fortifie Yverdon. La situation dans les campagnes est très difficile à appréhender. Aux V<sup>e</sup>-VI<sup>e</sup> siècles, Avenches perd son rôle de capitale et devient une bourgade à la frontière entre les Burgondes et les Alamans. De nombreux cimetières du Haut Moyen Age témoignent de l'occupation rurale.

### Les ressources minières potentielles

Ni la molasse du Plateau, ni les terrains quaternaires n'ont livré la moindre trace de minéralisation en fer. Seuls les terrains du Jura sont susceptibles de fournir de la matière première aux sidérurgistes. Dans la région comprise entre Yverdon et Biemme, les couches mésozoïques n'affleurent que le long de la frange NO. Aucune mine n'y est mentionnée mais des terrains potentiellement exploitables, dans les conditions économiques et techniques anciennes, sont connus par les études géologiques (fig. 168 et 169).

#### Le Sidérolithique

Les occurrences de Sidérolithique sont peu nombreuses et surtout ne représentent que de très petits volumes. Dans la plupart des cas, il ne s'agit que de poches karstiques ou de fissures comblées par des matériaux sidérolithiques, voire simplement des imprégnations. Elles forment un chapelet depuis la colline du mont de Chamblon jusqu'à l'extrémité NE du lac de Biemme et au-delà.

La colline de Chamblon, à l'E d'Yverdon, est essentiellement constituée par des sédiments du Crétacé (Jordi 1955,

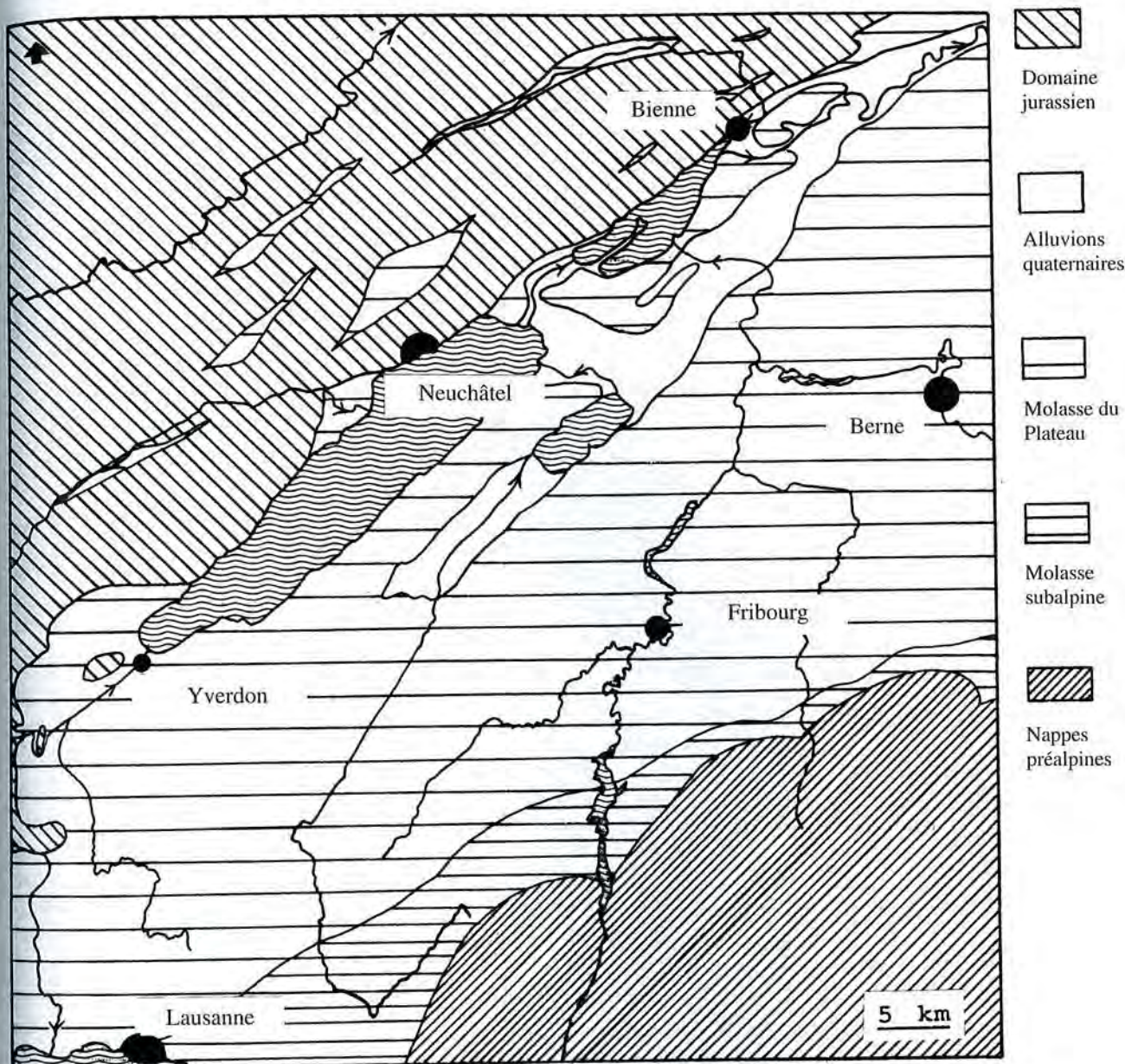


Fig. 165. Esquisse tectonique de la région des lacs de Neuchâtel et de Bienna. 1:500 000.

18-26 et pl. 1-2, Schardt 1880, 627-9 et pl. 1). Les anciennes carrières des Uttins et du Châtelard sont ouvertes dans les calcaires de l'Hauterivien (pierre jaune). Plusieurs crevasses sont remplies de matériaux infiltrés (fig. 167). D'autres crevasses sont mentionnées dans des carrières situées sur le versant N de la colline (Schardt 1880, 629-30). Toutes ces anciennes excavations sont actuellement disparues ou en cours de comblement. Les affleurements sont donc très médiocres.

Ces gisements, par leur mode de dépôt, rappellent les structures du Mormont, quoique ces dernières soient ouvertes dans les calcaires urgoniens (p. 89). Le fer et les concrétions ferrugineuses semblent toujours nettement moins abondants. Les analyses chimiques font défaut.

Sur le territoire de la commune de Pomy VD, au lieu dit Terres Rouges, près du hameau de Chevressy, on rapporte la

présence d'un affleurement de calcaires urgoniens. Un niveau stratiforme d'argiles rouges attribuées au Sidérolithique y fut observé (Jaccard 1869, 67-8). Cet affleurement a totalement disparu. Un sondage, effectué à l'E de Cuarny VD, a également rencontré des calcaires urgoniens imprégnés de matériaux sidérolithiques (Jordi 1955, 17 et carte).

Entre Concise VD et Vaumarcus NE, le long des rives du lac de Neuchâtel, les calcaires du faciès Urganien affleurent (lieux dits La Lance, Les Favarges, La Raisse). Localement, ils présentent des crevasses remplies par des matériaux sableux et argileux, attribués à l'Aptien (Bertschy 1958, 231-35). Il n'est pas impossible que des infiltrations de matériaux sidérolithiques aient pu être également présentes comme c'est le cas dans les secteurs voisins. Une situation comparable se retrouve plus à l'E, à l'entrée du village de Bevaix NE. Un petit pointement de calcaires urgoniens est connu. Le

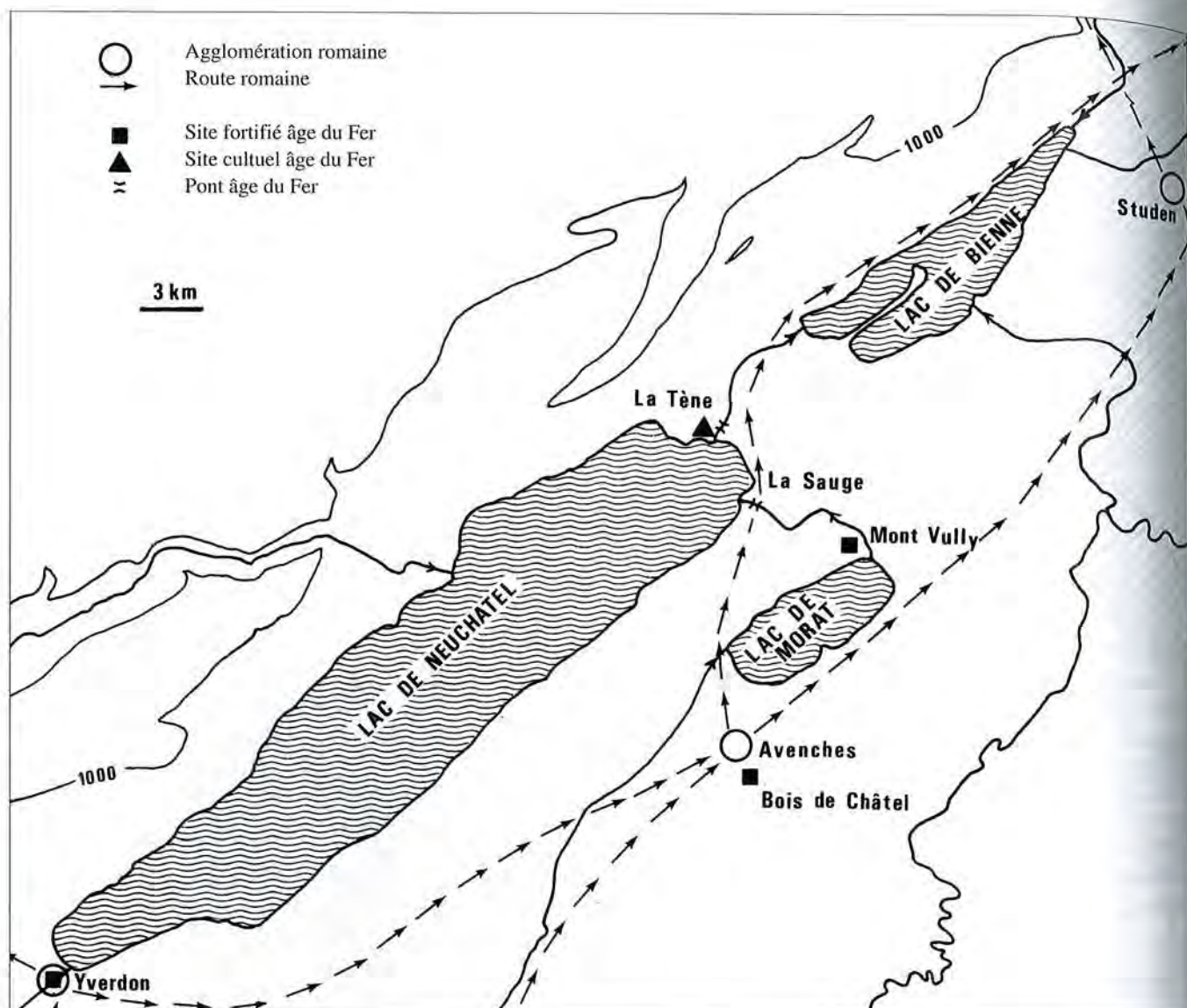


Fig. 166. Carte de situation des principaux sites archéologiques de la région des trois lacs.

Sidérolithique n'est mentionné que de manière très imprécise (Favre 1843).

Dans la partie E de la ville de Neuchâtel et jusqu'aux environs de Saint-Blaise, l'exploitation de la pierre jaune (Hauterivien supérieur) a occasionné l'ouverture de nombreuses petites carrières. A la fin du siècle passé, elles ont mis au jour de nombreuses poches et crevasses contenant des matériaux sidérolithiques: argiles, sables et pisolithes (Tribollet 1877, 23-31). Dans certains cas, il ne s'agit que d'imprégnations sans importance, mais parfois, il y a de véritables minerais pisolithiques quoique toujours en volumes limités.

Le long de la rive jurassienne du lac de Biennne, une situation similaire est connue. Dans les différents calcaires mésozoïques, on repère des crevasses ou des imprégnations sidérolithiques (Baumberger 1895, 50-52 et carte; Schär 1967, 52-53). Dans la plupart des cas, les pisolithes ne sont pas présents. Au-delà de Biennne, à l'entrée de Pieterlen BE, se trouve un affleurement plus étendu (Schürer 1928).

### Les autres ressources potentielles

Le Valanginien supérieur affleure sporadiquement au pied de la chaîne du Jura entre Yverdon et Biennne. Les calcaires roux sont présents, mais le contenu en limonite reste faible. Il n'est jamais fait mention d'un minerai de fer (p. 41). Localement, on ne peut exclure qu'il ait existé un faible volume suffisamment enrichi pour être exploité, mais rien de précis ne vient conforter cette hypothèse.

Un affleurement intéressant est celui qui se trouve au N de Bonvillars VD (Bertschy 1958, carte). Il s'agit de calcaires roux dans lesquels apparaissait une minéralisation secondaire dans une faille («minerai scoriacé dense» «pyrites oxydées», Schardt 1880, 630-631). Cette mention peut éventuellement être mise en relation avec un toponyme (Terre Rouge) et une forge médiévale (Pelet 1978, 74-75).

L'existence de gîtes d'accumulation secondaire (placers) ne peut être exclue. Il a pu se former, dans les rivières qui descendent du Jura, des concentrations de concrétions ferru-



Fig. 167. Remplissage sidérolithique d'une crevasse dans la pierre jaune (Hauterivién supérieur) de la carrière des Uttins (mont de Chamblon VD). Jordi 1955, fig. 8.

gineuses (oxydes ou sulfures oxydés), comme c'est le cas dans l'Orbe (p. 133). Les dépôts tourbeux post-glaciaires du Seeland offrent peut-être les conditions requises pour la formation de minerai de fer des marais. Des formations de ce type ne sont pas décrites, à notre connaissance, dans la bibliographie.

## Les sites liés à la réduction du minerai

Aucun amas de scories anciennes de réduction n'est connu dans ce secteur. Il faut toutefois souligner que la prospection de surface est restée très limitée. Quelques indices existent néanmoins, qui demandent à être confirmés par des recherches futures (fig. 168 et 170).

Entre Concise VD et Vaumarcus NE, au bord du lac de Neuchâtel, des scories auraient été découvertes éparses (Pelet, com. pers.). Il y existe un toponyme Les Favergès et l'exploitation des calcaires urgoniens à l'époque romaine est attestée (Schmid 1989). Celle-ci a pu mettre au jour des poches de Sidérolithique. L'existence d'une métallurgie extractive ancienne est probable, mais les vestiges restent à identifier. Sur la berge du lac, on trouve des fragments de laitier de haut fourneau. Ils sont probablement amenés par les rivières qui descendent du Jura (p. 149).

Aux Rochat, commune de Provence VD, des scories ont été découvertes à proximité du chalet (Jaccard 1869, 117; Pelet 1973, 225). Un petit lot d'échantillons a pu être étudié. L'une des pièces est une scorie de réduction coulée caracté-

ristique (SGD). Les autres sont également des SGD mais les fragments sont informes. Une seule analyse a pu être faite sur un échantillon en forme de calotte (Annexe 6.1, Ech. PRO 1). La composition ne montre pas d'affinité avec celles des scories de réduction du Sidérolithique jurassien. La morphologie n'est pas suffisamment caractéristique pour l'attribuer clairement à un travail post-réduction. Le minerai utilisé n'est pas identifié.

## Les sites liés au travail de post-réduction

La liste des sites qui ont livré des scories de travail post-réduction est déjà longue mais ne peut certainement pas être considérée comme exhaustive (fig. 168 et 170). Les ateliers eux-mêmes sont mal documentés, aucun n'ayant été fouillé récemment. Les découvertes de scories sont dans la plupart des cas liés à des vestiges d'habitat de tous types et de toutes époques.

### Les sites protohistoriques

Les fouilles récentes de Faoug ont mis au jour un habitat du début de l'âge du Fer (Derrière le Chaney, Faoug VD; Doiteau 1990). Quelques scories, peu nombreuses et peu significatives, attestent néanmoins d'une activité sidérurgique à une petite échelle.

Dans les environs du site prestigieux de La Tène, des fouilles récentes ont dégagé les restes d'une enceinte quadrangulaire de la fin de l'âge du Fer (Les Bourguignonnes, Marin-Epagnier NE; Egloff 1982). Des scories de fer sont mentionnées ainsi que des éléments attestant le travail de l'or. Des scories ont été ramassées non loin, au bord du lac (Préfarquier, Marin-Epagnier NE; Pelet com. pers.). Ces pièces ne peuvent pas être formellement mises en relation avec le site protohistorique. Elles sont atypiques et pourraient être des déchets modernes.

Les fouilles de l'oppidum du Mont Vully ont permis de mettre en évidence le rempart qui le défendait (Plan Châtel, Vully FR; Kaenel et Curdy 1988). Cette construction date de la fin de l'âge du Fer. Quelques scories éparses ont été relevées. L'habitat de Courgevoux FR, datant de la fin de l'âge du Fer, a également livré des scories (Anderson et Bouyer 1992).

### Les sites romains

De nombreux sites d'époque romaine ont livré des traces de métallurgie. Dans les établissements ruraux (*villae*) on trouve fréquemment de petites quantités de scories. C'est le cas à Orges VD, Fiez VD, Champagne VD, Bevaix NE, Colombier NE, Yvonand VD, Morens FR, St. Peterinsel BE (?) et Kallnach BE. Ces sites restent mal connus et le matériel est assez pauvre (prospections, fouilles anciennes ou simples sondages).

Le site de Bevaix n'est mentionné que dans la bibliographie ancienne. Le matériel n'est pas connu. Les scories,

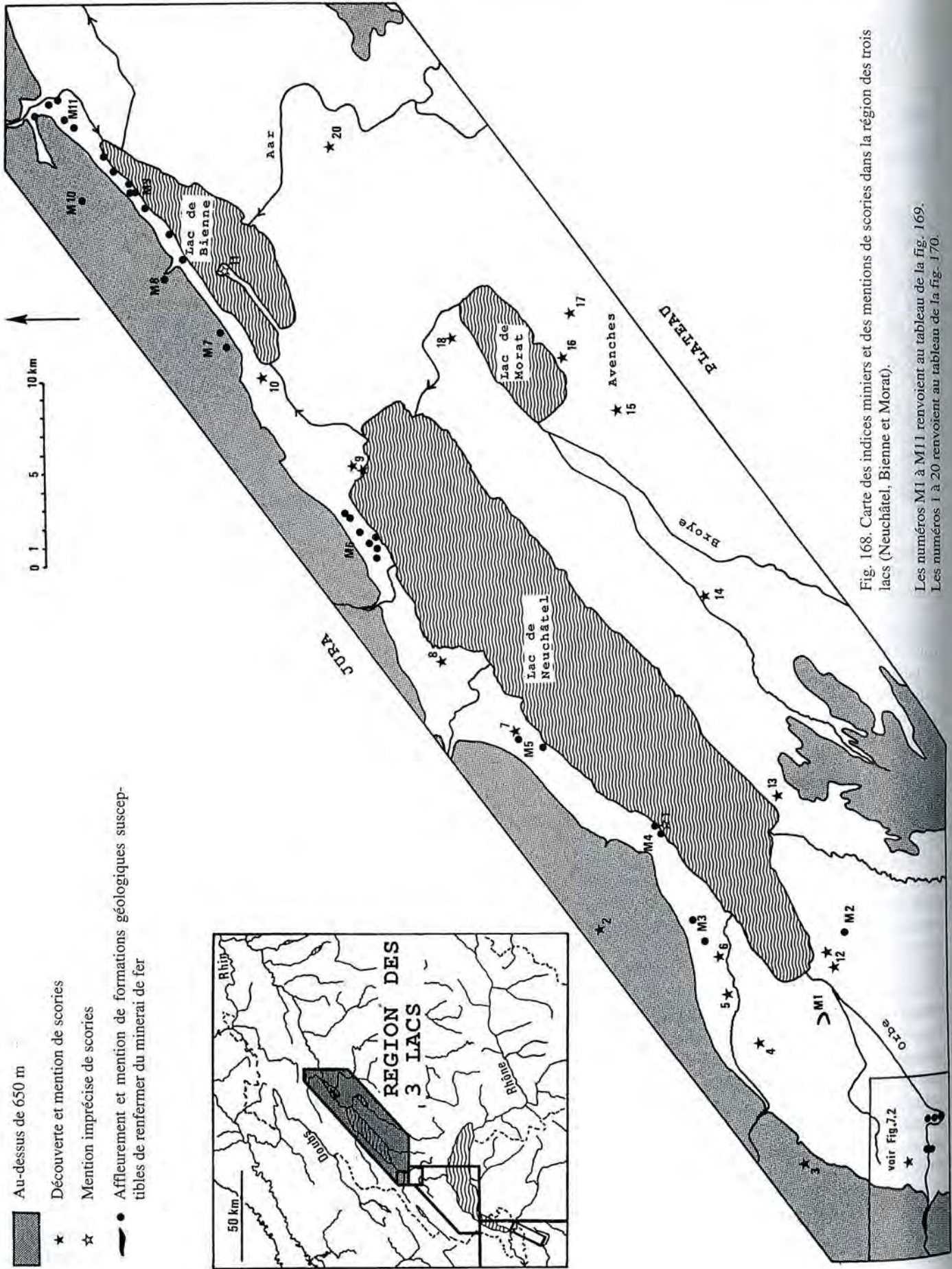


Fig. 168. Carte des indices miniers et des mentions de scories dans la région des trois lacs (Neuchâtel, Biennet et Morat).

Les numéros M1 à M11 renvoient au tableau de la fig. 169.  
Les numéros 1 à 20 renvoient au tableau de la fig. 170.

N°	Nom d'usage	X	Y	Z	Référence	remarque	
<b>Secteur Mont de Chamblon (VD)</b>							
M1	Carrière du Châtelard	537 150	181 080	440	Schardt 1898-9 Jordi 1955, p.18-26, pl.1 et 2	bolus et pisolithes bolus	
	Carrière de la Grotte (= Les Ultins)	537 125	181 175	440	Schardt 1880, p.626, pl.1, 3 Jaccard 1869, p.310-1		
	Carrière du Moulin Cosseau	536 750	181 625	440	Schardt 1880, p.626-7, pl.1, 1 et 2 Schardt 1880, p.628-9	bolus bolus	
	Carrière du Moulin Chappuis	536 375	181 750	440	Jordi 1955, p.18-26, pl.1 et 2 Schardt 1880, p.629		
<b>Secteur Pomy (VD)</b>							
M2	Chevressy - Terres Rouges	541 540	180 350	580	Jaccard 1869, p.67 Jordi 1955, p.17, pl.5	minerai de fer bolus et pisolithes	
	Cuarny-sondage	543 500	180 375	550	Schardt, 1880, p.631 Jordi 1955, p.17, pl.5 Schardt, 1880, p.631		
<b>Secteur Bonvillars (VD)</b>							
M3	Terre Rouge	540 750	187 750	490	Schardt 1880, p.630-631	sulfures oxydés ? bolus et pisolithes	
	La Galilée, carrière	542 420	188 380	490	Meia 1969, p.29		
<b>Secteur Concise (VD)</b>							
M4	La Lance	546 550	190 980	440	Bertschy 1958, p.231-35, carte	Aptien	
	Les Favarges	547 150	190 200	440	Bertschy 1958, p.231-35, carte		
<b>Secteur Bevaix (NE)</b>							
M5	ancienne carrière	552 075	197 925	540	Favre 1843	Sidérolithique ? bolus	
	Chez le Bart	551 100	195 400	450	Meia 1969, p.29		
<b>Secteur Neuchâtel - Saint-Blaise (NE)</b>							
M6	Promenade des Zigzags	situation imprécise			Tribolet 1877, p.28-9	bolus et pisolithes bolus et pisolithes	
	Faubourg du Crêt	situation imprécise			Tribolet 1877, p.30		
	Vieux Châtel	562 000	205 250	440	Tribolet 1877, p.30	bolus bolus et pisolithes	
	Pierre-a-Bot dessous	situation imprécise			Tribolet 1877, p.30		
	Hôpital Pourtalès	563 000	205 650	490	Tribolet 1877, p.31	bolus et pisolithes bolus et pisolithes	
	Les Saars	563 000	205 300	430	Tribolet 1877, p.31 Ritter 1877, p.39		
	Combe des Fahys (Neuchâtel)	situation imprécise			Schardt 1908	bolus et pisolithes	
	Belle Roche (Gibraltar)	526 450	205 300	445	Schardt 1898-9		
	La Coudre	563 530	206 375	500	Schardt 1908		
	Longs Champs (Hauterive)	564 650	207 050	500	Schardt 1908		
	Carrière Perrier (Hauterive)	564 425	206 975	500	Schardt 1908		
<b>Secteur du lac de Bienne (NE - BE)</b>							
M7	r. des Italiens (La Neuville)	573 385	213 370	685	Schär 1967, p.50		
	Poyerli (La Neuville)	574 850	214 160	780	Schär 1967, p.50		
M8	Sur Montet (Prêles)	577 100	217 000	780	Schär 1967, p.50	bolus	
	Brunnmüli (Ligertz)	578 100	215 650	440	Baumberger 1895, p.50		
	Steedli (Twann)	579 670	216 500	450	Baumberger 1895, p.50 Haefli 1966, p.599	sable bolus	
M9	Roggeten (Twann)	580 850	217 700	450	Baumberger 1895, p.50		
	Tüscherz	581 160	218 175	550	Baumberger 1895, p.50	bolus bolus et pisolithes	
	Alfermée	582 050	218 625	450	Baumberger 1895, p.50		
	Gottstätterhus (Bienne)	583 125	219 725	450	Baumberger 1895, p.51	bolus bolus	
	Goldberg (Bienne)	583 840	220 300	450	Baumberger 1895, p.51 Rollier et Jullierat 1902		
M10	Crêt sor Neuchâtel (Orvin)	581 075	221 250	800	Schurer 1928, p.20	bolus et pisolithes bolus et pisolithes	
M11	Spital (Bienne)	585 525	221 675	500	Haefli 1966, p.598 Schurer 1928, p.19		
	Falbringen (Bienne)	585 800	222 120	520	Haefli 1966, p.599	imprégnations Fe bolus	
	Tubeloch (Bözingen)	586 820	222 500	490	Haefli 1966, p.599		
		586 650	222 825	560	Haefli 1966, carte		
	Tubeloch (Frinvillier)	586 125	223 925	570	Haefli 1966, carte		

Fig. 169. Liste des indices miniers entre Yverdon et Bienne.

N°	Nom d'usage	X	Y	Z	Référence	remarque
<b>VESTIGES DE REDUCTION</b>						
1	<b>Concise VD</b> La Raisse-Les Favarges	situation imprécise			Pelet, com. pers.	carrière romaine scories éparses (réduction ?)
2	<b>Provence VD</b> Les Rochat, potager	514 650	193 400	1160	Jaccard 1869, p. 117 Pelet 1993, p. 121	pas d'habitat scories coulées et calotte ?
<b>VESTIGES POST-REDUCTION</b>						
3	<b>Baulmes VD</b> Forel, Saint-André	528 725	182 425	1060	Pelet 1993, pp. 64-65	site de hauteur romain tardif scories, dont calottes
4	<b>Orges VD</b> Borbolion	535 500	184 800	570	Gonthier, com. pers.	villa romaine scories post-réduction
5	<b>Fiez VD</b> maison coloniale	538 750	186 500	510	Gonthier, com. pers.	villa romaine scories post-réduction
6	<b>Champagne VD</b> Sur Biolex	539 750	187 400	500	Gonthier, com. pers.	villa romaine scories post-réduction
7	<b>Bevaix NE</b>	situation imprécise			Musée Neuchâtelois 1910	forge romaine ?
8	<b>Colombier NE</b> Place du Château	556 250	201 800	450	Ribaux & De Boe 1984, p.82	villa romaine scories
9	<b>Marin NE</b> Les Bourgignonnes Préfarquier	567 500	206 800	450	Egloff 1982	site cultuel fin de l'âge du Fer scories et métallurgie de l'or
10	<b>Le Landeron NE</b> Les Carougets	567 500	206 000	450	Pelet, com. pers.	scories douteuses
11	<b>St Peterinsel BE</b>	571 500	212 065	450	Hofmann P. 1992	habitat du Haut Moyen Age scories post-réduction
12	<b>Yverdon VD</b> Chantier du Technicum Castrum, porte de l'Est	situation imprécise			Bonstetten 1876, carte	villa romaine ?, "fonderie"
		540 450	181 270	435	Pelet 1993, p. 121	couche romaine : 1 calotte
		539 700	180 100	435	Abetel, com. pers.	fortification romaine scories post-réduction
13	<b>Yvonand VD</b> La Baumaz	548 750	183 700	455	Gonthier, com. pers.	villa romaine
14	<b>Morens FR</b> Derrière-la-Cure	559 400	187 700	445	ASSPA 1985, p. 255 Vauthey, com. pers.	villa romaine ? scories post-réduction
15	<b>Avenches VD</b>	voir fig. 179			Bögli 1984	ville romaine scories post-réduction, etc
16	<b>Faug VD</b> Derrière-le-Chaney	573 700	194 825	454	Doiteau 1990 et com. pers.	habitat début de l'âge du Fer scories post-réduction
17	<b>Courgevaux FR</b> Le Marais 1	573 650	194 900	458	Anderson et Bouyer 1992	habitat ? Début de l'âge du Fer scories
18	<b>Vully FR</b> Plan-Châtel	573 700	201 400	640	Kaenel & Curdy 1988. Kaenel com. pers.	site fortifié fin de l'âge du Fer scories post-réduction
19	<b>Kallnach BE</b> Muracher	584 480	208 040	456	Lechmann et Koenig 1990	villa romaine scories

Fig. 170. Liste des indices de métallurgie (scories) de la région entre Yverdon et Bienne.

abondantes, ont été trouvées à proximité d'un bâtiment en pierre avec quelques objets métalliques (Musée Neuchâtelois 1910). A Colombier, les fouilles archéologiques permettent de suspecter la présence d'une forge près des ruines de la grande villa (Ribaux et De Boe 1984, 82). Le matériel scoriifié n'a pas été réétudié. Toutes ces découvertes témoignent de l'omniprésence de la petite métallurgie liée aux habitats ruraux de l'époque romaine.

Le site d'Yverdon fut occupé probablement à une date très ancienne. A la fin de l'âge du Fer, une bourgade fortifiée occupe le cordon littoral. Un vicus romain, défendu par un castrum à partir du milieu du III<sup>e</sup> siècle, lui succède (Kasser 1975, 56). Des scories ont été découvertes en divers points, mais toujours en faibles quantités.

Avenches, capitale de l'Helvétie romaine, fut une ville importante avec son centre monumental, son réseau d'*insu-*

Grade N°	Nom d'usage	scories en calotte		scories informes		paroi de foyer		total poids kg
		nombre	poids gr	nombre	poids gr	nombre	poids gr	
3	Baulmes	17	6870	20	1520	x	240	± 10
4	Orges	2	550	40	1300	x	± 100	± 3
5	Fiez	1	180	1	100			> 1
12	Yverdon	2	1680	> 20	± 500	x	± 100	± 2
13	Yvonand	3	320	30	2770	x	± 100	± 3
14	Morens	2	640	1	150	x	± 200	± 1
15	Avenches	± 100	33100	xxx	17790	xxx	46030	± 100
18	Mont Vully	1	220	5	410			> 1

Fig. 171. Répartition des différentes catégories de scories sur les sites de travail post-réduction étudiés dans la région des lacs de Neuchâtel et de Bienna.

lae et son rempart. Sur ce site également, les fouilles révèlent la présence de scories en de nombreux endroits. Dans quelques cas, ces trouvailles sont liées à des traces d'artisanat, mais elles sont le plus souvent privées de contexte caractéristique (pp. 161-166).

Enfin, le site de Baulmes VD semble avoir un caractère de site défensif. Plusieurs bâtiments occupent le sommet d'une éminence dominant la plaine. On y relève la présence de tuiles romaines, mais le site est très mal daté (Pelet 1993, 64-65). Des scories ont été découvertes éparées en surface et un amoncellement d'une vingtaine de kilos se trouvait à l'extérieur de l'un des bâtiments (pp. 158-161).

### Les sites du Haut Moyen Age et du Moyen Age

Lors de la fouille d'un village du Haut Moyen Age, au Landeron NE, des structures artisanales (foyers, fosses) et des scories, ont été découvertes associées à des fonds de cabanes semi-enterrées (Les Carougets, Le Landeron NE;

Hofmann P. 1992 et com. pers.). L'étude de ces vestiges vient de commencer. Pour le Moyen Age, les archives attestent l'existence de forges dans de nombreux villages ainsi que dans les villes de Neuchâtel et de Fribourg (Pelet 1978, 30).

### Les scories du travail post-réduction

Les ateliers de forge au sens large livrent des vestiges métallurgiques de natures diverses. Les objets les plus caractéristiques sont les scories en forme de calotte. Ce sont eux qui apparaissent comme diagnostiques et qui permettent de définir l'étape du travail métallurgique. Ils ne sont toutefois pas sans ambiguïté.

Le gros du matériel est constitué de fragments dont la forme et la position au moment du refroidissement ne peuvent être précisées (scories informes). Les scories coulées sont très peu abondantes, ce sont toujours de très petites coulures. On trouve également des scories en forme de goutte constituées en majeure partie de matériaux argilo-sableux

N° objet	% con- servé	poids cons. gr.	poids estimé gr.	diam. max. cm.	diam. min. cm.	épais- seur cm.	nbre opéra- tions	trace bord foyer	cail- loux	remarques
BAU 1	95	700	735	17.0	12.5	4.5	1	X	X	petite coulure collée
BAU 2	90	700	770	14.0	10.5	7.5	2		X	trace d'outil (l = 6.4 cm)
BAU 3	80	700	875	17.0	12.0	6.0	2?	X		
BAU 4	70	800	1150	15.0	12.0	6.0	2	X		trace d'outil (l = ?)
BAU 5	65	650	1000	12.0	12.0	4.0	1	X		
BAU 6	100	490	490	11.0	8.0	5.0	2?		X	
BAU 7	95	700	735	15.0	9.0	7.0	1			
BAU 8		380				4.5	1			trace d'outil (l = 4.7 cm)
BAU 9	40	360	900	15.0	8.0	4.0	1	X		trace d'outil (l = 4.5)
BAU 10	60	230	380	11.0	10.0	3.0	1			
BAU 11		130				2.0	1			
BAU 12		300				3.0	1			
BAU 13		170				3.0	1			
BAU 14		100				2.0	1			
BAU 15		50						X		
BAU 16		60						X		
BAU 17		350					2	X		cassée et refondue

Fig. 172. Caractères morphologiques des scories en forme de calotte du site de Forel à Baulmes VD

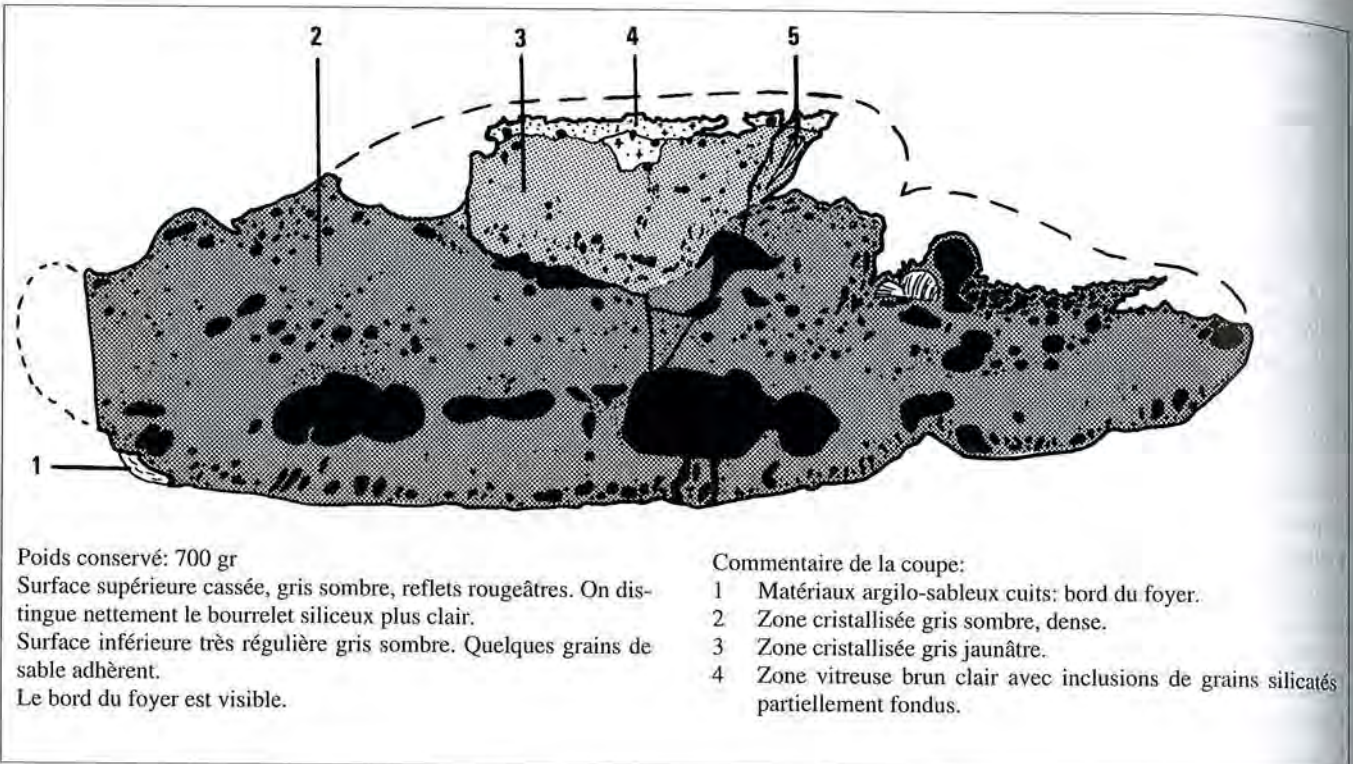


Fig. 173. Scorie en forme de calotte. Ech. BAU 3 (Forel, Baulmes VD). Coupe.

fondus. Enfin, les éléments de paroi de foyer, scorifiés sur une seule face, sont très caractéristiques et très abondants. Dans les cas étudiés, les particules fines comme les battitures, n'ont pas été récoltées. Toutes ces catégories forment un assemblage qui est caractéristique. Dans certains cas, on constate la présence de vestiges liés à la pratique d'autres métallurgies (scories de cuivre, morceaux de creuset, coulure de bronze, etc).

La répartition des différentes catégories de scories liées aux travaux post-réduction sur les sites étudiés, est donnée à la fig. 171. Seuls les ensembles les plus significatifs sont décrits plus complètement. Les autres résultats d'analyse sont donnés en annexe (Annexe 6.1: Orges VD et Yverdon VD; 6.3: Mont Vully FR et Morens FR).

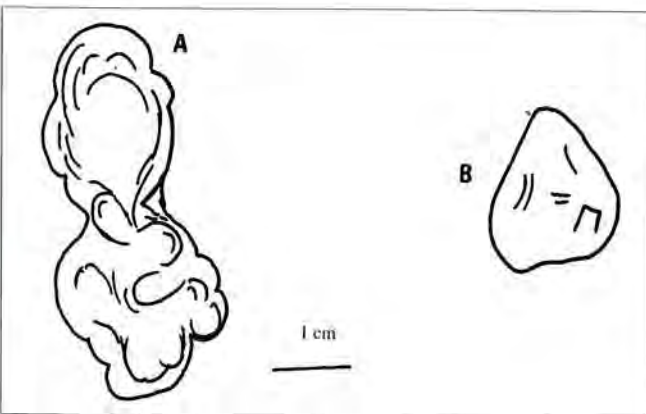


Fig. 174. Scories en goutte du site de Baulmes VD.  
 A: Ech. BAU 31  
 B: Ech. BAU 32

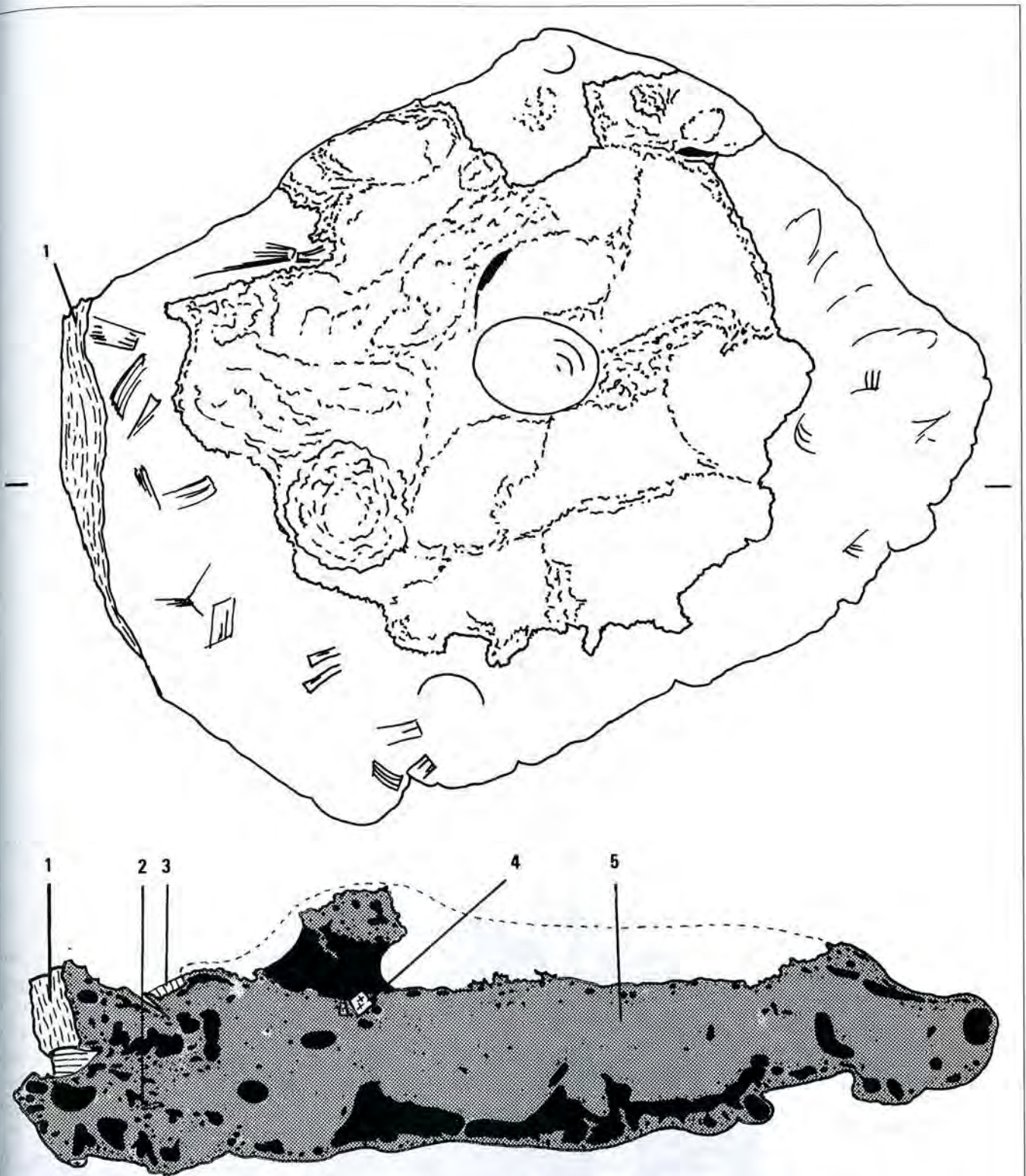
### Le site de Baulmes VD

Fig. 168 et 170, N° 3.

Le site a livré des scories éparses en surface, mais on note une concentration notable en un point, à l'extérieur de l'un des bâtiments (Pelet 1993, 75). Il s'agit probablement d'une aire de rejet. Le matériel n'est guère abondant, mais le site n'a fait l'objet que de recherches très limitées (fig. 171). Les scories en forme de calotte sont bien représentées dans le matériel conservé ce qui est le reflet des conditions de prélèvement (fig. 172).

Les scories en forme de calotte sont de grandes dimensions (diamètre > 10 cm) et pesantes (poids > 500 gr). La plupart présentent une structure interne typique (fig. 175-176). On observe plusieurs fois la trace d'arrachement (bord du foyer). La surface supérieure est caractérisée par la présence d'un bourrelet d'aspect vitreux. La partie supérieure est constituée d'une pâte gris jaunâtre claire et contient des éléments de roche silicatée non fondus. La partie inférieure est très sombre et plus dense. Une série de bulles souvent de grande dimension séparent les deux parties de la scorie. Des bulles plus petites sont disposées de manières radiaire à la surface inférieure. La surface inférieure est régulière. Elle montre tantôt des empreintes de charbon de bois, tantôt des inclusions de grains de sable ou des placages argilo-sableux. Elles sont très proches, à tous points de vue, des scories en forme de calotte découvertes à Boécourt JU (Eschenlohr et Serneels 1991, 107-115).

Plusieurs pièces sont doubles, c'est-à-dire que la structure interne se répète. Elles représentent chacune deux travaux effectués dans le foyer successivement.



Poids conservé: 700 gr

Surface supérieure:

Périphérie relief moutonné avec empreintes de charbon de bois.

Partie centrale cassée = grandes bulles horizontales.

Surface inférieure: régulière avec quelques inclusions de gravillons et de sable

Latéralement, le bord du foyer en matériaux argileux cuits adhère à la scorie (1).

Commentaire de la coupe:

1 Bord du foyer: matériaux argileux cuits.

2 Fer métallique.

3 Inclusion de charbon de bois.

4 Inclusion de roche silicatée partiellement fondue.

5 Zone cristallisée gris sombre, dense.

Les aiguilles de fayalite sont visibles. Les bulles de la partie inférieure permettent d'orienter le dégazage.

Fig. 175. Scorie en forme de calotte. Ech. BAU 1 (Forel, Baulmes VD).

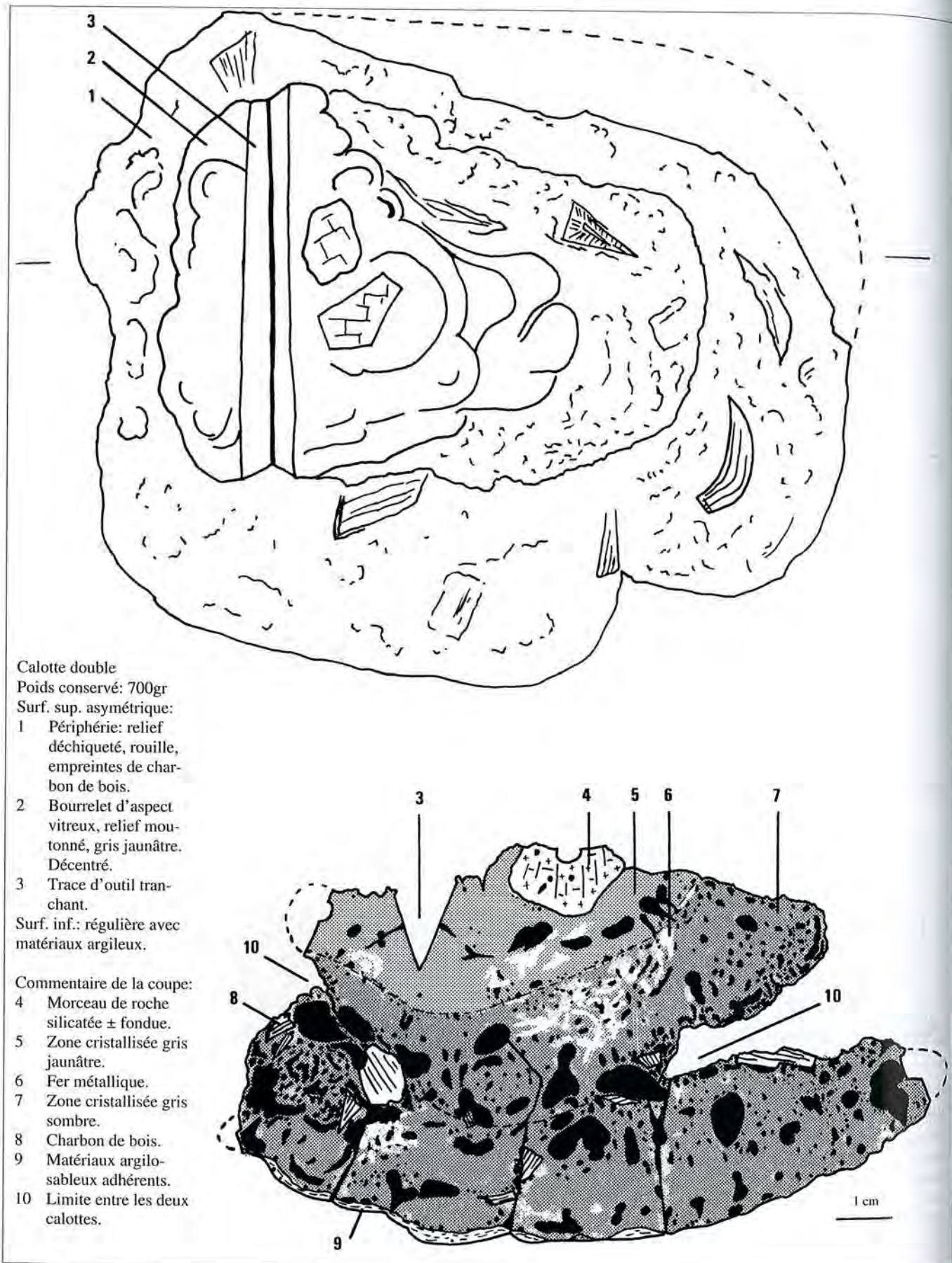


Fig. 176. Scorie en forme de calotte double. Ech. BAU 2 (Forel, Baulmes VD).

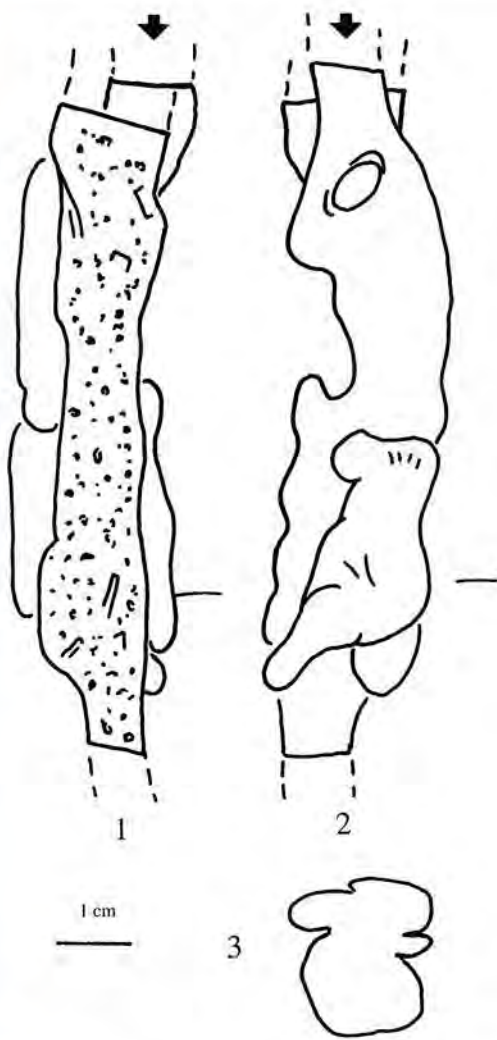


Fig. 177. Petites coulures de scories du site de Forel à Baulmes VD.  
Éch. BAU 21: 1: surface inférieure  
2: surface supérieure  
3: coupe

Une pièce complète, BAU 2, ainsi que 3 autres fragments, montrent clairement la trace d'un outil (fig. 176). Celle-ci coupe le bourrelet d'aspect vitreux perpendiculairement à l'allongement et s'enfonce de plusieurs centimètres dans la pièce. La largeur de la trace est de 5-6 cm. Cette marque n'a pu être faite que lorsque la scorie était encore molle et donc avant son refroidissement complet. Ceci indique que l'artisan nettoyait son foyer juste après son travail.

Les scories en goutte sont rares mais caractéristiques (fig. 174). Il en va de même pour les petites coulures de scories (fig. 177). Très peu de fragments de paroi sont conservés. L'un d'entre eux est constitué par une tuile romaine tordue par la chaleur et scorifiée. Il y a également quelques morceaux de métal, informes et impurs.

Les minéraux détectés par diffraction des rayons X sont la fayalite et la wüstite. Les analyses chimiques portent uniquement sur les calottes (Annexe 6.1, éch. BAU 1 à 6). Elles forment un groupe très homogène pour les majeurs comme pour les traces. Elles se distinguent nettement des scories de

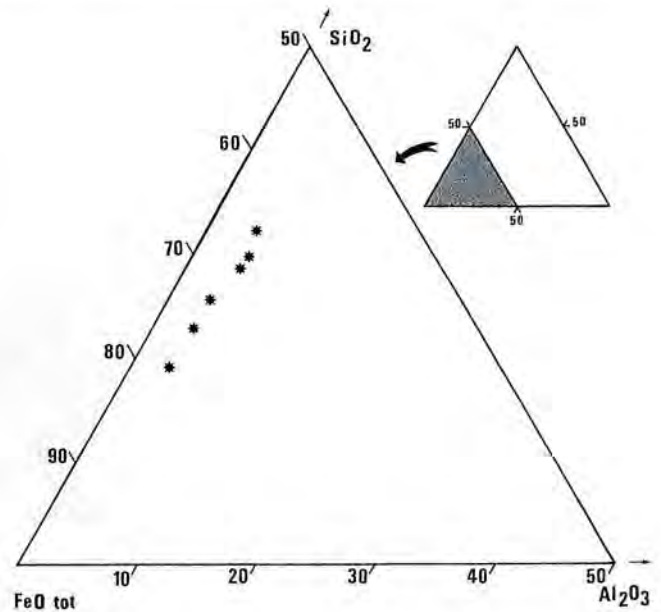


Fig. 178. Composition chimique des scories en forme de calotte de Forel à Baulmes VD.

réduction des régions proches. On relève de fortes teneurs en oxydes de fer. Al est bas et Ca particulièrement élevé et variable. Par rapport aux autres scories de travail post-réduction, elles présentent certaines particularités (Ba et Co pauvres, V élevé). Le rapport Si:Al est stable et avoisine 6:1 (fig. 178). Par rapport au matériaux du Mormont, proche, ces scories sont très riches en fer et en silice.

Cette cohérence interne du groupe chimique, avec ses particularités, fait penser que ces scories résultent toutes d'un travail identique: la réalisation de la même opération métallurgique, utilisant les mêmes matières premières. Il n'y a malheureusement pas d'argument décisif pour définir ce travail. Compte tenu de la structure interne et des dimensions des pièces, il semble probable que l'on soit en présence de résidu du raffinage des éponges de fer brut.

La présence du vanadium (teneurs proche de 100 ppm), élément caractéristique du Sidérolithique, mais non réduit au cours du traitement primaire du minerai, semble indiquer une participation importante de la scorie de réduction refondue (pp. 49-51). Cependant, le contenu en manganèse (0,1% MnO) n'est pas significatif. Pour le chrome, l'enrichissement est à peine marqué (autour de 50 ppm). Ces éléments apportent un argument chimique en faveur du raffinage.

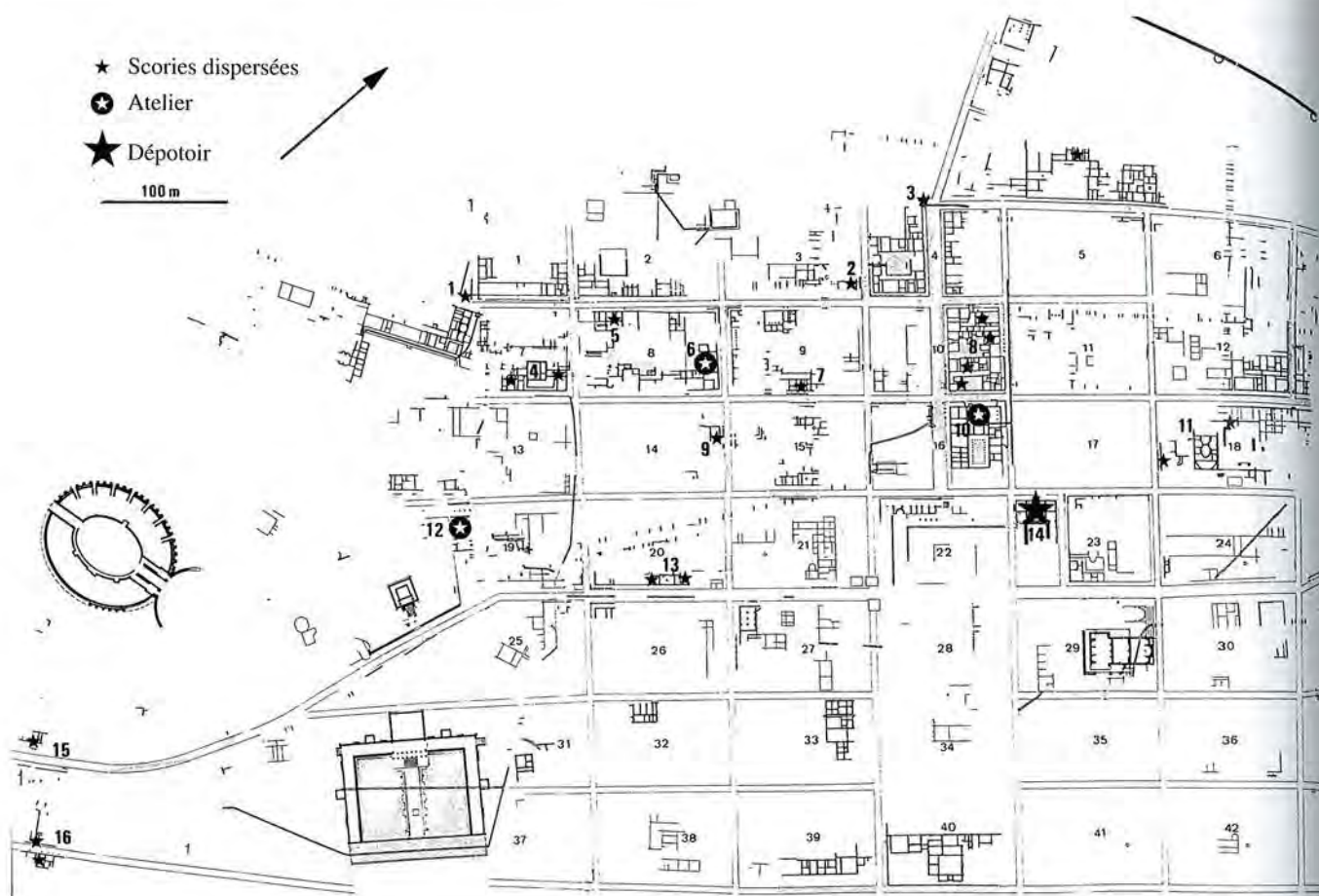


Fig. 179. Plan de la ville romaine d'Avenches et localisation des trouvailles anciennes de scories et vestiges métallurgiques. Voir fig. 180.

Localisation N° Fig. 179	Poids en gr	scories en calotte	scories informes	matériaux argilo- sableux	creuset	déchets de bronze	remarque
1	Insula 1	460	350	20			dispersé
2	Insula 3			210			dispersé
3	Insula 4			180			dispersé
4	Insula 7		180	210			dispersé
5	Insula 8 W			170			dispersé
6	Insula 8 E	4580	2270	1400	200	420	atelier
7	Insula 9			100	10		dispersé
8	Insula 10		90	4000	180	550	dispersé
9	Insula 14	880	790	770			dispersé
10	Insula 16			120			atelier
11	Insula 18	130	120	300			dispersé
12	Insula 19	1270	250	1450			atelier
13	Insula 20	1850	1050	710	230	80	dispersé
14	Insula 23	18850	10660	30850	1730	930	dépotoir
	Port	380	500	910	10		dispersé
15	St Etienne	1710	420	220			dispersé
16	St Martin	600	620	280			dispersé
	autres	2390	490	4130			dispersé
Total		33100	17790	46030	2360	1980	

Fig. 180. Liste des principales trouvailles anciennes de scories et vestiges métallurgiques d'Avenches. Voir fig. 179.

Poids conservé: 600 gr.

Surface supérieure convexe, ondulée, d'aspect vitreux, localement cassée.

Surface inférieure convexe régulière recouverte d'une pellicule argilo-sableuse oxydée.

Commentaire de la coupe:

- 1 Placage argilo-sableux riche en oxydes de fer = fond du foyer?
- 2 Gros nodule métallique fortement oxydé, localement vacuolaire.
- 3 Zone cristallisée gris clair, dense et assez homogène.
- 4 Charbon de bois.
- 5 Morceau de roche silicatée non fondu anguleux, noir.
- 6 Zone d'aspect vitreux jaune à vert olive, très riche en bulles.
- 7 Morceau de roche silicatée partiellement fondu (bulles) mais encore délimité (±anguleux) aspect vitreux, blanchâtre, bleuâtre ou noir.

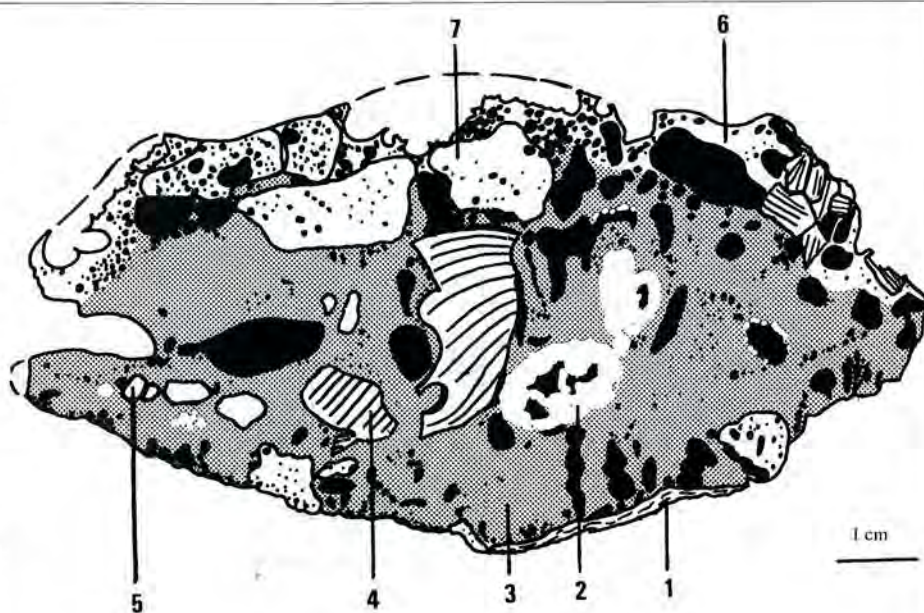


Fig. 181. Grande scorie en forme de calotte à structure très complexe. Ech.AVE14, Avenches VD. Coupe.

### Les ateliers et les scories d'Avenches

Depuis plus de deux siècles, le site d'Avenches a fait l'objet de fouilles archéologiques. Ce n'est que depuis quelques décennies que les témoignages de la métallurgie sont enregistrés et conservés. La collection de scories du Musée romain d'Avenches ne peut absolument pas être considérée comme représentative de l'ensemble des trouvailles qui eurent lieu. Toujours est-il que les réserves renferment une petite centaine de kilos de matériaux scorifiés divers. C'est cet ensemble qui a été étudié avec l'autorisation de M. H. Bögli. Les scories découvertes au cours des fouilles les plus récentes n'ont pas encore été étudiées (Morel 1991).

Dans tout le matériel, il n'y a aucune scorie coulée. Tout ce qui est conservé se rattache aux travaux post-réduction. La métallurgie du fer est bien représentée mais de nombreux produits se rapportent aux autres métaux et dans bien des cas, il est difficile de trancher de manière définitive. Quelques analyses témoignent soit de contamination dans les foyers soit de traitements polymétalliques.

#### Répartition des trouvailles

Des scories furent trouvées en de très nombreux points du site (fig. 180-184). Le gros du matériel conservé provient du remblai des anciens thermes du forum. Ceux-ci furent rasés et comblés pour permettre l'édification d'un temple, probablement un capitole, au début du II<sup>e</sup> siècle ap. J.-C. (Bögli 1975). Toutes sortes de matériaux furent utilisés pour réaliser le comblement dont des résidus provenant des ateliers métallurgiques de la ville. Au cours des fouilles, aucune attention particulière ne fut accordée à ce matériel et que ce qui est conservé n'est qu'un pâle reflet de ce qui fut excavé.

Bien que privées de contexte, certaines pièces sont intéressantes du point de vue de la forme et l'ensemble livre un panorama de l'activité des métallurgistes à Avenches au I<sup>er</sup> siècle ap. J.-C.

Les autres ensembles sont nettement moins volumineux et généralement difficiles à interpréter. Les vestiges de métallurgie apparaissent très dispersés dans la moitié W de la ville. Leur absence dans la moitié E n'est guère significative car celle-ci est nettement moins bien connue. Si des trouvailles sont situées en périphérie de la zone urbanisée, les scories ne sont pas absentes des quartiers du centre.

Une forge, située dans l'*insula* 16 a pu être identifiée (Bögli et col. 1970). Les scories correspondantes n'ont pas été retrouvées dans les réserves. Deux autres ateliers peuvent être situés d'après le matériel conservé. L'un se situe dans l'*insula* 8, l'autre dans l'*insula* 19.

Une petite dizaine de kilos de scories proviennent de l'*insula* 8, en particulier de nombreuses scories en forme de calotte. Elles étaient éparées dans une cour et dans les pièces adjacentes (zone M10-Z1, fouille 1967). Dans l'*insula* 19, le matériel est un peu moins abondant mais comporte des morceaux de paroi de foyers scorifiés qui attestent la présence d'une telle structure.

Les fouilles récentes au lieu dit Derrière la Tour, en bordure de l'*insula* 7, ont permis de mettre au jour des structures artisanales, en particulier un atelier de verrier (Morel 1991 et Morel *et al.* 1992). Des scories de fer ont également été retrouvées mais, pour le moment, aucune structure métallurgique. De même, à l'extérieur de la ville, au lieu dit En Châpoux, des traces de métallurgie sont attestées.

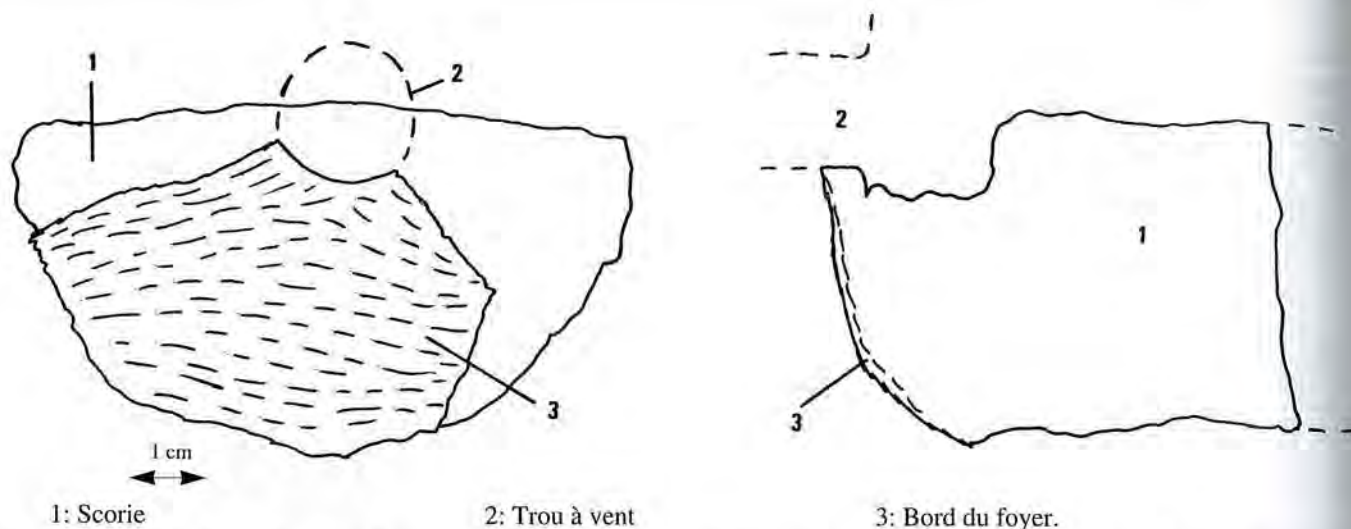


Fig. 182. Scorie en forme de calotte. Le morceau de bord du foyer arraché avec la scorie montre l'orifice de la soufflerie. Ech. AVE 108, Avenches VD. Vue latérale et vue de dessus.

### Les scories d'Avenches

Ce sont les matériaux argilo-sableux fondus ou scorifiés qui sont les plus abondants (env. 45kg). Ils comprennent des fragments de paroi de foyer, des scories en goutte et toutes sortes de morceaux informes.

Les scories en forme de calotte sont également nombreuses (fig. 181-184). Elles présentent une variété extrême à tous points de vue. Si la plupart d'entre elles sont petites, quelques-unes sont très volumineuses. Si la forme générale est toujours la même, les détails varient beaucoup.

Deux pièces sont particulièrement intéressantes car le morceau du bord du foyer qui a été arraché en même temps que la scorie présente nettement l'orifice du trou à vent (fig. 182 et 183). Ces objets apportent la confirmation de la position de la scorie en forme de calotte par rapport à l'orifice de la soufflerie. Au moins dans ces deux cas précis et sans doute de manière générale, la scorie en calotte se forme

immédiatement en dessous du trou à vent, lui-même situé à quelques centimètres au-dessus du fond du foyer. C'est un argument important pour la reconstitution de celui-ci.

La structure interne est très souvent caractérisée par la présence d'une zone supérieure claire et extrêmement riche en inclusions non fondues correspondant à un bourrelet d'aspect vitreux bien développé. Le volume occupé par cette zone, la taille et la répartition des inclusions ainsi que leur position dans la calotte varient considérablement. Dans certains cas, on observe de grandes quantités de fer métallique dans ces scories, fréquemment en nodules.

Dans la partie inférieure de nombreuses pièces, on observe des zones globuleuses gris sombre, se détachant dans un matériel cristallin gris jaunâtre fayalitique (fig. 184). L'examen microscopique permet de reconnaître des amas d'oxydes de fer en dendrites, probablement de la wüstite (fig. 185). La cristallisation des aiguilles de fayalite à travers ces

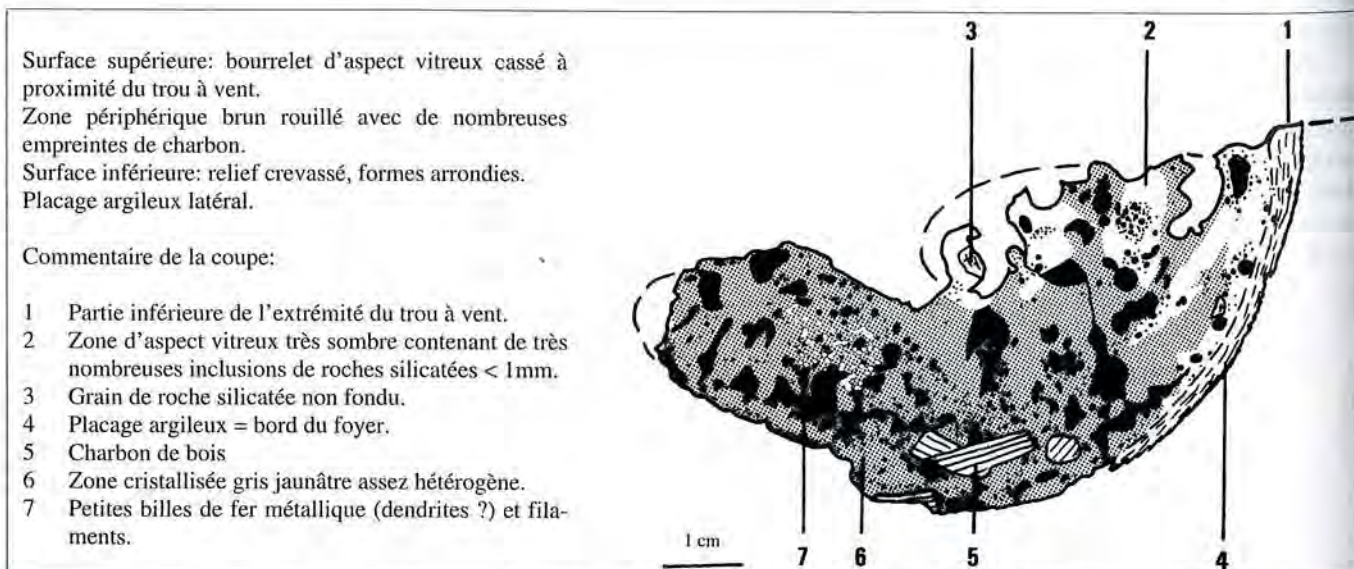


Fig. 183. Scorie en forme de calotte. Le morceau de bord du foyer arraché avec la scorie montre l'orifice de la soufflerie. Ech. AVE 99, Avenches VD. Coupe.

Poids conservé: 380 gr.

Surface supérieure: convexe, asymétrique.

Bourrelet vitreux très proéminent, relief ondulé, gris blanchâtre, localement bleu clair ou vert.

Périphérie avec un relief déchiqueté, inclusion de charbon et empreintes, développement de rouille.

Surface inférieure: convexe, régulière, recouverte par un placage argilo-sableux oxydé (fond du foyer?).

Commentaire de la coupe:

- 1 Morceau de roche silicatée non fondu, anguleux.
- 2 Zone d'aspect vitreux, couleur très variable suivant des domaines centimétriques aux contours flous (blanchâtre, jaunâtre, brunâtre, noire). Elle contient de très nombreuses inclusions < 1 mm non fondues claires. La quantité de bulles varie d'un domaine à l'autre.
- 3 Globule très sombre, cristallin. Zone riche en wüstite (voir fig. 185).
- 4 Placage argilo-sableux riche en oxydes de fer (rouille). Fond du foyer (?). Pas de bulles.
- 5 Zone cristallisée gris jaunâtre assez homogène, peu de bulles. On distingue clairement les aiguilles de fayalite de plusieurs mm de long.
- 6 Charbon de bois.

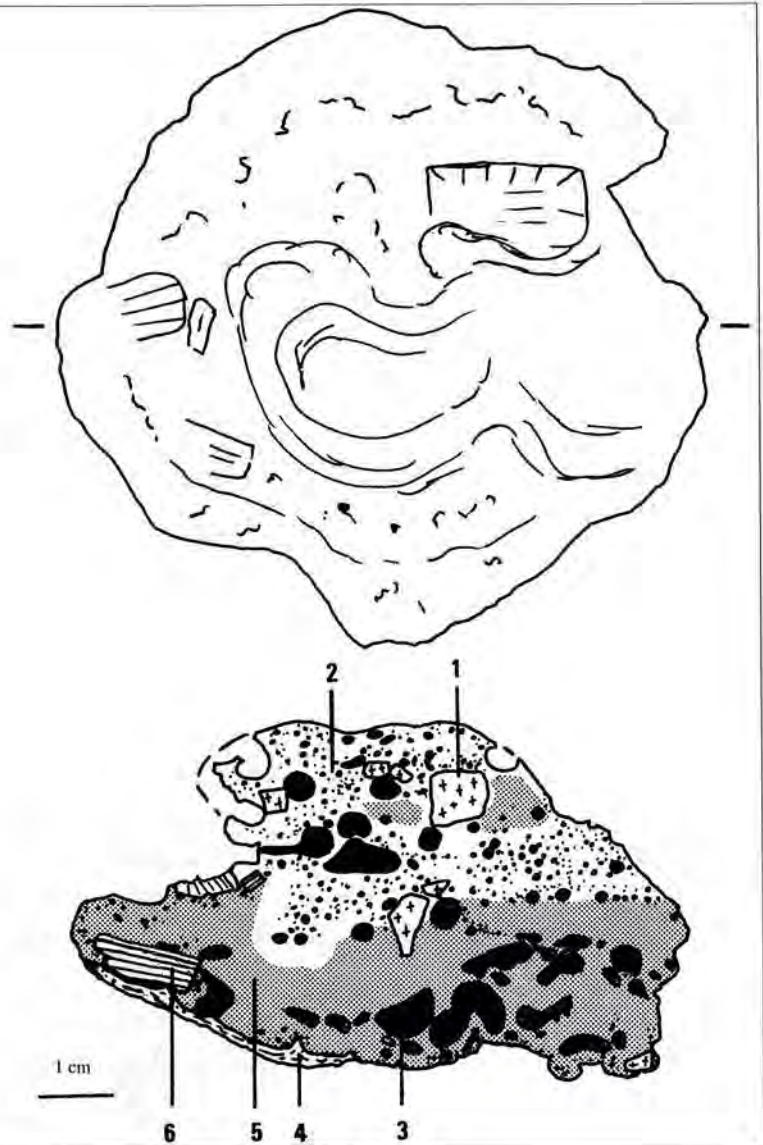


Fig. 184. Scorie en forme de calotte hétérogène. Ech. AVE 9, Avenches VD. Vue de dessus et coupe.

zones est postérieure mais démontre que le matériel est à l'état liquide. Cet habitus fréquent et connu par ailleurs, ne peut pas être expliqué facilement (Senn 1992, fig. 56; Mc Donnel 1991, 26).

L'interprétation de ces figures comme des battitures incomplètement refondues n'est pas totalement satisfaisante. Elle n'explique pas la forme de ces globules et leur taille parfois centimétrique. Elle ne rend pas compte non plus de la cristallisation des aiguilles de fayalite au travers de ces structures. Une autre hypothèse peut être envisagée: on pourrait avoir formation de deux liquides immiscibles. Cette possibilité a été démontrée dans le système  $K_2O-FeO-Al_2O_3-SiO_2$  mais devrait être étudiée pour les compositions réelle des scories en forme de calotte où ces structures sont observables (Visser et Koster Van Groos 1979).

Les données disponibles sur ce problème sont actuellement insuffisantes pour trancher. Cette hypothèse serait particulièrement intéressante puisqu'elle permettrait de relier objectivement les scories en forme de calotte à des phases de

travail de martelage.

Sur l'ensemble du matériel scorifié conservé au Musée d'Avenches, une bonne centaine de calottes ou de fragments ont été identifiés. Pour 86 pièces, il est possible d'estimer le poids initial. 90% des objets se situent entre 100 et 600 gr (fig. 186). Ce sont donc en majorité de petites pièces.

#### Les analyses chimiques des matériaux scorifiés d'Avenches

Une quinzaine d'échantillons provenant d'Avenches ont été étudiés au laboratoire. La plupart sont des scories en calotte. Elles montrent des compositions chimiques très variables (fig. 187). Il faut rappeler les difficultés qu'il y a pour obtenir des analyses significatives pour des échantillons hétérogènes.

Certaines teneurs en fer sont cependant particulièrement basses et c'est une tendance assez nette du groupe. Le CaO varie beaucoup (2 à 10%), de même que  $K_2O$  (1 à 4%). Le rapport Si:Al varie d'un échantillon à l'autre (de 5,5:1 à 9,5:1). Il reste toujours très élevé contrairement à ce que l'on

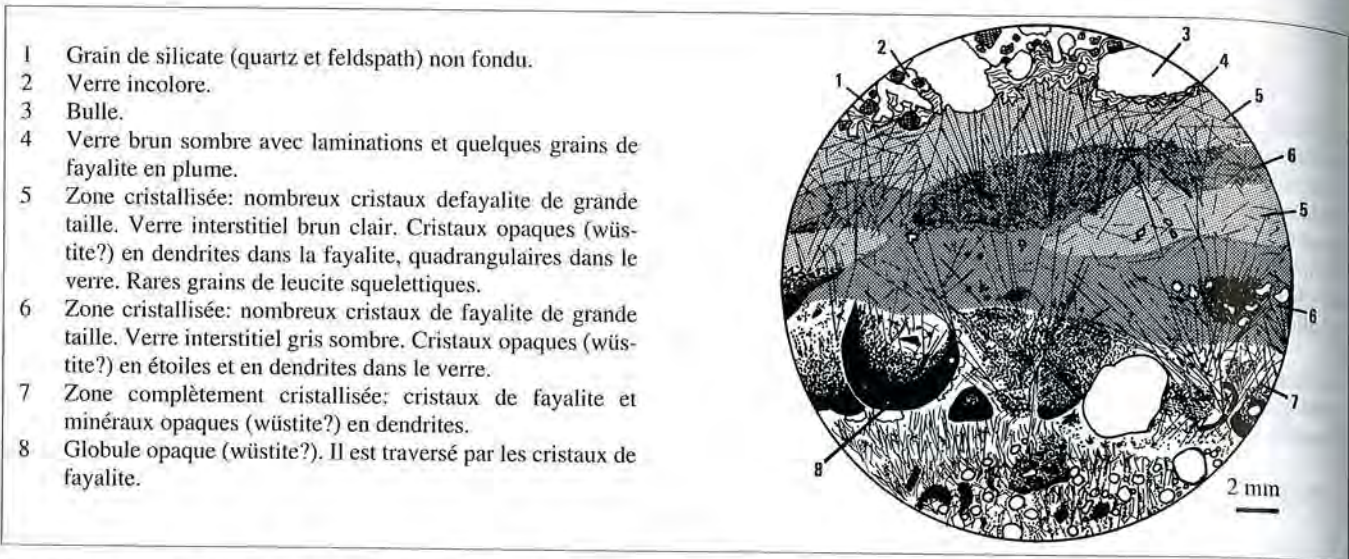


Fig.185. Scorie en forme de calotte hétérogène. Ech. AVE 9, Avenches VD. Texture microscopique.

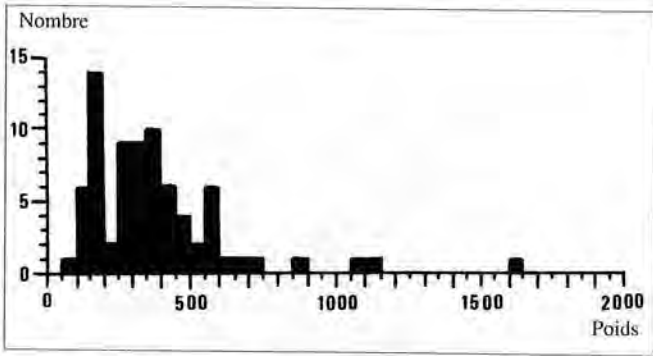


Fig. 186. Histogramme des poids estimés des scories en calotte d'Avenches VD.

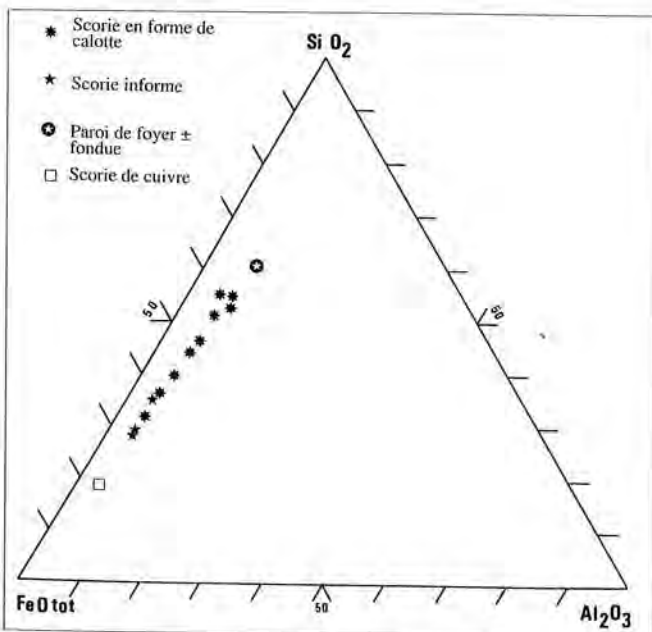


Fig. 187. Compositions chimiques des matériaux métallurgiques d'Avenches.

mesure pour les scories de réduction. De même, le contenu en alcalins est bien plus important.

Les éléments traces sont très variables, en particulier les éléments métalliques (Pb, Cu, Ni, Co, Sn et Sb). L'échantillon AVE 15, avec plus de 4% de Cu est clairement une scorie de cuivre (scorie informe vitreuse rouge avec billes de cuivre métallique visibles). Les autres hautes teneurs en métaux indiquent peut-être que les pièces concernées sont issues du traitement de ces métaux. Il est également possible d'envisager une pollution due au travail de plusieurs métaux en même temps (brasage, décoration) ou successivement dans le même foyer. Près d'un échantillon sur deux présente une anomalie en l'un ou l'autre métal.

Les résultats d'analyses d'Avenches sont, pour les majeurs comme pour les traces, assez comparables à ceux de Vidy (pp. 127-130; Annexe 4.9) et d'Yverdon (Annexe 6.1).

#### La métallurgie à Avenches

Les activités métallurgiques ont laissé de nombreuses traces à Avenches (scories diverses, creusets, outils de forgeron ou d'orfèvre). Les vestiges apparaissent dispersés dans la ville sans que l'on puisse percevoir une organisation spatiale.

En ce qui concerne la sidérurgie, on constate l'absence de résidus du traitement du minerai de fer. Les scories étudiées ne peuvent se rapporter qu'aux étapes de travail postérieures à la réduction. La grande majorité des scories en forme de calotte trouvées à Avenches sont des pièces de taille réduite. La plupart sont hétérogènes et présentent des structures très complexes. Cet ensemble pourrait être interprété comme le reflet de travaux variés. Les analyses, quoique peu significatives, reflètent aussi cette variété. Il semble clair qu'une bonne partie des objets témoignent d'activités de forge proprement dite. Seuls quelques-uns pourraient se rapporter au raffinage d'éponges de fer brutes. Si c'est le cas, cette activité paraît plutôt marginale.

Les échantillons analysés ne forment pas un groupe cohérent du point de vue chimique. Les conditions de prélèvement suffiraient à expliquer ce fait. On peut également y voir un argument en faveur d'une activité métallurgique variée.

## La région des lacs de Neuchâtel et Bienna et ses relations avec les régions voisines

Dans la région des lacs de Neuchâtel et de Bienna, les ressources minières paraissent très maigres. L'exploitation ancienne n'est pas encore confirmée de manière satisfaisante. Elle n'est probable qu'à petite échelle. Cette entité ne paraît donc pas autosuffisante. Au contraire, la métallurgie de transformation est très présente. Elle est intimement liée à la densité de l'occupation. Elle semble diffuse, c'est-à-dire qu'aucun site ne joue un rôle économique prépondérant dans ce domaine. Les vestiges de métallurgie de chaque site ne témoignent pas d'une activité dépassant le cadre des besoins locaux. L'artisanat est aussi bien rural qu'urbain.

Il n'est pas possible de relier matériellement les traces du travail post-réduction avec des témoignages connus de métallurgie primaire. Les ateliers de réduction de la région du Mormont sont situés à faible distance, 15 km, des rives du lac de Neuchâtel et leurs produits pouvaient être acheminés jusque là par voie d'eau depuis Orbe. Le district minier et métallurgique du Jura-Delémont n'est guère plus éloigné mais un bref parcours terrestre est nécessaire. Enfin, l'Aar permet d'acheminer sans difficulté majeure les marchandises depuis le Rhin. Dans cette région le marché du fer a pu être approvisionné de multiples façons.

### Les lingots de fer

Mis à part les scories de fer, témoignages archéologiques des activités sidérurgiques, une autre catégorie d'objets fournit des informations très importantes sur l'industrie du fer: les lingots. Dans la région des trois lacs, Neuchâtel, Bienna et Morat, de nombreuses trouvailles de lingots de fer ont été faites depuis le siècle passé. Pour cette raison, il est nécessaire d'aborder ce sujet même si les données sont uniquement fournies par la bibliographie.

Par définition, les lingots sont des produits métalliques destinés au stockage, au transport et au commerce. La nature et la forme des lingots doivent être adaptées à ces fonctions. Elles sont de plus influencées par les aspects techniques.

Pour le fer, il existe deux grands types d'objets qui sont interprétés comme des lingots: les barres et les lingots bipyramidaux (fig. 188). D'autres types de lingots sont connus, en particulier en Scandinavie et en Europe de l'E (Buchwald et Voss 1992; Hegedus 1962; Magnusson 1986, 272-280).

Les barres de fer présentent des formes qui varient énormément dans le détail. Elles mesurent entre 15 et 150 cm. La section est quadrangulaire, aplatie ou carrée. Elle n'est pas toujours constante. Le poids des pièces varie de quelques centaines de grammes à 1 ou 2 kg. L'une des extrémités est parfois travaillée (recourbée, enroulée, en éventail).

Lorsque l'on travaille le fer à la forge, la barre est une forme «naturelle», c'est-à-dire pratique. Elle est aisément manipulable avec des tenailles. Elle offre des surfaces planes pour le martelage. Sa section relativement faible permet de la

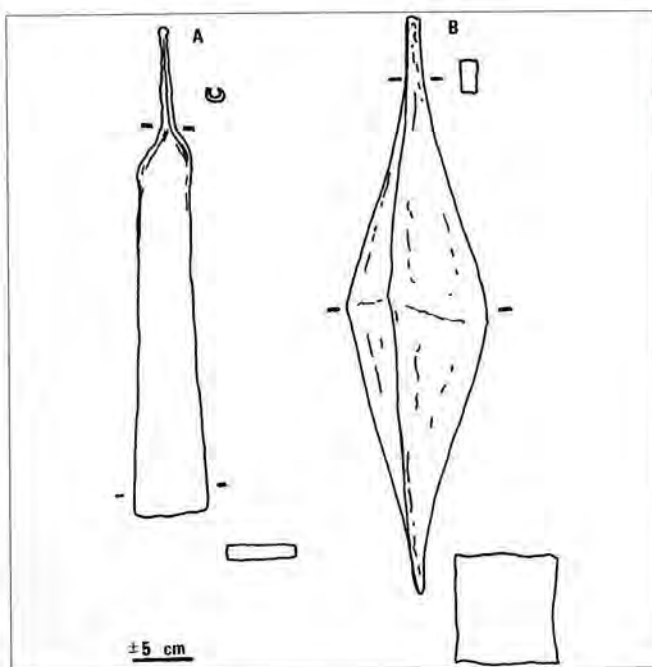


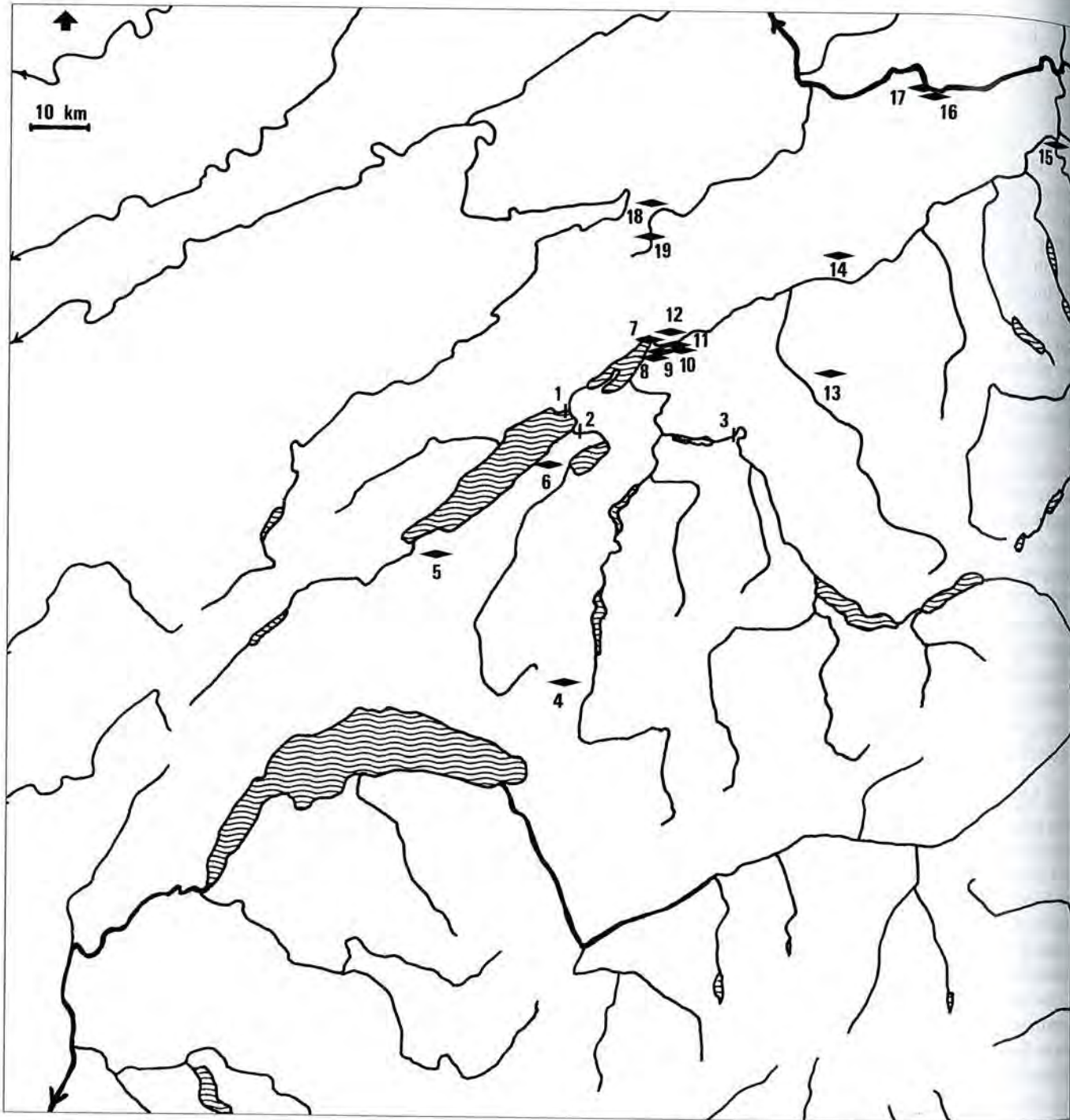
Fig. 188. Schéma des deux types principaux de lingots. A: barre B: bipyramide.

réchauffer rapidement. Elle se coupe et se divise sans difficulté. Les barres se manipulent, se transportent et se stockent facilement. C'est la forme d'une matière première prête à l'emploi, mais qui a déjà été longuement travaillée. Dans la plupart des cas, les barres sont constituées de fer pur ou faiblement carburé contenant peu d'inclusions de scorie.

Le fer en barre était encore commercialisé au XIX<sup>e</sup> siècle. Il est probable que, dès l'invention de la sidérurgie, le fer fut stocké, transporté et commercialisé sous cette forme. Dans un contexte régional, il est possible de tirer des informations chronologiques plus précises à partir des détails morphologiques.

En Suisse occidentale, quelques exemples de barres sont bien connus (fig. 189). Les découvertes les plus importantes sont celles de La Tène (Marin-Epagnier NE; Vouga 1923) et de Tiefenau (Berne, Engehalbinsel BE; Müller 1990; Tschumi 1929). Dans les deux cas, les barres ont été trouvées en même temps que de grandes quantités d'objets en fer, en particulier des armes, de la fin de l'âge du Fer. D'autres découvertes sont attribuées à la même région. Un lingot de la collection O. Schwab, à Bienna, est attribué «au lac de Neuchâtel ou de Bienna» (Keller 1858, pl. 3, N° 38). Un autre se trouve au musée de Morat et provient du lit de la Broye (Schwab 1989, 218-219). Si les barres de La Tène ont toutes une extrémité enroulée, à Tiefenau, elles sont beaucoup plus variées.

Des barres de fer antiques comparables sont connues au N des Alpes depuis le centre de la France jusqu'au centre de l'Allemagne ainsi qu'en Angleterre (Schäfer 1984; Müller 1990, 161-164; Allen 1967). Elles sont généralement datées de l'âge du Fer. En dehors de cette aire géographique, le problème est très mal connu mais le commerce des barres de fer est attesté (Monguilan 1987).



**Lingots en barre (N° 1 à 3)**

- 1 La Tène NE
- 2 La Sauge FR (Schwab 1989, 218)
- 3 Tiefenau BE
- 4 Enney FR (non publié, service archéologique cantonal de Fribourg)
- 5 Yvonand VD (Pelet 1993, 97)
- 6 Chabrey VD
- 7 Nidau BE
- 8 Bellmund BE
- 9 Port BE

**Lingots bipyramidaux (N° 4 à 19)**

- 10 Schwadernau «Schulweg» BE
- 11 Schwadernau «Zhil» BE
- 12 Nidau BE
- 13 Ersingen BE
- 14 Walliswil BE
- 15 Brugg AG
- 16 Kaiseraugst AG
- 17 Augst BL
- 18 Undervellier JU (Quiquerez 1866, 24)
- 19 Boécourt JU (Quiquerez 1866, 24)

Fig. 189. Carte de répartition des trouvailles de lingots de fer en Suisse occidentale (références non spécifiées dans Müller 1990).

L'autre forme typique des lingots de fer est celle d'une double pyramide à base quadrangulaire, généralement carrée (fig. 188).

Ces lingots sont massifs et trapus, longs de 20 à 30 cm, larges de 5 à 10 cm et pesant de 5 à 10 kg. Les détails typologiques permettent de définir plusieurs catégories qui restent difficiles à interpréter en termes de différences d'origine ou de chronologie (Kleemann 1961, 1966 et 1981). Certaines pièces sont de formes proches mais avec des variantes (Müller 1985, Rougier 1987).

Ces lingots bipyramidaux sont plus difficiles à travailler à la forge à cause de leur masse. Par contre, ils pourraient correspondre à la première mise en forme de l'éponge de fer produite dans le bas fourneau. Partant d'un bloc informe équidimensionnel, on aboutit assez naturellement à une forme bipyramidée par refoulage des contours (Thouvenin 1984).

Quelques études métallographiques de lingots bipyramidaux montrent la présence d'une quantité importante de scorie en inclusion (France-Lanord 1963; Rådeker et Naumann 1961). Ces lingots pourraient donc représenter un stade de travail moins avancé que les barres.

La forme se prête relativement bien au transport et même à l'emballage (Mutz 1981). Ils sont d'ailleurs souvent trouvés par groupe.

On signale de nombreuses trouvailles de lingots de ce type en Suisse occidentale (Müller 1990, 164-165, fig. 189). Elles sont réparties préférentiellement le long de l'axe fluvio-lacustre lac de Neuchâtel-Aar-Rhin avec une nette concentration au N du lac de Bienne. La découverte de 16 lingots à Schwadernau BE en 1977, est particulièrement intéressante, car elle peut être interprétée comme un ensemble de pièces perdues au cours d'un transbordement (Kaenel H.M. von 1981).

L'aire de répartition générale des lingots bipyramidaux est assez étendue. Ils sont très nombreux dans la région comprise entre Genève, Vienne et Cologne mais on en connaît jusqu'au Danemark, en Slovénie et dans l'O de la France (Kleemann 1961 et 1981). Cela, sans parler du parallèle troublant mais probablement non pertinent, des découvertes du palais de Korsabad, Irak (Place 1867). Pour des objets de ce type, on propose des datations depuis le premier âge du Fer jusqu'au Haut Moyen Age.

Les données archéologiques sur les lingots de fer restent très ambiguës. Dans l'état actuel des connaissances, il ne semble pas possible d'attribuer les divers types à des cultures différentes. Les aires de répartition et les données chronologiques font apparaître des différences et des recouvrements complexes.

Une approche différente serait de considérer les deux types de lingots comme complémentaires, témoignant d'étapes techniques différentes dans l'élaboration du métal. Le lingot bipyramidal représenterait le résultat d'une opération de raffinage d'une éponge de fer. Par la suite, il serait divisé en morceaux plus petits et complètement épurés, les barres. Les deux types de produits étant commercialisés parallèlement. Les formes répondraient aux impératifs techniques liés à cette hypothèse. De plus, elles fonctionneraient comme signes de reconnaissance, le client sachant quelle est la qualité du métal qu'il acquiert grâce à la forme de l'objet.

Des arguments en faveur de cette hypothèse sont apportés par les travaux expérimentaux de P. Crew en Angleterre où les barres longues et courtes pourraient également témoigner d'étapes de travail successives (Crew 1991). Cette hypothèse ne résoud malheureusement pas toutes les questions.

Les contextes des découvertes archéologiques sont malheureusement souvent mal documentés. On remarque cependant que les barres de fer à extrémité travaillée ont été trouvées dans des contextes culturels (dépôts) ou artisanaux (ateliers). Les lingots bipyramidaux, proviennent fréquemment de contextes de transport, plus rarement d'ateliers.

La question du lieu de production exact de ces objets reste encore complètement ouverte. Il n'y a pas plus d'arguments en faveur d'une production locale ou dans les aires adjacentes que pour une origine plus lointaine à l'intérieur de l'aire de répartition principale. On notera tout de même que la zone au N du lac de Bienne où les trouvailles de lingots bipyramidaux sont les plus nombreuses correspond au point de rupture de charge entre la route terrestre romaine venant du district minier et métallurgique du Jura-Delémont et la grande voie commerciale E-O du Plateau.

## LES SCORIES DE LA FORGE DE MARSENS, EN BARRAS

(FRIBOURG, SUISSE)

**L**E vicus gallo-romain de Marsens est connu depuis le siècle passé. Au cours de la construction de l'auto-route RN 12 à travers la Gruyère, le temple de Riaz, Tronche-Bélon fut redécouvert, fouillé et déplacé. En même temps, des fouilles importantes permettaient de dégager une partie d'un quartier d'habitat. Une quantité considérable, plus de 2 tonnes, de matériaux scorifiés provient de ce site.

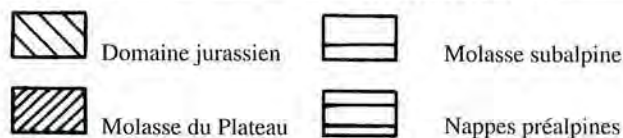
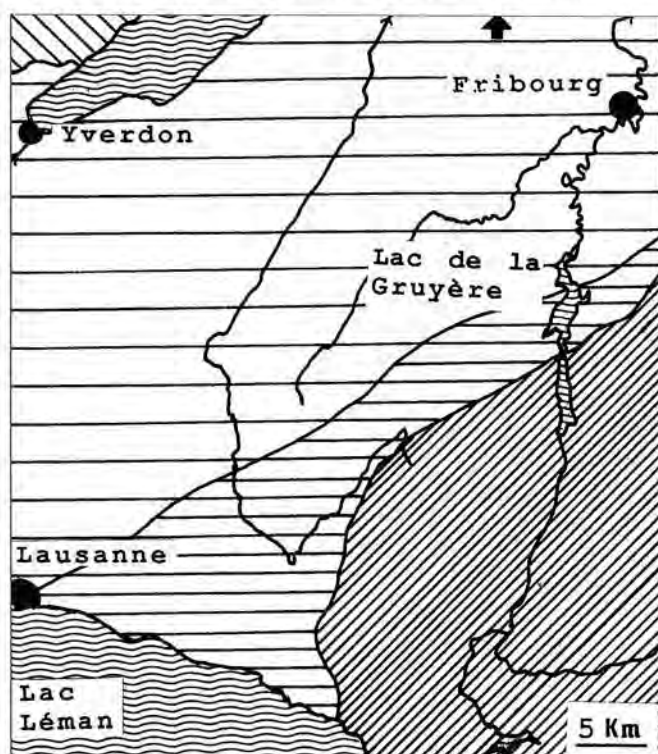


Fig. 190. Esquisse tectonique des régions voisines de la Gruyère.

Seule l'étude préliminaire d'un échantillonnage des scories a pu en être menée à bien. Dans cette région, les connaissances, tant sur le plan minier que sur celui de l'histoire de la sidérurgie, sont encore très lacunaires. Au stade actuel, beaucoup d'hypothèses restent donc à vérifier.

La Gruyère est une région aux reliefs peu accentués, située entre 700 et 900 m d'altitude. Elle se trouve au pied des premiers sommets des Préalpes (2000 m et plus). Elle est traversée du S au N par la Sarine qui se dirige vers les basses plaines situées au pied du Jura. C'est un pays de collines aux caractéristiques intermédiaires entre la montagne et la plaine. Le climat y est déjà rude, mais le sol encore fertile. La Gruyère est en contact avec le bassin lémanique, par Châtel-Saint-Denis ou Oron et avec le reste du Plateau suisse par la vallée de la Sarine. Elle contrôle l'accès à l'arrière-pays montagneux (haute vallée de la Sarine).

La Gruyère se trouve au front des nappes des Préalpes, dans le domaine où les sédiments tertiaires molassiques ont été fortement déformés par les mouvements tectoniques alpins (fig. 190).

L'occupation humaine de cette zone relativement peu favorable semble remonter à la préhistoire. Dès le milieu second âge du Fer, le peuplement se développe comme en témoignent plusieurs nécropoles (Kaenel 1991, 320). Un axe de circulation semble se mettre en place entre Vevey, sur les bords du Léman, et la région bernoise.

A l'époque romaine, plusieurs établissements ruraux sont connus en Gruyère (Schwab 1992). Si la route de Vevey à Avenches se déplace vers l'O, par Oron et Moudon, un axe secondaire est identifié dans la vallée (Aebischer 1930). Le vicus de Marsens-Riaz se développe autour de son sanctuaire (lieu dit Tronche-Bélon). C'est probablement le centre culturel de la région et un lieu de passage le long de la route.

Plusieurs nécropoles importantes attestent du maintien d'une population dense pendant le Haut Moyen Age. La richesse de certains sites indique même un niveau de vie assez élevé.

## La mine de fer de Hautaudon

La bibliographie fournit très peu d'indices concernant l'éventuelle exploitation de minerai de fer dans la région. Il n'est généralement fait allusion qu'à une seule mine, aux «Rochers-de-Naye» (fig. 191). Celle-ci se situe plus exactement sur le versant E de la Dent de Hautaudon, en territoire fribourgeois (565450/143750/1830). L'affleurement est porté sur la carte géologique (Feuille 1264 Montreux; Badoux 1965). Des traces d'extraction ont été observées sur le terrain (Weidmann M., com. pers.). L'histoire d'une tentative d'exploitation peu fructueuse, à la fin du XVI<sup>e</sup> siècle, a pu être retracée (Pelet 1970b, 121-123). Un haut fourneau fut même érigé dans le fond de la vallée de l'Hongrin (coordonnées 567625/144150).

Le matériau exploité fait partie de la «Croûte minéralisée à structure stromatolithique des Chenaux Rouges», faisant partie des Couches Rouges (Turonien-Yprésien; Guillaume 1986, 68-74). Il s'agit d'un horizon de quelques centimètres d'épaisseur constitué d'une gangue marneuse rougeâtre ou noirâtre emballant des concrétions à structure stromatolithique. Le tout est imprégné d'hydroxydes de fer. Localement, ce matériel s'insinue dans des fissures et des structures de dissolution à la surface des couches plus anciennes. Ce niveau s'est formé dans des conditions d'érosion sous-marine en milieu peu profond au Paléocène («hard ground»). Dans ce secteur et dans celui du barrage de l'Hongrin, ce niveau se développe sur les Calcaires Plaquetés du Crétacé inférieur. Ceux-ci contiennent des concrétions diagenétiques complexes de sulfures de fer et de cuivre. Ces concrétions pyriteuses se retrouvent, remaniées et complètement oxydées, dans la croûte d'altération plus jeune (Bertrand et Weidmann 1979). Un plan de la commune de Montbovon, daté de 1742, indique un autre emplacement de mine, sur le versant frigourgeois des Rochers-de-Naye (coordonnées 565725/143200; Pelet 1978, p.121).

Ce même niveau a été reconnu dans l'ensemble des Préalpes Médiannes (Guillaume 1986, 70). La puissance et la teneur en fer sont très variables. C'est lorsqu'il se développe sur les Calcaires Plaquetés que l'on peut espérer les teneurs les plus élevées. Des échantillons fournis par M. Weidmann sont en cours d'analyse. Les résultats préliminaires indiquent des teneurs très basses en fer. Ce que l'on sait de la tentative d'exploitation malheureuse confirmerait ce point. Si une tentative moderne d'utilisation de cette formation géologique est clairement attestée, rien ne prouve une exploitation antique. Au contraire, ce gisement est petit, situé à l'écart et à très haute altitude. Par ailleurs, plusieurs indices toponymiques existent dans la partie alpine de la Gruyère. Dans l'état actuel des connaissances, ils ne sont pas mis en relation avec une industrie connue. Si l'extraction de ce minerai en d'autres points est imaginable, elle n'est pas démontrée. Le domaine des nappes préalpines peut renfermer quelques minéralisations; les terrains molassiques sont encore moins favorables à la formation de minerai de fer.

## Le site de Marsens

### La route et les bâtiments

Entre les villages de Marsens et de Riaz, sur la rive gauche de la Sionge, un important établissement romain fut découvert au siècle passé (Gremaud 1854 et 1855). Les fouilles récentes ont mis au jour un temple gallo-romain et une partie du vicus (fig. 192). Les données chronologiques démontrent une occupation du I<sup>er</sup> au III<sup>e</sup> siècles ap. J.-C.

La situation après les invasions de 256 ap. J.-C. n'est pas connue. Une nécropole du Haut Moyen Age, de plus de 400 tombes, est installée par la suite.

Le temple a connu deux étapes de construction (Vauthey 1985, Meylan et Bonnet-Borel 1992). Des traces d'occupation ont été repérées principalement au N et à E dans un rayon de quelques centaines de mètres. Les fouilles ont mis au jour des installations thermales. Une voie romaine traverse le site. Une nécropole est localisée au N.

Au cours de la campagne de sondages de 1981, des quantités importantes de matériaux scorifiés furent découverts, en particulier le long de l'ancienne route de Riaz à Marsens («sondage F»: Schwab 1984, 70-72, Meylan 1988). Des fouilles systématiques eurent lieu dans ce secteur en 1983 et 1984 sous la direction locale de P.-A. Vauthey (Vauthey 1985b, 1988 et 1989) complétées par quelques travaux en 1985 et 1986. La zone fouillée couvre environ 3500 m<sup>2</sup> et correspond à la bordure occidentale du vicus qui s'étend encore dans les parcelles situées à l'E.

Six bâtiments rectangulaires (50 à 100 m<sup>2</sup> de surface), séparés les uns des autres, sont alignés le long de la route romaine bordée de fossés (fig. 193). Les bains se trouvent au

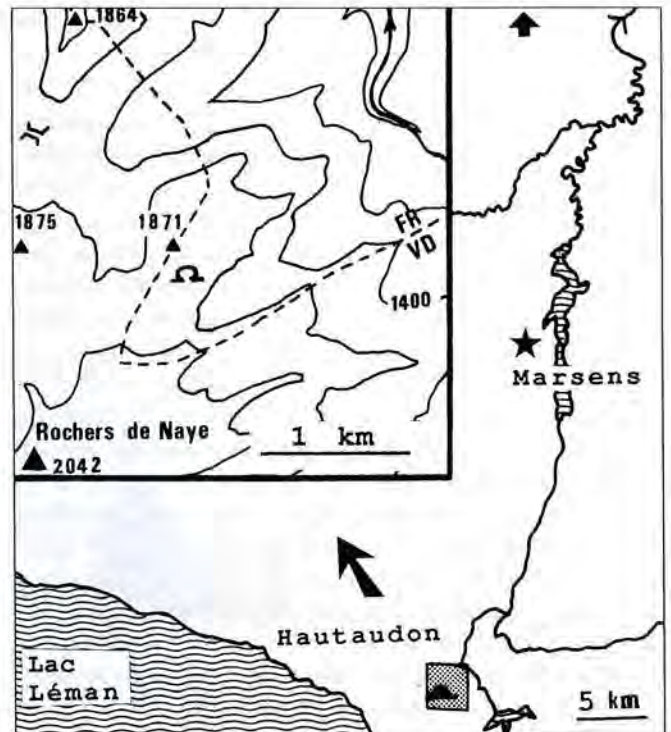


Fig. 191. Carte de situation de la mine de Hautaudon.

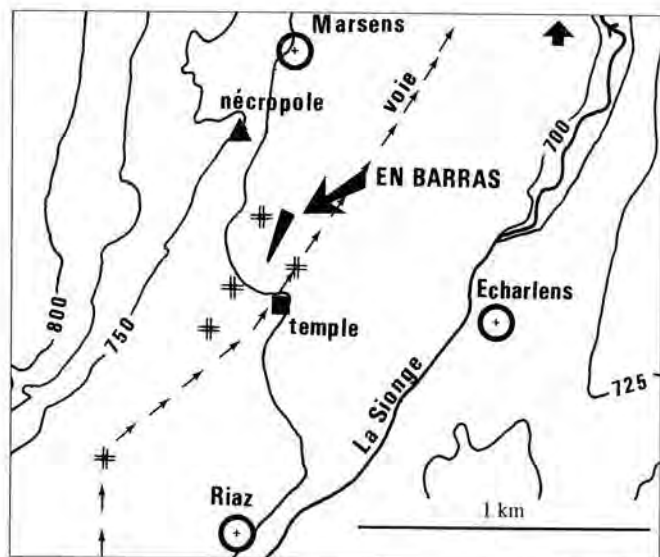


Fig. 192. Schéma du vicus gallo-romain de Marsens-Riaz. Les doubles croix indiquent des vestiges romains reconnus.

N, un peu à l'écart. C'est la seule construction maçonnée. Compte tenu du mode de construction et de l'état de conservation, les structures archéologiques restent difficiles à interpréter. Leur étude est encore en cours.

### Répartition des scories et structures associées

Les données archéologiques concernant le site de Marsens, En Barras, sont encore en grande partie inédites. P.-A. Vauthey, responsable de la fouille, a bien voulu communiquer les informations nouvelles sur la répartition spatiale des vestiges métallurgiques. La quantification globale du matériel a été effectuée par les membres du Service archéologique cantonal de Fribourg dont les résultats sont utilisés ici.

Les matériaux scorifiés sont éparés sur tout le site. En tout, plus de 2 tonnes de débris métallurgiques ont été récoltées. En fait, environ 80% du matériel provient d'une zone restreinte de quelque 300 m<sup>2</sup> située au NE entre la route et le fossé latéral (fig. 193). Une partie de cette zone est solidement empierrée et un grand foyer, de 1,5 m de diamètre a été identifié en périphérie. Une couche de terre noire, mêlée de charbon et contenant d'innombrables battitures et petits fragments de scories s'étend près du foyer. Le tout correspond certainement à un atelier de forgeron. Il est apparemment installé en plein air, mais un abri léger a fort bien pu ne laisser aucune trace. Le détail de l'organisation spatiale ne sera connu que lorsque l'étude stratigraphique aura pu progresser.

Les autres concentrations de scories sont nettement moins importantes. Elle peuvent correspondre aux rejets d'autres ateliers ou à des épandages de débris provenant du secteur principal. Les foyers installés à l'intérieur des bâtiments ne peuvent pas être clairement mis en relation avec le travail du fer. Si des scories sont présentes dans les remplissages, il en est de même pour toutes les couches archéologiques du site. Aucun détail technique ne permet de définir la fonction de ces structures.

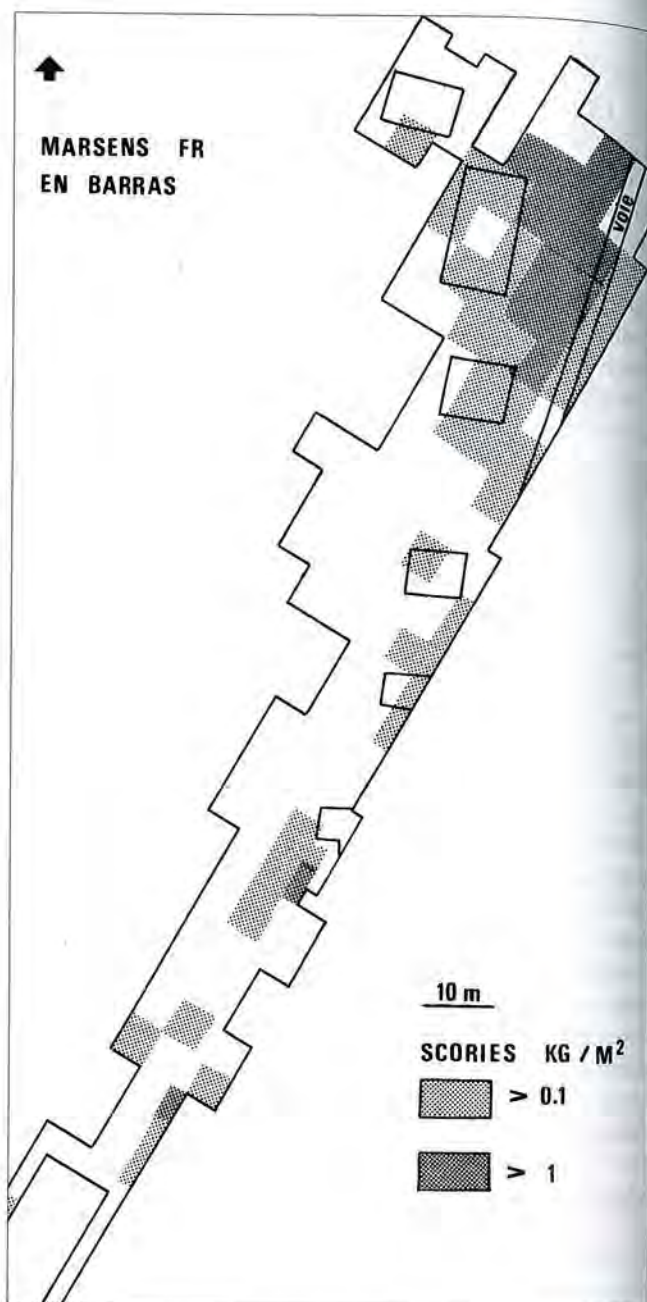


Fig. 193. Plan schématique des fouilles du vicus romain de Marsens FR, En Barras. D'après les documents établis par P.-A. Vauthey (Service archéologique de Fribourg).

## Les scories de Marsens

Les 2 tonnes de scories trouvées à Marsens n'ont pas pu être étudiées dans leur ensemble. Une centaine de pièces seulement ont été prélevées. Cet échantillon comporte des exemples des principales catégories de matériaux que l'on peut trouver sur le site. Par contre, les proportions entre les catégories ne peuvent pas être déduites sur cette base.

Aucune scorie coulée n'a été identifiée. Tout le matériel peut être interprété comme des résidus des travaux post-réduction.

### Les parois de foyer

Les éléments de placage argileux, scorifié sur une face et cuit sur l'autre sont nombreux (Ech.MRS 790 et 1000, pas d'analyse). La surface scorifiée a fondu et présente un aspect vitreux caractéristique. A l'inverse, l'autre face n'était pas en contact avec le feu et porte des traces d'arrachement.

Le matériau est, en général, fin et argileux. Il ne contient que 5 à 10% de grains de roches visibles à l'œil nu. Certains sont centimétriques. Ces éléments sont généralement anguleux. On note aussi la présence de traces de végétaux en quantité limitée (paille). En coupe, on observe le passage graduel du matériau primitif à un produit scorifié. Les teintes sont très variables.

### Les SAS: scories argilo-sableuses

Une grande variété de produits scorifiés sont regroupés sous ce vocable. Leurs caractéristiques communes sont d'être très légères, riches en bulles et constituées en grande partie de matériaux argilo-sableux plus ou moins fondus.

Elles se distinguent des parois de foyer par le fait que la masse a subi l'action de chaleur de tous les côtés et non pas sur une seule face. Les surfaces sont toutes scorifiées et présentent des reliefs mamelonnés. Les formes sont globuleuses et ne présentent pas de polarité. Les empreintes de charbon de bois ne sont pas systématiquement reconnaissables. La taille de ces pièces varie de quelques millimètres (gouttes ou amas de gouttes) à quelques centimètres (rognons). Le poids ne dépasse pas 200 gr.

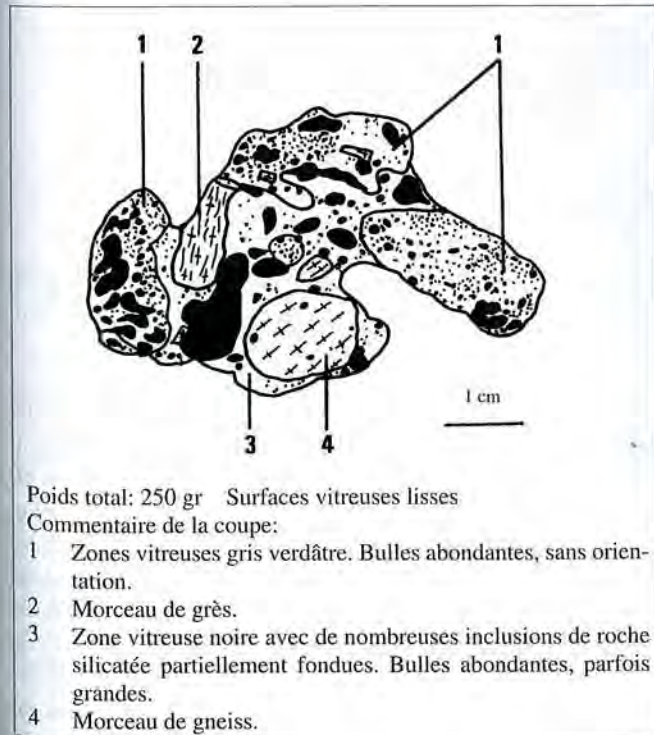


Fig. 194. SAS Scorie argilo-sableuse. Ech.MRS 10, Marsens, En Barras.

En coupe, on reconnaît des domaines correspondant à des fragments de roches variées plus ou moins fondus (arrondis ou anguleux). Ceux-ci atteignent parfois la taille de plusieurs centimètres. Ils sont englobés dans une pâte vitreuse, généralement très riche en bulles (fig. 194). Les teintes varient beaucoup au sein d'une même pièce (noir, gris, vert, bleu, beige, blanc, etc.). Les inclusions métalliques sont rares et petites. Ces caractères sont très proches de ce que l'on peut observer dans la partie scorifiée des parois de foyer.

Les teneurs en fer sont très basses (Annexes 7.1 et 7.2, Ech. MRS 20, 40, 260, 560 et 800; fig. 194 et 199). Le rapport Si:Al est très élevé, de 6:1 à 8:1.

Ces pièces peuvent être interprétées comme des morceaux de paroi détachés et tombés dans le foyer. La présence d'éléments centimétriques cohérents ne peut s'expliquer d'une autre manière. Il ne peut pas s'agir du résultat de la fusion d'un décapant (argile ou sable) qui par nature doit être fin. La nature très variée des éléments inclus fournit un argument dans le même sens: les décapants sont des matériaux soigneusement traités et purifiés. Il est également difficile d'admettre que ces cailloux aient pu être amenés avec le charbon de bois. Il est intéressant de constater que les formes n'indiquent que rarement une accumulation au fond du foyer. Ces pièces ne sont pas réellement fluides, mais seulement pâteuses et ne peuvent s'infiltrer à travers la masse de charbons.

### Les scories en forme de calotte

La grande majorité des pièces étudiées se sont accumulées au fond du foyer. A l'intérieur de ce groupe, la variabilité reste très grande et l'on peut décrire plusieurs sous-catégories. Les plus petites ne pèsent que quelques centaines de grammes (diamètre < 5 cm). Les plus volumineuses dépassent 1,5 kg pour une vingtaine de centimètres de diamètre (fig. 195). Les pièces étudiées sont, en grande majorité, de petites dimensions. Cet échantillonnage n'a pas été constitué de manière systématique, il n'est donc pas forcément représentatif.

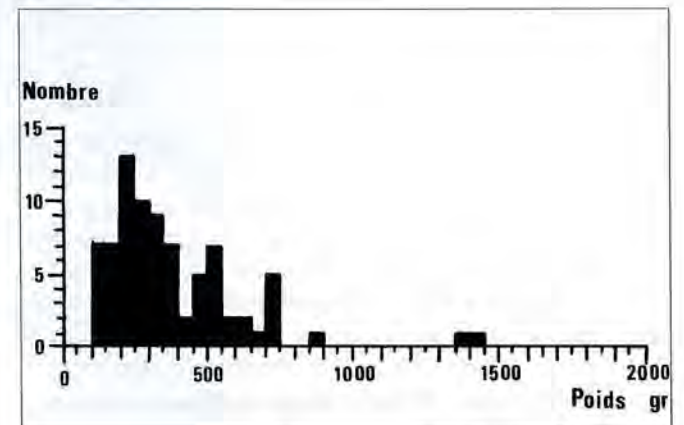


Fig. 195. Histogramme des poids estimés des scories en forme de calotte de Marsens (80 échantillons étudiés).

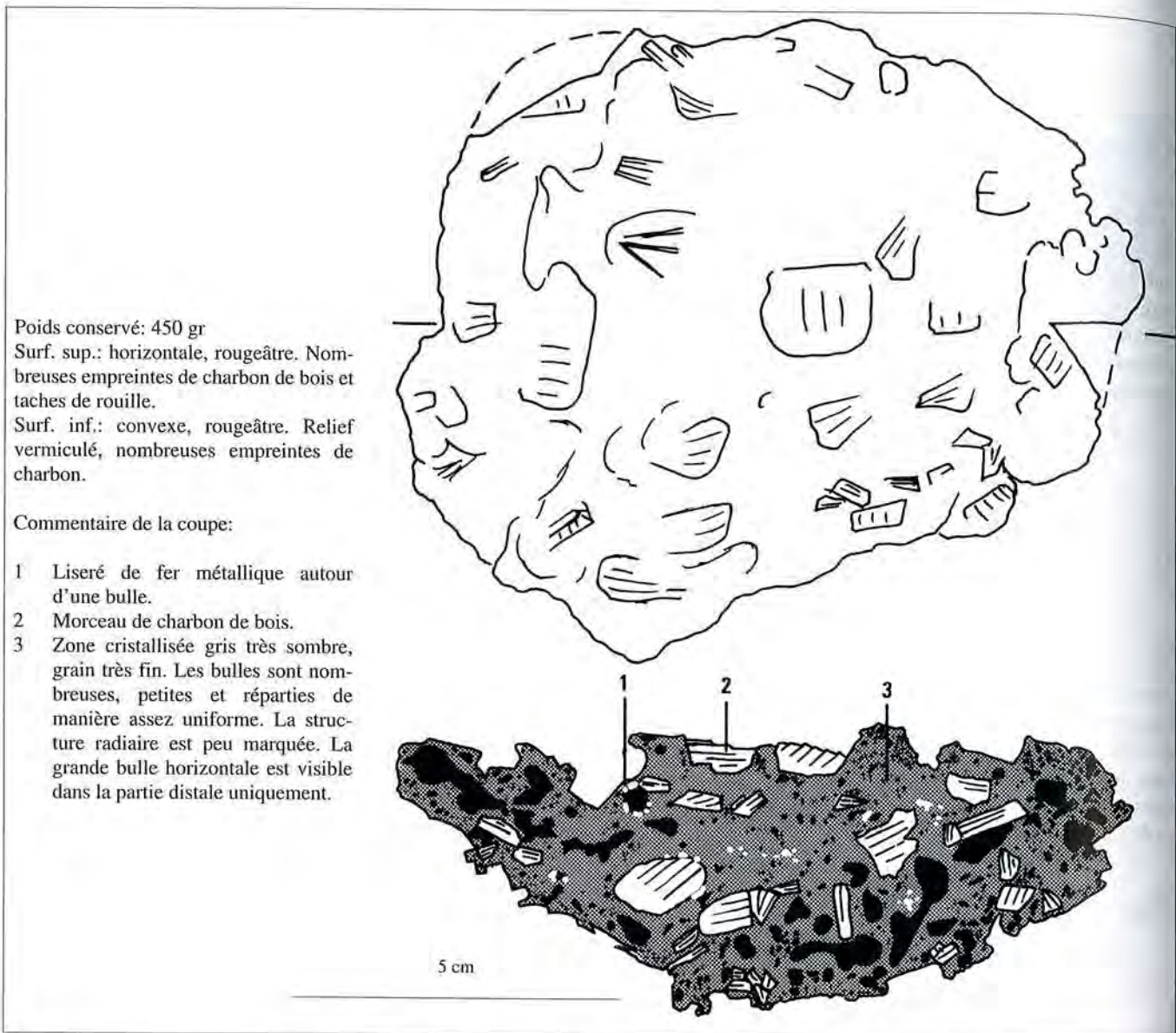


Fig. 196. Scories en forme de calotte gris sombre. Ech. MRS 57, Marsens, En Barras.

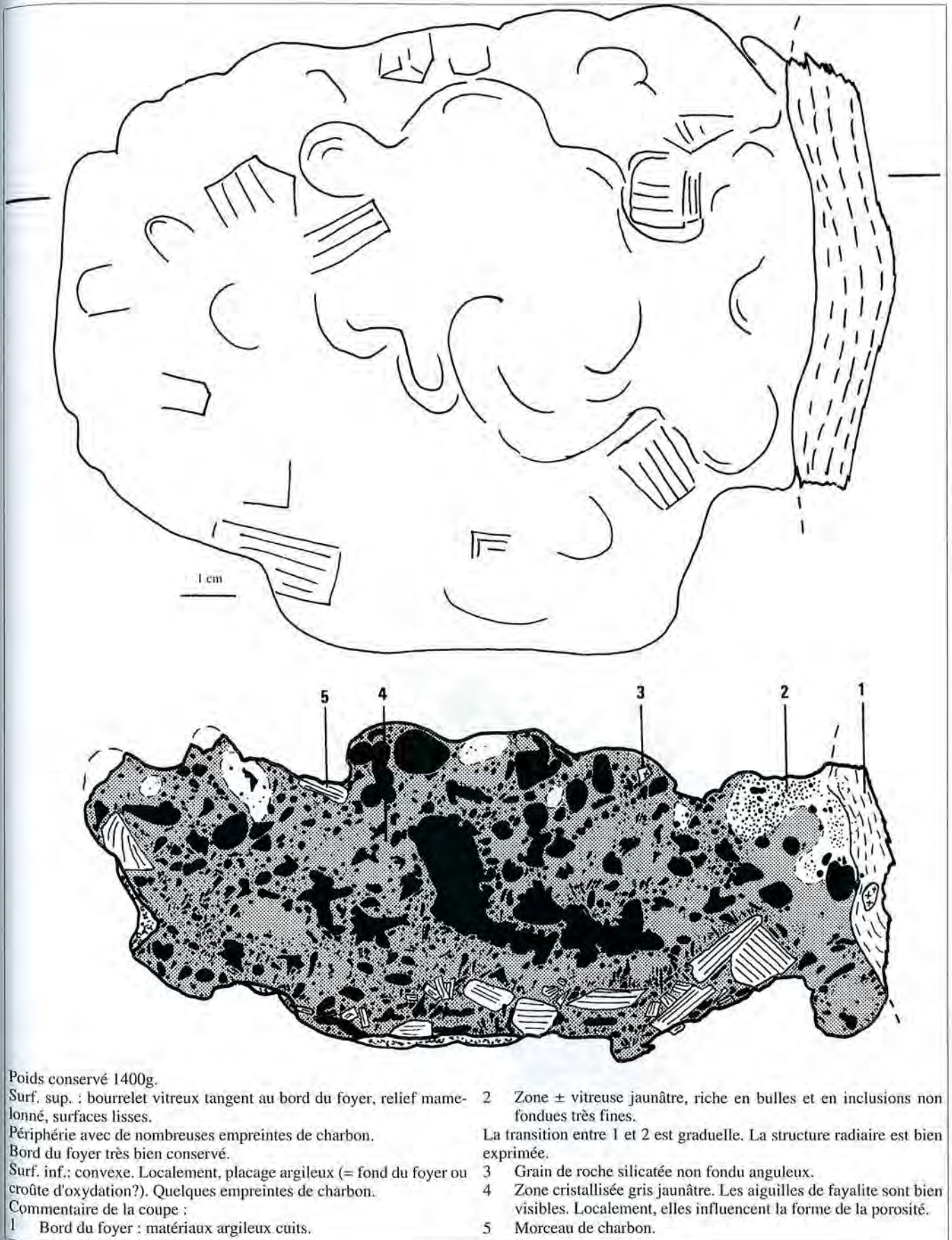
*Les scories en calotte grises, denses et charbonneuses: calottes SGD et SGC*

Les pièces typiques sont les plus denses (Annexes 7.1 et 7.2). La forme est généralement régulière hémisphérique ou en forme de demi-poire (fig. 196). La surface inférieure est convexe et la surface supérieure plate. Toutes deux sont couvertes de rouille, localement rouge sombre. Le diamètre maximum varie de 5 à 20 cm, le poids de 500 à 1500 gr.

Plusieurs pièces présentent une structure interne très homogène. La pâte est gris sombre tirant sur le noir. Les bulles sont assez nombreuses, moyennes et réparties assez également. La disposition radiaire par rapport à la surface inférieure est discrète. De même, on observe rarement une grande bulle horizontale dans la partie supérieure de la pièce. Il n'y a que très peu d'inclusions silicatées dans ces scories. Par contre, elles contiennent des quantités parfois énormes de charbon (jusqu'à 50%). Le fer métallique est toujours

visible (1 à 25%). Peu abondant, il ne forme que de simples liserés très fins autour des charbons; dans le cas contraire, on observe des nodules aux formes déchiquetées.

En lame mince, on observe de très grandes quantités de wüstite en dendrites épaisses et globuleuses, plus rarement fines. Ces cristaux sont pris dans une masse amorphe et indistincte. Localement la fayalite est reconnaissable. Elle est probablement présente en cristallites dans la masse. Les analyses chimiques reflètent bien la minéralogie. Les calottes SGD et SGC sont les plus riches en fer (de 55 à 70% FeOt; Annexes 7.1 et 7.2, Ech. MRS 140, 200, 350, 540 et 1220; fig. 199). Le rapport Si:Al est dans la même fourchette que pour les autres scories du site (6:1 à 8,5:1). Elles sont, en moyenne, plus pauvres en éléments lithophiles et intermédiaires (MgO, CaO, K<sub>2</sub>O, Zr, Y, Rb, Sr, Ba, MnO, V et Cr) et enrichies en sidérophiles (As, Cu, Ni, Co).



Poids conservé 1400g.

Surf. sup. : bourrelet vitreux tangent au bord du foyer, relief mame-  
lonné, surfaces lisses.

Périphérie avec de nombreuses empreintes de charbon.

Bord du foyer très bien conservé.

Surf. inf. : convexe. Localement, placage argileux (= fond du foyer ou  
croûte d'oxydation?). Quelques empreintes de charbon.

Commentaire de la coupe :

1 Bord du foyer : matériaux argileux cuits.

2 Zone ± vitreuse jaunâtre, riche en bulles et en inclusions non  
fondues très fines.

La transition entre 1 et 2 est graduelle. La structure radiaire est bien  
exprimée.

3 Grain de roche silicatée non fondu anguleux.

4 Zone cristallisée gris jaunâtre. Les aiguilles de fayalite sont bien  
visibles. Localement, elles influencent la forme de la porosité.

5 Morceau de charbon.

Fig. 197. Scorie en forme de calotte gris jaunâtre dense: calotte SJD. Ech. MRS 1200, Marsens, En Barras.

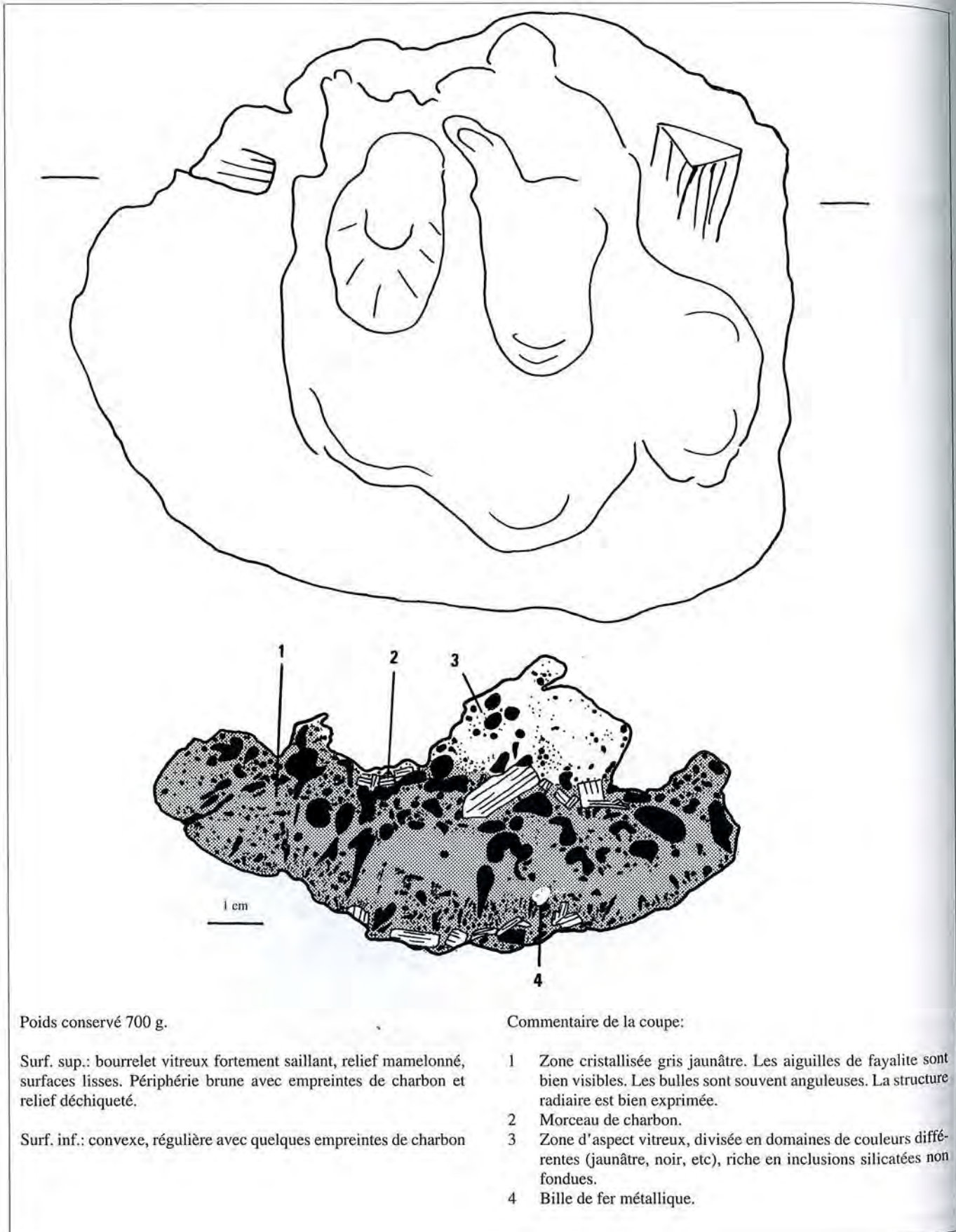


Fig. 198. Scorie en calotte gris jaunâtre dense: calotte SJD. Ech. MRS 6 (61-62), Marsens, En Barras.

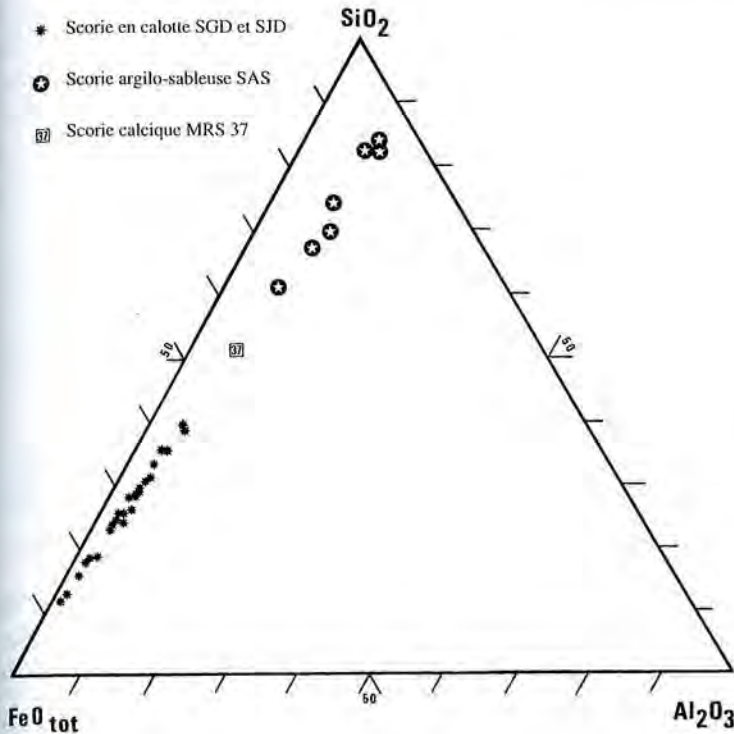


Fig. 199. Compositions chimiques des matériaux scorifiés de Marsens, En Barras.

#### Les scories en calotte grises, jaunâtres, denses: calotte SJD

Les calottes SJD sont moins denses que les calottes SGD. Elles ont des formes plus variées. Typiquement, la surface inférieure est convexe et régulière alors que la surface supérieure comporte un bourrelet d'aspect vitreux au relief mamelonné. Celui-ci est tangent à l'un des bords de la calotte. Lorsqu'il est présent, c'est là que se trouve le bord de foyer arraché (fig. 197). Le bourrelet occupe 1/3 ou 1/2 de la surface. La périphérie présente un relief plus déchiqueté avec des empreintes de charbon.

La structure interne est caractéristique: le bourrelet est composé d'éléments siliceux plus ou moins fondus (fig. 198). On reconnaît exactement les mêmes composants que dans les SAS. Les analyses chimiques de ces parties montrent clairement une parenté (Annexes 7.1 et 7.2, Ech. MRS 61 et 81; fig. 199). Sous le bourrelet, on trouve de grandes bulles horizontales. La partie centrale est constituée par une masse gris jaunâtre dans laquelle les cristaux de fayalite en aiguilles sont généralement visibles. Dans la partie inférieure, la structure radiaire est bien développée, soulignée par la disposition des bulles et des grands cristaux aciculaires. La surface inférieure incorpore généralement de petits charbons de bois, plus rarement des grains silicatés ou des particules argileuses. Ces pièces reposent sur un lit de charbon plutôt que sur le fond du foyer lui-même.

La fayalite est le constituant minéral principal. Elle est accompagnée par la wüstite, en quantité moindre que dans les calottes SGD. La leucite est assez fréquente. Le fer métallique est rare et peu abondant.

Les teneurs en fer restent élevées mais le sont moins que dans les calottes SGD (50 à 60% FeOtot). Le rapport Si:Al est normal pour le site. CaO avoisine 3% à l'exception de l'échantillon MRS 370, atypique morphologiquement, qui en

contient 14%. Un pyroxène calcique, sans doute l'hedenbergite, a été observé en lame mince.

Dans plusieurs pièces, on observe des aires globuleuses millimétriques ou centimétriques plus sombres dans la masse gris jaunâtre (Keesmann et Riekhoff-Pauli 1988). Les contours sont toujours arrondis, les bulles sont peu nombreuses, circulaires. Au microscope, on observe un développement particulièrement dense des oxydes de fer. Ces traces sont parfois interprétées comme des battitures tombées dans la scorie (pp. 165-168). Les scories de Marsens n'apportent guère d'arguments pour soutenir cette hypothèse. Dans un cas seulement, une inclusion de ce type apparaît anguleuse et aplatie (Ech. MRS 370). Du point de vue chimique, les calottes SJD sont intermédiaires entre les calottes SGD et les SAS.

#### Les scories en calotte composites

Plusieurs calottes de Marsens sont composites. La partie inférieure est proche, du point de vue macroscopique, minéralogique et chimique des calottes SGD. La partie supérieure est, en général, très proche des calottes SJD. Il semble s'agir de pièces doubles, présentant deux structures de refroidissement superposées. Elles témoignent donc de deux opérations successives dans le même foyer. Enfin quelques pièces possèdent des structures défiant toute description par leur complexité. Dans ces cas également, il est tentant de chercher une explication dans la négligence de l'artisan qui n'aurait pas nettoyé son foyer.

### Les battitures

Dans la couche de terre noire située à proximité du grand foyer dans l'aire de travail principale, on peut observer une grande quantité de petites particules produites lors des opérations métallurgiques. A côté des fragments d'argile cuite et des petits fragments de scories, se trouvent de véritables battitures. Les plus nombreuses sont des battitures lamellaires, c'est-à-dire de petites plaques, fines comme des feuilles de papier, anguleuses, de quelques millimètres de long. Elles sont fortement magnétiques. Elles sont comparables aux battitures décrites dans la bibliographie (McDonnell 1986). On trouve également des battitures sphériques: petites billes, elles aussi magnétiques. Le diamètre est millimétrique. Ces produits sont également décrits comme résultant du martelage. Ces matériaux n'ont pas encore été analysés ni étudiés plus en détail.

## Les analyses chimiques des scories de Marsens

Les 32 analyses faites sur des scories provenant de Marsens permettent d'esquisser une véritable réflexion sur les scories post-réduction. Dans une certaine mesure, elles éclaireront les résultats, beaucoup plus disparates, des autres sites (Avenches, Vidy, etc).

L'ensemble des échantillons analysés provient du même secteur. Tout porte à croire que ce sont les résidus du même atelier. Archéologiquement, il s'agit d'un groupe cohérent.

### Principaux caractères chimiques

Le rapport Si:Al est pratiquement constant pour tous les matériaux étudiés. Il est le même dans les SAS, qui dérivent des parois de foyer, que dans les scories métallurgiques (fig. 200). Les éléments mineurs et traces lithophiles et intermédiaires sont enrichis systématiquement dans les SAS et appauvris dans les calottes SGD. Les sidérophiles ont le comportement inverse (fig. 201).

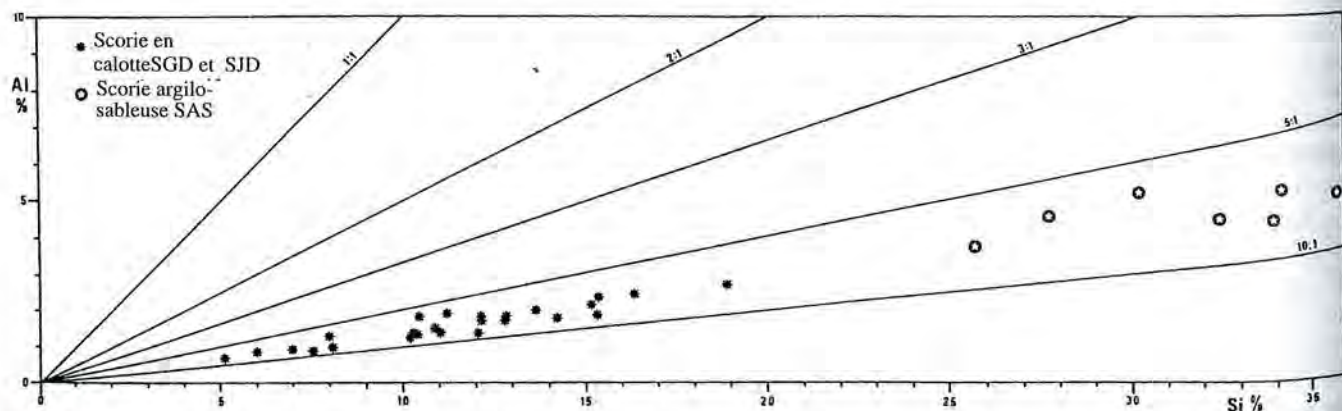


Fig. 200. Rapport Si:Al des matériaux scorifiés de Marsens.

enrichissement dans les SAS	SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> TiO <sub>2</sub> , MgO, Na <sub>2</sub> O, K <sub>2</sub> O, Zr, Y, (Sr), Rb, Ba, (V), Cr
enrichissement dans les calottes SGD et SGC	FeOtot As, Cu, Ni, Co
stable	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , MnO, Zn
incohérent	CaO
non significatif	Pb, Sn, Sb, Ag

Fig. 201. Comportement des éléments mineurs et traces dans les matériaux scorifiés de Marsens, En Barras.

Le calcium se comporte différemment. La gamme des teneurs est très étendue. Les calottes SGD sont plutôt pauvres, mais pas toujours, les SAS et les calottes SJD présentent la même gamme. Le Sr a plus ou moins le même comportement que le Ca.

Les calottes sont toujours très riches en fer (fig. 199). Si l'on considère le FeOtot, on atteint dans certains cas plus de 75%. Le fer métallique est bien visible, en particulier dans les calottes SGD et SGC. Les teneurs élevées en Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> s'expliquent essentiellement par une forte oxydation postérieure à la formation. Celle-ci est bien visible en lame mince (développement d'hydroxydes dans les pores). Ces scories contenant toujours beaucoup de minéraux instables, wüstite et fer métallique, cela s'explique aisément.

### La formation des scories en calotte

Le site de Marsens ne livre aucun argument archéologique pour soutenir l'hypothèse que ces scories pourraient résulter de la réduction d'un minerai de fer. Il n'y a pas de formation géologique susceptible de fournir du minerai dans les environs. Aucun fragment de minerai n'a été trouvé sur place. Il n'y a pas de vestige de bas fourneau. Les quantités de scories, quelques tonnes, restent faibles, etc.

Le seul argument intrinsèque fourni par les scories est la très forte teneur en fer des calottes. Si elles résultent de la réduction d'un minerai, celui-ci devait être extrêmement riche (77% Fe, 8,75% Si et 1,25% Al, soit 86% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 12,5%

SiO<sub>2</sub> et 1,5% Al). Même dans ce cas, la production n'aurait été que très limitée (récupération de 10-20% du fer pour des quantités de minerai ne dépassant pas 2-3 kg, soit 20 à 90 gr de métal pour les plus grosses calottes!). Ce n'est que dans le cas d'un minerai proche de 100% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et s'il n'y a que peu de contamination par la paroi que l'on peut calculer une production notable. Cette hypothèse est farfelue. En fait, pour tous les minerais potentiels de Suisse, il serait possible de démontrer par le calcul que ces calottes ne peuvent pas résulter de la réduction (p. 17). On est donc amené à conclure par défaut que les calottes sont les résidus de travaux post-réduction. Les vestiges archéologiques, le contexte général et les parallèles de la bibliographie ne contredisent pas cette idée.

Les scories de Marsens apportent quelques éléments concernant la distinction entre les différentes étapes de travail post-réduction: forge ou raffinage.

Au cours des travaux post-réduction, la scorie en calotte se forme par accumulation au fond du foyer, sous l'arrivée d'air. Divers facteurs contribuent à sa formation (p. 49).

Dans le cas du raffinage de l'éponge de fer, ces facteurs sont: les cendres de charbon, les parois du foyer, la scorie de réduction présente dans l'éponge et refondue, les morceaux de métal de l'éponge. Des battitures peuvent également se former lors des phases de martelage et tomber dans le foyer par la suite. De même, l'utilisation d'un décapant à ce stade du travail n'est pas exclue.

Lors du forgeage proprement dit, l'apport de scorie de réduction refondue est très minime. Le décapant peut jouer un rôle plus important. Les battitures sont peut-être plus abondantes mais il faut rappeler que ces résidus se forment sur l'enclume et non dans le foyer. Les autres contributions sont, a priori, comparables (Mc Donnel 1991).

Dans le cas des scories de Marsens, le point essentiel est que les calottes présentent le même rapport Si:Al que les SAS. Ce point est un sérieux argument pour indiquer que la contribution principale en Si et en Al est due à la paroi du foyer. La nature et la position du bourrelet siliceux que l'on observe sur les calottes SJD en apportent une confirmation.

On constate que des corrélations relativement bonnes existent entre les principaux éléments lithophiles et intermédiaires avec la silice (fig. 201). Pour ces éléments, la source principale est toujours la paroi. Le calcium et dans une moindre mesure, le strontium, indiquent une contribution des cendres de charbon de bois.

Par contre, pour les éléments sidérophiles, on constate un enrichissement notable dans les scories. Ceci ne peut s'expliquer que si ces éléments sont amenés par la matière première, à savoir le fer. C'est clairement le cas pour Ni, Co et Cu.

Pour Pb et Zn, les faibles teneurs ne doivent pas surprendre. Lors de la réduction, ils ont été volatilisés ou liquéfiés et ne sont pas entrés en alliage dans la masse métallique. Comme ils sont pratiquement absents dans les parois du foyer, les teneurs dans les calottes ne sont pas significatives.

Ces trois facteurs, paroi du foyer, cendres et métal, suffisent à expliquer les compositions mesurées. On ne trouve pas trace d'un apport dû à la scorie de réduction refondue.

Cette contribution devrait s'exprimer par la présence des éléments intermédiaires dans les calottes. En général et à Marsens en particulier, Mn, P, V et Cr sont peu abondants dans les matériaux argilo-sableux avec lesquels on construit les foyers. Par contre, ils sont fréquents dans les minerais de fer et en particulier dans le Sidérolithique (Mn, V et Cr) et les minerais oolithiques (P). Au cours de la réduction au bas fourneau, ils passent en majeure partie dans la scorie de réduction. Si celle-ci contribue de manière significative à la formation de calottes post-réduction, ces éléments devraient être présents (Eschenlohr et Serneels 1991, 113). De plus, il y a toutes les chances pour que le rapport Si:Al de la scorie de réduction ne soit pas identique à celui des parois de foyer. C'est en tout cas vrai pour les matériaux étudiés provenant du Salève, du Mormont, de Montcherand et de Boécourt. Si c'est bien le cas, le rapport Si:Al de la scorie post-réduction sera influencé. Il n'y a pas trace de cette contamination.

L'utilisation d'un décapant au cours du travail n'est pas non plus apparente. Son effet aurait également été de perturber le rapport Si:Al, sauf si, par hasard, le décapant a la même composition chimique que les parois du foyer. Un autre argument est plus fort: dans les calottes on observe la présence de morceaux de roches pluricentimétriques, en particulier dans le bourrelet vitreux supérieur. A cause de leur taille, ces éléments ne peuvent pas jouer le rôle physique de décapant; or ce sont eux qui fournissent à la scorie la silice et l'alumine.

Pour ces raisons, les scories de Marsens peuvent être interprétées comme résultant d'un travail de forge à proprement parler. Selon toute vraisemblance, c'est du fer presque pur qui était travaillé sur ce site et non pas des éponges brutes.

### L'origine de la matière première

Les analyses de scories n'apportent que des éléments ténus sur ce point. La contribution de la scorie de réduction n'étant pas décelable, il n'est pas possible de la comparer avec les compositions de scories de réduction des autres régions étudiées.

Par contre, les analyses mettent clairement en évidence que le métal travaillé contenait des éléments d'alliage en petites quantités, en particulier Cu, Ni et Co. Malheureusement, les rapports entre ces éléments ne sont pas assez constants (fig. 202). Il n'est donc pas possible de fournir une approche quantitative des teneurs en éléments traces du métal. De plus, au cours de la réduction, ces éléments sont, en partie, fractionnés entre la scorie et le métal. On peut cependant souligner leur présence d'un point de vue qualitatif. Le minerai dont est issu le métal travaillé devait donc impérativement contenir ces éléments. Cela permet d'exclure la région du Salève où le Sidérolithique ne contient pas de Cu. Les autres minerais du Jura restent des sources possibles.

Les variations des teneurs et surtout des rapports entre Cu, Ni et Co pourraient s'expliquer simplement par le fait que le métal travaillé ne provient pas d'une source unique.

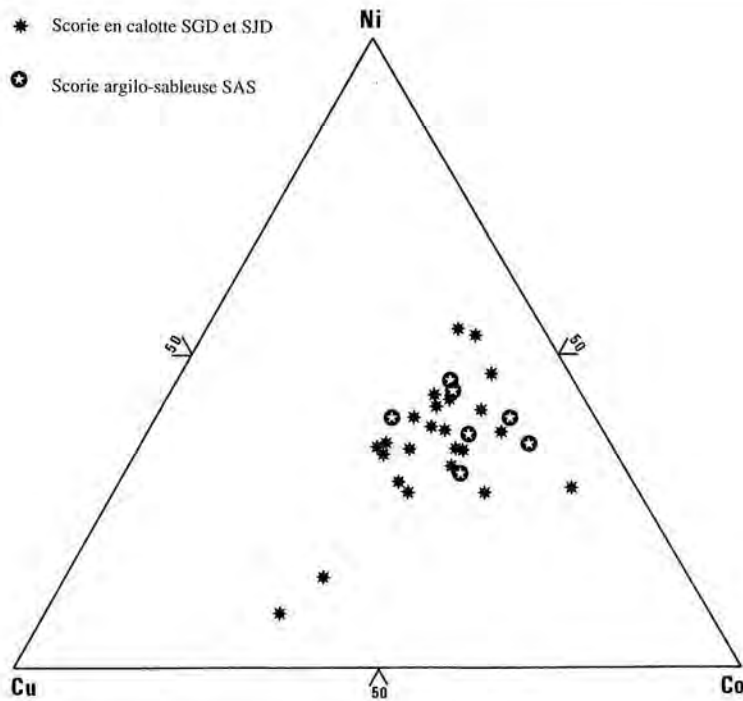


Fig. 202. Rapports entre Cu, Ni et Co dans les scories en forme de calotte de Marsens.

## La métallurgie dans le vicus de Marsens

Les fouilles du vicus gallo-romain de Marsens ont permis de localiser les traces d'un atelier de forgeron. Les scories de cet atelier résultent du travail de forge proprement dit. C'est du fer épuré, en lingots probablement, qui était la matière première de l'artisan. Le métal est sans doute importé.

Le volume des déchets, 2 tonnes, est impressionnant. Il ne permet cependant pas de quantifier le travail effectué, le volume de résidus produit au cours du forgeage étant très variable en fonction de la nature exacte du travail accompli. De plus la durée et le rythme de l'activité de l'atelier ne sont pas connus. Le vicus est occupé pendant plus de 200 ans, mais on ignore la durée de vie de la forge. Par comparaison avec les volumes de résidus de forge que l'on trouve habituellement, il semble que l'on soit en présence d'un atelier important.

L'atelier est installé dans le village dont les habitants forment sans doute la base de la clientèle. Il est placé en bordure de la route romaine, ce qui laisse penser qu'une partie de l'activité de la forge était consacrée au service des voyageurs et à l'entretien des voitures. On peut encore penser que le travail artisanal, en particulier pendant l'hiver, a pu occuper une partie des habitants. Le petit nombre de structures liées à la métallurgie telles que foyers et aires de travail,

semble indiquer que ce n'est pas l'activité principale des habitants. De plus, la matière première est importée et il est peu probable que la valeur ajoutée par le seul travail du métal soit suffisante pour rembourser les frais de transport, aller et retour. On peut, par contre, penser que la forge est complémentaire d'un autre artisanat, par exemple le travail du bois ou celui du cuir. Le forgeron produirait les charnières et les pièces métalliques utilisées ensuite pour l'assemblage ou la décoration. L'étude des objets en fer trouvés au cours des fouilles permettrait certainement de mieux définir la production. Elle apparaît donc très souhaitable.

Contrairement à ce que l'on constate à Vidy, Avenches ou Yverdon, les scories de Marsens ne contiennent jamais de grandes quantités de métaux de la métallurgie des alliages cuivreux (Pb, Zn, Cu, Sn, Sb). Ce fait pourrait être interprété en terme d'habitude de travail. Sur les autres sites mentionnés, l'activité métallurgique est variée et les artisans travaillent divers métaux. Outre les impuretés dans les scories, on rappellera la présence fréquente de scories de cuivre, fragments de creuset et gouttelettes de bronze sur ces sites. A Marsens, on aurait affaire à un forgeron au sens strict qui ne travaille que le fer. L'étude exhaustive du matériel métallurgique pourrait le confirmer.

La forge joue un rôle économique important dans ce vicus. Il est cependant probable qu'elle est le complément d'autres activités: agriculture, service aux voyageurs et éventuellement artisanat. L'étude des scories seules ne permet pas de conclure plus précisément.

## 9

# LES RECHERCHES SUR LA SIDÉRURGIE ANCIENNE DANS LES AUTRES RÉGIONS DE SUISSE

LES recherches menées en Suisse occidentale s'intègrent à un ensemble beaucoup plus vaste (fig. 203). Si l'état des connaissances acquises dans les régions voisines est très variable, les travaux d'A. Quiquerez et de W.U. Guyan apportent des éléments essentiels pour l'histoire de l'ancienne industrie du fer en Suisse (Serneels 1992). Dans plusieurs régions du pays, des découvertes récentes ont été faites et des recherches sont actuellement en cours (Doswald 1990, GSAF 1991b).

### La vallée de Delémont

La vallée de Delémont renferme dans son sous-sol le principal gisement de Sidérolithique de Suisse. Au siècle dernier, A. Quiquerez, adjoint de l'ingénieur des mines, fut frappé par l'importance des vestiges métallurgiques et miniers. Connaissant parfaitement le pays, il laisse une documentation d'un intérêt considérable tant sur le plan géologique (Quiquerez 1852, 1863) qu'archéologique et historique (Quiquerez 1855, 1866 et 1871).

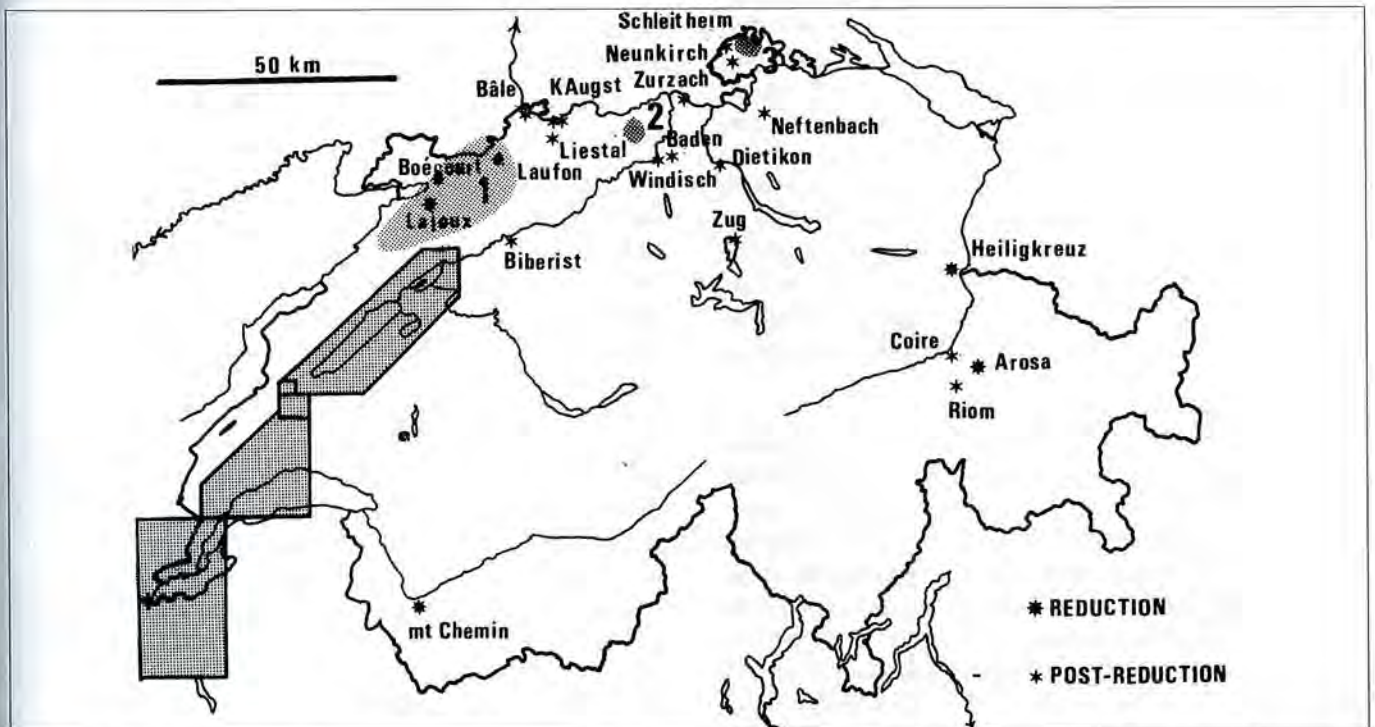


Fig. 203. Carte des principales découvertes concernant la sidérurgie ancienne en Suisse. Gris clair: régions étudiées dans ce travail.

Gris sombre: régions étudiées par d'autres chercheurs :

1 Jura central (Delémont)  
A. Quiquerez

2 Fricktal  
A. Amsler

3 Schaffhouse  
W. U. Guyan

Cet auteur connaît plus de 200 localités où se trouvent de tels vestiges. Il estime, et il a probablement raison, qu'il en existe le double. La plupart des sites se trouvent dans les petites vallées au SO de Delémont. La zone s'étend de Saint-Imier BE à Balsthal SO et de Laufon BE à Saint-Ursanne JU (env. 700 km<sup>2</sup>). Vers l'E, la limite est relativement artificielle : les vestiges sont moins nombreux, certes, mais surtout Quiquerez connaît moins bien le terrain. Il existe probablement une continuité jusqu'à la région de Bâle.

Si ces vestiges repérés sont clairement anciens, les éléments de datation utilisés par cet auteur sont très peu fiables. Les dessins de fourneaux qu'il a faits sont des éléments dont il faut tenir compte mais qui demandent encore à être confirmés. Après Quiquerez, les recherches marqueront le pas. Elles ne dépasseront pas le cadre des chercheurs locaux. Ceux-ci ont néanmoins accumulé une masse de connaissances considérable mais à peu près inédite (Borel 1948). Certains géologues qui contribuent au levé cartographique de la région notent l'existence de vestiges (Rothpletz 1933, 40-41).

En 1972-73, l'Institut de préhistoire de l'Université de Bâle a entrepris des fouilles sur un atelier de réduction directe du XIV<sup>e</sup> siècle, mettant au jour un curieux fourneau (Joos, M. et Pelet, P.-L., com. pers.). Ces travaux sont incomplètement publiés (Steiner 1979).

Ce site démontre la persistance de la méthode directe de réduction en plein Moyen Age. Il révèle aussi combien les datations proposées par Quiquerez doivent être considérées avec prudence.

En 1988, l'atelier de réduction des Boulies à Boécourt JU fut découvert au cours des prospections liées à la route N16-Transjurane. Les fouilles de sauvetage eurent lieu en 1989 (Eschenlohr 1991 et sous presse; Eschenlohr et Serneels 1991). Deux bas fourneaux mérovingiens ont été découverts. Ils étaient entourés d'aires de grillage du minerai et de rejet des scories. Des structures minières et liées au lavage du minerai, sans connexion stratigraphique avec le site, ont été mises en évidence dans le vallon. Le fonctionnement des bas fourneaux a pu être étudié en détail, en particulier grâce à la découverte en place de la dernière coulée de scories.

Les données provenant de cette fouille ont largement contribué à la compréhension des matériaux scorifiés étudiés dans le présent travail puisque des traces de toutes les étapes de la chaîne opératoire, de la mine au raffinage du produit des bas fourneaux, ont pu être étudiées. Ces recherches aboutissent à une évaluation quantitative de la production de fer sur la base des analyses (Serneels sous presse 1).

Les recherches sur la métallurgie du fer dans le district du Jura central vont se poursuivre dans les années à venir sous l'impulsion de L. Eschenlohr, avec l'appui du Fonds national pour la Recherche scientifique suisse, des services archéologiques cantonaux concernés ainsi que du Groupe de travail pour l'Archéologie du fer dans le Jura.

## Les territoires soleurois, argovien et bâlois

Le grand gisement de minerai oolithique du Fricktal a certainement été exploité dès le Moyen Age. Cette industrie ancienne a été mise en évidence par A. Amsler qui a cartographié de nombreux amas de scories dont certains à l'écart de cours d'eau (Amsler 1935, Doswald 1992b). Les recherches en cours indiquent que cette exploitation remonte probablement à l'Antiquité. Les petits gisements de Sidérolithique de la région furent, eux aussi, exploités. Un fourneau de réduction se trouvait à proximité de la *villa* gallo-romaine de Müschhag près de Laufon BE (Gerster-Gianbonini 1978, 35-38). D'autres traces, encore mal datées, sont repérées dans la région bâloise (Tauber J., com. pers.).

Des traces de métallurgie post-réduction sont attestées sur de nombreux sites. Des scories de l'âge du Fer sont signalées à Bâle BS (Münsterhügel et Gasfabrik. Guyan 1977, 119-120). Des forges romaines ont été fouillées dans les principales agglomérations: à Kaiseraugst AG, Zurzach AG, Baden AG et Windisch AG (Doswald 1990). L'atelier de la *villa* romaine de Biberist SO possède un système de circulation d'eau très sophistiqué dont le fonctionnement reste énigmatique (Schucany, 1986).

La ville romaine d'Augst BL a livré de nombreux témoignages du travail du fer (outils, Mutz 1976) et du commerce (lingots, Müller 1985). Sur le site de Munzach-Röserental à Liestal BL, des vestiges de travail post-réduction de l'époque carolingienne, avec 2 foyers et plusieurs tonnes de scories, ont été découverts récemment (Tauber 1992). L'étude est en préparation.

C. Doswald poursuit des recherches dans le cadre d'une thèse de doctorat sur la production et la diffusion du fer dans la Suisse du Nord à l'époque romaine.

## Le canton de Schaffhouse

Le canton de Schaffhouse renferme d'importants gisements de minerais sidérolithiques et oolithiques. Ces derniers ont pu être exploités dès l'âge du Fer (Merishausen SH, Bürgi et Banteli 1982). Pour l'époque romaine, il n'existe actuellement aucun témoignage clair en faveur d'une métallurgie extractive qui reste néanmoins probable. A partir du Haut Moyen Age, le minerai du Dogger est certainement utilisé. Plusieurs sites métallurgiques ont été fouillés par W.U. Guyan (Guyan 1946, 1957, 1965a, 1965b et 1991). Le site médiéval de Hofwiesen près de Bargaen SH est particulièrement intéressant avec un fourneau de réduction, trois foyers de travail post-réduction (forge et/ou raffinage) et un martinet.

Les scories du site de Neunkirch-Tobeläcker SH témoignent de travaux post-réduction pendant la période de Hallstatt. Elles sont parmi les plus anciennes scories de fer connues en Suisse (Fasnacht 1989).

Pour l'époque romaine, on mentionnera aussi les scories trouvées à la périphérie du vicus de Schleithem SH qui témoignent également de travaux post-réduction.

Plus au S, sur le Plateau molassique, on retrouve dans les

habitats romains des traces de métallurgie post-réduction. Dans les *villae* de Dietikon ZH et de Neftenbach ZH les forges sont situées dans les bâtiments annexes de la partie agricole. Les ateliers, leurs foyers et les déchets associés ont été étudiés (Senn 1992). Quelques scories ont été découvertes dans la vieille ville de Zoug ZG (Steinhauser R., com. pers.).

### Le domaine alpin

Les multiples petits gisements des Alpes ont été exploités à l'une ou l'autre occasion entre le XVI<sup>e</sup> et le XIX<sup>e</sup> siècle. Les traces sont souvent encore décelables. Pour les périodes plus anciennes, on ignore presque tout de l'activité minière et métallurgique. Dans les environs du gisement du Gonzen, on signale des scories de réduction (Epprecht 1986 et 1991, 41-43). Les vestiges de deux fourneaux du Haut Moyen Age auraient été observés au siècle dernier à Heiligkreuz SG à proximité immédiate de la mine. Les fouilles de Coire GR ont livré des fosses remplies de matériaux scorifiés dont des scories en forme de calotte (Nauli 1991). A Riom GR, une série de petits foyers en fosse ont été découverts sous le niveau de construction d'un grand édifice romain. De nombreux fragments de tuyère et des scories de travail post-

réduction leur sont associés. Il s'agirait d'une forge en relation avec la construction du bâtiment (Rageth 1982). Un four métallurgique médiéval a été fouillé anciennement près d'Arosa GR. La reconstitution qui en est proposée est incertaine (Fehlmann 1932, 50-52).

Enfin, des scories anciennes existent sur le Mont Chemin VS (Hügi et al 1948, 91; Marshall D. et Meisser N., com. pers.).

### Etat des recherches et perspectives

Le bilan des recherches en Suisse est imposant avec les œuvres du pionnier A. Quiquerez, de W. U. Guyan ainsi que l'apport très original de P.-L. Pelet. Le développement actuel des recherches est prometteur. Il n'en demeure pas moins que, à l'échelle de la Suisse, la carte de répartition des trouvailles demeure essentiellement le reflet des zones d'activité des chercheurs. Par le passé, les découvertes de scories ont été trop souvent négligées au point de ne pas figurer dans les publications. Il est aujourd'hui très difficile de reconstituer le puzzle. Dans le futur, on peut espérer une évolution à condition de rendre les archéologues attentifs au potentiel d'information que renferment les traces de métallurgie.

## CONCLUSION

L'étude des vestiges paléosidérurgiques doit être globale. Les échantillons isolés n'apportent que peu de renseignements. De même, une étude basée sur une seule approche atteint rapidement ses limites.

Les scories doivent être considérées comme des objets à part entière. La composition chimique, le contenu minéralogique et la texture microscopique, mais aussi la structure macroscopique et la forme générale ont un sens. A tous les niveaux, il y a des informations technologiques à tirer.

Plus que la présence de tel ou tel type de résidu métallurgique (scories et matériaux associés) sur une fouille, c'est l'association des différentes catégories qui est interprétable. C'est donc l'ensemble du matériel découvert qui doit être pris en compte. La quantification précise des diverses catégories est indispensable pour aborder les aspects économiques de l'industrie du fer.

Les résidus doivent être mis en relation avec les structures liées à l'activité métallurgique et, bien sûr, avec le contexte archéologique général. L'étude en laboratoire est d'autant plus riche que les données archéologiques sont abondantes et précises.

Les analyses sophistiquées, à elles seules, ne peuvent apporter de réponse à toutes les questions. Au contraire, une approche interdisciplinaire est indispensable. Ce ne peut être qu'un travail d'équipe associant des spécialistes des différentes sciences humaines et naturelles.

Cependant, l'étude au laboratoire des résidus métallurgiques et des débris associés, contribue de manière significative à la connaissance de la sidérurgie ancienne. Elle apporte des données technologiques. En particulier, les scories permettent d'identifier les différentes étapes de la chaîne opératoire: réduction, raffinage, forge. Le degré de perfectionnement technique et certaines pratiques telles que l'utilisation de fondant calcaire peuvent être décelées. Le calcul du volume de la production permet de replacer une industrie dans son contexte économique et de mesurer son impact sur

l'environnement. A travers l'étude des déchets, c'est finalement l'organisation sociale de l'industrie du fer que l'on peut percevoir.

Notre travail aboutit à des propositions nouvelles de portée générale dans le domaine de l'interprétation des analyses chimiques. L'étude régionale renouvelle les connaissances sur la sidérurgie suisse, en particulier pendant l'époque romaine et le Haut Moyen Age.

### Apports à l'étude des vestiges paléosidérurgiques

L'examen macroscopique de plusieurs milliers d'échantillons, provenant de nombreux sites archéologiques répartis sur un vaste territoire et un corpus de plus de 500 analyses de laboratoire permettent une première évaluation des résultats.

L'étude morphologique des différentes catégories de résidus, de leurs associations et de leurs liaisons avec des structures archéologiques, démontre l'existence d'une chaîne opératoire de la sidérurgie comportant plusieurs étapes dont les résidus sont différents. Les arguments morphologiques et ceux liés aux contextes archéologiques peuvent être confirmés au laboratoire. A l'aide des analyses, il est même possible d'aller au-delà.

S'il ne faut pas sous-estimer les problèmes pratiques d'analyse, liés à la nature des scories, il existe un large éventail de méthodes pour déterminer la nature physique et chimique des scories. Elles sont souvent complémentaires. La véritable question n'est donc pas de faire des analyses, mais de les interpréter. Les modèles établis de cette manière peuvent ensuite être vérifiés expérimentalement.

Les scories formées lors de la réduction ont une composition chimique qui témoigne essentiellement de la nature de la charge minérale du fourneau. Le minerai et sa gangue apportent la contribution majeure. Les rapports, par exemple Si:Al, entre les éléments non réductibles par le carbone aux

températures élevées, sont conservés. Une éventuelle modification est due à l'apport d'un autre composant (cendre de charbon, paroi fondue, fondant ou ajout volontaire).

La saturation en oxydes de fer donne une image du rendement du traitement et permet de déterminer si le minerai a été concentré après son abattage.

Après identification du minerai et des facteurs de contamination, il est possible de calculer un bilan chimique de l'opération de réduction (calcul du rendement et de la production unitaire). Si des données quantitatives sur les volumes de déchets sont disponibles, c'est la production globale de fer qu'il est possible de calculer. Par ce biais, on apporte des données quantitatives sur l'impact de la sidérurgie sur son environnement social et naturel (consommation de charbon, temps de travail, etc).

Les spectres des éléments mineurs et traces peuvent servir à l'identification à l'échelle régionale. Ce n'est que dans des cas spéciaux que l'on peut distinguer les ateliers au sein d'une même aire géographique. Il est cependant rare de trouver des scories de réduction ailleurs que sur un atelier où cette opération était pratiquée. Ce pourrait cependant être un moyen de déterminer l'origine des métaux contenant de grandes inclusions de scorie, par exemple les lingots bipyramidaux.

Les scories de raffinage du produit du bas fourneau présentent normalement des teneurs en fer et en éléments réductibles aux basses températures (Ni, Co, Cu) incompatibles avec les minerais. Par contre, comme la scorie de réduction contribue de manière assez importante à la formation des scories de raffinage, elles contiennent les éléments chimiques accompagnant les minerais mais difficilement réductibles (V, Mn, Cr, P). Ces éléments subissent un fractionnement au cours de la réduction ce qui rend délicat l'identification de la source de matière première. Pour cela, une large banque de données chimiques est nécessaire.

Les scories de forge ont pratiquement perdu tout héritage de la composition chimique du minerai. Par contre, grâce aux éléments facilement réductibles, il est possible de tracer le profil du métal utilisé ce qui peut contribuer à déterminer son origine. La variété de ces scories illustre probablement les très nombreux travaux pratiqués à la forge sans qu'il soit encore possible de les distinguer. Pour l'ensemble des résidus du travail post-réduction, des études minéralogiques détaillées devraient permettre des progrès.

## Apports à l'histoire de la sidérurgie

Quelques scories de travail post-réduction, trouvées éparpillées et les maigres restes du fourneau 10 de Bellaires 1 VD, sont les seuls témoins sûrs de l'activité sidérurgique au cours de l'âge du Fer. A l'opposé, les objets en fer sont très nombreux et prestigieux (La Tène NE, Berne, Engehalsinsel BE). L'image de l'industrie sidérurgique pré-romaine reste donc incohérente, faute de découvertes.

Pour les 3 premiers siècles de notre ère, sous la domination romaine, la métallurgie extractive est assez mal connue.

A Bellaires 1 VD et Prins-Bois 1 VD, quelques vestiges datent du Haut Empire. Les indications de Quikerey incitent à penser que des ateliers existent dans le Jura central. Pour les autres régions, les preuves archéologiques manquent (Salève, Fricktal AG, Schaffhouse, Gonzen SG, Mont Chemin VS). A l'opposé, les scories post-réduction sont partout présentes. Tous les habitats groupés, villes et villages, ainsi que bon nombre d'établissements ruraux, en livrent. Sans conteste, la forge est un élément de la vie quotidienne. Quelques armes, de nombreux outils et surtout d'innombrables clous, en témoignent.

Les ateliers de réduction connus sont situés à proximité des gisements de minerai. Ils sont situés à l'extérieur des zones habitées (exception : Laufon BE). Au contraire, les forges romaines sont liées aux habitats, aussi bien dans les zones métallifères qu'ailleurs. L'étape technique intermédiaire, celle du raffinage, n'est pas clairement identifiée dans les cas étudiés.

Les produits de l'industrie extractive de la chaîne du Jura approvisionnent certainement les forges du Plateau en matière première. Le fer voyage sous forme de lingots épurés et il est probable que les éponges brutes circulent également. Le déséquilibre entre les très nombreuses forges et les rares ateliers de réduction est patent. Il est peu probable que l'ensemble du fer utilisé soit d'origine locale. Dans d'autres régions de l'Empire romain, la production de fer se fait à une échelle sans commune mesure avec les petits districts du Salève et du Mormont (Mangin 1992, 217-245). Cette production devait être exportée. Il reste possible que les ateliers de réduction des environs de Delémont JU aient eu une capacité de production suffisante pour approvisionner l'ensemble de la Suisse, encore faudrait-il évaluer précisément celle-ci et surtout la dater.

La grande majorité des fourneaux datés du Jura vaudois sont postérieurs aux grandes invasions de 256 ap. J.-C. Plus de la moitié se placent entre le VI<sup>e</sup> et le VIII<sup>e</sup> siècle. Il y a quelques arguments technologiques en faveur d'une production contemporaine sur le Salève. Dans les autres régions de Suisse, la métallurgie extractive du Haut Moyen Âge est attestée (Boécourt JU; Liestal BL; Fricktal AG; Merishausen SH; Heiligkreuz SG).

Plusieurs sites défensifs de la fin de l'époque romaine ont livré des vestiges de travail post-réduction (Baulmes VD; Wittnauer Horn AG). Quelques forges du Haut Moyen Âge sont connues (Sézeznin GE; Le Landeron NE; Liestal BL). Les tombes de cette période livrent des quantités impressionnantes d'objets en fer, surtout des armes, parfois de très grande qualité.

Dans toute la Suisse, le Haut Moyen Âge est une période de développement important de l'industrie extractive. Dans le Jura vaudois, la région la mieux connue, le mouvement s'amorce dès le IV<sup>e</sup> siècle.

Parallèlement, la nature des scories ainsi que l'architecture et la conduite des bas fourneaux indiquent une grande maîtrise technique. Les minerais, relativement pauvres, sont utilisés d'une manière optimale, tant du point de vue du ren-

dement que de la production. Le rôle des fondants calcaires semble avoir été découvert. Ces progrès se fondent sur une tradition artisanale locale plus que sur une influence extérieure.

Si les données archéologiques mettent bien en relief cet accroissement considérable de la production primaire, les connaissances actuelles sur l'organisation de la chaîne opératoire restent insuffisantes. Faute de connaître les habitats de cette période, il n'est pas possible de bien situer les activités post-réduction. Le développement de la sidérurgie extractive semble aller de pair avec celui des techniques de forge dont témoigne la qualité des armes mérovingiennes.

Ce phénomène de grande ampleur reflète les bouleversements qui affectent l'ensemble de la société à la fin de l'Antiquité. Certes, la rupture des communications internationales a certainement stimulé la production locale confrontée à une demande accrue mais on constate aussi un progrès qualitatif. Sur le plan de la sidérurgie, cette période est loin de marquer une régression. Elle illustre au contraire le sommet de l'art.

Les bas fourneau du Jura vaudois peuvent fabriquer de la fonte mais celle-ci est considérée comme un déchet. La révolution technique de la méthode indirecte n'interviendra qu'au moment où les sidérurgistes seront capables de tirer parti de cet alliage en l'affinant.

# Annexes

Faint, illegible table with multiple columns and rows.

Year	2000	2001	2002	2003	2004
...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...

## Annexe 1: chimie et minéralogie

NOM	SYMBOLE	N°	MASSE	VALENCES	NOM	SYMBOLE	N°	MASSE	VALENCES	NOM	SYMBOLE	N°	MASSE	VALENCES
Actinium	Ac	89	227	+3	Hafnium	Hf	72	178.49	+4	Radium	Ra	88	226	+2
Aluminium	Al	13	26.981	+3	Hélium	He	2	4.002	0	Radon	Rn	86	222	0
Antimoine	Sb	51	121.75	-3,+3,+5	Holmium	Ho	67	164.930	+3	Rhénium	Re	75	186.2	+2,+3,+4,+5,+7
Argent	Ag	47	107.87	+1,+2	Hydrogène	H	1	1.007	-1,+1	Rhodium	Rh	45	102.905	+3
Argon	Ar	18	39.948	0	Indium	In	49	114.82	+1,+2,+3	Rubidium	Rb	37	85.47	+1
Arsenic	As	33	74.921	-3,+2,+3,+5	Iode	I	53	126.904	-1,+1,+3,+5,+7	Ruthénium	Ru	44	101.07	+3,+4,+6,+7,+8
Azote	N	7	14.006	-2,-3,+2,+3,+5	Iridium	Ir	77	192.2	+3,+4	Samarium	Sm	62	150.35	+2,+3
Barium	Ba	56	137.34	+2	Krypton	Kr	36	83.80	0	Scandium	Sc	21	44.956	+3
Béryllium	Be	4	9.012	+2	Lanthane	La	57	138.91	+3	Sélénium	Se	34	78.96	-2,+2,+4,+6
Bismuth	Bi	83	208.980	+3,+5	Lithium	Li	3	6.939	+1	Silicium	Si	14	28.08	-4,+4
Bore	B	5	10.81	+3	Lutécium	Lu	71	174.97	+3	Sodium	Na	11	22.989	+1
Brome	Br	35	79.90	-1,+1,+3,+5	Magnésium	Mg	12	24.312	+2	Soufre	S	16	32.06	-2,+2,+4,+6
Cadmium	Cd	48	112.40	+2	Manganèse	Mn	25	54.938	+2,+3,+4,+6,+7	Strontium	Sr	38	87.62	+2
Calcium	Ca	20	40.08	+2	Mercure	Hg	80	200.59	+1,+2	Tantale	Ta	73	180.948	+5
Carbone	C	6	12.011	-4,+4	Molybdène	Mo	42	95.94	+2,+3,+4,+5,+6	Tellure	Te	52	127.60	-2,+2,+4,+6
Cérium	Ce	58	140.12	+3,+4	Néodyme	Nd	60	144.24	+3,+4	Terbium	Tb	65	158.924	+3,+4
Césium	Cs	55	132.905	+1	Néon	Ne	10	20.183	0	Thallium	Tl	81	204.37	+1,+3
Chlore	Cl	17	35.45	-1,+1,+3,+5,+7	Nickel	Ni	28	58.71	+2,+3	Thorium	Th	90	232.038	+4
Chrome	Cr	24	51.99	+2,+3,+6	Niobium	Nb	41	92.906	+3,+5	Thulium	Tm	69	168.934	+3
Cobalt	Co	27	58.933	+2,+3	Or	Au	79	196.967	+1,+3	Titane	Ti	22	47.90	+3,+4
Cuivre	Cu	29	63.54	+1,+2	Osmium	Os	76	190.2	+2,+3,+4,+6,+8	Tungstène	W	74	183.85	+2,+4,+5,+6
Dysprosium	Dy	66	162.50	+3	Oxygène	O	8	15.999	-2	Uranium	U	92	238.03	+3,+4,+6
Erbium	Er	68	167.26	+3	Palladium	Pa	46	106.4	+2,+4	Vanadium	V	23	50.942	+2,+3,+4,+5
Etain	Sn	50	118.69	+2,+4	Phosphore	P	15	30.973	-3,+3,+5	Xénon	Xe	54	131.30	0
Europium	Eu	63	151.96	+2,+3	Platine	Pt	78	195.09	+2,+3,+4	Ytterbium	Yb	70	173.04	+2,+5
Fer	Fe	26	55.84	+2,+3	Plomb	Pb	82	207.19	+2,+4	Yttrium	Y	39	88.905	+2,+3
Fluor	F	9	18.9984	-1,+1	Polonium	Po	84	210	+2,+4	Zinc	Zn	30	65.37	+2
Gadolinium	Gd	64	157.25	+3	Potassium	K	19	39.102	+1	Zirconium	Zr	40	91.22	+2,+3,+4
Galium	Ga	31	69.72	+1,+2,+3	Praséodyme	Pr	59	140.907	+3,+4					
Germanium	Ge	32	72.59	-4,+1,+2,+4	Protactinium	Pa	91	231	+4					

Fig. 204. Liste alphabétique des éléments chimiques naturels. Nom, symbole, numéro atomique, masse atomique et principaux états de valence possibles.

Group	I	II	transitional elements										III	IV	V	VI	VII	O
Period 1	H <sup>+</sup>																	He
2	Li <sup>+</sup>	Be <sup>2+</sup>											B <sup>3+</sup>	C <sup>4+</sup>	N <sup>3+</sup>	O	F	Ne
3	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>											Al <sup>3+</sup>	Si <sup>4+</sup>	P <sup>5+</sup>	S <sup>4+</sup>	Cl <sup>7+</sup>	Ar
4	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Sc <sup>3+</sup>	Ti <sup>4+</sup>	V <sup>3+</sup>	Cr <sup>3+</sup>	Mn <sup>2+</sup>	Fe <sup>3+</sup>	Co <sup>3+</sup>	Ni <sup>2+</sup>	Cu <sup>2+</sup>	Zn <sup>2+</sup>	Ga <sup>3+</sup>	Ge <sup>4+</sup>	As <sup>3+</sup>	Se <sup>4+</sup>	Br <sup>5+</sup>	Kr
5	Rb <sup>+</sup>	Sr <sup>2+</sup>	Y <sup>3+</sup>	Zr <sup>4+</sup>	Nb <sup>5+</sup>	Mo <sup>4+</sup>	Tc <sup>3+</sup>	Ru <sup>3+</sup>	Rh <sup>3+</sup>	Pd <sup>2+</sup>	Ag <sup>+</sup>	Cd <sup>2+</sup>	In <sup>3+</sup>	Sn <sup>4+</sup>	Sb <sup>3+</sup>	Te <sup>4+</sup>	I <sup>5+</sup>	Xe
6	Cs <sup>+</sup>	Ba <sup>2+</sup>	La <sup>3+</sup>	Hf <sup>4+</sup>	Ta <sup>5+</sup>	W <sup>6+</sup>	Re <sup>6+</sup>	Os <sup>4+</sup>	Ir <sup>4+</sup>	Pt <sup>4+</sup>	Au <sup>+</sup>	Hg <sup>2+</sup>	Tl <sup>3+</sup>	Pb <sup>2+</sup>	Bi <sup>3+</sup>	Po <sup>4+</sup>	At <sup>6+</sup>	Rn
7	Fr <sup>+</sup>	Ra <sup>2+</sup>	Ac <sup>3+</sup>															
			La <sup>3+</sup>	Ce <sup>3+</sup>	Pr <sup>3+</sup>	Nd <sup>3+</sup>	Pm <sup>3+</sup>	Sm <sup>2+</sup>	Gd <sup>3+</sup>	Tb <sup>3+</sup>	Dy <sup>3+</sup>	Ho <sup>3+</sup>	Er <sup>3+</sup>	Tm <sup>3+</sup>	Yb <sup>3+</sup>	Lu <sup>3+</sup>		
			Ac <sup>3+</sup>	Th <sup>4+</sup>	Pa <sup>3+</sup>	U <sup>3+</sup>												

Fig. 205. Tableau périodique des éléments chimiques.

### Méthode d'analyse chimique par la fluorescence des rayons x et son application aux corps riches en fer

Les analyses chimiques globales ont été réalisées au Centre d'analyse minérale (CAM) de la Section des sciences de la Terre de l'Université de Lausanne (chef du centre, H.-R. Pfeifer, 1<sup>er</sup> laborantin, J.-C. Lavanchy).

#### Principes de la méthode XRF et problèmes spécifiques

La méthode d'analyse qui a été utilisée est celle de la spectrométrie de fluorescence des rayons x (XRF; Jenkins 1976). Lorsqu'un atome est bombardé avec des rayons x, il capte de l'énergie. Celle-ci permet à certains électrons gravitant autour du noyau de quitter leur orbitale pour en gagner une autre, de plus haute énergie. Dans cette configuration, l'atome est instable et lorsque les électrons reviennent à leur orbitale d'origine, ils émettent des rayons x secondaires, dits de fluorescence, qui sont caractéristiques de l'élément. C'est l'intensité de ce signal, le pic, qui est utilisée pour mesurer la concentration de l'élément.

Pour obtenir une analyse quantitative, l'intensité du pic mesuré doit être comparée à celles de pics correspondant à des substances dont les compositions sont connues. Ces standards doivent non seulement contenir l'élément chimique analysé en concentrations comparables à celles des échantillons inconnus, mais aussi être d'une nature aussi proche que possible, de manière à présenter le même type d'effet de matrice. L'importance de cet étalonnage est à souligner car cette méthode est avant tout une démarche comparative.

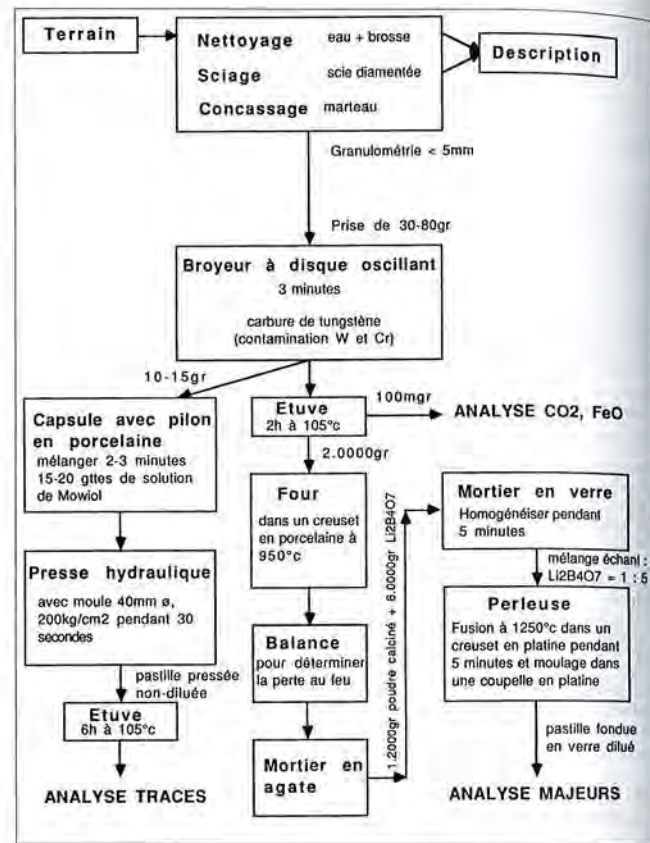


Fig. 206. Préparation des échantillons pour les analyses chimiques globales des matériaux riches en oxydes de fer. Centre d'analyse minérale, Section des sciences de la Terre, Université de Lausanne.

Elément	Raie	Col <sup>1</sup>	Det <sup>2</sup>	Cristal <sup>3</sup>	UPL <sup>4</sup>	LWL <sup>5</sup>	Angle <sup>6</sup>	Angle 2θ fond continu		Temps <sup>7</sup>	Corrections
Ba	Kα	F	S	LiF220	75	27	15.540	---	16.20	80	fond continu
Sb	Kα	F	S	LiF220	75	25	19.030	18.50	19.50	80	compton
Zr	Kα	F	S	LiF220	75	25	32.065	31.64	32.48	80	compton, interf. Sr Kβ
Y	Kα	F	S	LiF220	75	30	33.870	33.00	35.00	80	compton
Sr	Kα	F	S	LiF220	75	25	35.825	---	37.00	80	compton
Rb	Kα	F	S	LiF220	75	25	37.970	---	38.50	80	compton
Zn	Kα	F	F	LiF220	80	20	60.585	---	62.00	100	compton, 8)
Co	Kα	F	F	LiF220	75	20	77.925	74.00	---	100	fond continu, interf. Fe Kβ
V	Kα	F	F	LiF220	75	25	123.195	122.00	---	100	fond continu, interf. Ti Kβ
Ag	Kα	F	S	LiF200	75	25	15.990	15.00	16.50	200	fond continu
Pb	Lβ	F	FS	LiF200	80	20	28.285	27.00	30.00	100	fond continu
As	Kβ	F	FS	LiF200	70	25	30.470	29.90	31.00	100	compton
Cu	Kα	F	FS	LiF200	80	20	45.050	44.00	46.00	100	fond continu
Ni	Kα	F	FS	LiF200	80	20	48.700	48.00	49.40	100	compton
Cr	Kα	F	F	LiF200	70	15	69.410	68.40	70.40	100	fond continu, interf. V kβ
Sn	Lα	F	F	LiF200	75	25	126.865	126.00	---	100	compton

1) Col : Collimateur, F = 150 μm, C = 550 μm.  
 2) Det : Détecteurs, S = Scintillation, F = flux gazeux (argon-méthane)  
 3) Cristal : LiF(200), LiF(220) = Lithium fluoride, PE(002) = Pentaerythritol, Ge(111) = Germanium, PX1 = cristal multicouche organique, entre parenthèses: indices de Miller du plan de réflexion.  
 4) UPL : Limite supérieure de la fenêtre d'énergie en %.  
 5) LWL : Limite inférieure de la fenêtre d'énergie en %.  
 6) Angle pratique (2θ) de la raie de l'élément.  
 7) Temps de mesure du pic exprimé en secondes; pour le fond continu: T/2.

Fig. 207. Paramètres techniques de mesure des éléments traces par XRF.

Standards	Zr	Y	Sr	Rb	Ba	V	Sn	Sb	Ag	As	Pb	Zn	Cu	Ni	Cr	Co
IF-G	<5 2.4	8 9	4 3	<2 0.4	<7 1.5	<5 4	<5 0.6	<5 0.63	3	<8 2	<6 6.5	34 27	17 13	25 22.5	8 10	36 29
Fer-1	17 13	13 15	97 90	6 6	1008 1000	82 100	32 5	<5 5	4	<8 6	5169 2751	2751 105	105 8	8 7	6 12	14 12
Fer-2	33 39	15 15	56 58	67 66	243 240	35 37	<5 2.6	<5 0.7	<2	<8 2	14 11	42 43	39 45	26	40 47	8 7
Fer-3	<5 2	6 6	30 31	<2	10 11	6 8	<5	<5 1	<2	<8 1	12 9	33 36	7 6	11 10	5 6	<6 2
Fer-4	18 18	9 8	56 62	15 16	42 43	13 11	<5	<5 3	<2	<8 3.6	7 8	29 27	11 13	6 6	10 9	<6 2
SARM12	44 61	6 6	132 111	<2	17	519 520	6 7	<5	3	16	15 19	133 140	487 502	279 281	27 21	213 223
SARM11	17	8	198	4	82	52 40	<5	<5	2	23 19	12 18	32 23	14 11	25 30	43 41	16 27
627-2	73	29	202	8	118	401	<5	<5	3	196 200	65	147 20	20 20	100	134	35
629-1	89 86	27	153 158	7	116	731	<5 4	<5 <8	<2	236 230	50 38	163 175	12 10	110	129	57 55
680-1	30 26	7	47 26	5	3391	50	117 123	181	4	782	3387	1026	654 630	66 70	47 50	130 130
681-1	161 160	43	743 745	23	172	761 772	<5	<5	2	112 109	75 72	216 205	<3	163 159	439 413	85 80
301/1	61 62	25	203 200	14	81	421	<5	<5	<2	191 190	66 58	97 101	6	105 88	65 43	46 43
628-1	17 28	73	11 12	162	<7	1191	52	9	<2	31	<6	105	5	75	<4	24

15 analyse XRF CAM  
14 valeur proposée dans la bibliographie

15 XRF (ppm)  
14 valeur certifiée

15 XRF (ppm)  
14 valeur ICP

valeur utilisée pour l'étalonnage

Fig. 208. Valeurs utilisées pour l'étalonnage des éléments traces par XRF.

Dans le cas des corps riches en oxydes de fer, les standards disponibles sont des minerais de fer (fig. 209). Ils sont relativement peu nombreux et dans certains cas, mal connus. Pour pallier ce problème, une étude complémentaire a été nécessaire (Pfeifer *et al.* 1991).

#### Préparation des échantillons et mesures

Sur l'échantillon nettoyé soigneusement, on prélève 50 à 100 gr de matière qui est broyée et réduite en poudre homogène. 15 gr de poudre sont utilisés pour fabriquer une pastille pressée. Les éléments traces sont dosés sur cette préparation à l'aide du spectromètre (appareil Philips PW 1400, tube Mo/Sc). Les paramètres techniques de mesure des éléments traces, les valeurs retenues pour l'étalonnage et les gammes couvertes ainsi que les incertitudes sont donnés aux fig. 207, 208 et 210. Les effets de matrice induits par la présence des autres constituants sont corrigés par calcul (facteurs alpha, De Jongh 1976). La fig. 206 résume les étapes de la préparation des échantillons.

Le soufre n'a pas été dosé de manière systématique (problème de standards). En métallurgie, il peut avoir un rôle important et mérite donc une attention particulière. A de rares exceptions près, dans les corps analysés dans le cadre de ce travail, les concentrations en S sont très basses en raison de la nature des minerais traités et des combustibles utilisés.

D'autre part, 2 gr de poudre sèche sont calcinés à 1000°C dans un four en présence d'air pendant 1 h. La perte au feu est déterminée par pesée de l'échantillon avant et

Standard	Type de roche	% Fe	Source*
Fer-1	Iron ore (magnetite-quartz)	53.05	CCRMP
Fer-2	Iron ore (magnet.-amphibole-qtz)	27.42	CCRMP
Fer-3	Iron ore (hematite-quartz)	31.12	CCRMP
Fer-4	Iron ore (hematite-quartz)	27.92	CCRMP
Sch-1	Iron ore (hydrous Fe-oxide)	60.73	CCRMP
IF-G	Iron formation, Isua/Greenland	39.06	GIT-IWG
SARM 11	Sishen iron ore (hematite)	66.16	SABS
SARM 12	Iron ore (magnetite)	66.63	SABS
627-2	Sediment.iron ore ("Minette")	31.77	BAM
629-1	Sediment.iron ore ("Minette")	36.21	BAM
631-1	Iron ore, Venezuela	61.09	BAM
678-1	Iron ore, Kiruna D, Sweden	60.75	BAM
680-1	Iron ore ("Purpureur")	59.98	BAM
682-1	Iron ore	68.74	BAS
301/1	Lincolnshire iron ore	23.85	BAS
378	Iron ore sinter	61.80	BAS
681-1	Iron ore	33.21	BAS

\* Adresses des laboratoires qui fournissent ces standards

CCRMP : Canada Centre for Mineral and Energy Technology  
Energy, Mines and Resources  
555 Booth Street  
OTTAWA, Canada K1A 0G1

GIT-IWG : K. Govindaraju  
Centre de Recherche  
Petrogr. et Geochim. (CRPG)  
B.P. N°20  
54501 VANDOEUVRE  
France

SABS : South African Bureau of Standards  
Private Bag X191  
PRETORIA 0001  
South Africa

BAM : Bundesanstalt für Materialprüfung  
Unter den Eichen 87  
D 1000 BERLIN 45

BAS : Bureau of Analysed Samples  
Newham Hall, Newby,  
Middlesbrough, Cleveland,  
England, TS8 9EA

Oxyde	Gamme couverte par l'étalonnage (% poids)	Nombre de standards	incertitude 2 dev. std. (% poids)
SiO <sub>2</sub>	0 --> 50 %	15	0.20
TiO <sub>2</sub>	0 --> 1 %	17	0.02
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0 --> 12 %	15	0.10
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	40 --> 90 %	14	0.50
MnO	0 --> 2 %	17	0.02
MgO	0 --> 3 %	14	0.07
CaO	0 --> 20 %	15	0.15
Na <sub>2</sub> O	0 --> 1 %	10	0.04
K <sub>2</sub> O	0 --> 2 %	15	0.04
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0 --> 4 %	17	0.04

Fig. 210. Gammes de concentration couvertes par les étalonnages et incertitudes de mesure pour les éléments traces.

Elément	Gamme couverte par l'étalonnage ppm	incertitude 2 std. dév. (ppm)	Limite de détection (ppm)
Ba	0 --> 1000	3	7
Sb	0 --> 100	3	5
Zr	0 --> 200	4	5
Y	0 --> 20	1	2
Sr	0 --> 800	4	2
Rb	0 --> 100	1	2
Zn	0 --> 200	8	5
Co	0 --> 250	7	6
V	0 --> 800	10	5
Ag	0 --> 100	2	2
Pb	0 --> 100	3	6
As	0 --> 250	9	8
Cu	0 --> 100	4	3
Ni	0 --> 300	4	4
Cr	0 --> 400	16	4
Sn	0 --> 150	3	5

Fig. 211. Gammes couvertes par l'étalonnage et incertitudes de mesure pour les éléments majeurs.

après calcination. Au cours de celle-ci, certains éléments volatils sont perdus (H<sub>2</sub>O et CO<sub>2</sub>) entraînant une perte de poids (PAF négative). En même temps, les éléments se trouvant à l'état réduit (Fe, FeO, etc) passe à l'état oxydé en captant des atomes d'oxygène de l'air. Il s'en suit un gain de poids de l'échantillon (PAF positive).

Oxyde	Raie	Col <sup>1</sup>	Det <sup>2</sup>	Cristal <sup>3</sup>	UPL <sup>4</sup>	LWL <sup>5</sup>	Angle <sup>6</sup>	Angle 2θ fond continu	Temps <sup>7</sup>	Commentaires
SiO <sub>2</sub>	Kα	C	F	PE	80	20	109.095	--	50	Corr. par facteurs α
TiO <sub>2</sub>	Kα	F	F	LiF200	80	30	86.180	--	100	"
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Kα	C	F	PE	80	20	145.020	--	50	"
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Kα	F	F	LiF200	80	15	57.565	--	10	"
MnO	Kα	F	F	LiF220	80	15	95.265	97.26	50	"
MgO	Kα	C	F	PX1	70	20	23.580	22.00 25.00	40	"
CaO	Kα	F	F	LiF200	80	25	113.200	--	20	"
Na <sub>2</sub> O	Kα	C	F	PX1	70	20	28.510	27.00 30.00	100	"
K <sub>2</sub> O	Kα	F	F	LiF200	80	25	136.780	--	10	"
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Kα	C	F	Ge	80	20	141.060	143.06	40	"

- 1) Col : Collimateur, F = 150 μm, C = 550 μm.
- 2) Det : Détecteurs, S = Scintillation, F = flux gazeux (argon-méthane)
- 3) Cristal : LiF(200), LiF(220) = Lithium fluoride, PE(002) = Pentaerythritol, Ge(111) = Germanium, PX1 = cristal multicouche organique, entre parenthèses: indices de Miller du plan de réflexion.
- 4) UPL : Limite supérieure de la fenêtre d'énergie en %.
- 5) LWL : Limite inférieure de la fenêtre d'énergie en %.
- 6) Angle pratique (2θ) de la raie de l'élément.
- 7) Temps de mesure du pic exprimé en secondes; pour le fond continu: T/2.

Fig. 212. Paramètres techniques de mesure des éléments majeurs.

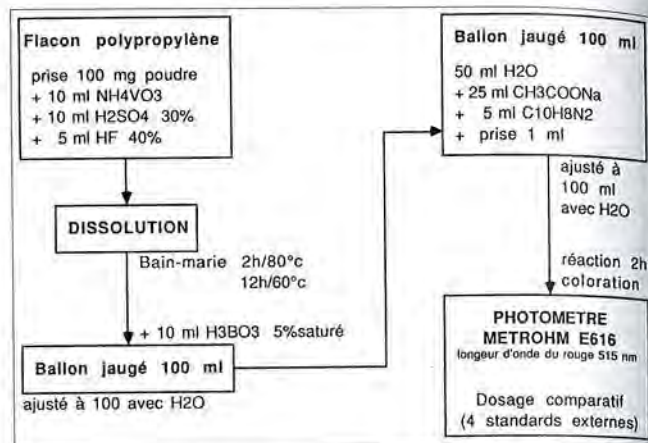


Fig. 213. Méthode de dosage du Fe<sup>2+</sup> par colorimétrie, modifié d'après Wilson 1960.

Un prélèvement de 1,2 gr de poudre calcinée est ensuite mélangé avec 6gr de Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> (rapport 1:5). Cette mixture est ensuite fondue dans un creuset en platine à la température de 1250°C (cycle de 3 minutes). Le liquide est moulé en forme de disque. On obtient une pastille de verre homogène dans laquelle l'échantillon est dilué. Cette préparation est analysée au spectromètre. Les paramètres techniques de mesure, les gammes couvertes et les incertitudes sont donnés aux fig. 211 et 212.

Pour les échantillons sortant de la gamme d'étalonnage spécifique aux matériaux riches en oxydes de fer, les analyses ont été faites à l'aide des standards utilisés au CAM pour les roches silicatées (parois de fourneau, certains minerais) ou carbonatées (certains minerais). Les intensités mesurées à l'aide du spectromètre sont ensuite corrigées et comparées avec l'étalonnage. On en déduit des valeurs de concentration en élément. Par la suite, on calcule les éléments majeurs sous forme d'oxydes en utilisant les facteurs stoechiométriques (fig. 214).

### Mesures et calculs complémentaires

La XRF permet de connaître la concentration du fer sous forme d'élément. Par contre, il faut doser séparément le  $\text{Fe}^{2+}$  afin de connaître le degré d'oxydation du fer. Cette mesure est faite par colorimétrie après mise en solution aqueuse de l'échantillon (Wilson 1960). Cette méthode a été modifiée de manière à éviter l'oxydation du  $\text{Fe}^{2+}$  pendant la dissolution (fig. 213). L'incertitude sur cette mesure est de 10% relatifs environ.

Le carbone n'est pas dosable par XRF. Il fait également l'objet d'une analyse séparée, par coulométrie (appareil Coulomat 702, Ströhlein). On mesure séparément C (organique) et  $\text{CO}_2$  (minéral). L'incertitude est de 1% relatif.

Ces deux mesures ainsi que la PAF à  $1000^\circ\text{C}$  permettent de déterminer la présence d'eau ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ou de fer à l'état métallique (Fe). Si

$$\text{PAF}\% + \text{C}\% + \text{CO}_2\% - (0,1113 \text{ FeO}\%)$$

est négative, on considère que cette différence est due à la présence d'eau.

On néglige les autres éléments chimiques pouvant intervenir; S, Cl, F, etc., se trouvent en général en très faibles proportions dans les échantillons. Les matériaux étudiés dans ce travail sont pauvres en soufre, mais ce n'est pas le cas de toutes les scories. Le cas échéant, cet élément doit être pris en compte.

Dans le cas contraire, le gain de poids est attribué à l'oxydation de fer à l'état métallique. On calcule alors la quantité de fer métallique nécessaire pour provoquer ce gain de poids:

$$\text{PAF}\% + \text{C}\% + \text{CO}_2\% - (0,1113 \text{ FeO}\%) = 2,3267 \text{ FeM}\%$$

Ce Fe métallique (FeM) est déduit de la concentration en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  calculée par soustraction du FeO dosé. On néglige les autres éléments qui peuvent fausser le calcul (Mn, V et traces

métalliques). Dans quelques cas, des échantillons de scories, très riches en manganèse ont été analysés et il est clair que ce calcul ne reflète pas la réalité. Dans d'autres scories, certains métaux (Cu, Pb, etc) peuvent être présents en quantités non négligeables (> 1000 ppm).

Si l'échantillon contient à la fois  $\text{H}_2\text{O}$  et FeM, le calcul est faussé. Cela peut se produire dans les scories par oxydation secondaire partielle. Généralement, la conséquence est une surévaluation du Fe métallique. Le cas échéant, il faudra recourir à d'autres méthodes de mesure (chromatographie en phase gazeuse, spectrométrie de masse), ce qui n'a pas été fait dans le cadre de ce travail.

Compte tenu des limitations qui ont été exposées, cette procédure de calcul doit donc être appliquée avec quelque discernement.

### Représentativité des analyses

L'analyse chimique porte toujours sur un volume restreint de matériel et n'est, à proprement parler, représentative que de celui-ci. Il est donc essentiel de choisir cet échantillon selon une procédure qui permette de connaître sa représentativité à une plus grande échelle.

Dans la plupart des cas, les scories sont relativement homogènes (scories de réduction). Ce fait a pu être vérifié maintes fois par l'analyse de plusieurs prélèvements sur la même pièce. Mais ce n'est pas toujours le cas et certaines scories sont constituées de zones chimiquement très différentes (en particulier les scories en forme de calotte du travail post-réduction). L'interprétation des analyses s'en trouve grandement compliquée. Les minerais de fer sont également complexes à analyser. Il est souvent très difficile de définir ce qui a réellement été utilisé. Dans la mesure du possible, le minerai naturel et le minerai enrichi par des méthodes simples (concassage + lavage) ont été étudiés.

### Présentation des analyses

Les analyses sont présentées sous forme de tableaux (Annexe 3 à 7). Les descriptions sommaires des échantillons sont placées en regard. La partie de l'échantillon qui a été analysée est indiquée.

Pour la plupart des calculs (production, contamination, etc.), les données initiales ont été recalculées en «norme anhydre». Cette procédure consiste à soustraire de la somme totale les composés volatils (C,  $\text{CO}_2$  et  $\text{H}_2\text{O}$ ) et à additionner les teneurs des éléments traces. Ce nouveau total est normé à 100.

Ensuite, on exprime les concentrations en % poids de cations ou en milliatomes pour 100 gr d'échantillon. Cette procédure permet de comparer plus judicieusement les minerais, hydratés, avec les scories, généralement anhydres. On s'affranchit ainsi des difficultés liées aux différents états de valence du fer.

Diverses méthodes de présentation des résultats sont utilisées dans le texte (histogrammes, diagrammes bivariants X-Y et projections triangulaires X-Y-Z). Des diagrammes de phases sont également présentés (VDE 1981, 12-25, fig. 215). Leur utilisation est avant tout régie par la règle des phases de Gibbs :

Nom de l'élément	facteur	Nom de l'oxyde	facteur
Silicium	Si x 2.1390	SiO2 Silice	SiO2 x 0.4675 Si
Titane	Ti x 1.6681	TiO2	TiO2 x 0.5995 Ti
Aluminium	Al x 1.8896	Al2O3 Alumine	Al2O3 x 0.5292 Al
Fer	Fe x 1.2865	FeO Fer ferreux	FeO x 0.7773 Fe
	x 1.4298	Fe2O3 Fer ferrique	Fe2O3 x 0.6994 Fe
	FeO x 1.1113	Fe2O3	Fe2O3 x 0.8998 FeO
Manganèse	Mn x 1.2913	MnO	MnO x 0.7744 Mn
Magnésium	Mg x 1.6581	MgO Magnésie	MgO x 0.6031 Mg
Calcium	Ca x 1.3992	CaO Chaux	CaO x 0.7147 Ca
Sodium	Na x 1.3481	Na2O Soude	Na2O x 0.7418 Na
Potassium	K x 1.2045	K2O Potasse	K2O x 0.8302 K
Phosphore	P x 2.2915	P2O5	P2O5 x 0.4364 P
Carbone	C x 3.6666	CO2 dioxyde de C	CO2 x 0.2727 C

Fig. 214. Liste des éléments majeurs mesurés par XRF et des facteurs de conversion éléments / oxydes.

Exemple de calcul :

poids atomique de Fe = 55.84

poids atomique de O = 15.999

poids moléculaire de FeO = 55.84 + 15.999 = 71.839

Fe x 71.839 / 55.84 = Fe x 1.2865 = FeO

$$F = K + T + p - P$$

F = nombre de degrés de liberté  
T = température

p = pression  
P = nombre de phases

En métallurgie, la pression peut être considérée comme constante (1 atm). Dans un système à n composants, seules n-1 concentrations sont variables.

Dans les cas étudiés, les variables sont donc les n-1 compositions et la température. Dans les systèmes binaires tels que Fe-O ou Fe-C, on peut utiliser un diagramme à deux dimensions compositions / températures. Pour un système à trois composants tels que SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-FeO, il faudrait travailler à trois dimensions (fig. 215). Généralement, on simplifie la représentation en projetant sur le plan des compositions chimiques les isothermes du liquidus (température à laquelle la solidification débute). Les courbes cotectiques indiquent la cristallisation simultanée de deux phases. Au point eutectique, on atteint la température de cristallisation la plus basse du système. Le problème de la représentation devient extrêmement complexe pour les systèmes qui ont plus de 3 constituants.

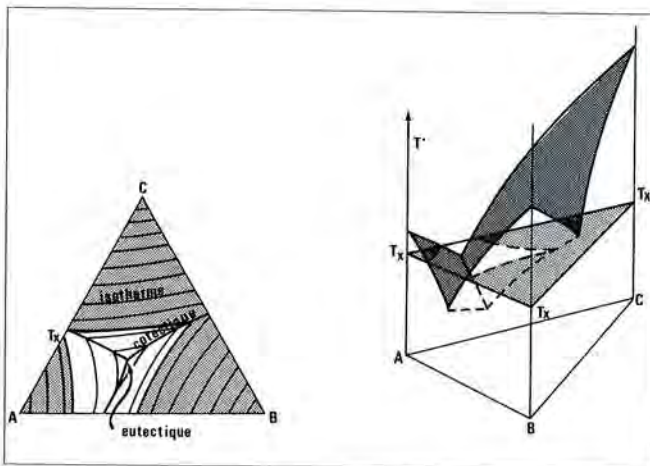


Fig. 215. Diagramme de phase d'un système à 3 constituants et projection sur le plan des compositions chimiques.

### Méthode de détermination des minéraux par diffraction des rayons x

Les scories sont des corps solides contenant une phase vitreuse et/ou des minéraux. Les méthodes optiques permettent l'observation d'un grand nombre de propriétés qui aident à identifier les minéraux. En lame mince, on étudie les interactions entre la lumière polarisée dans un plan et les structures cristallines (Tröger 1967 et 1979). Elles ont l'avantage d'être couplées avec l'observation directe de la position des grains les uns par rapport aux autres. Cependant, elles ont aussi de nombreuses limitations (confusions entre des minéraux proches, minéraux opaques difficilement identifiables, etc).

Les mesures de l'interaction entre les rayons x et la structure cristalline permettent souvent une bonne identification des minéraux présents (Hutchinson 1974).

### Principes de la méthode de diffraction des rayons x

Les rayons x sont caractérisés par des longueurs d'onde du même ordre de grandeur que les distances entre les plans réticulaires des cristaux (plans de densité atomique élevée). Ils seront réfléchis sur ces plans selon la loi de Bragg :

$$n \lambda = 2d \sin \theta$$

$\lambda$  = longueur d'onde du rayonnement

d = distance interréticulaire

$\theta$  = angle d'incidence du rayonnement

La méthode de la diffraction des rayons x utilise cette propriété. Une poudre très fine est irradiée par un faisceau de rayons x incidents, ceux-ci sont réfractés dans certaines directions de l'espace. On mesure, sous différents angles, l'intensité des ces rayons déviés. Les angles mesurés sont caractéristiques des minéraux présents et l'intensité du rayonnement dans une direction donnée est fonction de la densité du plan réticulaire ainsi que de l'abondance du minéral.

### Paramètres techniques de mesure

Les mesures ont été faites au moyen du diffractomètre automatique Philips du Laboratoire de rayons x de la Section des sciences de la Terre de l'Université de Lausanne (générateur PW 1730; microprocesseur PW 1710, goniomètre vertical 1771). Le responsable, Ph. Thélin et de L. Dufresne, 1<sup>re</sup> laborantine, ont apportés leur concours. Les mesures ont été faites en balayage continu entre 5 et 70° 2 $\theta$  (CuK $\alpha$ 1, 40kV, 30 mA). Le Si métallique, incorporé dans chaque échantillon joue le rôle de standard interne.

Telle qu'elle a été utilisée, cette méthode reste essentiellement qualitative. Au mieux, il est possible de distinguer les minéraux abondants de ceux qui ne le sont pas. La limite de détection est assez haute car le bruit de fond pour les scories est élevé. En effet, le fer est un élément qui absorbe assez fortement les rayons x du cuivre et il est toujours très abondant. On peut estimer qu'un minéral doit former au moins 5 ou 10% de l'échantillon pour pouvoir être détecté. Par ailleurs, l'interprétation des spectres complexes reste toujours délicate. Il arrive assez souvent que certains pics ne puissent pas être attribués de manière satisfaisante.

### Méthode d'analyse chimique des minéraux à la microsonde

La microsonde électronique (SEM) présente le gros avantage de mesurer la composition chimique de volumes de matière extrêmement faibles, d'un diamètre de l'ordre de quelques microns. C'est donc un outil précieux pour l'analyse des minéraux.

*Principes de la méthode*

L'échantillon est bombardé à l'aide d'un faisceau d'électrons de diamètre très réduit (3-10  $\mu\text{m}$ ). Dans la zone excitée, différentes interactions se produisent. En particulier, les éléments émettent des rayons X secondaires caractéristiques. Ceux-ci sont mesurés à l'aide de spectromètres (Potts 1992, 326-382). Les intensités sont ensuite comparées à celles des rayonnements émis par des standards de composition connue.

*Paramètres techniques de mesure*

Les analyses ont été réalisées à l'aide de la microsonde Cameca SX 50, munie de 5 spectromètres, du Laboratoire de microanalyse de la Section des sciences de la Terre de l'Université de Lausanne, avec l'aide des responsables, F. Bussy, 1<sup>er</sup> assistant et J. Hernandez, professeur. Les analyses ont été faites en mode ponctuel (tension d'accélération 15 kV, courant 10 mA). Les paramètres techniques sont résumés à la

fig. 216. Les programmes de calcul des corrections sont ceux fournis par Cameca (Pouchou et Pichoir 1984). Le principal problème limitant les applications de cette méthode aux résidus métallurgiques anciens est l'établissement d'une gamme d'étalonnage appropriée. Les standards disponibles au moment de la réalisation des analyses ne possédaient pas toutes les qualités requises. Les résultats présentés dans ce travail ne sont donc pas très satisfaisants.

Un autre problème se pose, celui de l'analyse des minéraux contenant simultanément du  $\text{Fe}^{2+}$  et du  $\text{Fe}^{3+}$ . Dans l'état actuel, il n'est pas possible de les mesurer séparément; le rapport s'établit par calcul. Or ce calcul n'est valable que si les analyses sont de première qualité.

Incontestablement, à condition de développer des procédures de mesure spécifiques, la microsonde est un outil qui peut apporter énormément à l'étude des résidus sidérurgiques.

Elément	Standard	Cristal	Durée de l'analyse sec.	Bruit de fond		
Si	Silicium	Fayalite, synthétique	$\text{Fe}_2\text{SiO}_4$	TAP	20	$\pm 750$
Fe	Fer	Fayalite, synthétique	$\text{Fe}_2\text{SiO}_4$	LiF	20	$\pm 900$
Mn	Manganèse	Rhodonite, Broken Hill	$\text{MnSiO}_3$	LiF	20	$\pm 800$
Mg	Magnésium	Geikiélite, synthétique	$\text{MgTiO}_3$	TAP	20	$\pm 1100$
Al	Aluminium	Andalousite, Minas Gerais	$\text{Al}_2\text{SiO}_6$	TAP	20	$\pm 800$
Ca	Calcium	Hedenbergite, Broken Hill	$\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$	PET	20	$\pm 700$
Ti	Titane	Geikiélite, synthétique	$\text{MgTiO}_3$	LiF	20	$\pm 700$
V	Vanadium	oxyde de vanadium, synth.	$\text{V}_2\text{O}_5$	LiF	20	$\pm 700$

Fig. 216. Paramètres techniques de mesure pour la microsonde. Laboratoire de microanalyse, Section des sciences de la Terre, Université de Lausanne.

## Annexe 2: chronologie

Les nomenclatures chronologiques utilisées dans ce travail sont résumées aux fig. 217 et 218. La chronostratigraphie géologique est celle consacrée par l'usage. Les âges absolus sont basés sur les résultats des méthodes de radiochronologie (Caron *et al.* 1992, p.250-251).

L'échelle archéologique est inspirée des recommandations de la Société suisse de Préhistoire et d'Archéologie (SSPA 1986). Les datations absolues se fondent essentiellement sur les données fournies par la dendrochronologie et l'histoire.

Date années	AGES	Périodes	Remarques
av. JC			
8000	PALEOLITHIQUE		
5500	MESOLITHIQUE		
2300	NEOLITHIQUE		
800	AGE DU BRONZE		
450	Hallstatt	ancien	800-675
		final	675-450
	AGE DU FER		
		ancien	450-250
	La Tène	moyen	250-150 60-50 Guerre des Gaules
15		final	150- 15
0	EPOQUE ROMAINE	Epoque augustéenne	15-0
		Haut Empire	0-300
			254-260 incursions alamanes
		Bas Empire	300-450
			350-370 incursions barbares
			406- invasions barbares
450			
	HAUT MOYEN AGE	Mérovingien ancien	450-600 443- Royaume burgonde
			534-536 Royaume franc
		Mérovingien récent	600-750
		Carolingien	750-1000
1000			
	MOYEN AGE		
ap. J.-C.			

Fig. 217. Tableau chronologique synthétique pour les périodes protohistoriques et historiques.

Age m.a.	ERES	Systèmes	Sous-systèmes	Etages	autres noms			
1.8	QUATERNAIRE			Holocène				
				Pléistocène				
8	TERTIAIRE	Néogène	Pliocène	Plaisancien				
				Zancléen				
11			Miocène	supérieur		Pontien		
				moyen		Tortonien		
						Serravallien		
15			inférieur			Langhien		
						Burdigalien		
						Aquitanien		
23			Paléogène			Oligocène	Chattien	
							Stampien s.s.	
							Sannoisien	
34						Eocène	supérieur	Ludien
							moyen	Bartonien s.s.
	Lutétien							
52	inférieur					Yprésien		
						Paléocène	Thanéien	
							Montien	
	Danien							
65	SECONDAIRE	Crétacé			supérieur	Maestrichtien		
						Campanien		
						Santonien		
			Coniacien					
			Turonien					
			Cénomanien					
95			inférieur		Albien			
					Aptien			
					Barrémien			
					Hauterivien			
					Valanginien			
					Berriasien			
130			Jurassique		supérieur = Malm	Portlandien		
						Kimméridgien		
						Oxfordien		
150					moyen = Dogger		Callovien	
							Bathonien	
	Bajocien							
178	inférieur = Lias				Aalénien			
					Toarcién			
					Domérién			
			Carixien					
			Sinémurien					
204	Trias		Hettangien					
			supérieur					
			moyen					
245	PRIMAIRE		inférieur					
			Permien					
			Carbonifère					
			Devonien					
			Silurien					
			Ordovicien					
			Cambrien					
630	PRECAMBRIEN		Protérozoïque					
3800			Archéen					

Gault  
Urgonien

Fig. 218. Tableau chronologique synthétique pour les périodes géologiques. m.a.: million d'années.

## Annexe 3-7: analyses chimiques

## Nomenclature des scories et matériaux associés

Au cours de ce travail, de très nombreux échantillons de scories et matériaux associés provenant de Suisse occidentale, ont été étudiés et décrits. Nous avons été amené à définir un certain nombre de catégories et à introduire une nomenclature correspondante (voir tableau). C'est, à l'échelle régionale, un outil utile. Certaines grandes distinctions pourront être employées par des chercheurs travaillant dans d'autres zones. Mais en aucun cas, il ne s'agit d'une typologie générale des scories de fer. Bien d'autres formes et bien d'autres aspects sont connus par ailleurs et non discutés dans le cadre de ce travail.

Enfin, par commodité, nous avons préféré ne pas multiplier les catégories. Pour cette raison, on retrouvera les mêmes appellations d'une région à l'autre, alors qu'en fait il existe toujours de subtiles différences, non seulement entre les zones, mais d'un site à l'autre.

CATEGORIES		N ° FIGURES			
<b>MINERAI</b> : substance naturelle riche en fer, potentiellement exploitable					
Minerai «géologique» :	idem, récolté en place à l'affleurement.	31	142		
Minerai «archéologique» :	idem, récolté sur un site archéologique.				
Minerai «grillé» :	idem, modifié par un chauffage mais sans fusion.				
Minerai fondu :	idem, modifié par un début de fusion (= scorie interne rouillée)				
<b>PAROI</b> : matériaux constitutif des parois du fourneau					
Paroi non modifiée :	idem, cuit mais non fondu				
Paroi scorifiée :	idem, scorifié sur une seule face	67	107	108	109
Scorie de paroi :	idem, complètement scorifié	110			
<b>SCORIES DE REDUCTION</b> : résidu de la réduction du minerai par la méthode directe					
SGD	Scorie grise, dense, cristallisée				
	coulées :				
	en cordon (= petite coulure) $\varnothing$ 1-2cm	70	115		
	en amas de cordons (= en canal)	71	113	150	
	en cuvette	72			
	en plaque	114			
	non coulées :				
	en bloc suspendu (= scories internes massives)	75			
	en rognons				
	Scorie coulée, grise, vacuolaire	73			
SVN	Scorie noire, vitreuses, fortement vacuolaire :				
	coulées :				
	en cordon (= petite coulure) $\varnothing$ 1-2cm	115			
	en tuyau (= cordon large) $\varnothing$ 5-10cm	68	69	111	112
SIJ	Scorie intermédiaire jaunâtre, partiellement cristallisée, fortement vacuolaire				
	coulées :				
	en cordon (= petite coulure) $\varnothing$ 1-2cm				
	en tuyau (=cordon large) $\varnothing$ 5-10 cm	148			
SBD	Scorie à reflets bleus, denses, surface vitreuse, masse cristallisée:				
	coulées :				
	en plaque ?	155			
	Scorie coulée, composite	159			
<b>SCORIES POST-REDUCTION</b> : résidu du travail d'élaboration du métal (forge et raffinage)					
Calotte : Scorie non coulée hémisphérique					
	calotte SGD :	idem, gris sombre, dense, homogène	126	173	175 176 196
	calotte SGC :	idem, gris sombre, dense, charbonneuse			
	calotte SJD :	idem, gris-jaunâtre, dense, souvent hétérogène	135	181	183 184 197 198
	calotte SJC :	idem, gris-jaunâtre, charbonneuse, vacuolaire			
Informe : Scorie non coulée informe, masse d'aspect très variable					
	Petite coulure SGD ou SVN $\varnothing$ 1-2cm	134	177		
SAS	Scorie argilo-sableuse : matériaux argilo-sableux scorifiés sur toutes les faces				
	non coulées :				
	en rognon	194			
	en goutte ou en agglomérat de gouttes	134	174		
<b>DIVERS</b>					
Laitier :	résidu de la réduction par la méthode indirecte (haut fourneau)				
Mâchefer :	résidu de la forge moderne				
Battiture :	résidu du martelage (sphérique ou lamellaire)				

# Annexe 3.1

Echan <sup>o</sup>	DIA 101	DIA 102	MOL 101	SLV 501	SLV 502	SLV 503	SLV 504	SLV 505	SLV 6011	SLV 6012	SLV 6021	SLV 6022	SLV 6031	SLV 6032
Eléments majeurs % poids														
SiO2	61.40	85.68	80.59	73.30	66.36	41.83	63.05	80.31	65.29	64.83	72.87	68.79	63.48	60.23
TiO2	0.14	0.19	0.15	0.50	0.47	0.52	0.50	0.16	0.41	0.40	0.54	0.51	0.47	0.44
Al2O3	3.57	0.66	3.32	6.74	5.36	5.86	3.59	4.64	5.74	5.50	6.73	6.43	6.09	6.35
Fe2O3	29.00	11.02	12.91	13.70	21.04	40.77	26.30	9.74	22.58	23.28	14.98	18.23	22.84	25.47
FeO	0.41	0.69	0.55	0.86	0.69	0.78	0.26	0.84	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MnO	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.00	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02
MgO	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CaO	0.13	0.03	0.10	0.01	0.02	0.03	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.00	0.02	0.04
Na2O	0.00	0.05	0.01	0.09	0.03	0.07	0.09	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.89	0.00
K2O	0.05	0.02	0.13	0.25	0.18	0.33	0.18	0.06	0.12	0.12	0.17	0.15	0.24	0.16
P2O5	0.39	0.09	0.15	0.02	0.17	1.60	0.73	0.22	0.30	0.39	0.05	0.06	0.37	0.56
H2O	3.53	1.21	1.25	4.06	4.86	7.28	4.54	3.02	5.18	5.17	4.47	4.90	5.44	5.85
CO2	0.47	0.63	0.32	0.38	0.42	0.67	0.38	0.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	99.11	100.28	99.49	99.99	99.61	99.77	99.64	99.74	99.66	99.73	99.84	99.09	99.85	99.12
Eléments traces ppm														
Zr	165	75	52	239	445	188	428	64	205	192	286	274	230	204
Y	12	7	7	9	10	15	13	10	12	12	10	10	13	14
Sr	62	10	14	11	82	83	43	191	136	220	28	21	216	347
Rb	2	<2	5	10	8	16	7	3	6	7	8	8	10	8
Ba	142	17	55	78	201	206	168	253	212	374	64	49	413	744
V	185	57	96	107	113	285	100	77	95	92	71	80	110	127
Sn	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Sb	5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Ag	2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2
As	152	53	25	18	21	27	20	28	<8	10	8	<8	13	<8
Pb	16	<6	13	7	20	25	10	11	16	16	14	11	21	26
Zn	77	17	29	12	17	48	17	13	30	29	19	19	36	36
Cu	<3	17	<3	<3	<3	10	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3
Ni	38	8	4	6	15	32	8	10	17	18	10	10	27	33
Cr	101	40	15	77	70	124	42	60	36	36	22	24	50	51
Co	114	121	77	112	91	47	83	181	30	35	6	<6	23	27

3.1		Sidérolithique du Salève I		
N <sup>o</sup> échan.	Localisation	catégorie	remarque	

### "minerais géologiques"

DIA 101	Grotte du Diable, 8, amas 8.	grès ferrugineux	jaune	
DIA 102	Grotte du Diable, 8, minière	grès ferrugineux	orange	
MOL 101	Les Molliets, 18, amas 18.3	grès ferrugineux	rouge violacé, probablement chauffé	
SLV 501	Carrière de Vovray	croûte ferrugineuse	tout venant	
SLV 502	Carrière de Vovray	croûte ferrugineuse	tout venant	
SLV 503	Carrière de Vovray	croûte ferrugineuse	tout venant	
SLV 504	Carrière de Vovray	croûte ferrugineuse	tout venant	
SLV 505	Carrière de Vovray	croûte ferrugineuse	tout venant	
SLV 6011	Carrière de Vovray	croûte ferrugineuse	concassé et lavé	
SLV 6012	Carrière de Vovray	croûte ferrugineuse	concassé et lavé	
SLV 6021	Carrière de Vovray	croûte ferrugineuse	concassé	
SLV 6022	Carrière de Vovray	croûte ferrugineuse	concassé et lavé	
SLV 6031	Carrière de Vovray	croûte ferrugineuse	concassé	
SLV 6032	Carrière de Vovray	croûte ferrugineuse	concassé et lavé	

## Annexe 3.2

Ech n°	SLC 351	SLC 352	THU 101	DIA 201	DIA 202	SLP 151	MOL 171
Eléments majeurs % poids							
SiO <sub>2</sub>	16.38	7.76	15.68	5.28	2.79	56.16	5.34
TiO <sub>2</sub>	0.09	0.08	0.18	0.06	0.04	0.33	0.09
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.68	3.96	2.64	1.31	0.88	5.55	1.73
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	65.13	74.85	72.21	80.88	81.76	28.67	78.06
FeO	0.11	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MnO	0.24	0.35	0.13	0.36	0.20	0.47	1.43
MgO	0.30	0.16	0.02	0.02	0.04	0.48	0.09
CaO	0.17	0.13	0.07	0.10	0.06	0.18	0.13
Na <sub>2</sub> O	0.03	0.16	0.00	0.00	0.12	0.03	0.00
K <sub>2</sub> O	0.66	0.31	0.16	0.11	0.08	1.15	0.19
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.12	0.18	0.11	0.07	0.07	0.20	0.20
H <sub>2</sub> O	9.88	9.99	8.01	11.04	13.00	5.34	11.84
CO <sub>2</sub>	1.13	1.97	0.00	0.00	0.00	0.52	0.00
Total	99.92	99.96	99.21	99.23	99.04	99.08	99.10
Eléments traces ppm							
Zr	31	21	70	25	14	158	23
Y	34	29	23	11	24	23	28
Sr	9	7	10	15	6	85	12
Rb	26	12	10	8	7	49	11
Ba	29	17	49	37	24	102	50
V	85	87	110	50	92	172	47
Sn	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Sb	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Ag	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2
As	21	29	21	25	31	25	13
Pb	15	<6	7	12	9	51	<6
Zn	219	218	118	79	126	94	508
Cu	<3	4	<3	<3	<3	<3	<3
Ni	55	88	40	31	45	63	284
Cr	60	65	53	46	45	94	40
Co	83	59	60	47	71	112	197

3.2		Sidérolithique du Salève 2	
N° échan.	Localisation	catégorie	remarque

### "minerais archéologiques"

SLC 351	Les Convers, 5, ruisseau	concrétion FeOOH	
SLC 352	Les Convers, 5, ruisseau	concrétion FeOOH	
THU 101	La Thuile, 7, minière	concrétion FeOOH	
DIA 201	Grotte du Diable, 8, minière	concrétion FeOOH	
DIA 202	Grotte du Diable, 8, minière	concrétion FeOOH	
SLP 151	Le Pommier, 12, amas 12.2	concrétion FeOOH	
MOL 171	Les Molliets, 18, chemin	concrétion FeOOH	

# Annexe 3.3

Ech n°	SLC 201	SLC 202	SLC 301	SLC 302	SLC 601	SLC 602	THU 1	THU 2	THU 3	THU 4	THU 5	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4	DIA 5	SLP 101	SLP 102	MOL 1	MOL 2	
Eléments majeurs % poids																					
SiO2	42.54	42.26	41.29	33.82	33.12	30.32	22.17	19.00	30.80	27.15	28.79	16.69	23.50	15.96	37.92	35.92	26.17	23.00	24.87	26.18	
TiO2	0.19	0.25	0.26	0.18	0.19	0.20	0.13	0.14	0.17	0.19	0.18	0.19	0.23	0.18	0.21	0.21	0.19	0.16	0.19	0.10	
Al2O3	20.29	14.27	11.24	17.62	6.95	9.34	4.26	6.65	9.87	8.10	9.19	3.28	4.71	3.30	5.76	5.32	11.49	8.26	8.46	3.85	
Fe2O3	12.88	10.93	13.82	11.86	17.43	16.02	26.73	33.24	18.33	28.41	26.20	34.47	31.51	33.96	21.60	21.13	23.97	22.35	25.53	45.87	
FeO	13.89	24.60	21.01	24.97	33.91	35.99	37.80	29.19	32.73	23.33	24.98	35.02	24.48	35.57	24.54	29.17	27.16	35.97	29.78	8.08	
MnO	0.37	0.50	0.42	0.27	0.46	0.48	0.28	0.40	0.32	0.47	0.43	1.31	1.82	1.27	0.67	0.69	0.45	0.46	0.22	0.34	
MgO	0.49	0.45	0.68	0.53	0.43	0.41	0.37	0.21	0.43	0.36	0.56	0.35	0.57	0.32	0.38	0.42	0.28	0.38	0.50	0.33	
CaO	2.75	1.75	2.99	3.33	1.01	1.22	1.37	1.53	1.68	2.41	1.44	1.41	4.23	1.41	1.87	2.23	2.63	2.80	4.70	0.96	
Na2O	0.03	0.06	0.05	0.05	0.09	0.17	0.00	0.01	0.00	0.37	0.03	0.00	0.04	0.00	0.01	0.05	0.09	0.06	0.03	0.02	
K2O	1.30	1.37	1.72	1.25	0.92	0.97	0.54	0.43	0.69	0.80	1.00	0.42	1.21	0.45	0.94	1.12	0.70	0.75	0.70	0.65	
P2O5	0.29	0.34	0.30	0.56	0.62	0.48	0.22	0.27	0.29	0.37	0.20	0.21	0.30	0.20	0.25	0.25	0.37	0.33	0.38	0.31	
H2O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
CO2	0.39	0.26	0.89	1.22	0.30	0.22	0.19	0.12	0.18	0.18	0.11	0.22	0.16	0.33	0.21	0.24	0.27	0.16	0.19	0.45	
FeM	4.48	2.84	4.89	4.30	4.66	4.10	5.38	8.12	4.46	7.87	6.58	6.14	7.06	7.05	5.76	3.15	6.55	5.27	3.52	13.17	
Total	99.89	99.88	99.56	99.96	100.09	99.92	99.44	99.31	99.95	100.01	99.69	99.71	99.82	100.00	100.12	99.90	100.32	99.95	99.07	100.31	
Eléments traces ppm																					
Zr	87	128	117	84	105	235	57	46	75	75	70	59	76	58	86	89	97	82	72	44	
Y	37	38	43	32	27	65	26	96	36	113	52	23	32	23	36	34	41	46	20	37	
Sr	62	135	62	75	58	42	24	31	46	45	43	26	55	28	40	41	78	58	45	24	
Rb	37	41	48	35	29	17	18	14	21	27	33	13	27	17	29	29	23	23	24	21	
Ba	122	147	144	107	81	209	24	66	53	122	52	66	161	61	98	103	94	94	286	45	
V	152	251	126	191	226	1325	103	84	176	123	130	84	97	82	127	104	179	160	540	112	
Sn	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	
Sb	<5	<5	<5	<5	<5	5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	6	<5	<5	<5	5	
Ag	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	3	<2	<2	<2	2	2	2	<2	<2	<2	<2	3	
As	<8	8	9	<8	<8	28	13	<8	<8	12	8	11	<8	<8	9	<8	19	18	9	<8	
Pb	<6	<6	<6	<6	<6	6	<6	<6	<6	<6	<6	<6	<6	<6	<6	<6	<6	<6	<6	<6	
Zn	39	37	38	49	38	47	37	103	48	43	35	38	35	31	27	26	38	42	32	46	
Cu	<3	3	<3	3	4	13	<3	<3	<3	<3	<3	7	<3	<3	<3	<3	5	6	3	3	
Ni	14	14	12	13	11	38	8	52	11	44	21	9	14	7	14	14	5	7	8	14	
Cr	102	141	99	135	131	501	63	45	92	52	87	49	53	41	62	59	81	70	63	61	
Co	51	87	46	40	31	92	24	62	9	20	11	14	8	8	22	<6	41	18	15	22	

3.3		Scories du Salève			
N° échan.	Localisation	catégorie description	analyse minéralogique (diffraction RX)	remarque	
SLC 201	Les Convers, 5, amas 5.2	SVN, tuyau	Her, Qz, (Fe), verre	partie inf. jaunâtre	
SLC 202	Les Convers, 5, amas 5.2	SVN, tuyau	verre		
SLC 301	Les Convers, 5, amas 5.3	SVN, tuyau		partie inf. jaunâtre	
SLC 302	Les Convers, 5, amas 5.3	SVN, tuyau			
SLC 601	Les Convers, 5, amas 5.6	SGD, amas de cordons	Fay, Her	inclusions silicates	
SLC 602	Les Convers, 5, amas 5.6	SGD, cuvette	Fay, Her, (Qz)		
THU 1	La Thuile, 7, amas 7.1	SGD, amas de cordons			
THU 2	La Thuile, 7, amas 7.1	SGD, amas de cordons			
THU 3	La Thuile, 7, amas 7.1	SGD, amas de cordons			
THU 4	La Thuile, 7, amas 7.1	SGD, amas de cordons			
THU 5	La Thuile, 7, amas 7.1	SGD, amas de cordons			
DIA 1	Grotte du Diable, 8, amas 8.1	SGD, cuvette			
DIA 2	Grotte du Diable, 8, amas 8.1	SGD, amas de cordons	Fay, Wü		
DIA 3	Grotte du Diable, 8, amas 8.1	SGD, cuvette	Fay, Wü, (Her), (Qz)		
DIA 4	Grotte du Diable, 8, amas 8.1	SGD, cuvette			
DIA 5	Grotte du Diable, 8, amas 8.1	SGD, amas de cordons			
SLP 101	Le Pommier, 12, amas 12.2	SGD, amas de cordons	Fay, Her		
SLP 102	Le Pommier, 12, amas 12.2	SGD, amas de cordons			
MOL 1	Les Molliets, 18, amas 18.3	SGD, amas de cordons			
MOL 2	Les Molliets, 18, amas 18.3	SGD, cuvette/plaque			

SGD : Scorie grise dense  
SVN : Scorie vitreuse noire

Fay : Fayalite  
Her : Hercynithe  
Wü : Wüstite  
Qz : Quartz  
Fe: fer métal visible

## Annexe 4.1

Ech n°	FER 151	FER 171	GOU 14	GAR 102	GOU 3	GAR 101	ALV 101	GOU 1	GOU 2	GOU 11	GOU 12	GOU 13	GOU 15	PRI 251	PRI 252
Eléments majeurs % poids															
SiO2	20.70	23.85	16.33	48.87	30.57	48.74	53.75	53.09	52.00	52.24	50.01	60.27	53.81	8.19	6.36
TiO2	0.25	0.28		1.23	0.78	1.17	1.27	1.23	1.18					0.24	0.19
Al2O3	4.84	6.25	9.90	20.49	14.29	18.93	20.23	19.98	20.53	22.60	18.73	23.04	21.85	4.97	3.94
Fe2O3	59.52	44.31	60.22	18.97	39.33	10.46	11.53	11.32	13.87	10.40	18.30	15.83	15.79	18.88	10.19
FeO	0.12	11.49		0.00	1.56	0.36	0.21	2.70	0.89					0.03	0.07
MnO	0.26	0.78	0.39	0.05	0.10	0.04	0.02	0.06	0.06	0.15	0.37	0.23		5.97	0.55
MgO	0.19	0.20	0.11	0.08	0.17	0.38	0.50	0.17	0.27	0.10	0.06	0.20		0.36	0.14
CaO	2.09	4.10	0.29	0.22	0.55	6.43	2.26	0.23	0.27	0.30	0.36	0.33	0.09	34.23	43.63
Na2O	0.01			0.00	0.02	0.05	0.01	0.29	0.13					0.08	0.05
K2O	0.02			0.30	0.17	0.21	0.27	0.44	0.53					0.06	0.02
P2O5	0.19	0.87	0.25	0.07	0.20	0.06	0.14	0.07	0.12	0.07	0.08	0.08		0.08	0.05
H2O	9.15		11.54	8.79	9.64	7.14	8.59	8.26	8.14	12.94	11.42			2.78	3.71
CO2	2.46		0.54	0.00	1.04	5.13	1.35	0.16	0.24	0.42	0.32			24.13	31.00
Total	99.80	92.06	99.57	99.08	98.42	99.10	100.13	98.00	98.23	99.22	99.65	99.98	91.54	100.00	99.90
Eléments traces ppm															
Zr	100			274	273	321	314	388	357					47	46
Y	21			20	28	20	16	22	52					39	21
Sr	29			57	54	129	45	48	63					80	42
Rb	3			43	20	28	27	58	82					4	3
Ba	56			61	68	54	54	152	129					187	85
V	508			303	726	141	156	200	272					143	68
Sn	<5			<5	<5	<5	<5	<5	<5					<5	<5
Sb	<5			<5	8	<5	<5	<5	<5					6	<5
Ag	<2			<2	<2	<2	<2	<2	<2					2	3
As	480			70	216	50	70	53	81					405	128
Pb	108			61	90	66	64	67	74					29	9
Zn	148			77	144	129	92	70	77					75	38
Cu	15			<3	11	<3	11	<3	3					32	4
Ni	98			67	113	44	50	75	97					99	40
Cr	108			118	511	110	111	180	164					9	5
Co	123			31	71	15	12	31	45					42	14

4.1		Sidérolithique du Mormont 1			
N° échan.	Localisation	catégorie description	remarque	référence	

### Minerais "géologiques"

FER 151	Haut de Champs, M10	Pisolithe		Pelet 1973 Schardt 1923, n°45
FER 171	Haut de Champs, M10	Pisolithe		
GOU 14	Goumoens-J., M11	Pisolithes lavés		
GAR 102	Gare d'Eclépens, M4	Bolus rouge	env.30% pisolithes	
GOU 3	Goumoens-J., M11	Bolus rouge	env.30% pisolithes	
GAR 101	Gare d'Eclépens, M4	Bolus rouge		
ALV 101	Les Alleveys, M8	Bolus rouge		
GOU 1	Goumoens-J., M11	Bolus rouge	env.5% pisolithes	
GOU 2	Goumoens-J., M11	Bolus rouge	env.5% pisolithes	
GOU 11	Goumoens-J., M11	Bolus jaune		
GOU 12	Goumoens-J., M11	Bolus rouge		Schardt 1923, n°42
GOU 13	Goumoens-J., M11	Bolus rouge		Schardt 1923, n°43
GOU 15	Goumoens-J., M11	Bolus rouge		Schardt 1923, n°44 Schardt 1923

### Minerais "archéologiques" : calcaires

PRI 251	Prins-Bois 2, 5.2	calcaire ferrugineux	
PRI 252	Prins-Bois 2, 5.2	calcaire ferrugineux	env.10% bolus rouge

## Annexe 4.2

Echn°	BEL 131	BEL 171	BEL 172	BEL 173	BEL 174	BEL 251	BEL 252	BEL 253	BEL 261	BEL 271	BEL 351	BEL 361	BOS 151	BOS 152	CAR 151	CAR 161	LAC 261	LAC 361	PRI 171	PRI 261	
Eléments majeurs % poids																					
SiO2	31.86	15.28	20.58	11.53	28.42	14.80	26.81	21.16	15.17	21.62	23.44	26.00	25.21							25.60	
TiO2	0.83	0.27	0.28	0.26	0.62	0.48	0.65	0.52	0.26	0.77	0.51	0.64	0.69							0.55	
Al2O3	14.45	8.72	11.79	5.72	9.78	8.85	10.96	8.95	8.38	12.48	8.64	11.26	12.92							11.50	
Fe2O3	19.00	66.28	54.78	23.20	50.83	70.63	55.29	62.54	64.88	58.34	61.48	54.79	52.05							45.09	
FeO	21.92	0.26	0.26	0.26	4.92	0.00	0.00	0.25	0.22	0.13	0.53	0.06	0.35							2.16	
MnO	0.30	0.32	0.71	26.27	0.49	0.40	0.19	0.16	0.28	0.27	0.27	0.16	0.66							0.54	
MgO	0.32					0.11	0.13	0.13		0.12	0.10	0.11	0.30							0.06	
CaO	2.03	3.51	2.70	5.36	3.10	0.93	0.79	0.89	3.20	0.60	0.30	0.71	0.95							0.80	
Na2O	0.10					0.00	0.04	0.02		0.02	0.08	0.01	0.04								
K2O	0.37					0.04	0.06	0.03		0.04	0.03	0.06	0.23								
P2O5	0.33	0.50	0.50	0.50	0.50	0.30	0.20	0.37		0.31	0.28	0.34	0.24							0.57	
H2O	0.00			7.20		2.27	4.19	3.35		3.84	3.00	4.78	4.12								
CO2	0.89			8.40		0.34	0.48	0.98		1.09	0.71	0.91	2.15								
Total	99.19	95.12	91.60	89.00	98.66	99.15	99.79	99.35	92.39	99.63	99.37	99.83	99.91							86.87	
Eléments traces ppm																					
Zr	278					144	186	193	164	189	172	181	230	247	307	174	195			243	
Y	39					28	29	41	30	45	29	28	30	44	21	44	29			30	
Sr	50					31	39	34	34	21	48	14	30	25	17	59	54			31	
Rb	12					4	10	4	5	4	7	4	8	22	7	12	4			13	
Ba	196					142	163	151	170	214	136	128	115	170	68	120	31			78	
V	1704					953	1543	1893	1116	1611	1188	1276	2675	1647	338	692	633			626	
Sn	<5					<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5			<5	
Sb	<5					6	<5	8	<5	12	10	5	12	12	<5	6	10			<5	
Ag	<2					<2	<2	2	<2	<2	<2	2	<2	<2	<2	<2	<2			<2	
As	33					408	216	459	358	520	403	316	436	601	135	1122	176			315	
Pb	47					69	75	85	49	85	58	56	89	126	37	<6	27			49	
Zn	229					204	201	294	235	335	219	176	292	334	126	51	194			220	
Cu	31					19	21	96	16	27	19	10	153	86	17	46	11			10	
Ni	33					298	234	254	281	222	269	185	234	348	155	265	232			219	
Cr	126					75	99	70	146	109	148	66	79	112	223	141	312			198	
Co	58					158	123	126	144	206	144	113	77	246	72	147	122			118	

4.2	Sidérolithique du Mormont 2			
N° échan.	Localisation	catégorie description	remarque	référence

### Minerais "archéologiques" : bolus

BEL 131	Bellaires 1, 25.1	Bolus rouge	env.5% pisolithes	grillé
BEL 171	Bellaires 1, 25.1	Minerai brun-rouge		Pelet 1973
BEL 172	Bellaires 1, 25.1	Minerai brun		Pelet 1973
BEL 173	Bellaires 1, 25.1	Minerai bleuâtre		Pelet 1973
BEL 174	Bellaires 1, 25.1	Minerai grillé		Pelet 1973
BEL 251	Bellaires 2, 25.2	Bolus rouge	env.5% pisolithes	
BEL 252	Bellaires 2, 25.2	Bolus rouge	env.5% pisolithes	
BEL 253	Bellaires 2, 25.2	Bolus rouge	env.5% pisolithes	
BEL 261	Bellaires 2, 25.2	Minerai		
BEL 271	Bellaires 2, 25.2	Minerai rougeâtre		Pelet 1973
BEL 351	Bellaires 3, 25.3	Bolus rouge	env.5% pisolithes	
BEL 361	Bellaires 3, 25.3	Minerai		
BOS 151	Bossena 1, 18	Bolus rouge	env.5% pisolithes	
BOS 152	Bossena 1, 18	Bolus rouge	env.5% pisolithes	
CAR 151	Carolines, 16	Bolus rouge	env.5% pisolithes	
CAR 161	Carolines, 16	Minerai		
LAC 261	Petits Lacs 2, 21	Minerai		
LAC 361	Petits Lacs 3, 19	Minerai		
PRI 171	Prins Bois 1, 5.2	Minerai		Pelet 1960a
PRI 261	Prins Bois 2, 5.2	Bolus rouge	env.5% pisolithes	

## Annexe 4.3

Echn°	PRP 1	PRP 2	PRP 3	PRP 4	PRP 5	COS 1	COS 2	COS 3	COS 4	COS 5
Eléments majeurs % poids										
SiO <sub>2</sub>	26.08	22.14	9.11	24.28	6.76	37.05	45.61	40.88	59.59	46.77
TiO <sub>2</sub>	0.19	0.19	0.18	0.26	0.09	0.74	0.80	1.12	1.01	1.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.50	5.59	4.49	7.38	2.23	23.32	26.75	33.36	27.26	29.94
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	34.07	31.35	34.34	18.30	43.08	2.11	4.85	3.47	1.06	2.24
FeO	19.20	18.40	18.26	24.53	23.15	7.31	5.33	9.54	2.30	2.00
MnO	0.54	0.09	0.23	0.21	0.39	0.16	0.24	0.12	0.08	0.16
MgO	0.70	0.54	0.59	0.83	0.18	2.03	3.26	2.61	1.20	3.15
CaO	7.90	6.47	2.00	3.61	0.83	3.25	4.22	3.17	0.45	5.44
Na <sub>2</sub> O	0.20	0.24	0.03	0.17	0.11	0.46	0.38	0.24	0.72	0.46
K <sub>2</sub> O	2.46	0.65	0.58	0.86	0.19	2.98	3.26	2.26	5.13	3.17
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.45	0.35	0.26	0.22	0.21	0.29	0.21	0.20	0.15	0.23
H <sub>2</sub> O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.29	0.00	0.00	0.00	0.00
CO <sub>2</sub>	0.69	1.90	8.28	5.06	4.06	13.60	1.49	2.32	0.67	1.89
FeM	3.80	11.71	21.05	14.21	18.25	0.00	3.20	0.79	0.40	3.60
Total	99.78	99.62	99.40	99.92	99.53	99.59	99.60	100.08	100.02	100.05
Eléments traces ppm										
Zr	65	72	24	72	20	110	145	178	120	138
Y	17	14	13	19	8	44	54	44	38	45
Sr	79	173	43	193	45	567	578	507	185	584
Rb	73	32	38	59	14	161	185	111	230	164
Ba	190	176	126	259	60	1729	2064	1648	1068	1857
V	28	48	67	57	47	172	155	173	129	139
Sn	<5	17	<5	<5	394	<5	<5	<5	<5	<5
Sb	7	<5	8	7	10	5	<5	<5	<5	<5
Ag	2	2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	2
As	12	55	364	24	85	51	35	23	<8	<8
Pb	<6	6	<6	<6	45	13	<6	<6	<6	<6
Zn	25	24	25	25	31	33	24	13	26	22
Cu	136	148	216	234	760	175	58	60	55	45
Ni	19	64	130	60	148	94	122	123	56	117
Cr	26	50	62	37	67	98	75	98	100	73
Co	12	45	67	49	96	87	80	105	23	74

4.3		Produits scorifiés modernes de la région du Mormont			
N° échan.	Localisation	catégorie description	analyse minéralogique RX, lames minces	remarque référence	

### Secteur Cuarnens

PRP 1	Pré Penard 2, 2	mâchefer hétérogène		
PRP 2	Pré Penard 2, 2	mâchefer homogène		
PRP 3	Pré Penard 2, 2	mâchefer hétérogène		Fe abondant, houille
PRP 4	Pré Penard 2, 2	mâchefer hétérogène		
PRP 5	Pré Penard 2, 2	mâchefer homogène		

### Secteur de Cossonay

COS 1	sans précision	mâchefer, ± calotte		Fe, houille
COS 2	sans précision	mâchefer, ± calotte		Fe, houille
COS 3	sans précision	mâchefer, ± calotte		
COS 4	sans précision	matière vitrifiée blanche		
COS 5	sans précision	mâchefer		charbon

Fe: fer métal visible

# Annexe 4.4

Echn°	PRI 181	PRI 182	PRI 1	PRI 2	PRI 3	PRI 4	PRI 5	BAR 1	BAR 2	BAR 3	BAR 4	ROS 201	ROS 202	ROS 203	ROS 204	101ROS	102ROS	181	
Eléments majeurs % poids																			
SiO <sub>2</sub>	29.06	41.24	24.23	39.58	38.84	37.46	40.46	35.62	36.55	47.12	52.87	28.10	26.85	43.88	44.01	33.67	47.31	38.24	
TiO <sub>2</sub>	0.42	0.55	0.75	1.05	0.98	1.08	1.04	0.67	0.74	1.09	1.04	0.73	0.77	0.99	1.02	0.83	0.99	1.00	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20.10	5.30	14.00	18.53	17.33	19.39	19.07	11.19	13.38	19.53	17.88	12.77	13.35	17.74	17.23	14.34	16.83	14.40	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26.35	24.86	14.54	0.00	-1.30	3.13	4.42	12.89	8.25	3.90	1.78	14.41	15.58	8.53	7.46	15.86	3.21	8.14	
FeO	9.77	6.18	28.48	18.91	28.50	21.98	20.83	29.68	28.70	16.18	20.99	33.61	35.78	21.10	20.58	20.70	20.10	30.32	
MnO	0.49	0.78	2.87	4.54	1.09	4.93	1.94	0.57	2.67	1.86	0.37	0.29	0.35	0.39	0.62	0.30	0.38	0.44	
MgO	0.13	0.19	0.94	1.19	0.74	1.43	0.95	0.42	0.60	0.56	0.50	0.45	0.35	0.63	0.62	0.44	0.61	0.35	
CaO	1.50	0.70	4.38	6.76	4.88	5.52	7.01	3.63	4.90	3.79	2.46	4.33	2.04	3.29	2.80	5.88	4.20	4.30	
Na <sub>2</sub> O	0.47	0.18	0.11	0.03	0.09	0.17	0.11	0.14	0.11	0.15	0.10	0.00	0.01	0.09	0.10	0.02	0.10	0.35	
K <sub>2</sub> O	0.38	0.32	0.98	0.76	0.81	1.02	0.80	0.52	0.61	0.91	0.72	0.48	0.36	0.86	0.77	0.51	1.15	0.57	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.43	0.52	0.41	0.20	0.28	0.22	0.18	0.26	0.29	0.08	0.08	0.41	0.36	0.19	0.12	0.23	0.14	0.48	
H <sub>2</sub> O			0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
CO <sub>2</sub>			0.27	1.38	0.76	0.94	1.74	0.50	0.65	0.39	0.35	0.14	0.29	0.55	0.46	0.23	0.51		
FeH			5.07	4.94	7.04	2.80	1.26	2.97	2.15	2.42	0.54	3.25	3.57	1.91	2.46	3.94	2.98		
Total	89.10	80.82	97.03	97.87	100.04	100.07	99.81	99.06	99.60	97.98	99.68	98.97	99.66	100.15	98.25	96.95	98.51	98.59	
Eléments traces ppm																			
Zr			196	304	290	272	273	253	209	353	394	231	229	325	333	290	356		
Y			38	49	45	56	46	39	41	49	36	44	44	43	45	45	45		
Sr			156	159	164	255	171	54	88	86	114	63	52	93	64	72	72		
Rb			18	19	22	30	22	16	29	26	17	13	13	26	18	13	21		
Ba			163	248	167	342	229	230	580	561	129	131	194	148	314	170	270		
V			828	859	776	839	785	1197	1199	1686	1019	1393	1849	1251	1747	1608	1634		
Sn			<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5		
Sb			6	<5	<5	5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	6	<5	<5		
Ag			2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	2	<2	<2	<2	<2		
As			848	64	127	38	40	15	31	15	22	13	26	28	24	9	17		
Pb			<6	<6	<6	<6	7	24	15	<6	<6	<6	16	7	6	6	<6		
Zn			58	27	40	33	46	157	158	39	29	122	196	62	55	122	41		
Cu			63	28	15	11	14	15	27	4	4	15	21	11	9	18	6		
Ni			260	34	66	36	37	26	36	15	17	26	26	19	20	22	20		
Cr			96	88	99	97	100	87	84	145	121	96	100	127	155	113	147		
Co			142	7	44	49	57	21	20	13	60	28	22	56	19	51	13		

## 4.4

### Scories de la région du Mormont 1

N° échan.	Localisation	catégorie description	analyse minéralogique RX, lames minces	remarque référence
-----------	--------------	-----------------------	--	--------------------

#### Secteur La Praz - Juriens

PRI 181	Prins Bois 1, 5.1	scorie		Pelet 1960a
PRI 182	Prins Bois 1, 5.1, four 19,	scorie		Pelet 1960a
PRI 1	Prins Bois 2, 5.2	SGD, non coulée		Fe abondant
PRI 2	Prins Bois 2, 5.2	interm., gris/jaunâtre, bulleux, bloc		Fe, hétérogène
PRI 3	Prins Bois 2, 5.2	SVN, tuyau		Fe, hétérogène
PRI 4	Prins Bois 2, 5.2	SVN, tuyau ?		
PRI 5	Prins Bois 2, 5.2	SVN, tuyau		Fe
BAR 1	Barnel 1, 7	SGD, amas de cordons		
BAR 2	Barnel 1, 7	interm., gris clair, bulleux, tuyau ?		hétérogène
BAR 3	Barnel 1, 7	SVN, tuyau		
BAR 4	Barnel 1, 7	SVN, tuyau		
ROS 201	Rosset 2, 8	SGD, amas de cordons		
ROS 202	Rosset 2, 8	SGD, amas de cordons	Fay, Her	
ROS 203	Rosset 2, 8	SVN, tuyau		
ROS 204	Rosset 2, 8	SVN, tuyau		
ROS 101	Rosset 1, 9	SGD, amas de cordons		
ROS 102	Rosset 1, 9	SVN, tuyau ?		inclusions silicates
ROS 181	Rosset 1, 9	scorie		Pelet 1960a

SGD : Scorie grise dense

SVN : Scorie vitreuse noire

interm. : Scorie intermédiaire entre SVN et SGD

Fay : Fayalite

Her : Hercynite

Fe: fer métal visible

# Annexe 4.5

Ech n°	PDF 1	PDF 2	PDF 3	PDF 4	PDF 181	PDF 182	VOU 1	VOU 2	VOU 3	VOU 4	VOU 5	BOS 1	BOS 2	BOS 3	BOS 4	BOS 13	BOS 14	BOS 15	BOS 181	
Eléments majeurs % poids																				
SiO2	47.67	35.65	48.57	43.28	42.06	48.48	77.23	37.70	42.52	48.34	42.00	36.89	45.28	37.23	53.04	46.33	48.50	39.41	43.37	
TiO2	0.72	0.86	1.02	1.06	0.54	1.00	0.43	0.99	1.20	1.29	0.88	0.86	0.84	1.02	0.98	1.17	1.20	0.92	0.67	
Al2O3	12.61	16.82	17.82	17.88	17.75	20.95	10.61	17.24	21.64	22.28	16.61	14.87	14.26	17.96	16.07	20.01	20.72	15.93	17.30	
Fe2O3	0.29	3.84	12.09	14.51	17.40	18.36	0.00	2.27	7.75	2.90	8.77	16.53	2.19	12.37	1.00	0.77	3.13	10.71	8.86	
FeO	18.78	18.85	7.45	8.46	13.79	5.03	3.09	21.45	8.57	17.30	11.60	18.52	23.53	24.96	19.77	22.20	17.73	23.04	22.56	
MnO	0.53	2.89	0.39	0.86	0.75	1.01	0.11	5.52	3.30	1.03	3.49	0.37	0.66	0.38	0.58	0.47	0.46	0.34	0.45	
MgO	0.37	0.71	0.35	0.79	0.24	0.05	1.05	1.10	1.23	0.85	1.57	0.33	0.27	0.32	0.33	0.36	0.54	0.33	0.70	
CaO	3.13	8.39	2.62	4.53	5.00	3.05	1.10	6.68	5.67	4.40	7.06	3.43	1.87	2.00	2.51	3.12	5.11	2.74	3.15	
Na2O	0.03	0.10	0.07	0.14	0.61	0.89	1.32	0.09	0.01	0.08	0.24	0.01	0.01	0.10	0.08	0.25	0.12	0.13	0.01	
K2O	0.74	1.23	0.67	0.56	0.22	0.12	2.46	0.63	1.15	0.81	0.90	0.36	0.48	0.52	0.51	0.72	0.83	0.44	0.53	
P2O5	0.30	0.30	0.12	0.19	0.39	0.21	0.10	0.21	0.08	0.07	0.24	0.20	0.19	0.16	0.09	0.08	0.08	0.17	0.36	
H2O	0.00	0.00	0.00	0.00			0.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
CO2	1.25	2.85	0.80	0.55			0.66	1.63	0.58	0.36	1.13	1.15	0.80	1.79	1.13	0.75	0.82	1.24		
FeM	12.79	6.89	7.07	6.72			1.02	2.75	3.29	0.40	4.14	6.16	9.24	1.24	3.67	1.88	0.64	3.01		
Total	99.21	99.38	99.04	99.53	98.75	100.05	99.50	98.26	96.99	100.11	98.63	99.68	99.62	100.05	99.76	98.11	99.88	98.41	97.96	
Eléments traces ppm																				
Zr	249	226	334	289			127	247	346	372	269	300	318	339	411	385	386	339		
Y	38	48	48	47			24	50	60	46	43	45	49	47	48	53	54	46		
Sr	61	100	60	203			71	140	253	169	222	50	58	59	61	66	81	49		
Rb	34	33	24	23			93	29	31	30	40	16	24	22	28	22	30	23		
Ba	155	542	304	183			327	317	357	198	271	246	340	258	239	334	347	274		
V	828	1215	1707	850			51	925	1006	954	610	2013	1585	1659	1475	1967	1455	2261		
Sn	<5	<5	<5	<5			<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5		
Sb	<5	<5	<5	<5			<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5		
Ag	<2	2	<2	<2			<2	<2	<2	<2	<2	2	<2	<2	<2	<2	<2	<2		
As	50	35	32	68			41	<8	28	16	45	15	51	25	33	23	17	43		
Pb	7	7	<6	<6			<6	<6	<6	<6	<6	15	7	<6	10	<6	<6	8		
Zn	66	41	45	52			14	48	26	28	30	142	82	75	41	49	26	174		
Cu	15	36	11	<3			10	22	<3	<3	5	30	19	44	24	8	<3	17		
Ni	45	33	44	36			36	28	16	13	29	31	46	27	19	22	21	27		
Cr	100	99	122	104			67	91	146	144	90	121	106	135	100	157	160	136		
Co	56	9	34	43			15	13	12	14	64	21	40	20	50	13	9	121		

4.5		Scories de la région du Mormont 2			
N° échan.	Localisation	catégorie description	analyse minéralogique RX, lames minces	remarque référence	

### Secteur Moiry - Bellaires

PDF 1	Fontaine des Forges, 14	SVN, tuyau		Fe abondant, hétéro.
PDF 2	Fontaine des Forges, 14	interm., gris clair, bulleux, bloc		inclusions silicates
PDF 3	Fontaine des Forges, 14	SVN, tuyau		Fe, hétérogène
PDF 4	Fontaine des Forges, 14	SVN, tuyau		Fe, hétérogène
PDF 181	Fontaine des Forges, 14,	scorie		Pelet 1960a
PDF 182	Fontaine des Forges, 14,	scorie		Pelet 1960a
VOU 1	Voualève 1, 15	scorie de paroi		Fe, incl.gneiss
VOU 2	Voualève 1, 15	interm., gris clair, bulleux, tuyau ?		hétérogène
VOU 3	Voualève 1, 15	SVN, tuyau		Fe
VOU 4	Voualève 1, 15	SVN, tuyau		Fe
VOU 5	Voualève 1, 15	SVN, tuyau		Fe
BOS 1	Bossena 1, 18	interm., gris jaunâtre, bulleux, tuyau		Fe, hétérogène
BOS 2	Bossena 1, 18	SVN, tuyau	verre, (Qz)	Fe, incl.gneiss, hét.
BOS 3	Bossena 1, 18	SVN, tuyau		hétérogène
BOS 4	Bossena 1, 18	SVN, cordon plat		hétérogène
BOS 13	Bossena 1, 18	SVN, tuyau		
BOS 14	Bossena 1, 18	SVN, tuyau		
BOS 15	Bossena 1, 18	SVN, tuyau		
BOS 181	Bossena 1, 18	scorie		Pelet 1960a

SGD : Scorie grise dense

SVN : Scorie vitreuse noire

interm. : Scorie intermédiaire entre SVN et SGD

Qz : Quartz

Fe: fer métal visible

# Annexe 4.6

Ech n°	BEL 101	BEL 102	BEL 181	BEL 182	BEL 183	BEL 184	BEL 185	BEL 186	BEL 187	BEL 188	BEL 189	BEL 190	BEL 191	BEL 302	BEL 304	BEL 305	BEL 281	BEL 282
Eléments majeurs % poids																		
SiO2	35.32	28.82	58.30	51.20	18.07	41.00	31.16	53.28	27.09	13.48	55.05	38.05	40.85	29.68	28.41	36.83	42.44	25.66
TiO2	0.90	0.74		0.62				0.58	0.49		0.39		0.44	0.78	0.65	0.88		
Al2O3	16.16	13.58	11.28	11.20	6.01	16.69	13.02	11.92	10.12	9.12	9.35	11.69	11.48	14.38	11.06	15.09	13.88	11.51
Fe2O3	24.09	24.50	24.75	27.65	63.48	7.63	9.82	25.90	44.72	72.26	10.38	37.53	40.85	31.13	19.42	25.52	4.06	11.32
FeO	9.68	17.85				31.93	39.10							7.86	30.73	11.46	35.35	47.28
MnO	0.33	1.68	0.12	0.05	0.39	0.32	0.32	0.11	0.12	0.19	0.12	0.39	0.09	0.30	0.26	0.25	0.39	0.36
MgO	0.37	0.80	0.20	0.66		0.20	1.21	1.31	2.62	0.60	0.71	0.71	0.40	0.41	0.38	0.41	0.40	0.40
CaO	3.63	3.79	0.28	0.70	2.66	2.24	3.93	2.94	2.80	0.56	5.89	5.89	1.54	5.20	2.78	1.89	3.65	3.08
Na2O	0.09	0.08												0.02	0.22	0.04		
K2O	0.55	0.48												0.41	0.32	0.36		
P2O5	0.25	0.45												0.28	0.41	0.21		
H2O	0.00	0.00												0.00	0.00	0.00		
CO2	1.33	0.17												0.35	0.16	0.67		
FeM	7.10	7.29												8.81	4.70	6.11		
Total	99.80	100.23	94.93	92.08	90.61	100.01	98.56	96.04	87.96	96.21	81.89	94.26	95.65	99.61	99.50	99.72	100.17	99.61
Eléments traces ppm																		
Zr	273	193												223	241	294		
Y	48	52												45	40	38		
Sr	53	98												54	50	70		
Rb	17	19												16	11	10		
Ba	240	116												186	137	223		
V	1624	809												1591	1454	1707		
Sn	<5	<5												<5	<5	<5		
Sb	<5	<5												<5	<5	<5		
Ag	<2	<2												<2	<2	<2		
As	34	65												29	62	19		
Pb	8	11												17	26	<6		
Zn	109	104												143	151	100		
Cu	19	10												32	68	18		
Ni	43	35												39	53	17		
Cr	123	78												125	87	124		
Co	32	39												39	82	55		

4.6		Scories de la région du Mormont 3		
N° échan.	Localisation	catégorie description	analyse minéralogique RX, lames minces	remarque référence

### Secteur Moiry - Bellaires (suite)

BEL 101	Bellaires 1, 25.1	SVN, tuyau		Fe, hétérogène
BEL 102	Bellaires 1, 25.1	SGD, amas de cordons		Pelet 1973
BEL 181	Bellaires 1, 25.1, four 9	paroi		Pelet 1973
BEL 182	Bellaires 1, 25.1, four 5	paroi		Pelet 1973
BEL 183	Bellaires 1, 25.1, four 4/5	scorie		Pelet 1973
BEL 184	Bellaires 1, 25.1, four 7	paroi		Pelet 1973
BEL 185	Bellaires 1, 25.1, four 15	scorie		Pelet 1973
BEL 186	Bellaires 1, 25.1, four 12	paroi		Pelet 1973
BEL 187	Bellaires 1, 25.1, four 12	fond		Pelet 1973
BEL 188	Bellaires 1, 25.1, four 14	scorie		Pelet 1973
BEL 189	Bellaires 1, 25.1, four 2	paroi		Pelet 1973
BEL 190	Bellaires 1, 25.1, four 3	paroi		Pelet 1973
BEL 191	Bellaires 1, 25.1, four 4	paroi		Pelet 1973
BEL 302	Bellaires 3, 25.3	interm., gris clair, bulleux, tuyau ?		
BEL 304	Bellaires 3, 25.3	interm., jaunâtre	Fay, Her, (Qz)	
BEL 305	Bellaires 3, 25.3	SVN, tuyau		
BEL 281	Bellaires 2, 25.2, four 17	scorie		Pelet 1973
BEL 282	Bellaires 2, 25.2, four 17	scorie		Pelet 1973

SGD : Scorie grise dense  
 SVN : Scorie vitreuse noire  
 interm. : Scorie intermédiaire entre SVN et SGD

Fay : Fayalite  
 Her : Hercynite  
 Qz : Quartz  
 Fe: fer métal visible

## Annexe 4.7

Ech n°	CAR 1	CAR 2	CAR 3	CAR 4	CAR 5	CAR 6	CAR 7	CAR 8	CAR 9	CAR 10	LAC 301	LAC 302	MLF 181	MLF 182	MLF 183	LOU 181	ORN 201	
Eléments majeurs % poids																		
SiO <sub>2</sub>	46.80	35.43	64.21	34.20	38.20	45.90	40.78	46.77	41.90	47.13	37.88	46.76	41.78	39.35	41.38	40.30	52.69	
TiO <sub>2</sub>	1.18	0.76	0.62	0.94	0.87	0.98	0.88	1.00	1.07	1.30	0.90	0.91	0.92	0.87	0.87	0.75	0.89	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21.23	13.51	12.38	17.45	15.08	16.65	15.58	17.36	18.92	22.27	16.00	16.36	27.50	27.50	32.01	32.80	16.05	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	13.98	4.26	25.41	24.96	9.59	15.49	5.76	14.42	9.56	21.13	0.70	14.92	15.88	14.58	10.78	0.42	
FeO	10.07	23.30	4.97	8.44	4.23	15.68	19.33	21.40	10.40	8.89	10.54	20.91	4.18	2.59	2.59	3.59	20.73	
MnO	0.38	0.28	0.11	0.37	0.61	0.72	0.67	0.73	0.40	0.61	0.28	1.19	0.18	0.15	0.23	0.16	0.97	
MgO	0.55	0.48	1.28	0.50	0.63	0.53	0.35	0.53	0.66	0.59	0.53	0.52	3.60	1.83	0.05	0.16	0.55	
CaO	4.88	5.84	6.52	2.74	3.81	3.68	2.18	3.13	3.84	2.96	4.39	4.18	3.45	4.15	3.80	5.50	4.43	
Na <sub>2</sub> O	0.00	0.05	0.83	0.06	0.17	0.08	0.07	0.05	0.06	0.23	0.29	0.03	0.51	0.50	0.47	1.13	0.13	
K <sub>2</sub> O	0.81	0.53	2.58	0.68	0.62	0.45	0.55	0.56	0.93	0.60	0.61	0.76	1.05	0.83	0.51	0.96	0.78	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.07	0.28	0.16	0.21	0.22	0.14	0.14	0.13	0.14	0.05	0.25	0.18	0.78	0.53	0.89	0.50	0.11	
H <sub>2</sub> O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					0.00	
CO <sub>2</sub>	3.47	0.35	0.28	0.54	0.38	0.70	1.17	0.25	1.07	0.22	0.33	0.89					0.46	
FeM	9.47	4.53	1.13	7.98	8.56	4.27	2.02	2.62	5.68	5.40	6.90	5.61					0.94	
Total	98.91	99.32	99.33	99.52	98.34	99.37	99.21	100.29	99.49	99.81	100.03	99.00	98.87	94.18	97.38	96.63	99.15	
Eléments traces ppm																		
Zr	342	221	181	247	247	332	261	336	295	360	267	323						303
Y	45	39	25	46	42	44	41	45	55	58	45	46						36
Sr	121	91	129	70	80	114	58	112	93	96	93	87						99
Rb	27	23	84	18	27	19	27	22	17	17	18	25						37
Ba	153	113	489	95	151	119	93	132	128	162	101	251						208
V	1026	965	113	1296	790	961	1448	1031	1558	1711	1296	1078						870
Sn	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5						<5
Sb	<5	10	<5	5	5	<5	<5	<5	<5	<5	5	<5						<5
Ag	2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2						<2
As	22	88	56	15	40	52	83	56	26	23	22	60						33
Pb	<6	21	8	<6	12	<6	12	<6	<6	<6	18	8						<6
Zn	27	117	38	98	103	37	133	36	24	23	148	44						20
Cu	<3	30	14	31	17	6	29	9	<3	<3	27	8						<3
Ni	34	100	45	28	40	60	60	41	33	28	44	44						16
Cr	132	90	47	126	89	105	111	107	128	131	115	106						101
Co	45	82	88	41	79	35	24	38	29	66	46	39						81

4.7		Scories de la région du Mormont 4		
N° échan.	Localisation	catégorie description	analyse minéralogique RX, lames minces	remarque référence

### Secteur Moiry - Bellaires (suite)

CAR 1	Carolines, 16	SVN, tuyau	verre, (Qz)	Fe, hétérogène
CAR 2	Carolines, 16	SGD, plaque	Fay, Her, (Qz)	Fe
CAR 3	Carolines, 16	scorie de paroi		Fe abondant, gneiss
CAR 4	Carolines, 16	interm., gris jaunâtre, tuyau		Fe, hétérogène
CAR 5	Carolines, 16	scorie de paroi		Fe, gneiss, argile
CAR 6	Carolines, 16	SVN, tuyau ?		Fe, hétérogène
CAR 7	Carolines, 16	SVN, tuyau		Fe
CAR 8	Carolines, 16	SVN, tuyau		Fe, hétérogène
CAR 9	Carolines, 16	SVN, tuyau ?		Fe, hétérogène
CAR 10	Carolines, 16	SVN, tuyau		Fe, hétérogène
LAC 301	Petits Lacs 3, 19	interm., gris jaunâtre		hétérogène
LAC 302	Petits Lacs 3, 19	interm., gris jaunâtre, bulleux		Fe abondant

### Secteur Pompaples - La Sarraz - Mormont

MLF 181	Maillefer 1, 38	scorie		Pelet 1960a
MLF 182	Maillefer 2, 38	scorie		Pelet 1960a
MLF 183	Maillefer 3, 38	scorie		Pelet 1960a
LOU 181	Saint Loup, 39	scorie		Pelet 1960a

### Secteur Orny

ORN 201	Vignes d'Orny, 45	SVN, tuyau ?		
---------	-------------------	--------------	--	--

SGD : Scorie grise dense  
 SVN : Scorie vitreuse noire  
 interm. : Scorie intermédiaire entre SVN et SGD

Fay : Fayalite      Fe: fer métal visible  
 Her : Hercynite  
 Qz : Quartz

# Annexe 4.8

Ech n°	AFF 1	AFF 2	AFF 3	AFF 9	AFF 10	TIG 1	TIG 2	MRD 1	MRD 2	DON 1	DON 2	DON 3	COM 1	COM 2
Eléments majeurs % poids														
SiO <sub>2</sub>	38.62	35.15	39.09	45.54	44.50	34.94	68.80	39.29	41.58	43.55	45.32	12.51	35.47	43.29
TiO <sub>2</sub>	0.90	0.96	0.86	1.08	1.21	0.86	0.66	0.80	1.07	1.14	1.15	0.12	0.88	1.13
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.49	17.09	15.09	18.48	21.29	15.48	9.75	14.88	19.08	20.04	19.85	1.82	15.06	19.05
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.36	26.73	21.57	2.87	9.17	6.27	0.46	12.70	6.54	-1.40	4.93	46.38	13.34	5.40
FeO	22.06	5.41	9.21	20.16	10.30	13.35	14.64	21.67	20.59	8.67	20.42	32.06	17.73	23.46
MnO	0.63	0.39	0.73	0.81	0.47	16.33	0.42	2.30	0.77	16.51	1.53	0.09	2.11	0.40
MgO	0.46	0.46	0.52	0.54	0.61	0.66	0.39	0.52	0.59	0.78	0.57	0.46	0.47	0.41
CaO	4.05	2.62	3.02	3.34	3.78	6.89	2.72	2.19	3.04	5.49	3.49	3.41	4.06	1.93
Na <sub>2</sub> O	0.06	0.05	0.10	0.11	0.01	0.02	0.03	0.40	0.22	0.08	0.08	0.08	0.43	0.12
K <sub>2</sub> O	0.77	0.95	0.84	1.03	1.13	0.80	0.74	0.68	0.82	1.12	0.60	0.48	0.52	0.47
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.24	0.40	0.28	0.12	0.09	0.25	0.23	0.28	0.21	0.04	0.10	1.39	0.41	0.13
H <sub>2</sub> O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO <sub>2</sub>	1.09	0.66	0.33	0.64	0.76	1.03	0.36	0.67	2.33	0.29	0.74	0.40	4.18	0.38
FeM	4.24	8.23	7.43	3.15	3.92	0.68	0.00	3.55	2.83	1.22	1.25	0.72	5.41	1.16
Total	99.97	99.10	99.07	97.87	97.24	97.56	99.55	99.93	99.67	97.53	100.03	99.92	100.07	97.33
Eléments traces ppm														
Zr	278	275	268	358	353	207	293	207	321	259	301	53	248	328
Y	44	46	43	46	50	50	22	37	50	59	40	9	34	34
Sc	65	61	68	68	77	225	67	95	75	232	110	62	79	75
Rb	31	23	29	37	29	46	17	32	24	48	23	6	25	20
Ba	333	205	299	366	261	6851	277	1071	340	8681	469	41	1031	149
V	1509	1460	1480	1703	1601	794	338	860	1696	765	952	126	883	1053
Sn	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Sb	<5	<5	<5	<5	5	<5	<5	<5	<5	6	<5	8	<5	<5
Ag	<2	<2	2	<2	<2	<2	2	<2	<2	2	<2	<2	<2	<2
As	23	40	28	15	23	213	23	15	73	28	30	177	50	33
Pb	9	10	<6	<6	<6	<6	12	9	<6	<6	<6	<6	42	9
Zn	96	125	116	34	51	50	198	68	51	24	47	29	131	64
Cu	13	45	41	5	7	17	<3	31	24	<3	<3	47	16	5
Ni	26	30	20	15	18	59	41	22	56	31	24	104	37	19
Cr	118	132	124	152	165	80	66	88	142	82	122	50	140	141
Co	38	46	32	11	17	34	67	30	103	18	38	98	32	71

4.8		Scories de la région du Mormont 5		
N° échan.	Localisation	catégorie description	analyse minéralogique X, lames minces	remarque référence

### Secteur Ferreyres

AFF 1	Maison Favre, 28	SVN, tuyau		Fe
AFF 2	Maison Favre, 28	interm., gris clair	Fay, Her, (Qz)	Fe, incl. sil., hétéro.
AFF 3	Maison Favre, 28	interm., gris jaunâtre, informe		Fe, incl. silicates
AFF 9	Maison Favre, 28	interm., gris jaunâtre, bulleux, tuyau		Fe, incl. sil., hétéro.
AFF 10	Maison Favre, 28	SVN, tuyau aplati		Fe, hétérogène
TIG 1	Le Tignon, 30	interm., gris jaunâtre, bloc		Fe, hétérogène
TIG 2	Le Tignon, 30	scorie de paroi		Fe, hétérogène
MRD 1	Morandín 1, 31	interm., gris clair, bulleux, bloc ?		
MRD 2	Morandín 1, 31	SVN, tuyau ?		Fe, hétérogène
DON 1	Donchires 1, 34	interm., gris clair, bloc ?		Fe, hétérogène
DON 2	Donchires 1, 34	SVN, tuyau		hétérogène
DON 3	Donchires 1, 34	SGD, calotte ?		Fe abondant structure ± radiaire hétérogène
COM 1	En Combattions, 35	SVN, tuyau		
COM 2	En Combattions, 35	SVN, tuyau		

SGD : Scorie grise dense  
 SVN : Scorie vitreuse noire  
 interm. : Scorie intermédiaire entre SVN et SGD

Fay : Fayalite      Fe: fer métal visible  
 Her : Hercynite  
 Qz : Quartz

## Annexe 4.9

Ech.N°	ETO 1	ETO 2	VID 1	VID 2	VID 3	VID 4	VID 5	VID 6	VID 7	VID 8	VID 9	VID 10	VID 12	VID 27	VID 28	VID 29	VID 30	VID 102	
<b>Eléments majeurs % poids</b>																			
SiO <sub>2</sub>	52.21	41.13	37.26	30.86	24.17	36.39	15.48	36.51	29.62	22.89	18.26	42.60	57.47	47.87	36.21	25.80	17.72	23.68	
TiO <sub>2</sub>	1.03	0.85	0.22	0.23	0.19	0.22	0.13	0.34	0.23	0.17	0.17	0.39	0.44	0.32	0.23	0.14	0.13	0.15	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	29.00	24.57	5.13	4.97	4.01	5.42	2.74	6.93	4.93	3.59	3.31	7.79	9.54	6.64	5.29	3.47	2.63	2.87	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.35	5.58	25.82	20.73	60.28	25.74	67.26	7.82	52.37	39.01	40.63	7.07	10.81	11.20	23.33	37.60	26.08	32.88	
FeO	0.46	10.39	22.10	31.70	0.00	22.20	0.00	28.25	0.00	22.80	25.30	18.65	4.00	21.11	19.65	16.39	28.71	28.05	
MnO	0.10	0.17	0.06	0.11	0.08	0.09	0.10	0.08	0.13	0.09	0.07	0.12	0.10	0.14	0.09	0.06	0.15	0.06	
MgO	1.42	3.58	0.56	0.79	0.84	0.99	0.29	0.97	0.64	0.47	0.67	2.24	1.26	1.07	0.82	0.35	1.29	0.54	
CaO	4.17	7.98	2.37	3.61	5.39	4.33	2.89	13.15	4.62	3.52	2.94	12.38	9.04	9.58	9.16	2.86	10.77	7.93	
Na <sub>2</sub> O	1.17	0.94	0.42	0.40	0.57	0.49	0.12	0.50	0.29	0.33	0.23	0.72	1.04	0.59	0.57	0.39	0.04	0.33	
K <sub>2</sub> O	3.45	2.97	1.49	1.37	1.73	1.96	0.49	2.15	1.40	1.15	0.79	4.19	3.52	2.96	2.20	1.18	1.34	2.28	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.33	0.59	0.42	0.69	0.85	0.47	1.36	0.55	1.36	0.47	0.61	0.67	0.39	0.76	0.52	0.58	1.01	0.36	
H <sub>2</sub> O	0.32	1.28	2.34	2.62	0.00	1.14	3.90	1.17	1.14	3.52	3.10	1.69	0.00	0.00	0.81	7.78	6.06	0.00	
CO <sub>2</sub>			1.91	1.43	1.47	1.28	5.04	0.62	2.78	2.45	1.90	0.33	0.92					0.20	
FeM	0.00	0.00	0.00	0.00	0.88	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.64	0.00	0.00	0.00	0.00	0.53	
<b>Total</b>	<b>100.01</b>	<b>100.03</b>	<b>100.10</b>	<b>99.51</b>	<b>100.46</b>	<b>100.72</b>	<b>99.80</b>	<b>99.04</b>	<b>99.51</b>	<b>100.46</b>	<b>97.98</b>	<b>98.84</b>	<b>99.17</b>	<b>102.25</b>	<b>98.49</b>	<b>96.61</b>	<b>95.95</b>	<b>99.86</b>	
<b>Eléments traces ppm</b>																			
Zr			74	74	53	68	36	101	70	50	47	104	126					53	
Y			14	14	13	15	9	18	12	11	9	23	21					15	
Sr			57	97	116	99	98	97	128	64	79	137	222					92	
Rb			57	53	40	64	17	83	49	44	21	137	109					86	
Ba			253	368	209	241	285	341	489	199	183	333	498					258	
V			40	28	27	26	58	35	51	46	40	34	38					15	
Sn			<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	11	<5					<5	
Sb			<5	<5	<5	<5	8	<5	<5	7	<5	<5	<5					<5	
Ag			<2	<2	<2	<2	2	2	2	<2	3	<2	2					2	
As			40	<8	521	95	336	<8	44	102	51	<8	14					73	
Pb			22	<6	29	<6	<6	7	<6	14	<6	308	<6					<6	
Zn			26	27	30	35	37	23	33	35	30	25	20					19	
Cu			70	38	221	69	326	26	80	135	62	116	32					79	
Ni			96	17	395	258	925	21	64	229	142	122	45					141	
Cr			32	34	26	31	32	38	33	25	27	54	38					16	
Co			146	28	373	186	999	27	83	262	160	98	44					145	

4.9		Scories de la région lémanique			
N° échan.	Localisation	catégorie description	analyse minéralogique	remarque référence	
			X, lames minces		

### Etoy, La Romanèche

ETO 1	Etoy, La Romanèche, surface	mâchefer		
ETO 2	Etoy, La Romanèche, surface	mâchefer		

### Lausanne, Vidy

VID 1	Vidy, Chavannes 26 1984 1573	paroi fondue	lm : Fay, Wü, verre	charbonneux homogène
VID 2	Vidy, Chavannes 26 1984 1587	frgt calotte (ø 6 cm)		
VID 3	Vidy, Chavannes 26 1984 2635	calotte SGD		
VID 4	Vidy, Chavannes 26 1984 2637	ø 10 cm, h 5 cm, 700 gr		
VID 5	Vidy, Chavannes 26 1984 2822b	sc informe SGD		
VID 6	Vidy, Chavannes 26 1984 2958a	sc informe		
VID 7	Vidy, Chavannes 26 1984 2958a	paroi fondue		
VID 8	Vidy, Chavannes 26 1984 2958b	sc informe		
VID 9	Vidy, Chavannes 26 1984 2958c	frgt calotte		
VID 10	Vidy, Chavannes 26 1984 2958d	frgt calotte SGD		
VID 12	Vidy, Chavannes 26 1984 3007	sc informe		
VID 12	Vidy, Chavannes 26 1984 3007	verre bleu informe		
VID 27	Vidy, mosaïque 1973	frgt calotte		gros nodule Fe
VID 28	Vidy, mosaïque 1973	frgt calotte SGJ		charbonneux
VID 29	Vidy, mosaïque 1973	frgt calotte SGJ		hétérogène
VID 30	Vidy, mosaïque 1973	ø 8 cm, h 4 cm, ±200 gr		hétérogène, charbon.
VID 102	Vidy, mosaïque 1973	frgt calotte SGD		charbonneux
VID 102	Vidy, mosaïque 1973	ø 6 cm, h 3 cm, 300 gr		homogène
VID 102	Vidy, mosaïque 1973	calotte SGD		homogène
VID 102	Vidy, mosaïque 1973	ø 10x8 cm, h 3 cm, ±500 gr		homogène

SGD : scorie grise dense  
SGJ : scorie grise jaunâtre

ø : diamètre  
h : épaisseur

lm : lame mince  
Fay : Fayalite  
Wü : Wüstite

Fe: fer métal visible

# Annexe 5.1

Ech n°	MON 1	MON 2	MON 54	MON 56	MON 57	MON 62	MON 63	MON 55	MON 55	MON 58	MON 59	MON 60	CLE 101
Eléments majeurs % poids													
SiO2	33.53	30.56	32.39	32.61	34.84	27.21	20.70	2.66	3.26	13.93	1.73	13.20	2.35
TiO2	0.40	0.36	0.39	0.36	0.42	0.37	0.26	0.10	0.13	0.18	0.05	0.13	0.02
Al2O3	6.48	6.44	6.40	6.04	7.00	7.01	5.02	1.57	1.87	3.37	1.00	2.01	0.18
Fe2O3	55.92	44.87	51.96	54.84	50.70	48.67	63.95	31.07	35.14	15.81	9.64	13.16	85.31
FeO	0.00	6.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.41
MnO	0.91	4.62	2.13	0.44	1.61	4.19	1.19	0.37	0.46	2.13	5.04	0.15	0.02
MgO	0.49	0.94	0.26	0.41	0.75	0.97	0.63	0.25	0.20	0.24	0.30	0.21	0.14
CaO	1.16	3.18	1.18	0.86	1.74	2.02	2.06	35.34	32.47	35.88	43.99	36.30	0.10
Na2O	0.11	0.05	0.04	0.01	0.72	0.00	0.00	0.51	0.10	0.20	0.35	0.37	0.07
K2O	0.11	0.12	0.18	0.12	0.15	0.15	0.16	0.03	0.01	0.12	0.06	0.05	0.02
P2O5	0.65	0.81	0.67	0.50	0.84	0.71	1.02	0.32	0.42	0.11	0.13	0.15	0.13
H2O	1.17	1.88	3.27	1.56	0.58	7.36	3.68	1.52	0.26	0.00	0.00	0.00	10.71
CO2	0.62	1.28	0.44	0.55	0.42	0.62	0.51	26.30	25.32	27.90	36.86	34.33	0.49
Total	101.55	101.48	99.31	98.30	99.77	99.32	99.22	100.04	99.64	99.87	99.15	100.06	100.13
Eléments traces ppm													
Zr	156	142	179	154	163	138	136	39	49	45	16	52	11
Y	21	21	24	16	20	22	23	11	13	14	9	9	5
Sr	49	57	59	30	48	167	76	58	60	51	102	41	17
Rb	5	9	6	8	8	13	7	3	3	6	2	4	2
Ba	77	55	116	62	43	112	87	42	57	109	66	68	7
V	797	854	971	907	504	1002	1196	285	335	51	82	168	370
Sn	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Sb	<5	<5	7	<5	<5	<5	<5	<5	5	<5	<5	7	25
Ag	2	2	2	<2	2	<2	<2	2	3	3	5	5	<2
As	412	370	461	381	244	636	677	246	306	63	130	67	359
Pb	19	21	24	17	23	19	23	9	17	13	7	8	58
Zn	146	147	174	163	107	168	186	62	87	37	55	38	108
Cu	57	72	94	81	49	85	95	38	55	5	28	31	30
Ni	289	258	286	315	204	320	365	81	118	55	66	55	1262
Cr	65	53	74	77	87	59	48	5	5	9	<4	16	108
Co	210	161	135	218	154	320	213	23	28	27	89	18	211

5.1		Minerais de Montcherand		
N° échan.	Localisation	catégorie description	remarque	référence

### Minerais "archéologiques" : Bolus

MON 1	Montcherand	bolus rouge	incl.Qz grillé	Abetel 1992, fig.20 Abetel 1992, fig.21
MON 2	Montcherand	bolus, aspect fritté	incl.Qz grillé	
MON 54	Montcherand	bolus rouge	env.10% piso.,incl.Qz grillé	
MON 56	Montcherand	bolus rouge	grillé	
MON 57	Montcherand	bolus, aspect fritté	grillé	
MON 62	Montcherand	bolus, aspect fritté	grillé, noirâtre (Mn)	
MON 63	Montcherand	bolus, aspect fritté		

### Minerais "archéologiques" : Calcaires ferrugineux

MON 551	Montcherand	calcaire ferrugineux	env.10% bolus	double de 552 double de 551
MON 552	Montcherand	calcaire ferrugineux	env.10% bolus	
MON 58	Montcherand	calcaire ferrugineux		
MON 59	Montcherand	calcaire ferrugineux	env. 5% bolus, trace Mn	
MON 60	Montcherand	calcaire ferrugineux	trace Mn	

### Les Clées : rognon de limonite

CLE 101	Les Clées, lit de l'Orbe	rognon de limonite à structure fibro-radiée marcassite oxydée ?	
---------	--------------------------	--	--

Qz : quartz visible

# Annexe 5.2

Ech n°	MON 3c	MON 6	MON 7	MON 9	MON 24	MON 31	MON 31	MON 35	MON 42	MON 44	MON 44	MON 45	MON 47	MON 52	MON 78	MON 79	MON 89	MON 96	
Eléments majeurs % poids																			
SiO2	27.71	28.57	27.81	27.24	30.45	33.33	45.34	28.72	31.65	28.64	27.25	26.74	33.54	21.30	26.08	27.22	31.08	34.92	
TiO2	0.39	0.41	0.42	0.30	0.37	0.42	0.55	0.32	0.43	0.35	0.34	0.36	0.40	0.33	0.41	0.42	0.37	0.40	
Al2O3	7.68	8.28	8.78	6.05	6.88	8.50	10.20	6.43	8.59	6.92	6.67	6.89	7.70	6.71	8.20	8.57	6.99	7.32	
Fe2O3	5.66	3.42	0.19	6.73	13.04	16.26	4.92	36.64	17.74	19.27	15.81	26.51	17.28	41.08	9.25	10.19	18.57	15.41	
FeO	52.58	50.88	48.34	49.85	35.80	27.20	25.95	8.88	25.40	33.75	36.55	25.85	27.15	12.35	36.45	34.65	31.98	31.31	
MnO	1.26	1.16	6.77	1.16	3.87	2.64	2.26	1.25	2.00	1.84	1.82	1.93	1.21	5.53	6.64	6.65	1.48	1.34	
MgO	0.77	0.79	1.08	0.68	1.14	0.94	1.17	0.75	0.94	0.76	0.76	0.87	0.81	0.82	1.02	1.12	0.73	0.74	
CaO	3.81	5.37	5.32	4.90	4.52	7.07	5.50	5.58	4.50	4.65	4.61	4.89	5.45	4.15	5.26	5.18	2.91	2.40	
Na2O	0.11	0.06	0.06	0.22	0.12	0.29	0.25	0.20	1.44	0.07	0.25	0.05	0.49	0.02	0.08	0.27	0.03	0.08	
K2O	0.51	0.43	0.54	0.72	0.33	0.46	0.77	0.74	0.44	0.24	0.25	0.34	0.40	0.34	0.55	0.54	0.34	0.33	
P2O5	1.25	1.07	1.37	0.85	0.90	0.95	0.44	0.87	1.05	0.99	0.97	1.14	0.94	1.18	1.28	1.33	0.96	1.03	
H2O	0.00	0.51	0.00	0.55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
CO2	0.68	0.93	0.21	0.17	0.42	0.26	0.51	0.16	0.62	0.22	0.29	0.11	0.30	0.08	0.18	0.15	0.15	0.10	
FeM	0.00	0.00	0.30	0.00	2.06	1.91	1.77	9.26	4.87	2.52	2.10	4.68	4.23	5.60	1.42	2.75	4.56	3.62	
Total	102.41	101.88	101.19	99.42	99.90	100.23	99.63	99.80	99.67	100.22	97.67	100.36	99.90	99.49	96.82	99.04	100.15	99.00	
Eléments traces ppm																			
Zr	155	165	166	133	237	208	207	156	203	163	157	161	179	174	166	171	188	204	
Y	34	36	48	20	29	28	28	21	38	26	25	26	22	24	48	49	23	26	
Sr	106	101	132	74	98	87	88	83	84	79	78	86	84	103	134	135	75	71	
Rb	31	22	20	31	23	17	20	33	20	13	12	15	14	17	21	19	16	18	
Ba	164	141	128	120	173	93	83	125	107	66	48	65	91	115	124	132	54	81	
V	846	931	1676	825	737	1562	1506	864	1314	1104	1104	1283	1045	737	1745	1742	1103	906	
Sn	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	
Sb	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	5	<5	8	5	<5	6	5	<5	<5	<5	
Ag	5	5	3	5	<2	2	2	<2	<2	2	2	2	<2	2	2	4	<2	<2	
As	16	66	35	9	32	30	24	<8	31	111	120	19	51	77	41	35	98	47	
Pb	9	11	<6	6	<6	<6	<6	<6	8	11	16	<6	12	<6	<6	<6	<6	14	
Zn	143	136	67	44	30	63	79	46	119	147	150	88	97	66	70	67	86	139	
Cu	87	83	30	70	23	37	49	64	41	80	74	50	59	62	40	29	60	59	
Ni	16	79	34	5	31	32	32	<4	33	88	92	19	53	66	31	31	70	58	
Cr	43	56	63	50	80	71	67	51	85	59	58	58	64	41	64	62	61	66	
Co	59	71	21	27	18	34	34	21	17	80	89	42	48	68	31	20	78	65	

5.2		Scories de Montcherand 1		
N° échan.	Localisation	catégorie description	analyse minéralogique RX, lames minces (lm)	remarque référence
MON 3c	Montcherand, four 2b	SGD, plaque mince		incl. surf.inf. Abetel 1992, fig.29
MON 6	Montcherand, four 2b	SGD, cuvette	Fay, Her, verre lm	incl. surf.inf. Abetel 1992, fig.30
MON 7	Montcherand, four 2b	SGD, plaque mince		Abetel 1992, fig.31
MON 9	Montcherand, four 5	SGD, amas de cordons		Abetel 1992, fig.32
MON 241	Montcherand, four 2b	SGD, amas de cordons	Fay, (Her), (Qz) lm	Fe
MON 311inf	Montcherand, four 5	SGD, amas de cordons		
MON 312sup	Montcherand, four 5	SGD, cordon large	Fay	Fe
MON 35	Montcherand, four 5	SGD, cordon large		Abetel 1992, fig. 39,40
MON 42	Montcherand, site	SGD, amas de cordons		
MON 441	Montcherand, site	SGD, bloc, stratifié		Fe
MON 444	Montcherand, site	SGD, amas de cordons	Fay, Her lm	
MON 45	Montcherand, site	SGD, amas de cordons	Fay, (Qz) lm	
MON 47	Montcherand, site	SGD, informe	Fay, Rhö	Fe
MON 52	Montcherand, four 2	SGD, plaque épaisse		
MON 78	Montcherand, four 2b	SGD, amas de cordons		
MON 79	Montcherand, four 2b	SGD, plaque mince		
MON 89	Montcherand, four 5	SGD, plaque+cordons		
MON 96	Montcherand, four 5	SGD, informe		jaunâtre

SGD : Scorie grise dense

lm : lame mince  
voir ann. 5.6  
Rhö : Rhoenite

Fay : Fayalite  
Her : Hercynite  
Qz : Quartz

Fe: fer métal visible

# Annexe 5.3

Echan°	MON 8	MON 9	MON 26	MON 26	MON 28	MON 30	MON 32	MON 32	MON 32	MON 33	MON 36	MON 38	MON 38	MON 39	MON 41	MON 46	MON 90	MON 95	
Eléments majeurs % poids																			
SiO2	46.26	37.36	44.98	38.70	44.64	34.18	42.90	38.79	38.96	39.05	37.29	37.35	34.38	34.73	48.12	37.57	36.18	47.66	
TiO2	0.48	0.42	0.54	0.48	0.55	0.43	0.52	0.46	0.47	0.48	0.45	0.44	0.41	0.42	0.54	0.48	0.44	0.48	
Al2O3	8.91	8.03	10.12	9.08	10.02	8.40	9.94	8.83	8.94	8.88	8.50	7.99	7.24	7.59	9.50	9.16	8.30	9.06	
Fe2O3	1.35	5.16	8.31	14.67	9.12	16.01	12.21	11.58	20.28	3.09	19.46	6.93	20.52	12.95	5.02	14.03	20.37	3.26	
FeO	31.34	43.18	24.15	22.75	18.10	27.45	23.80	29.70	21.55	37.80	21.60	35.75	28.65	31.55	26.25	26.10	22.27	30.45	
MnO	1.47	1.27	2.21	2.06	3.82	3.27	2.44	2.18	2.16	2.33	1.99	1.46	1.64	1.81	1.53	2.25	1.72	0.72	
MgO	0.89	0.77	1.08	0.93	1.19	0.98	0.98	0.93	0.87	0.90	1.10	0.86	0.91	0.78	0.95	0.95	0.82	0.76	
CaO	5.56	4.49	5.49	4.89	6.89	4.87	3.50	3.53	3.36	3.15	3.99	5.67	4.64	3.50	2.68	4.49	3.38	4.97	
Na2O	0.19	0.11	0.32	0.44	0.21	0.17	0.56	0.41	0.69	0.40	0.78	0.69	0.24	0.11	0.28	0.28	0.03	0.40	
K2O	0.99	0.41	0.76	0.69	0.68	0.36	0.55	0.50	0.48	0.47	0.52	0.45	0.48	0.32	0.58	0.75	0.33	0.66	
P2O5	0.62	0.80	0.42	0.67	0.40	0.86	0.49	0.67	0.70	0.68	0.84	0.90	0.93	0.96	0.44	0.67	0.81	0.64	
H2O	0.64	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.36	0.00	0.94	0.00	0.98	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	
CO2	0.64	0.70	0.29	0.29	0.50	0.33	0.55	0.84	0.70	0.47	0.15	0.22	0.26	0.15	0.30	0.20	0.20	0.18	
FeM	0.00	0.00	0.49	3.34	2.11	2.36	1.42	0.00	1.23	0.00	3.32	0.00	0.05	3.83	3.18	2.50	5.31	0.00	
Total	99.34	102.76	99.16	98.99	98.23	99.67	99.86	98.78	100.39	98.64	99.99	99.69	100.35	98.70	99.37	99.43	100.16	99.32	
Eléments traces ppm																			
Zr	198	189	230	212	250	223	229	202	201	215	200	192	192	190	240	205	218	188	
Y	30	24	38	37	42	30	37	35	34	35	25	31	27	24	32	39	26	24	
Sr	94	86	98	88	121	94	93	83	83	87	97	102	87	78	84	84	87	89	
Rb	41	17	25	22	29	18	22	20	23	20	18	20	19	14	27	24	17	29	
Ba	183	98	152	141	261	92	111	120	105	109	94	92	74	72	109	127	104	140	
V	644	1103	1187	1100	1324	1796	1205	1075	1087	1138	1132	1459	1016	925	1090	1168	1236	422	
Sn	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	
Sb	<5	<5	<5	<5	<5	<5	5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	6	<5	<5	<5	
Ag	5	2	<2	<2	<2	<2	2	<2	<2	2	<2	<2	2	<2	<2	2	<2	<2	
As	78	73	18	26	42	16	11	17	58	25	18	18	50	109	28	13	20	92	
Pb	7	<6	<6	7	<6	<6	<6	10	9	8	<6	<6	9	15	<6	7	6	14	
Zn	61	79	43	50	20	73	80	117	117	116	64	56	85	84	56	41	77	67	
Cu	30	44	24	36	50	49	48	35	65	39	92	17	30	39	16	20	40	36	
Ni	69	56	29	27	32	17	18	27	35	16	17	18	34	84	24	29	5	94	
Cr	63	63	70	65	62	70	80	76	72	77	65	66	68	64	85	63	72	67	
Co	41	42	22	25	20	9	<6	35	53	14	26	41	59	87	18	26	17	62	

5.3		Scores de Montcherand 2			
N° échan.	Localisation	catégorie description	analyse minéralogique RX, lames minces (lm)	remarque référence	
MON 8	Montcherand, four 5	SVN, coulure large		surf.sup. ridée Abetel 1992, fig.35	
MON 9c	Montcherand	SVJ, plaque		Abetel 1992	
MON 261sup	Montcherand, four 5	SVN, tuyau	verre, (Qz) lm		
MON 262inf	Montcherand, four 5	SVJ, tuyau			
MON 28	Montcherand, four 5	SVN, tuyau			
MON 30	Montcherand, four 5	SGD, amas de cordons			
MON 321sup	Montcherand, four 5	SVN			
MON 322inf		SVJ			
MON 323com		SVJ			
MON 33	Montcherand, four 5	SVJ			
MON 36	Montcherand, four 5	SVJ, tuyau	Fay, (Qz) lm		
MON 381inf	Montcherand, four 5	SVJ, tuyau	Fay		
MON 382sup		SGD, cordons	Fay, (Qz)		
MON 39	Montcherand, four 5	SGD, amas de cordons	variations de structures,	polygones incl.surf.inf.	
MON 411	Montcherand, site	SVJ	Fay, (Qz)		
MON 46	Montcherand	scorie hétérogène	Fay, (Qz) lm		
MON 90	Montcherand, four 5	SVN	Fay	Fe, hétérogène Abetel 1992, fig.39c	
MON 95	Montcherand, four 5	SVN tuyau			

SGD : Scorie grise dense  
SVN : Scorie vitreuse noire  
SVJ : scorie vitreuse jaunâtre

lm : lame mince  
voir ann. 5.6

Fay : Fayalite  
Her : Hercynite  
Qz : Quartz

Fe: fer métal visible

## Annexe 5.4

Ech n°	MON 5	MON 13	MON 48	MON 49	MON 50	MON 51	MON 76	MON 92	MON 93	MON 53	MON 53	MON 533
Elémentst majeurs % poids												
SiO2	37.01	36.86	37.42	35.75	32.94	36.73	33.78	33.38	33.68	36.38	36.48	37.01
TiO2	0.43	0.42	0.44	0.42	0.37	0.43	0.38	0.36	0.37	0.58	0.58	0.58
Al2O3	7.64	7.68	7.86	7.50	6.54	7.64	6.59	6.52	6.55	11.42	11.35	11.58
Fe2O3	1.62	3.22	8.43	11.13	14.99	5.63	0.00	14.79	12.04	0.00	0.00	0.37
FeO	36.56	34.83	25.15	25.90	25.45	29.85	38.33	25.09	27.07	0.08	3.03	0.00
MnO	1.50	1.43	1.50	1.53	1.60	1.44	1.59	1.56	1.57	23.01	21.99	22.94
MgO	0.96	0.94	0.96	0.84	0.87	0.90	0.87	0.90	0.89	1.65	1.62	1.67
CaO	14.31	13.91	14.22	13.47	12.79	14.03	13.08	12.95	13.01	15.35	14.93	15.46
Na2O	0.04	0.05	0.07	0.16	0.13	0.07	0.28	0.05	0.07	1.80	0.30	0.12
K2O	0.50	0.49	0.53	0.45	0.49	0.50	0.51	0.49	0.50	1.42	1.30	1.33
P2O5	0.92	0.93	0.87	0.97	0.86	0.88	0.88	0.85	0.86	0.69	0.59	0.58
H2O	0.36	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO2	0.23	0.23	0.15	0.14	0.13	0.18	0.11	0.12	0.13	0.23	0.52	0.17
FeM	0.00	0.00	1.74	1.27	1.99	0.69	3.24	2.90	3.34	4.07	3.40	3.82
Total	102.08	101.32	99.34	99.53	99.15	98.97	99.64	99.96	100.08	96.68	96.09	95.63
Elémentst traces ppm												
Zr	200	201	203	197	169	196	135	185	186	198	195	198
Y	25	26	27	26	23	25	43	22	23	42	40	42
Sr	105	108	111	104	104	105	115	106	106	294	287	297
Rb	18	21	21	18	19	20	15	21	19	42	42	42
Ba	133	119	136	105	115	121	86	113	116	524	502	525
V	939	991	976	994	755	967	1364	736	758	990	934	965
Sn	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Sb	<5	<5	5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Ag	7	5	<2	2	<2	3	<2	<2	<2	5	2	2
As	14	14	<8	19	75	9	204	79	78	15	<8	<8
Pb	10	<6	<6	<6	<6	<6	13	<6	6	<6	<6	<6
Zn	76	88	74	95	71	83	103	72	70	27	19	16
Cu	28	27	20	30	68	30	90	62	61	34	3	5
Ni	24	17	18	15	65	20	135	61	64	15	18	16
Cr	44	45	49	46	41	47	57	41	43	42	42	40
Co	27	9	9	14	66	11	107	64	74	7	14	<6

5.4 Scories de Montcherand 3				
N° échan.	Localisation	catégorie description	analyse minéralogique RX, lm	remarque référence
MON 5	Montcherand, four 1	SBD, plaque épaisse		Abetel 1992, fig.33 Abetel 1992, fig.34
MON 13	Montcherand, four 2b	SBD, plaque épaisse		
MON 48	Montcherand, four 2	SBD, plaque épaisse		
MON 491	Montcherand, four 2	SBD, plaque épaisse		
MON 50	Montcherand, four 2	SBD, plaque épaisse	Fay, Rhö lm	
MON 51	Montcherand, four 2	SBD, plaque épaisse	Fay, (Rhö), (Qz) lm	
MON 76	Montcherand, four 2b	SBD, plaque épaisse		
MON 92	Montcherand, four 1	SBD, plaque épaisse		
MON 93	Montcherand, four 1	SBD, plaque épaisse		

### Scorie très riche en Mn

MON 531com	Montcherand, four 2	SVN + SVJ, tuyau	lm	composite, polygones
MON 532sup		SVN	verre	
MON 533inf		SVJ	verre, (FayMn?)	

SBD : Scorie dense à reflets bleus

SVN : Scorie vitreuse noire

SVJ : Scorie vitreuse jaunâtre

lm : lame mince

voir ann. 5.6

Fay : Fayalite

Rhö : Rhoenite

Qz : Quartz

FayMn : Fayalite manganésifère

Fe: fer métal visible

## Annexe 5.5

Echn°	MON 3	MON 211	MON 212	MON 22	MON 23	MON 11	MON 12	MON 4	MON 43	MON 29	MON 72
Eléments majeurs % poids											
SiO <sub>2</sub>	23.21	24.06	27.47	15.66	19.18	21.84	20.08	32.37	56.14	58.78	53.50
TiO <sub>2</sub>	0.30	0.34	0.35	0.24	0.29	0.39	0.29	0.47	0.66	0.62	0.51
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.03	6.58	6.89	4.93	5.72	7.14	5.29	9.78	23.86	10.86	11.09
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	46.64	47.76	48.65	62.96	58.26	37.20	29.37	15.62	7.14	0.00	0.00
FeO	10.58	8.45	4.40	1.19	3.65	10.67	30.79	26.65	5.00	18.09	6.57
MnO	1.63	1.32	1.27	3.80	1.96	2.05	1.82	3.33	0.25	0.95	0.75
MgO	0.50	0.55	0.56	0.58	0.53	0.59	0.59	1.02	0.35	0.82	2.05
CaO	3.17	2.16	2.33	4.07	2.01	5.56	3.19	5.21	4.21	5.34	10.83
Na <sub>2</sub> O	0.09	0.24	0.40	0.54	0.44	0.06	0.08	0.02	0.21	0.30	0.77
K <sub>2</sub> O	0.38	0.42	0.58	0.18	0.26	0.41	0.38	0.65	0.36	0.75	1.10
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.98	0.98	0.95	1.05	1.08	0.78	1.00	1.21	0.21	0.20	0.23
H <sub>2</sub> O	4.64	3.76	3.54	1.35	3.77	0.00	0.00	0.00	0.09	0.00	0.00
CO <sub>2</sub>	3.06	2.41	1.86	2.38	2.38	9.35	6.30	0.50	0.48	0.37	3.48
FeM	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.71	3.03	4.78	0.00	1.15	6.91
Total	101.21	99.03	99.25	98.93	99.53	101.75	102.21	101.61	98.96	98.23	97.79
Eléments traces ppm											
Zr	118	124	125	96	113	123	126	190	207	253	186
Y	21	23	24	24	23	26	23	35	25	28	23
Sr	70	65	71	93	64	92	69	100	122	102	162
Rb	16	17	21	7	13	23	23	28	24	25	44
Ba	107	102	117	77	92	247	141	121	102	148	203
V	1141	1190	1180	1363	1345	845	885	1534	210	555	335
Sn	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Sb	6	<5	6	<5	13	6	8	<5	<5	<5	<5
Ag	<2	<2	2	<2	<2	<2	2	5	<2	2	<2
As	452	426	477	890	487	336	427	13	54	20	21
Pb	11	8	<6	56	45	56	20	11	143	<6	<6
Zn	720	1319	1220	748	2248	342	237	127	104	23	24
Cu	88	87	88	105	99	69	96	18	20	<3	15
Ni	271	238	214	350	293	227	268	16	120	18	31
Cr	59	68	69	44	60	61	65	75	83	77	93
Co	159	154	140	218	182	141	148	15	52	25	38

5.5		Produits scoriacés divers de Montcherand			
N° échan.	Localisation	catégorie description	analyse minéralogique RX, lames minces	remarque référence	

### Fond de Fourneau

MON 3	Montcherand, site	FDF, bloc, ± calotte		Abetel 1992, fig.37 double de 212 double de 212
MON 211	Montcherand, four 2b	FDF, bloc, ± cuvette		
MON 212				
MON 22	Montcherand, four 2b	FDF, bloc, ± cuvette		
MON 23	Montcherand, four 2b	FDF, bloc, ± calotte		

### Grenaille

MON 11	Montcherand	grenaille		Abetel 1992
MON 12	Montcherand	grenaille		Abetel 1992

### Divers

MON 4	Moncherand , four 2b	SGD, interne	lm	analyse composite Abetel 1992, fig.38 Fe argileuse très riche en grains silicatés non fondus très riche en grains silicatés non fondus
MON 43	Montcherand, site	scorie collée à la paroi	verre, Qz, (Kal?)	
MON 29	Montcherand, four 5	paroi scorifiée SVJ, tuyau		
MON 72	Montcherand, site	scorie de paroi ? SVN, bloc informe scorie de paroi ?		

SGD : Scorie grise dense

SVJ : Scorie vitreuse jaunâtre

SVN : Scorie vitreuse noire

FDF : Fond de fourneau

lm : lame mince

voir ann. 5.6

Qz : Quartz

Kal : Kalsilite

Fe: fer métal visible

## Annexe 5.6

5.6		Scories de Montcherand : Etude des lames minces					
N° éch.	Catégorie Descript.	estimation modale en %					remarques
		porosité	verre	Fayalite	Opaque*	autre	
MON 4	SGD interne+ paroi	40	15	35 B+C+T	10	Quartz Feldspaths Micas	contact avec la paroi. au moins 2 couches de scorie adhérentes.
MON 6	SGD cuvette	5	7 recrist.	65 B+C+(H) plume	20	Rhönite 3 (tardive)	grains très grossiers -> 2.5 cm. fayalites orientées parallèlement par zone. voir fig. 154
MON 24	SGD cordons	40 variable	20	30 B+C+P B+H	10	Rhönite ? (tardive) hydroxydes Quartz	les habitus et orientations des cristaux de fayalite sont répartis par zones (structure de refroidissement des cordons).
MON 28	SVN tuyau	60	35			métal 5 hydroxydes	voir fig. 147
MON 36	SVJ tuyau	80 - 40 variable	0 - 20	20 - 40 B+C+P T (tardive)		métal 3	voir fig. 149
MON 45	SGD cordons	20	15	55 B+C+P B+H P+C	10		les habitus et orientations des cristaux de fayalite sont répartis par zones (structure de refroidissement des cordons).
MON 46	SVJ tuyau	60 - 20 variable	20 - 60	10 - 30 P+T P		métal 1	
MON 47	SGD informe	20	20	50 C+P+T B+H	10	métal ? Quartz	texture de mélange de 2 liquides ?
MON 50	SBD plaque	5	10	60 C T (tardive)	?	Rhönite 20 tardive	voir fig. 157 aiguilles de fayalite très longues -> 2 cm.
MON 51	SBD plaque	10	60	20 sphérules	?	Rhönite ? métal ? Quartz 10	
MON 53	SVJ+SVN Mn riche	5	0 - 90	0-90 B+T plume			
MON 71	SBD informe	10	70	20 plume		métal I	voir fig. 158

SGD : Scorie grise den:  
SVN : Scorie vitreuse noire  
SVJ : Scorie vitreuse jaune  
SBD : Scorie dense à reflets bleus

habitus de la fayalite  
H : forme de Hopper  
B : en branche  
C : en chaîne  
P : en plaque  
T : en treillis

Opaque\* : probablement spinelle  
proche de la ferri-hercynite

## Annexe 5.7 et 5.8

<b>5.7</b>	<b>ANALYSES MICROSONDES : ECH. MON 52 : SBD bloc informe</b> Laboratoire de Microanalyse de la Section des Sciences de la Terre Université de Lausanne, F. Bussy et J. Hernandez (dir.)
------------	---

% poids	Fayalite			Fayalite			Fayalite			Fayalite		
	coeur	bord	bord clair	coeur	bord	bord clair	coeur	bord	coeur	bord	coeur	bord
SiO <sub>2</sub>	29.707	29.833	33.612	29.370	29.635	31.875	29.757	31.571	29.312	30.303	29.587	30.006
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.299	0.116	2.750	0.176	0.125	3.047	0.121	0.351	0.147	3.041	0.143	0.223
FeO	60.388	60.397	53.947	60.060	60.546	53.673	61.195	59.536	61.591	56.349	60.987	60.016
MnO	3.169	2.906	2.882	3.087	3.013	2.578	3.163	2.800	2.983	3.114	3.136	2.908
MgO	1.898	1.403	1.253	1.855	1.062	0.657	1.827	0.992	1.756	0.710	2.008	0.762
CaO	4.590	5.293	7.165	4.406	5.441	8.538	4.121	6.330	3.952	6.872	3.701	5.784
TiO <sub>2</sub>	0.044	0.057	0.063	0.053	0.066	0.154	0.097	0.076	0.124	0.027	0.115	0.062
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.189	0.081	0.079	0.112	0.089	0.095	0.000	0.058	0.100	0.086	0.127	0.000
total	100.279	100.087	101.551	99.218	99.977	100.617	100.281	101.714	99.963	100.503	99.812	99.763

% poids	Fe-rhönite		Fe-rhönite		Fe-rhönite		Fe-rhö		Fe-rhö		Fe-rhö		Fe-rhö	
	coeur	bord	coeur	bord	coeur	bord	coeur	bord	coeur	bord	incl fay	incl fay	coeur	bord
SiO <sub>2</sub>	26.388	27.004	30.367	25.913	27.807	26.069	27.008	25.625	25.858	25.464	24.949	25.761	25.761	25.761
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.071	11.717	11.180	12.219	11.643	12.523	12.281	11.247	11.165	14.962	14.281	12.513	12.513	12.513
FeO	44.042	43.138	38.840	44.585	43.584	43.256	43.946	43.854	44.925	41.954	42.359	44.489	44.489	44.489
MnO	0.729	0.702	0.759	0.686	0.708	0.734	0.722	0.721	0.760	0.836	0.736	0.618	0.618	0.618
MgO	0.387	0.382	0.427	0.481	0.411	0.372	0.366	0.405	0.469	0.644	0.592	0.316	0.316	0.316
CaO	12.482	12.53	15.492	12.484	12.854	12.537	12.759	12.422	12.237	12.757	12.081	12.493	12.493	12.493
TiO <sub>2</sub>	1.659	1.538	1.157	1.664	1.322	1.731	1.231	1.592	1.435	1.593	1.616	2.041	2.041	2.041
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.146	0.792	0.656	1.293	0.829	1.294	0.638	1.110	1.400	1.028	1.522	1.471	1.471	1.471
total	98.904	97.801	98.878	99.326	99.157	98.516	98.852	98.483	98.248	99.236	98.136	99.703	99.703	99.703

Le déficit des sommes est dû à l'oxydation d'une partie du FeO en Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

% poids	Verre											Verre		
	coeur	bord	coeur	bord	coeur	bord	coeur	bord	coeur	bord	coeur	bord	incl fay	incl fay
SiO <sub>2</sub>	38.163	38.297	38.218	38.796	38.538	39.702	39.463	40.074	39.618	37.884	38.152	38.361	38.361	38.361
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.670	10.523	10.354	10.818	9.900	9.760	12.774	13.170	11.708	12.764	9.496	10.505	10.505	10.505
FeO	25.819	25.765	26.278	25.359	25.583	26.025	21.684	19.711	23.347	25.601	31.984	27.974	27.974	27.974
MnO	1.071	1.199	1.166	1.183	0.852	0.958	1.016	0.780	0.920	1.321	1.483	1.281	1.281	1.281
MgO	0.137	0.087	0.155	0.065	0.508	0.243	0.094	0.089	0.830	0.179	0.461	0.352	0.352	0.352
CaO	20.278	19.691	19.623	19.582	21.644	20.796	20.458	20.774	20.580	16.594	15.363	16.849	16.849	16.849
TiO <sub>2</sub>	0.464	0.312	0.317	0.381	0.328	0.293	0.414	0.327	0.363	0.324	0.125	0.145	0.145	0.145
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.148	0.035	0.117	0.165	0.196	0.178	0.162	0.049	0.240	0.129	0.026	0.073	0.073	0.073
total	96.749	97.801	96.228	99.326	97.548	97.956	96.065	94.973	96.859	94.796	97.089	95.541	95.541	95.541

Le déficit des sommes est probablement lié à la présence d'alcalins non dosés et à l'oxydation du FeO en Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

<b>5.8</b>	<b>ANALYSES MICROSONDES : ECH. MON 67 : SGD en amas de cordons</b> Laboratoire de Microanalyse de la Section des Sciences de la Terre Université de Lausanne, F. Bussy et J. Hernandez (dir.)
------------	---

% poids	Fayalite		Fayalite		Spinelle		Spinelle		FeOxydes		Verre	
	coeur	bord	coeur	bord	coeur	bord	coeur	bord	ligne Wü	coeur	bord	coeur
SiO <sub>2</sub>	30.064	29.416	30.783	30.038	29.090	2.089	5.372	1.514	3.055	3.852	46.997	45.695
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.262	0.232	0.281	0.278	0.498	24.930	11.322	25.391	8.347	1.262	8.186	8.338
FeO	64.415	65.185	63.042	64.818	63.035	64.134	75.506	62.858	81.790	84.498	27.540	29.210
MnO	3.335	2.718	2.795	2.867	2.944	0.914	0.724	0.714	0.674	3.102	1.059	1.155
MgO	2.317	1.471	0.924	1.909	1.343	0.302	0.194	0.269	0.112	0.644	0.269	0.251
CaO	0.765	0.756	0.828	1.018	1.320	0.202	1.046	0.113	0.420	1.102	9.736	11.259
TiO <sub>2</sub>	0.058	0.012	0.053	0.074	0.054	1.338	0.853	1.659	0.939	0.050	0.159	0.032
total	101.216	99.790	98.730	101.002	98.283	93.939	95.017	92.519	95.338	94.510	93.945	95.940

# Annexe 6.1

Ech.N°	PRO 1	BAU 1	BAU 2	BAU 3	BAU 4	BAU 5	BAU 6	ORG 1	ORG 2	YVE 1	YVE 2	YVE 3	YVE 4	YVE 5	YVE 6	YVE 7	YVE 8	YVE 9	YVE 10	
<b>Eléments majeurs % poids</b>																				
SiO2	17.12	27.07	19.58	24.45	16.97	25.37	23.05	28.46	23.96	16.24	9.48	14.77	14.27	16.11	37.52	18.64	50.67	16.11	11.77	
TiO2	0.11	0.22	0.16	0.20	0.17	0.20	0.20	0.21	0.18	0.12	0.09	0.17	0.12	0.15	0.37	0.15	0.75	0.13	0.13	
Al2O3	2.01	3.50	3.06	3.76	3.01	3.79	3.00	4.18	3.68	2.54	1.69	5.07	2.49	3.01	8.53	2.94	17.26	2.98	1.94	
Fe2O3	44.10	24.65	45.88	42.46	38.16	40.01	27.50	39.81	29.12	50.16	57.36	49.61	52.54	69.38	20.80	39.94	3.47	54.20	63.19	
FeO	20.60	24.98	7.77	6.79	28.33	10.18	33.51	18.52	25.36	22.45	21.40	18.65	21.05	0.00	0.00	20.25	3.25	7.20	11.47	
MnO	0.11	0.09	0.10	0.08	0.05	0.09	0.06	0.07	0.07	0.05	0.58	0.44	0.11	0.13	0.17	0.08	0.15	0.80	0.06	
MgO	0.86	0.85	0.78	0.83	0.64	0.81	0.80	0.69	0.74	0.45	0.53	0.35	0.63	0.71	2.71	1.05	5.18	1.16	0.53	
CaO	7.90	12.17	10.09	10.36	4.61	7.79	6.60	2.74	9.93	3.08	3.41	1.74	4.35	2.91	20.44	6.81	14.20	7.23	3.26	
Na2O	0.15	0.07	0.11	0.36	0.13	0.16	0.06	0.28	0.24	0.15	0.04	0.03	0.16	0.22	0.54	0.20	0.75	0.19	0.13	
K2O	1.07	0.93	1.10	1.04	0.73	0.78	0.80	1.83	1.56	0.84	0.34	0.56	0.78	1.26	2.81	2.61	3.12	1.77	0.66	
P2O5	0.73	0.49	0.51	0.41	0.28	0.82	0.24	0.22	0.39	0.89	2.02	1.78	1.48	2.00	2.91	0.81	0.14	1.55	0.64	
H2O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.30	1.13	0.00	0.68	2.57	0.13	0.00	0.22	0.00	1.74	
CO2	0.93	0.11	0.27	0.23	0.24	0.21	0.34	1.51	0.36	1.68	1.97	1.29	1.14	1.07	2.38	0.40	0.34	2.63	4.41	
FeM	4.16	4.16	10.46	8.83	5.74	9.67	3.53	1.23	3.76	0.00	0.00	5.62	0.00	0.00	5.74	0.00	3.14	0.00		
Total	99.85	99.29	99.87	99.80	99.06	99.88	99.69	99.75	99.35	99.95	100.04	100.08	99.80	99.52	99.31	99.62	99.50	99.09	99.93	
<b>Eléments traces ppm</b>																				
Zr	46	96	60	71	50	68	79	73	58	40	29	41	37	41	76	38	100	38	47	
Y	11	12	13	12	11	12	10	12	12	10	7	28	9	10	19	11	28	11	8	
Sc	78	108	79	82	48	78	69	65	92	90	223	109	226	228	305	143	242	297	50	
Rb	41	24	29	29	20	22	20	45	46	21	11	23	19	30	82	37	153	29	15	
Ba	110	87	105	108	70	103	98	201	206	125	139	173	120	168	549	177	484	184	91	
V	14	138	107	128	84	69	37	29	21	21	32	181	21	51	36	17	72	29	23	
Sn	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	
Sb	19	<5	<5	<5	6	<5	7	<5	<5	6	<5	8	<5	8	<5	<5	<5	<5	11	
Ag	<2	2	2	2	<2	2	2	<2	<2	<2	<2	2	<2	2	3	<2	3	<2	<2	
As	16	17	36	14	108	38	38	109	9	86	<8	16	80	52	30	15	14	32	193	
Pb	8	<6	<6	<6	<6	<6	<6	<6	<6	10	25	<6	<6	6	8	<6	9	33	<6	
Zn	37	21	25	31	33	24	26	20	22	22	33	33	29	35	48	29	36	28	26	
Cu	154	19	38	45	82	56	18	82	28	54	57	24	41	42	31	41	44	78	289	
Ni	302	6	19	32	207	28	26	511	39	74	53	14	35	47	34	167	170	37	206	
Cr	14	68	42	47	88	42	43	43	25	18	19	83	16	31	20	38	124	18	51	
Co	40	<6	<6	9	43	11	11	381	71	65	28	<6	46	45	16	205	90	13	72	

## 6.1 Scories de la région d'Yverdon

N° échan.	Localisation	catégorie description	analyse minéralogique (diffraction RX)	remarque
-----------	--------------	-----------------------	--	----------

### Provence VD : Les Rochats

PRO 1	Les Rochats, potager	couleur SGD ?		
-------	----------------------	---------------	--	--

### Baulmes VD : Saint André-Forel

BAU 1	Saint André-Forel	calotte ø 17 cm, h 4.5 cm, 735 gr	Fay, Wü	Fe
BAU 2	Saint André-Forel	calotte double ø 14 cm, h 7.5 cm, 770 gr		Fe trace d'outil
BAU 3	Saint André-Forel	calotte double ? ø 17 cm, h 6 cm, 875 gr		Fe
BAU 4	Saint André-Forel	calotte ø 15 cm, h 7 cm, 1150 gr		Fe trace d'outil
BAU 5	Saint André-Forel	calotte ø 12 cm, h 4 cm, 1000 gr	Fay, Wü	Fe
BAU 6	Saint André-Forel	calotte double ? ø 11 cm, h 3 cm, 490 gr		Fe

### Orges VD : villa romaine

ORG 1	Borbolion, surface	calotte elliptique ø 10.5 cm, h 5.5 cm, 400 gr		
ORG 2	Borbolion, surface	calotte, fragment ø 9.5 cm, h 3.5 cm, 300 gr		

### Yverdon VD

YVE 1		calotte ø 10 cm, h 7 cm, 780 gr	Fay, Wü, (Lep), (Goe)	
YVE 2	Castrum porte de l'Est, 4e s.	SGD informe		charbonneux
YVE 3	Castrum porte de l'Est, 4e s.	SGD informe		Fe, charbonneux
YVE 4	Castrum porte de l'Est, 4e s.	calotte ? ø 7 cm, h 2 cm, 100 gr		charbonneux
YVE 5	Castrum porte de l'Est, 4e s.	SGD informe		charbonneux, oxydé
YVE 6	Castrum porte de l'Est, 1e s.	SVN informe		
YVE 7	Castrum porte de l'Est, 1e s.	calotte ?, frgt.		
YVE 8	Castrum porte de l'Est, 2-3e s.	paroi ? ou non-métallurgique		
YVE 9	Castrum porte de l'Est, 2-4e s.	SGD informe		charbonneux
YVE 10	chantier du Technicum	calotte ø 13 cm, h 5 cm, 700 gr		

SGD : scorie grise dense  
SVN : scorie noire vitreuse

ø diamètre  
h épaisseur

Fay : Fayalite  
Wü : Wüstite

Fe: fer métal visible

## Annexe 6.2

Ech.N°	AVE 1	AVE 2	AVE 3	AVE 4	AVE 5	AVE 6	AVE 7	AVE 8	AVE 9	AVE 10	AVE 11	AVE 12	AVE 13	AVE 14	AVE 15	AVE 16
Eléments majeurs % poids																
SiO2	46.00	29.92	23.68	42.08	27.98	34.82	47.91	36.00	34.95	14.77	28.40	22.39	52.71	37.28		
TiO2	0.22	0.16	0.13	0.19	0.14	0.18	0.17	0.19	0.18	0.13	0.15	0.13	0.30	0.23		
Al2O3	5.91	4.06	3.21	5.10	3.65	4.64	4.53	4.99	4.74	3.17	3.62	3.26	7.81	5.97		
Fe2O3	11.35	19.42	37.13	11.06	24.47	22.25	30.05	22.26	22.29	44.76	54.72	56.62	21.73	30.56		
FeO	22.00	31.85	21.65	25.65	32.00	28.35	3.45	19.45	20.75	27.05	0.00	2.70	6.90	0.00		
MnO	0.08	0.10	0.09	0.17	0.08	0.08	0.10	0.08	0.16	0.06	0.16	0.04	0.11	0.25		
MgO	0.80	0.80	0.40	0.81	0.64	0.60	0.82	0.67	0.77	0.51	0.71	0.40	0.83	1.39		
CaO	6.77	5.79	3.16	7.06	4.46	3.36	6.37	6.48	8.94	5.04	4.80	1.89	3.01	10.88		
Na2O	0.67	0.58	0.36	0.51	0.81	0.45	0.49	0.62	0.51	0.33	0.37	0.45	1.00	0.66		
K2O	2.62	1.93	0.80	3.60	1.68	2.06	1.29	2.61	2.60	1.47	1.71	0.79	2.97	3.18		
P2O5	0.76	0.74	1.13	1.19	0.54	0.58	0.66	0.70	0.87	0.77	1.19	0.87	0.49	1.41		
H2O	1.42	1.61	5.05	1.09	2.68	1.25	0.00	3.96	1.43	0.04	0.42	3.89	0.00	2.05		
CO2	0.55	1.39	3.66	0.88	1.12	0.92	0.70	1.73	1.21	0.97	1.90	6.78	0.81	4.29		
FeM	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.31	0.00		
Total	99.15	98.35	100.45	99.39	100.25	99.54	100.04	99.74	99.40	99.07	98.15	100.21	98.98	98.15		
Eléments traces ppm																
Zr	87	58	41	79	57	67	57	66	73	40	51	32	88	76	295	93
Y	15	13	13	18	12	15	13	14	15	12	14	10	18	18	23	19
Sr	117	115	80	137	109	98	114	109	161	101	86	38	87	106	214	125
Rb	65	52	23	115	41	63	36	67	76	23	53	33	89	102	133	86
Ba	358	332	283	515	294	302	310	362	473	152	490	139	464	616	347	575
V	21	27	38	19	28	28	26	32	19	129	27	36	33	22	19	35
Sn	<5	<5	<5	<5	126	21	<5	28	90	138	<5	<5	<5	<5	15754	31
Sb	<5	<5	5	<5	5	<5	<5	<5	<5	157	<5	8	<5	<5	<5	<5
Ag	2	3	<2	<2	<2	2	4	3	2	4	<2	<2	<2	2	<2	3
As	27	21	92	11	75	30	20	36	22	156	25	94	19	31	<8	49
Pb	6	24	18	<6	401	69	49	119	433	203	24	11	10	<6	68803	267
Zn	21	24	34	21	39	37	30	41	31	37	27	32	20	23	4805	28
Cu	62	189	250	78	727	174	109	1277	301	12938	46	45	42	63	46448	808
Ni	74	107	209	63	154	113	77	118	107	123	49	317	71	120	66	79
Cr	27	25	21	23	22	25	41	27	23	87	23	20	43	22	26	37
Co	104	138	210	74	171	139	112	146	133	46	47	271	65	115	24	65

6.2 Scores d'Avenches				
N° échan.	Localisation	catégorie description	analyse minéralogique (diffraction RX)	remarque
AVE 1	Insula 8, 3426/1	frgt calotte		hétérogène
AVE 2	Insula 8, 3426/2	frgt calotte ø 10 cm, h 1 cm, 260 gr		hétérogène
AVE 3	Insula 8, 3426/3	informe		hétérogène, charbon.
AVE 4	Insula 8, 3426/4	frgt calotte		
AVE 5	Insula 23, 2475/1	calotte ø 7 cm, h 2 cm, 200 gr		
AVE 6	Insula 23, 2475/2	calotte ø 10 cm, h 7 cm, 270 gr		
AVE 7	Insula 23, 2475/3	calotte ø 8 cm, h 4 cm, 100 gr		
AVE 8	Insula 23, 2475/4	frgt calotte	lm: Fay, Wü?, Leu, verre	
AVE 9	Insula 23, 2475/5	calotte ø 7 cm, h 6 cm, 380 gr		
AVE 10	Insula 4, 4351	calotte ø 15 cm, h 6 cm, 1000 gr	lm: Wü?, verre, Fay?	trace carbonate Cu
AVE 11	St Martin, 3596/1	informe		très charbonneux
AVE 12	St Martin, 3596/2	informe		charbonneux, oxydé
AVE 13	St Martin, 3596/3	paroi de foyer		
AVE 14	St Martin, 3596/4	calotte ø 10 cm, h 7 cm, 600 gr	lm: ?	hétérogène
AVE 15	Insula 12, Delacretaz	scorie de cuivre		
AVE 16	Insula 12, Delacretaz	calotte ? ø 7 cm, h 3 cm, 100 gr		Fe

ø diamètre  
h épaisseur  
lm : lame mince  
Fay : fayalite  
Wü : Wüstite  
Leu : Leucite  
Fe: fer métal visible

## Annexe 6.3

Ech.N°	VUL 1	VUL 2	VUL 3	VUL 4	VUL 5	VUL 21	MOR 1	MOR 21	MOR 22	MOR 3	MOR 4	MOR 5
Eléments majeurs % poids												
SiO <sub>2</sub>	26.98	13.03	31.11	28.30	26.02	19.70	63.67	21.49	43.07	24.67	63.42	18.32
TiO <sub>2</sub>	0.17	0.09	0.21	0.19	0.21	0.13	0.41	0.15	0.30	0.17	0.39	0.11
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.98	2.20	5.01	4.51	4.42	3.06	8.91	3.24	6.64	3.06	9.44	2.50
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	33.40	45.90	26.44	37.04	38.81	4.62	9.64	40.99	13.73	43.33	3.55	50.40
FeO	22.20	21.45	22.95	17.40	18.80	68.61	1.60	22.75	19.55	23.45	8.85	15.50
MnO	0.08	0.05	0.13	0.10	0.06	0.03	0.18	0.08	0.13	0.09	0.15	0.05
MgO	0.60	0.51	0.98	0.84	0.59	0.42	1.21	0.52	0.82	0.55	1.09	0.33
CaO	2.41	5.19	5.57	4.81	1.90	0.80	7.15	6.07	7.12	2.13	6.11	2.97
Na <sub>2</sub> O	0.29	0.22	0.55	0.45	0.42	0.68	1.54	0.32	0.90	0.17	1.30	0.39
K <sub>2</sub> O	2.73	1.44	2.28	1.86	1.63	0.93	3.12	1.13	2.20	1.18	3.01	1.02
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.43	0.53	0.66	0.54	0.47	0.38	0.65	0.85	1.07	0.38	0.60	0.49
H <sub>2</sub> O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.19	0.19	0.00	1.27	0.11	0.55	6.51
CO <sub>2</sub>	0.88	0.46	0.42	0.43	1.18	0.00	0.62	0.48	0.99	0.37	0.59	1.14
FeM	5.70	8.92	3.13	3.19	5.23	0.00	0.00	2.04	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	99.85	99.99	99.44	99.66	99.74	100.55	98.89	100.11	97.79	99.66	99.05	99.73
Eléments traces ppm												
Zr	65	34	78	71	88	38	141	59	114	87	140	49
Y	13	8	13	12	12	9	19	12	18	15	23	9
Sr	64	121	104	92	49	31	151	140	186	189	160	93
Rb	51	22	45	40	45	28	83	36	81	66	98	25
Ba	273	178	304	239	153	93	588	313	601	362	685	172
V	18	14	24	19	30	13	35	22	32	16	37	14
Sn	<5	<5	<5	<5	<5	243	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Sb	<5	5	<5	<5	<5	6	<5	5	<5	<5	<5	<5
Ag	2	2	2	2	2	2	<2	3	<2	2	2	3
As	33	47	19	13	46	335	<8	49	27	10	15	392
Pb	<6	<6	<6	<6	<6	41	7	<6	7	<6	9	<6
Zn	27	36	24	27	25	20	27	29	34	21	24	22
Cu	85	73	105	95	44	144	15	45	48	33	14	147
Ni	256	80	118	155	229	263	43	148	92	43	50	633
Cr	27	15	39	41	67	25	47	22	34	21	46	12
Co	263	139	105	128	174	261	14	142	85	81	37	534

6.3 Scories du Mont Vully et de Morens				
N° échan.	Localisation	catégorie description	analyse minéralogique (diffraction RX)	remarque

### Mont Vully FR : oppidum du Plan Châtel

VUL 1	Vully, sondage 32	informe SGD		Fe hétérogène
VUL 2	Vully, sondage 32	informe SGD		
VUL 3	Vully, sondage 5	informe SGD		
VUL 4	Vully, sondage 5	informe		
VUL 5	Vully, sondage 5	informe SGD		
VUL 21	Vully	calotte ø 7 cm, h 5 cm, 300 gr		

### Morens FR : Derrière la Cure

MOR 1	Morens, Derrière la Cure	paroi de foyer		partie inférieure partie supérieure
MOR 21	Morens, Derrière la Cure	frgt calotte ?		
MOR 22	Morens, Derrière la Cure	frgt calotte ?		
MOR 3	Morens, Derrière la Cure	paroi et scorie		charbonneux
MOR 4	Morens, Derrière la Cure	paroi de foyer		
MOR 5	Morens, Derrière la Cure	calotte ø 10 cm, h 5 cm, 340 gr		

SGD : scorie grise dense

ø diamètre  
h épaisseur

Fe : Fer métal visible

# Annexe 7.1

Ech.N°	MRS 20	MRS 40	MRS 61	MRS 62	MRS 70	MRS 81	MRS 82	MRS 120	MRS 140	MRS 200	MRS 260	MRS 350	MRS 370	MRS 421	MRS 422	MRS 440
Eléments majeurs % poids																
SiO2	71.78	62.95	53.65	31.81	20.66	58.02	27.96	29.92	15.08	10.76	70.90	15.85	38.76	31.39	23.40	21.70
TiO2	0.51	0.48	0.33	0.20	0.14	0.34	0.20	0.18	0.12	0.09	0.41	0.10	0.23	0.19	0.20	0.16
Al2O3	9.64	9.62	6.91	3.41	2.24	8.38	3.71	3.34	2.12	1.29	7.88	1.64	4.89	4.24	3.59	2.56
Fe2O3	0.00	0.00	3.43	19.96	42.78	11.78	16.31	19.55	44.13	33.89	0.00	44.26	7.04	12.93	28.58	35.27
FeO	4.37	17.54	24.25	35.20	26.90	9.30	41.90	38.15	23.35	49.90	6.23	28.30	25.15	33.80	36.05	32.80
MnO	0.15	0.12	0.19	0.24	0.04	0.16	0.10	0.09	0.07	0.04	0.28	0.05	0.15	0.08	0.09	0.15
MgO	1.19	1.13	1.06	0.88	0.22	1.05	0.77	0.57	0.32	0.20	1.16	0.33	1.21	0.78	0.48	0.51
CaO	4.79	2.35	3.96	4.35	0.81	4.54	3.19	3.21	1.75	1.24	6.72	5.98	14.57	8.41	2.79	2.91
Na2O	0.98	0.78	0.82	0.28	0.08	0.99	0.31	0.88	0.10	0.03	0.85	0.09	0.32	0.56	0.36	0.15
K2O	3.52	2.24	2.25	1.86	0.59	2.73	1.08	1.59	0.65	0.31	2.24	0.58	3.31	2.49	1.34	0.97
P2O5	0.40	0.26	0.58	0.56	0.37	0.62	0.51	0.36	0.34	0.28	0.44	0.44	0.62	0.66	0.55	0.38
H2O	0.54	0.68	1.62	0.00	3.27	0.81	1.65	0.51	3.96	0.67	0.32	0.00	1.18	0.93	3.07	0.35
CO2	0.59	0.62	0.92	0.48	1.25	0.73	1.72	0.70	8.13	0.22	1.13	1.57	0.62	4.03	0.15	1.28
FeM	0.86	0.09	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.80	1.37	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	99.32	98.86	99.97	99.30	99.35	99.45	99.41	99.05	100.12	98.92	99.36	100.56	98.05	100.49	100.65	99.19
Eléments traces ppm																
Zr	163	142	123	84	52	129	67	72	39	31	141	37	83	66	59	50
Y	22	22	17	12	8	19	12	15	8	7	18	8	18	12	11	10
Sr	115	84	81	79	25	103	78	89	39	30	115	99	228	62	54	54
Rb	87	93	74	51	23	82	37	62	17	7	73	16	93	36	32	28
Ba	565	533	455	308	108	477	222	280	133	58	432	92	560	250	172	192
V	37	46	28	20	12	37	31	18	16	10	33	7	21	25	23	19
Sn	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Sb	<5	<5	<5	<5	5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	7	<5	<5	<5	<5
Ag	<2	<2	2	<2	2	<2	3	2	2	2	<2	<2	2	2	<2	<2
As	11	14	18	45	475	24	48	32	87	55	10	88	21	<8	50	10
Pb	<6	10	15	<6	<6	10	<6	<6	<6	<6	<6	<6	26	<6	<6	<6
Zn	16	29	28	25	20	28	25	23	32	26	18	26	23	22	25	19
Cu	15	46	76	87	165	39	119	90	252	77	15	100	38	62	130	42
Ni	43	62	88	118	169	96	233	122	682	125	43	393	83	56	315	35
Cr	69	67	56	34	29	56	40	40	32	22	70	26	36	43	56	31
Co	63	91	104	213	176	84	210	165	746	159	66	251	71	78	270	67

7.1 Scories de Marsens 1							
N° échan.	Secteur	catégorie description	dimensions		poids gr	analyse minéralogique RX ou optique	remarque
			ø cm	h cm			
MRS 20	258	SAS ± calotte	6	3	100		hétérogène
MRS 40	258	SAS globulaire	5		100		hétérogène
MRS 61	258	SAS calotte	15	7	700	Fay, Qz	partie sup.
MRS 62		SJD calotte				Fay, Wü, Qz, Leu	partie inf.
MRS 70	360	SGD calotte	8	7	550	Fay, Wü?, Hyd, Qz Leu, verre, Fe	petit morceau SAS collé
MRS 81	258	SAS calotte	8	7	350		partie sup.
MRS 82		± SJD calotte					partie inf.; hétérogène
MRS 120	258	SAS+SJD calotte	7	4	250	Fay, Wü?, verre, Leu, Hyd, Qz	composite globules à Wü
MRS 140	257	SJC ± calotte	7	3	300	Wü?, Fay?, verre Qz, Hyd	60% charbon, Fe
MRS 200	257	SGD calotte	11	3	520	Fay, Wü sup : Qz, Hyd	homogène
MRS 260	259	SAS informe	6		100		hétérogène, Fe
MRS 350	356	SGD calotte	7	2.5	320	Fay, Wü, verre Qz, Hyd	Fe > 1%
MRS 370	356	SJD informe	10	2	170	Fay, Leu, Wü? Hedenbergite?	texture polygonale battiture
MRS 421	258	SJC calotte double	7	8	300		calotte sup.
MRS 422		SGD calotte double					calotte inf.; Fe
MRS 440	258	SJC+SGD calotte	12	4	350		composite

SAS scorie argilo-sableuse

SJC scorie jaunâtre charbonneuse

SJD scorie jaunâtre dense

SGC scorie grise charbonneuse

SGD scorie grise dense

ø diamètre

h épaisseur

Fay : Fayalite

Qz : Quartz

Leu : Leucite

Wü : Wüstite

Wü? : opaque prob. Wüstite (l.m.)

Hyd : Hydroxydes de fer

Fe : fer métallique

visible

# Annexe 7.2

Ech. N°	MRS 500	MRS 520	MRS 540	MRS 551	MRS 552	MRS 560	MRS 611	MRS 612	MRS 651	MRS 652	MRS 800	MRS 950	MRS 960	MRS 119	MRS 120	MRS 121	MRS 122	
Eléments majeurs % poids																		
SiO2	22.48	24.13	11.87	26.77	25.77	67.95	30.43	21.36	25.54	21.36	75.02	25.38	22.79	27.31	33.71	13.59	16.61	
TiO2	0.16	0.15	0.09	0.21	0.19	0.34	0.19	0.15	0.19	0.19	0.49	0.19	0.16	0.19	0.25	0.11	0.10	
Al2O3	2.69	2.45	1.47	3.76	3.37	8.21	3.75	2.52	3.24	3.26	9.29	3.33	2.61	3.39	4.34	1.63	1.70	
Fe2O3	28.53	39.27	46.05	29.89	32.04	2.65	26.10	28.87	34.59	31.54	1.12	31.08	35.21	17.27	17.13	43.61	37.39	
FeO	37.30	23.25	27.80	27.60	31.60	12.80	27.55	39.50	23.10	34.00	4.00	33.95	32.10	45.30	32.35	31.00	34.70	
MnO	0.16	0.08	0.05	0.16	0.14	0.13	0.10	0.11	0.14	0.15	0.15	0.06	0.12	0.09	0.10	0.06	0.07	
MgO	0.59	0.54	0.14	0.50	0.58	0.83	0.58	0.59	0.69	0.59	1.12	0.56	0.56	0.56	0.71	0.26	0.46	
CaO	2.83	2.83	0.71	2.75	3.48	1.30	3.39	2.76	3.93	2.90	2.99	1.60	1.64	3.06	4.69	1.25	1.39	
Na2O	0.20	0.21	0.17	0.31	0.29	0.91	0.19	0.09	0.18	0.12	0.99	0.15	0.08	0.16	0.35	0.01	0.40	
K2O	1.24	0.75	0.26	1.47	1.43	2.47	1.33	0.88	1.07	0.74	2.37	1.39	0.62	1.39	2.66	0.43	0.82	
P2O5	0.34	0.44	0.42	0.66	0.48	0.31	0.45	0.47	0.39	0.85	0.41	0.42	0.45	0.39	0.52	0.31	0.37	
H2O	0.33	1.58	0.00	4.95	0.18	0.72	4.19	1.69	2.23	1.41	0.87	1.08	2.29	0.00	1.99	2.63	0.00	
CO2	3.81	4.58	8.35	0.33	0.51	0.48	1.03	0.51	3.30	1.50	0.59	0.40	1.90	0.18	1.03	5.39	4.25	
FeM	0.00	0.00	3.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.62	0.00	0.00	1.53	
Total	100.66	100.26	100.39	100.39	100.06	99.10	99.28	99.50	98.59	98.61	99.41	99.59	100.53	99.91	99.83	100.28	99.79	
Eléments traces ppm																		
Zr	56	52	30	80	71	109	74	48	67	64	166	64	48	69	82	36	40	
Y	10	9	7	13	12	21	11	9	11	12	23	10	9	11	13	7	9	
Sr	63	71	16	81	75	73	98	61	86	81	94	44	43	81	94	20	22	
Rb	31	24	9	48	44	84	36	24	29	26	78	37	18	40	52	13	23	
Ba	180	165	39	357	303	414	339	241	220	238	493	211	179	199	359	54	84	
V	16	16	10	24	22	36	20	21	21	33	39	24	27	19	21	13	21	
Sn	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	
Sb	<5	<5	<5	<5	7	<5	5	7	<5	<5	<5	<5	<5	9	<5	<5	<5	
Ag	<2	2	<2	<2	<2	2	<2	2	2	<2	2	3	<2	<2	<2	<2	<2	
As	86	103	264	169	<8	11	166	10	60	12	<8	72	37	<8	35	84	65	
Pb	<6	<6	<6	<6	<6	6	<6	<6	<6	<6	15	<6	<6	<6	<6	<6	<6	
Zn	23	28	27	23	18	18	26	24	21	23	35	26	26	20	21	19	27	
Cu	168	133	177	358	60	43	157	83	216	100	25	73	129	57	78	95	99	
Ni	275	210	726	184	9	55	159	41	347	96	63	154	154	65	130	307	272	
Cr	43	38	23	42	40	56	46	34	48	50	87	56	51	43	42	34	60	
Co	276	259	669	172	33	79	151	56	309	119	52	130	171	61	137	645	339	

7.2		Scories de Marsens 2						
N° échan.	secteur	catégorie description	dimensions		poids gr	analyse minéralogique (diffraction RX)	remarque	
			ø cm	h cm				
MRS 500	257	SAS+SJC+SGD calotte	10	7	430		composite; Fe	
MRS 520	258	SGD+SJC calotte	10	7	650	Fay, Wü, verre Hyd	composite; oxydé	
MRS 540	258	SAS+SGD informe	7	5	700	Fay, Qz, Wü?, Hyd	composite; Fe 5%; oxydé	
MRS 551	258	SJD calotte	15	7	600	Fay, Wü?, Leu, verre, Hyd	partie sup.	
MRS 552		SGD calotte				Fay, Wü?, Hyd	partie inf.	
MRS 560	258	SAS informe	5		250		hétérogène	
MRS 611	360	SJ ± calotte	7	7	370	Qz, Hyd, verre	partie sup.; Fe 0.1%	
MRS 612		SGD+SJC calotte				Fay, Wü?	partie inf.	
MRS 651	360	SJD calotte double ?	13	5	500		partie sup.; Fe 0.1%	
MRS 652		SGD calotte double ?					partie inf.	
MRS 800	360	SAS calotte	5	1	40		grains non fondus	
MRS 950	357	SJD calotte	15	5	700	Fay, Wü?, Leu, verre, Hyd		
MRS 960	357	SGC ± calotte	7	3	180		Fe 0.1%; sup. lie de vin	
MRS 1190	360	SJD calotte	11	4	500	Fay, Wü?, verre	homogène	
MRS 1200	360	SJD calotte	15	6	1400	sup : Qz, Hyd inf : Fay, Wü?, Leu, verre	bord de foyer	
MRS 1210	360	SGC ± calotte	12	5	890	Fay, Wü?, Hyd	Fe 5%	
MRS 1220	360	SGC calotte	15	5	1325		Fe 25%	

SAS scorie argilo-sableuse  
 SJC scorie jaunâtre charbonneuse  
 SJD scorie jaunâtre dense  
 SGC scorie grise charbonneuse  
 SGD scorie grise dense

ø diamètre  
 h épaisseur

Fay : Fayalite Fe : fer métallique visible  
 Qz : Quartz  
 Leu : Leucite  
 Wü : Wüstite (RX)  
 Wü? : opaque prob. Wüstite (l.m.)  
 Hyd : Hydroxydes de fer

# BIBLIOGRAPHIE

## I Livres et articles

- ABETEL, E., 1992: *L'établissement sidérurgique de Montcherand*. Lausanne 1992, 112p., avec la coll. de Klausener, M. et Serneels V. (Cah. Archéol. romande 54).
- ABETEL, E. et SERNEELS, V., 1987: La métallurgie antique en Suisse: recherches récentes. p. 211-225, in *Actes du colloque «Mines et métallurgie en Gaule et dans les provinces voisines»*, Paris 26-27.04.1986. Paris 1987, 334 p. (= Caesarodunum 22).
- ABETEL, E. et SERNEELS, V., 1988: Recherches sur la métallurgie du fer dans le Canton de Vaud: analyse multivariée des scories. p. 585-596, in: Symposium «Archäometallurgie von Kupfer und Eisen in Westeuropa», Mainz 12-5.09.1986. *Jb. Römisch-Germanischen Zentralmuseums Mainz*, 35, 1988, pp. 481-704.
- AEBISCHER, P., 1930: Notes sur les routes romaines du canton de Fribourg. *Rev. Hist. Suisse*, 10, 1930, p. 189-
- ALLEN, D., 1968: Iron Currency Bars in Britain. *Proc. Prehist. Soc.*: 1967, (ns) 33, 1968.
- AMBERGER, G., 1982: Géologie régionale. p.23-32, in: Guichonnet, P., Perrotta, D., de Senarclens J. et collab.: *Encyclopédie de Genève, vol.1: Le Pays de Genève*. Genève 1982, 190 p.
- AMBERGER, G., CAROZZI A.V., CHAROLLAIS, J., DECROUEZ, D., RUCHAT, C. et ZANINETTI, L., 1988: Histoire géologique du Salève d'Horace-Bénédict de Saussure à nos jours. *Arch. Sci.(Genève)*, 41/1, 1988, pp. 1-42.
- AMSLER, A., 1935: Die alten Eisenindustrien des Fricktales, bei Erlinsbach und in benachbarten Gebieten des östlichen Juras im Licht der Flurnamen. *Argovia*, 47, 1935, pp. 101-157.
- ANDERSON, T.J. et BOUYER, M., 1992: Chronique archéologique, Courgevaux FR, Le Marais 1. *Annu. Soc. suisse Préhist. Archéol.*, 75, 1992, p.199.
- ANDRIEUX, P., 1990: *Prolégomènes à une étude tracéologique sur les structures d'élaboration thermique et les parois argilo-sableuses, application à la paléoméallurgie du fer*. Thèse Université de Franche-Comté, 1990, 599 p., manuscrit.
- ARBENZ, P., 1910: *Zur Kenntnis der Bohnerzformation in den Schweizeralpen*. p.3-16 in Matér. Carte géol. Suisse, Berne, (ns) 34, 1910, 45 p.
- ARIKIAN, Y., 1964: Etude géologique de la chaîne du Grand Crédo-Vuache (Ain, Haute Savoie, France). *Eclogae geol. Helv.*, 57/1, 1964, pp. 1-75.
- AUBERT, D., 1941: *Notice explicative de la feuille 1221 (Le Sentier)*. Atlas géol. Suisse 1:25000, Berne, 1941, 24 p., 1 pl.
- AUBERT, D., 1943: *Monographie géologique de la Vallée de Joux (Jura vaudois)*. Berne 1943, p. (Matér. Carte géol. Suisse (ns) 78).
- AUBERT, D., 1963: *Notice explicative de la feuille 1202 (Orbe)*. Atlas géol. Suisse 1:25000, Berne, 1953, 20 p., 1 pl.
- AUBERT, D. et LE RIBAUT, L., 1975: Quartz du pied du Jura. *Bull. Soc. vaudoise Sci. Nat.*, 72, pp. 231-240 (Bull. Labo. Lausanne 217).
- BACHMANN, H.G., 1982: *The Identification of Slags from Archaeological Sites*. Londres, 1982, 37 p., 27 pl. (Occas. Publ. 6).
- BADOUX, H., 1965: *Notice explicative de la feuille 1264 (Montreux)*. Atlas géol. Suisse 1:25000, Berne, 1965, 20 p., 3 pl.
- BAUMBERGER, E., 1895: Über die geologischen Verhältnisse am linken Ufer des Bielersees. *Mitt. natf. Ges. Bern*, 1985, pp.150-202.
- BAUMBERGER, E., 1923: Bohnerz: I. Die Vorkommen im Jura-gebirge. p.5-125, 7pl., in *Die Eisen- und Manganerze der Schweiz*, Berne, 1923, 284 p., 13 pl. (= Matér. Géol. Suisse, Sér. géotech., Die Eisen- und Manganerze der Schweiz, 13/1).
- BECKER, F., 1973: *Notice explicative de la feuille Murten (1165)*. Atlas Géol. Suisse 1:25000, Berne, 1973, 28 p.
- BELHOSTE, F., 1986: The Diffusion of the Blast Furnace Process across Western France in the 15th and 16th Centuries. *Jernkontorets Forskning*, 39, 1986, pp. 5-19. («Medieval Iron in the Society», papers and discussions at the symposium in Norberg, 6-10.05.1985, 2).
- BERCHEM, D. van, 1982: *Les routes et l'histoire, études sur les Helvètes et leurs voisins dans l'Empire romain*. Lausanne, 1982, 306 p. (Publ. Fac. Lett. Univ. Lausanne 25).
- BERSIER, A., 1953: *Notice explicative de la feuille 1223 (Echalens)*. Atlas géol. de la Suisse 1:25000, Berne, 1953, 21 p., 1 pl.
- BERSIER, A. et BADOUX, H., 1937: Une formation éolienne sub-désertique dans le Sidérolithique du Mormont (Vaud). *Eclogae geol. Helv.*, 30/2, pp. 231-234.

- BERTHIER, P., 1822: Sur la nature des scories de forges catalanes et des foyers d'affinerie. *Ann. Mines*, (1) 7, 1822, pp. 377-402.
- BERTRAND, J. et WEIDMANN, M., 1979: Les nodules minéralisés de la Jointe, vallée de l'Hongrin, Crétacé inférieur de la nappe des Préalpes Médiannes. *Arch. Sci. (Genève)*, 32/1, 1979, pp. 43-66. (= Bull. Labo. Lausanne 241).
- BERTSCHY, R., 1958: Geologie der Kreide und Molasse in der Umgebung von Grandson (Kt. Waadt). *Eclogae geol. Helv.*, 52/2, 1958, pp. 217-264.
- BIELENIN, K., 1974: *Starozytne Gornictwo i Hutnictwo Zelaza w Gorach Swietokrzyskich (Ancient Mining and Iron Metallurgy in the Gory Swietokrzyskie - Holy Cross Mountains)*. Cracovie 1974, 279 p.
- BIRCHMEIER, C., 1986: *Bohnerzbergbau im Südranden*. Schaffhouse, 1986, 80 p. (= Njbl. natf. Ges. Schaffhausen 38).
- BLANDER, M., PLANNER, H.N., KEIL, K., NELSON, L.S., RICHARDSON, N.L., 1976: The Origin of Chondrules: experimental investigation of metastable liquids in the system Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>-SiO<sub>2</sub>. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 40, 1976, pp. 889-896.
- BLONDEL, L., 1926: Chronique (1925). *Genava*, 4, 1926, pp. 68-82.
- BLONDEL, L., 1932: Maisons gauloises et édifice public romain (basilique?). *Genava*, 10, 1932, pp. 55-76.
- BLONDEL, L., 1940: Carouge, villa romaine et burgonde. *Genava*, 18, 1940, pp. 54-68.
- BLONDEL, L., 1943: Chronique (1941-42). *Genava*, 21, 1943, pp. 32-54.
- BLONDEL, L., 1944: Chronique archéologique: 1943. *Genava*, 22, 1944, pp. 21-60.
- BLONDEL, L., 1955: Chronique (1954-55) *Genava*, (ns) 3, 1955, pp. 117-139.
- BÖGLI, H., 1975: Rapport préliminaire sur les fouilles du Capitole. *Bull. Assoc. Pro Aventico*, 23, 1975, pp. 40-45.
- BÖGLI, H., 1984: *Aventicum, La ville romaine et le musée*. Lausanne 1984, 83 p. (Guides archéol. Suisse 19).
- BONNARD, P., 1988: *Noviodunum 1: La ville romaine de Nyon*. Lausanne, 1988, 94 p. (Cah. Archéol. Romande 44).
- BOREL, P., 1948: Le fer dans le Jura bernois. *Bull. Assoc. Défense Intérêts Jura*, 19 / 12, 1948, pp. 209-224.
- BOULANGE, B. et BOCQUIER, G., 1983: Le rôle du fer dans la formation des pisolithes alumineux au sein des cuirasses bauxitiques latéritiques. *Sci. géol. (Strasbourg) Mém.*, 72, 1983, pp. 29-36.
- BRAUNSTEIN, P. et CHAPELOT, O., 1983: Mines et métallurgie en Bourgogne à la fin du Moyen Age, première esquisse. pp. 31-66 in Benoit, P et Braunstein, P (éd.) «Mines, carrières et métallurgie dans la France médiévale», *Colloque, Paris 19-21.06.1980*. Paris, 1983, 415 p.
- BRIDEL, P., 1982: Nouveau plan archéologique de Nyon. *Archéol. suisse*, 5/3, 1982, pp. 178-183.
- BROISE, P., 1974: *Genève et son territoire dans l'Antiquité, de la conquête romaine à l'occupation burgonde*. Bruxelles, 1974, 369 p., 12 fig., atlas. (Coll. Latomus 129).
- BROISE, P., 1984-7: Antiquités gallo-romaines du Faucigny. *Bull. Soc. Hist. Archéol. Genève*, 18, 1984-7, pp. 223-300.
- BRUN, E., 1988: Die Eisenerzvorkommen des Schmorrasgrates und ihre Verhüttung im Oberhalbstein. *Minaria Helvetica*, 8a, 1988, p.33-42.
- BRYAN, W.B. 1972: Morphology of Quench Crystals in Submarine Basalts. *J. geophys Res.*, 77/29, 1972, pp. 5812-5819.
- BUCHWALD, V.F., 1975: *Handbook of Iron Meteorite.*, 1975, 1418 p.
- BUCHWALD, V.F. et VOSS, O., 1992: Iron Production in Denmark in Viking and Medieval Times. p.31-44 in Espelund A.(éd.) «Bloomery Ironmaking during 2000 years» *Seminar in Budalen 26-30.08.1991, vol.2*, Trondheim, 1992, 132 p.
- BÜRGI, J. et BÄNTELI, K., 1982: Latènezeitliche Siedlungsspuren bei Merishausen SH. *Arch. suisse*, 5, 1982, pp. 105-109.
- CARON, J.M., GAUTHIER, A., SCHAAF, A., ULYSSE, J. et WOZNIAK, J., 1992: *Comprendre et enseigner la planète Terre*. Gap, 1992, 2e éd., 271 p.
- CAYEUX, L., 1922: *Les minerais de fer oolithiques de France, fasc.2: minerais de fer secondaires*. Paris, 1922, 1051 p., 35 pl.
- CHAIX, A., 1923: Gisements sidérolithiques des Dents-du-Midi, pp. 141-150 in *Die Eisen- und Manganerze der Schweiz*. Berne, 1923, 284p., 13 pl. (Matér. Géol. Suisse, Sér. Géotech., Die Eisen- und Manganerze der Schweiz, 13/1).
- CHAIX, L., 1988: Le Salève quaternaire: environnement et préhistoire. *Arch. Sci. (Genève)*, 41/1, 1988, pp. 159-171.
- CHAROLLAIS, J., BADOUX, H. et coll., 1990: *Suisse lémanique, Pays de Genève, Chablais*. Paris, 1990, 224 p. (Guides géol. Régionaux).
- CHAROLLAIS, J., BUSNARDO, R., CARDIN, M., CLAVEL, B., DECROUEZ, D., DELAMETTE, M., GORIN, G., LEPILLER, M., MONDAIN, P.-H., ROSSET, J. et VILLARS, F., 1988: *Notice explicative de la feuille Annecy-Bonneville à 1/50 000 (678)*. Orléans, 1988, 139 p.
- CHARVET, L., 1967: Le rôle des exploitations cartusiennes dans l'essor de la métallurgie alpine. *Rev. Hist. Sidérurgie*, 8/3, 1967, pp. 187-192.
- CHAVANNES, S., 1854: Etudes géologiques des environs de La Sarraz et plus spécialement du Mauremont. *Bull. Soc. vaudoise Sci. nat.*, 3, 1854, pp. 197-203 (Bull. N° 29, année 1853).
- CHAVANNES, S., 1856a: Essais sur la géologie d'une partie du pied du Jura comprise entre le Nozon et Yverdon. *Bull. Soc. vaudoise Sci. nat.*, 4, 1856, pp. 14-24 (Bull. N° 32, année 1854).
- CHAVANNES, S., 1856b: Note sur le terrain sidérolithique de la coline néocomienne de Chamblon près d'Yverdon. *Bull. Soc. vaudoise Sci. nat.*, 4, 1856, pp. 310-311 (Bull. N° 36, année 1855).
- CHRISTE, F., 1983: Chronique archéologique: Nyon, La Morache. *Ann. Soc. suisse Préhist. Archéol.*, 66, 1983, pp. 286-294.
- CHRISTE, F. et MOREL, J., 1982: Un nouveau quartier romain de Nyon: fouilles de Bel-Air 1978-80. *Etudes de Lettres (Lausanne)*, 1982/1, pp. 105-126.
- CLEERE, H., 1970: *The Romano-British Industrial Site at Bardown, Wadhurst*. Lewis, 1970, 23p. (Sussex archaeol. Soc. Occas. Paper 1).
- CLEERE, H., 1991: Iron smelting experiments: Towards a systematic policy for international cooperation, p.45-50, in: *Archéologie expérimentale, actes du colloque international «Expérimentation en archéologie: bilan et perspectives»*, Beaune, 6-9.05.1988, Tome 1: *Le Feu: métal et céramique*. Paris, 1991, 272 p. (Coll. Archéologie Aujourd'hui).
- CLEERE, H. ET CROSSLEY, D., 1985: *The Iron Industry of the Weald*, Leicester, 1985, 395 p.
- CLOUGH, R.E., 1985: The Iron Industry in the Iron Age and Romano-British Period, p.179-187 in Craddock, P.T. et Hughes, M.J. (éd.): *Furnaces and Smelting Technology in Antiquity*, Londres, 1985, 244 p. (British Mus. Occas. Paper 48).

- COGHLAN, H.H., 1956: *Notes on prehistoric and early iron in the Old World*, Oxford, 1956, 144 p., 16 pl. (= Occas. Paper Technology, Pitt Rivers Mus. 8).
- COLLET, L.-W. et PAREJAS, E., 1934: Contribution à l'étude du Tertiaire du Salève, 1: Les environs de Mornex. *C.R. Soc. Phys. Hist. nat. Genève*, 51/2, 1934, pp.1 71-174 (Suppl. Arch. Sci (Genève)).
- COLLET, L.-W. et PAREJAS, E., 1936: Contribution à l'étude du Tertiaire du Salève, 2: La région comprise entre les Esserts et les Ussets; 3: Vue d'ensemble. *C.R. Soc. Phys. Hist. nat. Genève*, 53/2, 1936, pp. 96-101 (Suppl. Arch. Sci.(Genève)).
- CONRAD, M.-A. et DUCLOZ, C., 1977: Nouvelles observations sur l'Urgonien et le Sidérolithique du Salève. *Eclogae geol. Helv.*, 70, 1977, pp. 127-144.
- COSCA, M.A., ROUSE, R.R. et ESSENE, E.J., 1988: Dorrite  $\text{Ca}_2(\text{Mg}_2\text{Fe}_4)(\text{Al}_4\text{Si}_2)\text{O}_{20}$ , a new member of the aenigmatite group from a pyrometamorphic melt-rock. *Amer. Mineralogist*, 73, 1988, pp. 1440-1448.
- CREW, P., 1986: Bryn y Castell Hillfort: a Late Prehistoric Iron Working Settlement in north-west Wales. p.91-100 in Scott, B.G. et Cleere, H. (éd.): «*The Craft of the Blacksmith*», *Symposium 16-21.09.1984, Belfast*. Belfast, 1986, 180 p.
- CREW, P., 1991: The Experimental Production of Prehistoric Bar Iron. *Hist. Metallurgy*, 25/1, 1991, pp. 21-34.
- CREW, P. et SALTER, C., sous presse: Currency Bars with Welded Tips. in Espelund, A. (éd.), «*Bloomery Ironmaking during 2000 years*», *Seminar in Budalen 26-30.08 1991, vol.3*. Trondheim, 1993, pp. 11-30.
- CUSTER, W., 1928: *Etude géologique du Pied du Jura vaudois*. Berne, 1928, 71 p., 2 pl. (Matér. Carte géol. Suisse (ns) 59).
- CUSTER, W., 1935: *Notice explicative de la feuille 1222 (Cossonay)*. Atlas géol. Suisse 1:25000, Berne, 1935, 6 p.
- DEER, W.A., HOWIE, R.A. et ZUSSMAN, J., 1978: *Rock-Forming Minerals, 2A: Single-Chain Silicates*. Londres, 1978, 2e éd., 668 p.
- DEER, W.A., HOWIE, R.A. et ZUSSMAN, J., 1982: *Rock-Forming Minerals, 1A: Orthosilicates*. Londres, 1982, 2e éd., 919p.
- DEER, W.A., HOWIE, R.A. et ZUSSMAN, J., 1986: *Rock-Forming Minerals, 1B: Disilicates and Ring Silicates*. Londres, 1986, 2e éd., 629 p.
- DEER, W.A., HOWIE, R.A. et ZUSSMAN, J., 1992: *An Introduction to the Rock-Forming Minerals*. Londres, 1992, 2e éd., 696 p.
- DE JONGH, W.K., 1976: *Norelco Reporter*, 23, 1976, pp. 26-31.
- DE LA HARPE, P. et GAUDIN, C., 1854: Ossements fossiles trouvés au Mormont, près La Sarraz. *Bull. Soc. vaudoise Sci. nat.*, 3, 1854, p.117-124 (Bull. N° 26, année 1852).
- DELALOYE, M.F., 1966: *Contribution à l'étude des silicates de fer sédimentaires, le gisement de Chamoson (Valais)*. Berne, 1966, 71 p. (Matér. Géol. Suisse, Sér. géotech., 13/9).
- DELLA VALLE, G., 1992: *Les fahlbandes et les veines polymétalliques du Val d'Anniviers et du Val de Tourtemagne, Valais, contribution à l'interprétation métallogénique*. Berne 1992, 60 p., 8 pl. (Matér. Géol. Suisse, Sér. géotech., 81).
- DEVERIN, L. 1945: *Etude pétrographique des minerais de fer oolithiques du Dogger des Alpes suisses*. Berne, 1945, 115 p., 20 pl. (Matér. Géol. Suisse, Sér. géotech., 13/2).
- DOITEAU, S., 1990: Chronique archéologique, Faoug VD, Derrière le Chaney. *Annu. Soc. suisse Préhist. Archéol.*, 73, 1990, p. 197.
- DOMERGUE, C., 1991: Récentes découvertes aux Martys (Aude, France): des fours de réduction du fer du 1er siècle avant J.C. *Materiály Archeologiczne*, 26, 1991, pp. 107-114, 3 pl. («Form Bloom to Knife» International Archaeometallurgical Symposium, Kielce-Ameliowka 18-22.05.1989)
- DOMERGUE, C., REBISCOUL, A. et TOLLON, F., 1982: Les fours de réduction du fer dans la Montagne Noire (Aude) à l'époque gallo-romaine et leur production. p. 215-230 in: *Mines et Fonderies antiques de la Gaule, Table Ronde du CNRS, 21-22.10.1980, Toulouse-le-Mirail*. Paris 1982, 329 p.
- DONALDSON, C.H., 1974: Olivine Crystal Types in Harristic Rocks of the Rhum Pluton and in Archean Spinifex Rocks. *Bull. geol. Soc. Amer.*, 85, 1974, pp. 1721-1726.
- DONALDSON, C.H., 1976: An Experimental Investigation of Olivine Morphology. *Contr. Mineral. Petrol.*, 57, 1976, pp. 187-213.
- DONALDSON, C.H., 1979: An Experimental Investigation of the Delay in Nucleation of Olivine in Mafic Magmas. *Contr. Mineral. Petrol.*, 69, 1979, pp. 21-32.
- DONZE, P. et ENAY, R., 1972: *Notice explicative de la feuille Seyssel à 1/50 000 (677)*. Orléans, 1972, 16 p.
- DOSWALD, C., 1990: The Archaeology of Iron in Switzerland. *PACT* 30, 1990.
- DOSWALD, C., 1992a: Bohnerzbergbau am Scherzberg (Kanton Aargau). *Minaria Helvetica*, 12/a, 1992, pp. 31-38.
- DOSWALD, C., 1992b: Die Eisenverhüttungsanlage von Kaisten-Seehübel. *Minaria Helvetica*, 12a, 1992, pp. 39-54.
- DOUSSET, P.E. et TOLLARDO, J.Y., 1981: *Etude métallogénique du Val d'Aoste (Italie), essai de valorisation des ressources minières par les méthodes de prospection géophysique, géochimique et alluvionnaire.*, 1981, 2 vol., 234 + 163 p. (Thèse Univ. Grenoble).
- DOUXAMI, H., 1896: *Etude sur les terrains tertiaires du Dauphiné, de la Savoie et de la Suisse occidentale*. Lyon, 1896, 316 p. (Ann. Univ. Lyon 27/1).
- DURRER, R., 1957: *Réduction des minerais de fer*. Paris, 1957, 142 p. (trad. M. Auxenfans).
- EGLOFF, M., 1982: Découverte d'une enceinte quadrangulaire celtique à proximité de La Tène (Marin NE). *Archéol. suisse*, 5, 1982, pp. 110-113.
- EICHLER, J., 1961: Mineralogische und geologische Untersuchungen von Bohnerz in Baden-Württemberg, besonders der Vorkommen bei Liptingen, Kreis Stockach. *N. Jb. Mineral., Abh. Stuttgart*, 97/1, 1961, pp. 51-111.
- EPPRECHT, W., 1946: *Die Eisen- und Manganerze des Gonzen*. Berne, 1946, 128 p., 1 pl. (Matér. Géol. Suisse, Sér. géotech., 24).
- EPPRECHT, W., 1957: Unbekannte schweizerische Eisenerzgruben sowie Inventar und Karte aller Eisen- und Manganerz-Vorkommen der Schweiz. *Bull. suisse Minéral. Pétrogr.*, 37/2, 1957, pp. 217-246, carte. (Matér. Géol. Suisse, Petites Contr. 19).
- EPPRECHT, W., 1986: Neues vom alten Bergbau am Gonzen (Sargans). *Minaria Helvetica*, 6a, 1986, p. 18-28.
- EPPRECHT, W., 1991: Das Gonzenbergwerk: Geschichte, Geologie, Bergbautechnik, Verhüttung. p. 33-84 in Hugger, P.: *Der Gonzen, 2000 Jahre Bergbau*. Sargans, 1991, 222 p.
- EPPRECHT, W., BÜCHI, U., HOFMANN, F. et HÜGI, T., 1963: Die Bohnerzfunde in den Tiefbohrungen von Limberg (Küsnacht, Kt. Zürich) und Eglisau 2. *Bull. suisse Minéral. Pétrogr.*, 43/1, 1963, p.313-338. (=Matér. Géol. Suisse, Petites Contr. 31).
- ESCHENLOHR, L., 1991: Le site sidérurgique de Boécourt-Les Boulies. *Minaria Helvetica*, 11a, 1991, pp. 13-19.
- ESCHENLOHR, L., sous presse: Le site sidérurgique de Boécourt-Les Boulies (JU-CH). in *Actes du Symposium international «Paleo-*

- métallurgie du Fer et Cultures», 1-3.10.1990, Sévenans, sous presse.
- ESCHENLOHR, L. et SERNEELS, V., 1991: *Les bas fourneaux mérovingiens de Boécourt-Les Boulies (JU/Suisse)*. Porrentruy 1991, 144 p. (Cah. Archéol. Jurassienne 3).
- ESPELUND, A., 1991: *Ole Evenstad: Praktische Abhandlung von den Eisensteinen, welche sich in Norwegen in Sümpfen und Morästen Finden, und über die Methode solche in Eisen und Stahl zu Verwandeln. 1790*. Trondheim 1991, 63 p.
- EUGSTER, H., 1923: Die Eisenerzlagertstätten im Val Tisch und Val Plazbi. p.207-219 in *Die Eisen- und Manganerze der Schweiz*, Berne, 1923, 284 p., 13 pl. (Matér. Géol. Suisse, Série géotech., Die Eisen- und Manganerze der Schweiz, 13/1).
- EVARD, A., 1867: Le plateau de Thoste et ses mines de fer, notice géologique. *Rev. Universelle Mines Métallurgie Travaux Publics (Liège)*, 22, 1867, pp. 1-49, 2 pl.
- FABER, W., 1954: Mikroskopie der Metallhütten-Schlacken. p.521-595 in Freund, H., *Handbuch der Mikroskopie in der Technik, Bd.2 Mikroskopie der Bodenschätze, T.2 Mikroskopie der Erze, Aufbereitungsprodukte und Hüttschlacken*. Frankfurt am Main, 1954, 724 p.
- FALCONNIER, A., 1931: *Etude géologique de la région du Col du Marchairuz*. Berne, 1931, 31 p., 1 pl. (= Matér. Carte géol. Suisse, (ns), 27).
- FALCONNIER, A., 1951: *Notice explicative de la feuille 1241 (Marchairuz)*. Atlas géol. Suisse 1:25000, Berne, 1951, 24 p., 1 pl.
- FASNACHT, W., 1989: Haupt- und Spurenelementanalysen der Schlacken. p.96-97 in Ruckstuhl, B., *Hallstattzeitliche Siedlungsgruben aus Neunkirch-Tobeläcker (SH)*. *Annu. Soc. suisse Préhist. Archéol.*, 72, 1989, pp. 59-98.
- FAURE, G., 1992: *Principles and Applications of Inorganic Geochemistry*. New York, 1992, 628 p.
- FAVRE, A., 1843: Considérations sur le Mont Salève et les environs de Genève. *Mém. Soc. Phys. Hist. nat. (Genève)*, 10, 1843, pp. 1-113.
- FEHLMANN, H., 1932: *Die schweizerische Eisenerzeugung ihre Geschichte und wirtschaftliche Bedeutung*. Berne, 1932, 255 p. (Matér. Géol. Suisse, Sér. géotech., Die Eisen- und Manganerze der Schweiz, 13/3).
- FEHLMANN, H. et QUERVAIN, F. de, 1952: *Eisenerze und Eisenerzeugung der Schweiz*. Berne, 1952, 31p. (= Matér. Géol. Suisse, Sér. géotech., Die Eisen- und Manganerze der Schweiz, 13/8).
- FELKA, H. et LOI ZEDDA, F., 1982: La villa gallo-romaine de Cuarnens. *Etudes de Lettres (Lausanne)*, 1982/1, pp. 49-76.
- FELLMANN, R., 1992: *La Suisse gallo-romaine, cinq siècles d'histoire*. Lausanne, 1992, 470 p.
- FLEURY, E., 1909: *Le Sidérolithique suisse, contribution à la connaissance des phénomènes d'altération superficielle des sédiments*. Fribourg, 1909, 261 p. (Mém. Soc. fribourgeoise Sci. nat.6).
- FLUZIN, P. 1983: Notions élémentaires de sidérurgie. p.13-44 in Echard, N., *Métallurgies africaines: nouvelles contributions*. Paris, 1983, 339 p. (Mém. Soc. Africanistes 9).
- FOIT, F.F., HOPPER, R.L. et ROSENBERG, P.E., 1987: An unusual pyroxene, melilite and iron oxide mineral assemblage in a coal-fire buchite from Buffalo, Wyoming. *Amer. Mineralogist*, 72, 1987, pp. 137-147.
- FORBES, R.J., 1950: *Metallurgy in Antiquity: a notebook for archaeologists and technologists*. Leiden, 1950, 489 p.
- FORBES, R.J., 1963: *Studies in Ancient Technology, vol.7*. Leiden 1963, 255 p.
- FORRIERES, C., LEROY, M. et PLOQUIN, A., 1989: La métallurgie du fer à Ludres en Lorraine: données archéométriques des conditions de réduction d'un bas-fourneau. pp. 253-277, pl. 13 in Pleiner, R. (éd.): *Archaeometallurgy of Iron 1967-1987, International Symposium 5-9.10.1987, Liblice*. Prague, 1989, 49 p.
- FOUCAULT, A. et RAOULT, J.F., 1984: *Dictionnaire de Géologie*. Paris, 1984, 2e éd., 347 p.
- FRANCE-LANORD, A., 1963: Les lingots de fer protohistoriques. *Rev. Hist. Sidérurgie*, 4/3, 1963, pp. 167-178.
- FREI, A., 1952: *Die Mineralien des Eisenbergwerkes Herznach und ihre Ausbildung im Lichte morphogenetischer Untersuchungen*. Bern, 1952, p. (Matér. Géol. Suisse, Sér. géotech., Die Eisen- und Manganerze der Schweiz, 13/6).
- FUCHS, P., 1978: Die Verhüttung von Eisenerz im Rennfeuerofen bei den Bäile in der Südost-Sahara, 1953, pp. 87-94 in: *Eisen + Archäologie, Eisenbergbau und -verhüttung vor 2000 Jahren in der VR Polen*, Ausstellung Deutschen Bergbau-Museum Bochum 1978, 123 p. (Veröff. Deutsche Bergbau-Museum Bochum 14).
- GABUS, J.-H., 1953: *Le gisement sidérolithique de Goumoëns-le-Jux*. Lausanne, 1953, 25 p., 1 carte, manuscrit. (Rapp. diplôme, Univ. Lausanne).
- GALLAY, A., 1973: Les dolmens savoyards / Le Salève (Haute Savoie). *Helvetia. Archaeologica.*, 4/14, pp. 51-8.
- GARDI, R., 1978: Die Matakam - «Eisenkocher» in Kamerun - 1952. p.109-123 in: *Eisen + Archäologie, Eisenbergbau und -verhüttung vor 2000 Jahren in der VR Polen*, Ausstellung Deutschen Bergbau-Museum Bochum, 1978, 123 p. (= Veröff. Deutsche Bergbau-Museum Bochum 14).
- GARILLOT, J., 1967: Le grillage des minerais de fer. *Rev. Hist. Sidérurgie*, 8/2, 1967, pp. 95-103.
- GAUDIN, C. et DE LA HARPE, P., 1856: Quelques détails nouveaux sur les brèches à ossements éocènes du terrain sidérolithique du Mauremont. *Bull. Soc. vaudoise Sci. nat.*, 4, 1856, pp. 402-403 (Bull. N° 35, année 1855).
- GERSTER-GIAMBONINI, A., 1978: Der römische Gutshof Müschhag bei Laufen. *Helvetia. Archaeologica.*, 33, 1978, pp. 2-66.
- GILLARD, A., 1971: *L'industrie du fer dans les localités du Comté de Namur et de l'Entre-Sambre-et-Meuse de 1345 à 1600*. Bruxelles, 1971, 257 p. (Pro Civitate, coll. Histoire 29).
- GILLES, J.W., 1936: Die Grabungen auf vorgeschichtlichen Eisenhüttenplätzen des Siegerlandes, ihre Bedeutung und die hüt- tentechnischen Erfahrungen im Vergleich mit anderen Funden. *Stahl und Eisen*, 56/9, 1936, pp. 252-263.
- GILLES, J.W., 1957: 25 Jahre Siegerländer Vorgeschichtsforschung durch Grabungen auf alten Eisenhüttenplätzen. *Arch. Eisenhütten-wessen*, 28/4, 1957, pp. 179-185.
- GILLES, J.W., 1958: Versuchsschmelze in einem vorgeschichtlichen Rennofen. *Stahl und Eisen*, 78/23, pp. 1690-1695.
- GLASSER, F.P., 1961: The System Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>-Mn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>. *Amer. J. Sci.*, 259, 1961, pp. 46-59.
- GONZENBACH, V. von, 1974: Les mosaïques romaines d'Orbe. Bâle 1974, 39p. Trad. Carjat Y. (Guides archéol. Suisse 26).
- GREMAUD, J., 1854: Antiquités romaines de la Gruyère: Tronche-Bélon dans la commune de Riaz. *Mémorial Fribourg*, 1, 1854, p.69-81 et 363-364.
- GREMAUD, J., 1855: Antiquités romaines de la Gruyère: Tronche-Bélon dans la commune de Riaz. *Mémorial Fribourg*, 2, 1855, pp. 333-335.
- GREPPIN, J.-B., 1870: *Description géologique du Jura bernois et de quelques districts adjacents.*, Berne, 1870, 35 p. (Matér. Carte géol. Suisse, (1) 8/1).

- GRESSLY, A., 1841: *Observations géologiques sur le Jura soleurois*. Zurich, 1841, (Nouv. Mém. Soc. helv. Sci. nat. 5).
- GSAF, 1991a: Groupe de travail Suisse d'Archéologie du Fer (Doswald C., Eschenlohr L., Fasnacht W., Senn M., Serneels V.): *Minerais, Scories, Fer: cours d'initiation à l'étude de la métallurgie du fer ancienne et à l'identification des déchets de cette industrie*. Association Suisse des Techniciens des Fouilles Archéologiques, 1991, 48 p. (*Technique des Fouilles* N° spécial).
- GSAF, 1991b: Groupe de travail Suisse d'Archéologie du Fer (Doswald C., Eschenlohr L., Fasnacht W., Senn M., Serneels V.): Bericht von der Schweizerische Arbeitsgruppe für Eisenarchäologie (SAGEA). *Minaria Helvetica*, 11a, 1991, pp. 34-41.
- GUENDON, J.-L., 1982: Le paléokarst du Coulon (Vaucluse), morphologie et évolution d'une karstification sous couverture. pp. 133-159, in: Nicod, J.(éd.): *Phénomènes Karstiques III*. Paris, 202 p. (Mém. Doc. Géogr.).
- GUICHONNET, P., 1988: Le Salève des Gallo-romains à nos jours, à travers les noms de lieux. pp. 49-60, in: *Le grand livre du Salève*. Genève, 1988, 272 p.
- GUILLAUME, M., 1986: *Révision stratigraphique des couches rouges de la nappe des Préalpes Médiannes Romandes*. Fribourg, 1986, 153 p. (Thèse Univ. de Fribourg).
- GUILLAUME, S., 1966: Le Crétacé du Jura français. *Bull. Bur. Rech. géol. et min.*, 1, 2, 3 et 5, pp. 1-297.
- GUYAN, W.U., 1946: *Bild und Wesen einer mittelalterlichen Eisenindustriellandschaft in Kanton Schaffhausen*. Bâle, 1946, 72 p. (=Schr. Inst. Ur- und Frühgesch. Schweiz 4).
- GUYAN, W.U., 1957: Die Eisenöfen im Hoftal bei Barga (Kanton Schaffhausen). *Rev. suisse Art Archéol.*, 17, 1957, pp. 159-174.
- GUYAN, W.U., 1965a: *Schaffhauser Eisenhütten und Hammerschmieden im Mittelalter*. Schaffhouse, 1965, 23 p. (N. Zürcher Ztg., 23 sept 1964).
- GUYAN, W.U., 1965b: Die mittelalterliche Eisenhütte von Barga-Hofwiesen, p. 163-194, in *Vita pro Ferro*, Festschrift für Robert Dürer. Schaffhouse, 1965.
- GUYAN, W.U., 1977: Neue archäologische Untersuchungen zur Eisenverhüttung in der Schweiz. p.119-126, in *Symposium «Archäologische Eisenforschung in Europa»*. Eisenstadt 29.09-2.10.1975. Eisenstadt, 1977., 183 p. (Wiss. Arb. Burgenland 59).
- GUYAN, W.U., 1991: Das Mittelalterdorf Berslingen bei Schaffhausen. Ausgrabungen 1968-1970. *Rev. suisse Art Archéol.*, 48/4, 1991, pp. 193-234.
- HÄFELI, C., 1966: Die Jura/Kreide- Grenzsichten im Bielerseegebiet (Kt Bern). *Ecolgae geol. Helv.*, 59/2, 1966, pp. 565-696, 1 carte.
- HAGGERTY, S.E., 1976: Opaque Mineral Oxides in Terrestrial Igneous Rocks. p. Hg101-Hg300 in Rumble, D. (éd.): *Oxide Minerals*. Chelsea, Mich., 1976, 510 p. (Reviews Mineral. 3)
- HAVETTE, A., CLOCCHIATTI, R., NATIVEL, P. et MONTAGGIONI, L., 1982: Une paragenèse inhabituelle à fassaïte, mélilite et rhönite dans un basalte alcalin contaminé au contact d'un récif corallien (Saint-Leu, Ile de la Réunion). *Bull. Minéral.*, 105, 1982, pp. 364-375.
- HEIM, A., 1923: Die Eisen- und Manganerz-Lagerstätten im Val Ferrera, p. 221-252 in *Die Eisen- und Manganerze der Schweiz*, Berne, 1923, 284p., 13pl. (= Matér. Géol. Suisse, Sér. géotech., Die Eisen- und Manganerze der Schweiz, 13/1).
- HEGEDUS, Z., 1962: Loupes de fer dans les musées hongrois. *Rev. Hist. Sidérurgie*, 3/1, 1962, p.197-207.
- HOFMANN, F., 1991: Neuere Befunde zur Geologie, zur Lagerstättenkunde und zum historischen Abbau der Bohnerze und Bolustone der Region Schaffhausen (Schweiz). *Mit. natf. Ges. Schaffhausen*, 36, 1991, pp. 45-82. (= Matér. Géol. Suisse, Petites Contr. 93, 1992).
- HOFMANN, F., 1992: Geologische und lagerstättenkundliche Grundlagen der historischen Eisenerzeugung in der Region Schaffhausen. *Minaria Helvetica*, 12a, 1992, pp. 55-65.
- HOFMANN, P., 1992: Chronique archéologique, Le Landeron NE, Les Carougets. *Annu. Soc. suisse Préhist. Archéol.*, 75, 1992, p. 18.
- HOFSTETTER, R., 1962: Additions à la faune reptilienne de l'Éocène Supérieur du Mormont-Saint-Loup (Suisse). *Bull. Soc. géol. France*, (7) 4, pp. 109-117.
- HUGI, E., HUTTENLOCHER, H.F., GASSMANN, F. et FEHLMANN, H., 1948: *Die Magnetit-Lagerstätten*. Berne, 1948, 116p., 8pl. (=Matér. Géol. Suisse, Sér. géotech., Die Eisen- und Manganerze der Schweiz, 13/4).
- HURLBUT, C.S.Jr. et KLEIN, C., 1971: *Manual of Mineralogy after J.D. Dana*. New York, 1971, 19e éd., 532 p.
- HUTCHINSON, C.S., 1974: *Laboratory Handbook of Petrographic Techniques*. New York, 1974, 527 p.
- JACCARD, A., 1869: *Description géologique du Jura vaudois et neuchâtelois*. Berne, 1869, (Matér. Carte géol. Suisse 6).
- JEANNET, A., 1951: *Stratigraphie und Palaeontologie des oolithischen Eisenerzlagers von Herznach und seiner Umgebung*. Berne, 1951, 240 p., 107 pl. (Matér. Géol. Suisse, Sér. géotech., Die Eisen- und Manganerze der Schweiz, 13/5).
- JENKINS, R., 1976: *An Introduction to X-Ray Spectrometry*. Londres, 1976, 2e éd, 16 p.
- JORDI, H.A., 1955: *Geologie der Umgebung von Yverdon, Jura-fuss und mittelländische Molasse*. Berne, 1955, 8 p., pl. (= Matér. Carte géol. Suisse (ns) 99).
- JOUKOWSKI, E. et FAVRE, J., 1913: Monographie géologique et paléontologique du Salève (Haute Savoie, France). *Mém. Soc. Phys. Hist. nat. Genève*, 3/4, 1913, pp. 295-523, 34 pl.
- KAENEL, G., 1977: *Lousonna, La promenade archéologique de Vidy*. Bienne, 1977, 40p. (Guides archéol. Suisse 9).
- KAENEL, G., KLAUSENER, M. et FEHLMANN, S., 1980: *Nouvelles recherches sur le vicus gallo-romain de Lousonna (Vidy, Lausanne)*. Lausanne, 1980, 195 p. (Cah. Archéol. romande 18 Lousonna 2).
- KAENEL, G. et CURDY, P., 1988: *L'Oppidum du Mont Vully*. Fribourg, 1988, 36 p. (Guides archéol. Suisse 22).
- KAENEL, G., 1990: *Recherches sur la période de La Tène en Suisse occidentale, analyse des sépultures*. Lausanne, 1990, 457 p. (Cah. Archéol. romande 50).
- KAENEL, H.M. von, 1981: Ein Depotfund von 16 doppelpyramidenförmigen Eisenbarren in Schwadernau BE. *Archéol. suisse*, 4/1, 1981, pp. 29-32.
- KASSER, R., 1975: Yverdon, Histoire d'un sol et d'un site avec la cité qu'ils ont fait naître. pp. 7-154 in *Eburodunum I*. Yverdon, 1975, 231 p.
- KEESMANN, I., 1989: Chemische und Mineralogische Detailuntersuchungen zur Interpretation Eisenreicher Schlacken. pp. 17-34, pl.1 in Pleiner, R.,(éd.), «*Archaeometallurgy of Iron 1967-1987*», *International Symposium 5-9.10.1987, Liblice*. Prague, 1989, 49 p.
- KEESMANN, I., BACHMANN, H.G. et HAUPTMANN, A., 1982: Norm-Berechnungsverfahren für eisenreiche Schlacken. *Fortschr. Mineral.*, 60/1, 1982, pp. 100-111.

- KEESMANN, I. et RIECKHOFF-PAULI, S., 1988: Eisenverarbeitung in der Spätkeltschen Siedlung Regensburg-Harting, Oberpfalz. p.553-556 in: Symposium «Archäometallurgie von Kupfer und Eisen in Westeuropa», Mainz 12-5.09.1986. *Jb Römisch-Germanischen Zentralmuseums Mainz*, 35, 1988, pp. 481-704.
- KELLER, F., 1858: Pfahlbauten 2. *Mitt. Antiquarischen Ges. Zürich*, 12/3, 1858, pp. 114-155.
- KEYSER, C.A., 1959: *Basic Engineering Metallurgy: Theories, Principles and Applications*. New Jersey, 1959, 2e éd., 507 p.
- KLEEMANN, O., 1961: Stand der archäologischen Forschung über die eisernen Doppelpyramiden-(Spitz-)Barren. *Arch. Eisenhüttenwesen*, 32/9, 1961, pp. 581-585.
- KLEEMANN, O., 1966: Der erste Fund vorgeschichtlicher Eisenbarren in Franken. *Mainfränkisches Jb. Gesch. Kunst*, 18, 1966, p.121-134 (Arch. Hist. Ver. Unterfranken und Aschaffenburg 89).
- KLEEMANN, O., 1981: Les lingots de fer bipyramidaux courts et épais, les lingots de fer du type Colmar. *Rev. archéol. Est Centre Est*, 32/3-4, pp. 109-119.
- KOSAK, S., 1971: *Le gisement sidérolithique de Goumoëns-le-Jux.*, Lausanne, 1971, 36 p., carte, manuscrit. (Rapp. Diplôme, Univ. Lausanne).
- KRESTEN, P et SERNING, I, 1983: *The Calculation of Normative Constituents from the Chemical Analysis of Ancient Slags*. Stockholm, 1983, 25 p. (Jernkontorets Bergshistoriska Utskott 25).
- KRUMMENACHER, R., 1971: Stratigraphie du bassin de la Valsérine. *Arch. Sci. (Genève)*, 24/2, 1971, pp.227-258.
- KÜRSTEINER, M., HOFMANN, F. et STALDER, H.A., 1990: Eisenerz und eisenindustrie im Jura. *Jb. nathist. Mus. Bern*, 10, 1990, pp. 171-196. (Matér. Géol. Suisse, Petites contr. 84).
- LABOULAYE, 1867-8: *Dictionnaire des Arts et Manufactures*. Paris, 1867-8, 2 vol., 1 suppl.
- LAGOTALA, H., 1920: Etude géologique de la région de la Dôle. Berne, 1920, 39p., 1 pl. + carte. (= Matér. Carte géol Suisse (ns), 46/4).
- LECHMANN-McCAILLON, J. et KOENIG, F.E., 1990: Kallnach BR: vestiges romains et nécropole du Haut Moyen Age, rapport préliminaire des fouilles 1988-1989. *Annu. Soc. suisse Préhist. Archéol.*, 73, 1990, pp. 160-166.
- LEROY, M., FORRIERES, C. et PLOQUIN, A., 1990: Un site de production sidérurgique du haut Moyen Age en Lorraine. *Archéol. Médiévale*, 20, 1990, pp. 141-179.
- LESSING, R., 1926: Coal Ash and Clean Coal, part 1. *Fuel in Science and Practice*, 5, 1926, pp. 17-23.
- LINDSLEY, D.H., 1976: The Crystal Chemistry and Structure of Oxide Minerals as Exemplified by the Fe-Ti Oxides. p. L1-L60 in Rumble, D. (éd.): *Oxide Minerals*. Chelsea, Mich., 1976, 510 p. (Reviews Mineral. 3).
- LINDSLEY, D.H., 1991: Experimental Studies of Oxide Minerals, p. 69-106 in Lindsley, D.H. (éd.): *Oxide Minerals: petrologic and magnetic significance*. Chelsea, Mich., 1991, 509 p. (Reviews Mineral. 25).
- LOMBARD, A., 1965: *Notice explicative de la feuille Genève (1301)*. Atlas géol. Suisse 1:25 000. Berne, 1965, 42 p.
- MAGNUSSON, G., 1986: *Lågtekknisk Järnhantering i Jämtlands Län (Bloomery Iron Production in the County of Jämtland, Sweden)*. Stockholm, 1986, 437 p. (Jernkontorets Berghistoriska Skriftserie 22).
- MAGNUSSON, G., 1988: Lapphyttan. *PACT*, 21, 1988, p.177-198. (Sperl, G. (éd.): «The First Iron in the Mediterranean»: *Proceedings of the Populonia/Piombino 1983 Symposium*. Strasbourg, 1988, 199 p.).
- MANGIN, M., KEESEMANN, I., BIRKE, W. et PLOQUIN, A., 1992: *Mines et métallurgie chez les Eduens, le district sidérurgique antique et médiéval du Morvan-Auxois*. Paris, 1992, 364 p. (Ann. litt. Univ. Besançon 456).
- MARECHAL, J.R. et ARMAND, H., 1962: Recherches scientifiques sur la sidérurgie aux époques de La Tène et de l'occupation romaine en Savoie. pp. 61-82, in: *Actes du 85ème Congrès National des Sociétés Savantes, Section Archéologie, Chambéry*, Paris, 1962.
- MARSHALL, D., en prép.: *Hydrothermal Conditions of Vein Formation in the Mont Chemin Area, Valais, Switzerland*. En prép. (Thèse Univ. Lausanne)
- MARTINI, J., 1965: Etude des minéraux secondaires du Sidérolithique des environs de Genève. *Arch. Sci.(Genève)*, 18/1, 1965, pp.71-81.
- MAY-CASTELLA, C. et BERTI, S., 1992: Chronique archéologique 1991: Lausanne VD, Lousonna-Vidy, propriété Sagrave. *Ann. Soc. suisse Préhist. Archéol.*, 75, 1992, pp. 217-218.
- McDONNELL, G., 1986: The Study of Early Iron Smithing Residues. p.47-52 in Scott, B.G. et Cleere, H. (éd.): *The Craft of the Blacksmith, Symposium 16-21.09.1984, Belfast*. Belfast, 1986, 180 p.
- McDONNELL, G., 1991: A Model for the Formation of Smithing Slags. *Materialy Archeologiczne*, 26, 1991, pp. 23-26, 2 pl. (International Symposium «Form Bloom to Knife», Ameliowka, 18-22.09.1989).
- MEIA, J., 1969: *Géologie du Mont Aubert et de l'anticlinal Soliat-Montagne de Boudry au Nord du lac de Neuchâtel*. Neuchâtel, 1969, 69 p., carte. (Thèse Univ. Neuchâtel).
- MEIA, J. et BECKER, F., 1976: *Notice explicative de la feuille Neuchâtel (1164)*. Atlas géol. Suisse 1:25000, Berne, 1976, 27 p.
- MERIAN, P., 1821: *Beiträge zur Geognosie. Uebersicht der Beschaffenheit der Gebirgsbildungen in der Umgebungen von Basel, mit besonderer Hinsicht auf das Juragebirge im Allgemein*. Bâle, 1821.
- MERLE, A., 1905: *Les gîtes minéraux et métallifères et les eaux minérales du département du Doubs*. Besançon, 1905, 217 p., carte (Thèse Univ. Besançon).
- MEYLAN, M.F., 1988: *Marsens, la terre sigillée du vicus gallo-romain*. Fribourg 1988, 7p. (Archéol. Fribourgeoise 4).
- MEYLAN, M.F. et BONNET-BOREL, F., 1992: *Riaz, Tronche-Bélon: vol.2: La céramique et le verre du sanctuaire gallo-romain*. Fribourg 1992, 69 p. (Archéol. Fribourgeoise 8).
- MONEY, J.H., 1971: Medieval Iron-Workings in Minepit Wood, Rotherfield, Sussex. *Medieval Archaeol.*, 15, 1971, pp. 86-111.
- MONGUILAN, L., 1987: Une épave romaine chargée de fer et de plomb dans le golfe de Fos, Saint-Gervais 1. p.171-177 in *Actes du colloque «Mines et métallurgie en Gaule et dans les provinces voisines», Paris 26-7.04.1986*. Paris 1987, 334 p. (Caesarodunum 22).
- MONTANDON, R., 1922: *Genève, des origines aux invasions barbares*. Genève, 1922, 218 p., 20 pl., carte.
- MOREL, J., 1991: Avenches VD-Derrière la Tour et insula 7: fouilles 1989/1990, bilan provisoire. *Ann. Soc. suisse Préhist. Archéol.*, 74, 1991, pp. 214-220.
- MOREL, J., AMREIN, H., MEYLAN, M.F., CHEVALLEY, C., 1992: Un atelier de verrier du milieu du 1er siècle après J.C. à Avenches. *Archéol. suisse*, 15/1, 1992, pp. 2-17.
- MOREL, J. et AMSTAD, S., 1990: *Un quartier romain de Nyon: de l'époque augustéenne au IIIe siècle (les fouilles de Bel-Air/Gare 9, 1978-82)*. Lausanne, 1990, 149 p. (Cah. Archéol. romande 49 Noviodunum 2).

- MORET, L., 1926: Présence de l'Albien et du Crétacé supérieur à la Montagne de la Balme. *C.R. sommaires Séances Soc. géol. France* (1926), 1926.
- MORTON, G.R. et WINGROVE, J., 1969: Constitution of Bloemery Slags: part 1: Roman. *J. Iron Steel Inst.*, 1969, pp. 1556-1564.
- MORTON, G.R. et WINGROVE, J., 1972: Constitution of Bloemery Slags: part 2: Medieval. *J. Iron Steel Inst.*, 1972, pp. 478-488.
- MOTTAS, F., 1986: De la plaine de l'Orbe en Franche Comté: voie romaine et chemin saunier. *Archéol. suisse*, 9/3, 1986, v124-134.
- MOTTAZ, E., 1914: *Dictionnaire historique, géographique et statistique du Canton de Vaud*, Lausanne, 1914-1921.
- MÜLLER, U., 1985: Die römischen Gebäude in Kaiseraugst-Schmidmatt. *Archéol. suisse*, 8/1, 1985, pp. 15-29.
- MÜLLER, F., 1990: *Der Massenfund von der Tiefenau bei Bern*, Bâle 1990, 265 p. (Antiqua 20).
- MUHLETHALER, C., 1930: *Notice explicative de la feuille 1162 (Les Verrières)*. Atlas géol. Suisse 1:25000, Berne, 1930, 6 p.
- MUSEE NEUCHÂTELOIS, 1910: Petite chronique (Bevaix). *Mus. Neuchâtelois*, 1910, p. 191.
- MUTZ, A., 1976: *Römisches Schmiedehandwerk*. Bâle, 1976, 47 p. (Augster Museumh. 1).
- MUTZ, A., 1981: Einige Bemerkungen zum Depotfund von 16 Eisenbarren in Schwadernau BE. *Archéol. suisse*, 4/2, 1981, pp. 128-129.
- NAHON, D.B., 1976: *Cuirasses ferrugineuses et encroutements calcaires au Sénégal occidental et en Mauritanie. Systèmes évolutifs: Géochimie, structures, relais et coexistence*. Strasbourg 1976, 232 p. (Sci. géol. (Strasbourg) Mém.).
- NAHON, D.B., 1986: Evolution of Iron Crusts in Tropical Landscapes. p.169-191 in Colman, S.M. et Dethier, D.P., éd.: *Rates of chemical Weathering of Rocks and Minerals*. Orlando, 1986, 600 p.
- NAHON, D.B., 1991: *Introduction to the Petrology of Soils and chemical Weathering*. New York, 1991, 313 p.
- NAULI, S., 1991: Ein Werkplatz der Eisenverarbeitung im römische Chur. p.67-83 in Hochuli-Gysel, A. et alii, *Chur in Römischer Zeit 2: Areal Markthalenplatz*, Bâle, 1991, 501 p. (Antiqua 19).
- NAVILLE, A., 1867: Recherches sur les anciennes exploitations de fer du Mont Salève, *Mém. et Doc. Soc. Hist. Archéol. Canton Genève*, 16, 1867, pp. 349-381.
- NOLTHENIUS, A.B.T., 1921: *Étude géologique des environs de Vallorbe (VD)*. Berne 1921, 119 p., 3 pl. (Matér. Carte géol. Suisse (ns) 48).
- NOSEK, E., 1977: The Investigation of the Iron-sponge Fragments form Burgenland. p.71-82 in *Symposium «Archäologische Eisenforschung in Europa», 29.09-2.10.1975, Eisenstadt*. Eisenstadt 1977, 183 p. (Wiss. Arb. Burgenland 59).
- OBERHOLZER, J., 1923: Das Eisenerzvorkommen am Gonzen bei Sargans. p. 155-203 in *Die Eisen- und Manganerze der Schweiz*, Berne, 1923, 284 p., 13 pl. (Matér. Géol. Suisse, Sér. géotech., Die Eisen- und Manganerze der Schweiz, 13/1).
- OBERNAUER, K., 1954: Mikroskopische Untersuchungstechnik der Eisenhüttenschlacken. pp. 461-520 in Freund, H., *Handbuch der Mikroskopie in der Technik, 2 Mikroskopie der Bodenschätze, 2 Mikroskopie der Erze, Aufbereitungsprodukte und Hüttenschlacken*. Frankfurt am Main, 1954, 724 p.
- PAUNIER, D., 1981: *La céramique gallo-romaine de Genève* Genève, 1981, 437 p. (Mém. Doc. Soc. Hist. Archéol. Genève 9).
- PAUNIER, D., 1982: L'archéologie gallo-romaine en Suisse romande: bilan et perspectives. *Études de Lettres (Lausanne)*, 1982/1, 5-28.
- PAUNIER, D. et coll., 1987: *Le vicus gallo-romain de Lousonna-Vidy, rapport préliminaire sur la campagne de fouilles 1984*. Lausanne 1987. (Cah. Archéol. romande 40 = Lousonna 6).
- PAREJAS, E., 1938: Essai sur la géographie ancienne de la région de Genève. *Istanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Mecmuası (= Rev. Fac. Sci. Univ. Istanbul)*, (ns) 3/2, pp. 1-50.
- PELET, P.L., 1960a: Une industrie du fer primitive au pied du Jura vaudois: la ferrière de Prins Bois et ses voisins. *Rev. hist. Vaudoise*, 1960, pp. 49-110. Collab. Decollogny, P. et Stüchel, O.
- PELET, P.L., 1960b: Une industrie romaine du fer au pied du Jura. *Ann. Soc. suisse Préhist. Archéol.*, 48, 1960, pp. 104-106.
- PELET, P.L., 1970a: Sidérurgie antique au pied du Jura vaudois. *Helvetica Archaeologica*, 1/4, 1970, pp. 86-95.
- PELET, P.L., 1970b: La politique du fer des Autorités «Helvétiques» et vaudoises 1798-1833. *Rev. hist. Vaudoise*, 78, 1970, pp. 83-129. Collab. Gonvers-Girardet, N.
- PELET, P.L., 1971: *Sidérurgie frontalière: Bon Port, 1623 - Pontarlier, 1820, Deux essais sur des forges du Jura*. Genève 1971, 103 p. (Pub. Ecole Sci. soc. pol. Univ. Lausanne 6).
- PELET, P.L., 1973: *Une industrie méconnue. Fer, Charbon, Acier dans le Pays de Vaud, 1: Les sources archéologiques*. Lausanne, 1973, 272 p. Collab. de Carvalho, B. et Decollogny, P. (Bibl. hist. vaudoise 49)
- PELET, P.L., 1978: *Fer, Charbon, Acier dans le Pays de Vaud, 2: La lente victoire du haut fourneau*. Lausanne, 1978, 354 p. Collab. Radeff, A. et Jaccard, M. (Bibl. hist. vaudoise 59)
- PELET, P.L., 1982: Recherches sur la métallurgie du fer dans le Jura vaudois. p.205-214 in *Mines et fonderies antiques de la Gaule, Table ronde du CNRS Toulouse 21-22.10.1980*, Paris, 1982, 329 p.
- PELET, P.L., 1983: *Fer, Charbon, Acier dans le Pays de Vaud, 3: Du mineur à l'horloger*. Lausanne, 1983, 491 p. Collab. Dépraz, J.P., Vernez, M. et Jaccard, M. (Bibl. hist. vaudoise 74).
- PELET, P.L., 1992: L'emploi des fourneaux à fer asymétriques au pied du Jura vaudois: deux hypothèses à vérifier. pp. 341-349 in: Kaenel, G. et Curdy, P. éd.: *L'Age du Fer dans le Jura, Actes du 15ème colloque de l'Association Française pour l'Etude de l'Age du Fer, Pontarlier (France) et Yverdon (Suisse) 9-12.05.1991*, Lausanne, 1992, 352 p. (Cah. Archéol. romande 57).
- PELET, P.L., 1993: Une industrie reconnue. Fer Charbon Acier dans le Pays de Vaud. 1993, 144 p. (Cah. Archéol. romande 60).
- PELICHET, E., 1974: Chronique. *Rev. hist. vaudoise*, 82, 1974, pp. 7-26.
- PEREC, G., 1980: Experimental Demonstration of the tomatotopic organization in the soprano (Cantatrix sopranica L.). *Banana Split*, 2, 1980, pp. 22-26.
- PETRUS, O., 1970: Camp des Allobroges au Salève, C.R. de la séance du 8 avril 1970. *Rev. savoisienne*, 110, 1970, pp. 7-8.
- PFEIFER, H.R., LAVANCHY, J.C. et SERNEELS, V., 1991: Bulk Chemical Analysis of Geological and Industrial Materials by X-Ray Fluorescence, Recent Developments and Application to Materials Rich in Iron Oxide. *J. Trace Microprobe Tech.*, 9/2-3, 1991, pp. 127-148.
- PFEIFER, H.R., OBERHÄNSLI, H. et EPPRECHT, W., 1988: Geochemical Evidence for a Synsedimentary Hydrothermal Origin of Jurassic Iron-Manganese Deposit at Gonzen (Sargans, Helvetic Alps, Switzerland). *Marine Geol.*, 84, 1988, pp. 257-272.
- PICHARD, N. et ANDRES-COLOMBO, M., 1987: Recherches préliminaires sur la cadastration romaine dans la région lémanique. *Annu. Soc. suisse Préhist. Archéol.*, 70, 1987, p. 133- .

- PIOGER, A., 1971: Bas foyer à Lavardin (Sarthe). *Bull. Soc. Agricul., Sci. Arts Sarthe, Mém.* (4) 7, 1971, pp. 3-17.
- PLACE, V., 1867: *Ninive et l'Assyrie*. Paris, 1867.
- PLEINER, R., 1958: *Zaklady Slovanskeho Zelezarskeo Hutnictvi v Ceskych Zemich (Die Grundlagen der Slavischen Eisenindustrie in den Böhmisches Ländern)*. Prague 1958, 335 p., 32 pl. (Monumenta Archaeologica 6).
- PLEINER, R., 1965: Die Eisenverhüttung in der «Germania Magna» zur römischen Kaiserzeit. *Germania*, 45, 1965, pp. 11-86.
- PLEINER, R., 1969: Experimental smelting of Steel in Early Medieval Furnaces. *Pamatky Archeologické (Prague)*, 60, 1969, pp. 458-487.
- PLEINER, R., 1969: *Iron Working in Ancient Greece*. Prague, 1969, 55 p., 17 pl. (= Acta musei nationalis technici Prague 7)
- PLEINER, R., 1980: Early Iron Metallurgy in Europe. p.335-376 in Wertime, T.A. et Muhly, J.D. (éd.): *The Coming of the Age of Iron*, Londres, 1980, 555 p..
- POTTS, P.J., 1992: *A Handbook of Silicate Rock Analysis*. Londres, 1992, 622 p.
- POUCHOU, J.L. et PICHOU, F., 1984: Un nouveau modèle de calcul pour la microanalyse quantitative par spectrométrie des rayons x. *Rech. Aérospatiale*, 1984/3, 1984, pp. 167-192.
- PRIVATI, B., 1983: La nécropole de Sézéglin. Genève, 1983, 181 p. (Mém. Doc. Soc. Hist. Archéol. Genève 10).
- PRIVATI, B., 1986: Sézéglin GE: une unité agricole du haut Moyen Age. *Archéol. suisse*, 9/1, 1986, pp. 9-19.
- QUIQUEREZ, A., 1852: Recueil d'observations sur le terrain sidérolithique dans le Jura bernois et particulièrement dans le val de Delémont et de Moutier. *Nouv. Mém. Soc. helv. Sci. nat.*, 12, 1850-1852.
- QUIQUEREZ, A., 1855: *Notice historique et statistique sur les mines, les forêts et les forges de l'ancien Evêché de Bâle*. Berne, 1855, 197 p.
- QUIQUEREZ, A., 1864: *Rapport sur la question d'épuisement des mines de fer du Jura bernois à la fin de l'année 1863*. 52 p., carte.
- QUIQUEREZ, A., 1866: *De l'âge du fer. Recherches sur les anciennes forges du Jura bernois*. Porrentruy, 126p., 4pl. (= Monuments de l'ancien Evêché de Bâle). Réimpression 1992, Porrentruy (=L'Oeil et la Mémoire 11).
- QUIQUEREZ, A., 1871: Notice sur les forges primitives dans le Jura. *Mitt. Antiq. Ges. Zürich*, 17/4, 1871, pp. 71-88, 4 pl.
- RÄDEKER, W. et NAUMANN, F.K., 1961: Untersuchung voroder frühgeschichtlicher Spitzbarren. *Arch. Eisenhüttenwesen*, 32/9, 1961, pp. 587-595.
- RAGETH, J., 1982: Die römischen Schmiedegruben von Riom GR. *Archéol. suisse*, 5/4, 1982, pp. 202-208.
- REVUE SAVOISIENNE, 1906: Chronique (Veigy). *Rev. savoisienne*, 1906, p. 184.
- REYMOND, M., BONARD, A. et CHASTELLAIN, H., 1988: Histoire de Romainmôtier. Morges 1988, 336 p. Présenté par J.-P. Tuscher et R. Junod.
- RIBAU, P. et DE BOE, G., 1984: La villa romaine de Colombier, fouilles récentes et nouvelle évaluation. *Archéol. suisse*, 7/2, 1984, pp. 79-87.
- RICKENBACH, E., 1925: *Description géologique du Val-de-Travers, du cirque de Saint-Sulpice et de la vallée de la Brévine*. Neuchâtel, 1925, 74 p., 2 cartes. (Thèse Univ. Neuchâtel 402)
- RIGASSI, D., 1977: Le Tertiaire de la région Genevoise et Savoisiennne. *Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geologuen & Ingenieure*, 24/66, 1977, pp. 19-34.
- RIGBY, G.R., 1953: *The Thin-Section Mineralogy of Ceramic Materials*, Stoke-on-Trent, 1953, 231 p., 2e éd.
- RITTENER, T., 1920: *Etude géologique de la Côte-aux-Fées et des environs de Sainte-Croix et Baulmes*. Berne 1920, 116 p. (= Matér. Carte géol. Suisse (ns) 13).
- RITTER, G., 1877: Présentation d'un échantillon de Bohnerz des Saars. *Bull. Soc. neuchâteloise Sci. nat.*, 11, 1877, p. 39.
- ROEDDER, E., 1984: *Fluids Inclusions*. Washington, 1984, 646 p. (=Reviews Mineral. 12).
- ROLLIER, L., 1898: *Deuxième supplément à la description géologique de la partie jurassienne de la feuille VII de la carte géologique de la Suisse au 1:100000*. Berne, 1898, 206 p. avec des extraits d'un manuscrit de A. Quiquerez sur le terrain sidérolithique. (Matér. Carte géol. Suisse (ns) 8).
- ROLLIER, L. et JULLIERAT, E., 1902: Sur une nouvelle poche sidérolithique à fossiles albiens. *Arch. Sci. phys. nat. (Genève)*, 14, 1902, pp. 59-68.
- ROSENTHAL, P., 1990: Les ressources minières de la Franche-Comté: minerais métalliques. p.13-48 in Jacob, J.P. et Mangin, M. (éd.): *De la mine à la forge en Franche-Comté des origines au XIXe siècle*. Paris, 1990, 315 p. (= Ann. litt. Univ. Besançon 410).
- ROTHPLETZ, W., 1933: *Geologische Beschreibung der Umgebung von Tavannes im Berner Jura*. Bâle, 1933, 151p., 2 pl. (Thèse Univ. Bâle).
- ROUGIER, J., 1987: Les lingots de fer d'Aoste (Isère). p.180-183 in *Actes du colloque «Mines et métallurgie en Gaule et dans les provinces voisines»*, Paris 26-7.04.1986. Paris 1987, 334 p. (Caesarodunum 22).
- SAHAMA, T.G. et HYTÖNEN, K., 1958: Calcium-Bearing Magnesium-Iron Olivines, *Amer. Mineralogist*, 43, 1958, pp. 862-871.
- SAUSSURE, H.B. de, 1779-1796: *Voyages dans les Alpes précédés d'un essai sur l'histoire naturelle des environs de Genève*. Neuchâtel, 4 vol.
- SAUTER, M.R., 1973a: Survol de la préhistoire du bassin de Genève. *Helvetica Archeologica*, 4/14, 1973, pp. 27-29.
- SAUTER, M.R., 1973b: Genève allobroge et romaine. *Helvetica Archeologica*, 4/14, 1973, pp. 30-36.
- SAUTER, M.R., 1973c: Les Magdaléniens de Veyrier. *Helvetica Archeologica*, vol.4/14, pp. 48-50.
- SCHÄFER, K., 1984: Ein Spätlatènezeitliches Eisenbarrendepot aus Saffig, Kreis Mayen-Koblenz. *Archäol. Korrespbl.*, 14, 1984, pp. 163-168.
- SCHAABER, O., 1963: Beiträge zur Frage des norischen Eisens Metallkundliche Grundlagen und Untersuchungen an Funden vom Magdalensberg. p. 129-278 in Egger, E., *Die Ausgrabungen am Magdalensberg 1960 und 1961*, Klagenfurt, 1963. (Carinthia (1) 153).
- SCHÄR, U., 1967: *Geologische und sedimentpetrographische Untersuchungen im Mesozoikum und Tertiär des Bielerseegebietes (Kt. Bern)*. Berne, 1967, 87 p. (Matér. Carte géol. Suisse (ns) 133)
- SCHÄR, U., 1971: *Notice explicative de la feuille Bieler See (1145)*. Atlas géol. Suisse 1:25000, Berne, 1971, 32p.
- SCHARDT, H., 1880: Notice géologique sur la molasse rouge et le terrain sidérolithique au pied du Jura. *Bull. Soc. vaudoise Sci. nat.*, 16, 1879-80, p.609-640, 2pl. (= Bull. 83, année 1880).
- SCHARDT, H., 1891: Etudes géologiques sur l'extrémité méridionale de la chaîne du Jura (Chaîne du Reculet et du Vuache). *Bull. Soc. Vaudoise Sci. nat.*, 17, 1891, p.69-158, pl.6-10.

- SCHARDT, H., 1898-9: Note sur des remplissages sidérolithiques dans une carrière sous Belle-Roche près Gibraltar (Neuchâtel). *Bull. Soc. Neuchâteloise Sci. nat.*, 27, 1898-9, p.1-23.
- SCHARDT, H., 1908: Crevasses sidérolithiques avec nodules phosphatés et fossiles remaniés dans la pierre jaune à Hauterive (Neuchâtel). *Bull. Soc. Neuchâteloise Sci. nat.*, 34 (1905-7), 34, 1908, p.206-227.
- SCHARDT, H., 1909: Sur une carrière romaine à La Lance près de Vaumarcus. *Bull. Soc. Neuchâteloise Sci. nat.*, 37, 1909, p.424-427.
- SCHARDT, H., 1923: Bohnerz II: Terrain sidérolithique de Goumoëns-le-Jux, pp. 129-137, in *Die Eisen- und Manganerze der Schweiz*, Bern, 1923, 284 p., 13 pl. (Matér. Géol. Suisse, Sér. Géotech., Die Eisen- und Manganerze der Schweiz, 13/1).
- SCHMID, E., 1989: Bemerkungen zum römischen Steinbruch Concise am Neuenburger See. *Minaria Helvetica*, 9, 1989, pp. 63-64.
- SCHNORRER-KÖHLER, G., 1987: Die Minerale in den Schlacken des Harzes. *Aufschluss*, 38, 1987, pp. 181-197, 231-246, 291-300.
- SCHUCANY, C., 1986: Der römische Gutshof von Biberist-Spitalhof, Ein Vorbericht. *Annu. Soc. suisse Préhist. Archéol.*, 69, 1986, pp. 199-220.
- SCHUMANN, H., 1960: *Metallographie*. Leipzig, 1960, 611 p.
- SCHÜRER, W., 1928: *Geologische Aufnahmen der Jura- und Molassegebietes zwischen Dottingen und Tavannes*. Solothurn 1928, 46 p., carte. (Thèse Univ. Zürich).
- SCHÜRMAN, E., 1958: Die Reduktion des Eisens im Rennfeuer. *Stahl und Eisen*, 78/19, 1958, pp. 1297-1308.
- SCHWAB, H., 1984: *Chronique archéologique 1980-1982*. Fribourg 1984, 149 p. (Archéol. Fribourgeoise).
- SCHWAB, H., 1989: *Archéologie de la 2ème correction des eaux du Jura, vol.1 Les Celtes sur la Broye et la Thielle*. Fribourg 1989, 270p. (Archéol. Fribourgeoise 5).
- SCHWAB, H., 1992: Avant-propos et introduction, p. 9-16. in Meylan, M.F. et Bonnet Borel, F., *Riaz / Tronche-Bélon, vol.2 La céramique et le verre du sanctuaire gallo-romain*, Fribourg, 1992, 69p. (= Archéol. Fribourgeoise 8).
- SCHWEINGRUBER, F.H., 1976: *Prähistorisches Holz, Die Bedeutung von Holzfinden aus Mitteleuropa für die Lösung archäologischer und vegetationskundlicher Probleme*. Berne, 1976, 106 p.
- SCOTT, B.G., 1991: *Early Irish Ironworking*. Belfast, 1991, 238 p. (Ulster Mus. Publ. 266).
- SEEGER, M., 1963: Fossile Verwitterungsbildungen auf der Schwabischen Alb, Ein Beitrag zur Kenntnis der roten Bolus-Tone. *Jb. geol. Landesamt Baden-Württemberg*, 6, 1963, pp 421-59.
- SEGALEN, P., 1964: *Le fer dans les sols*. Paris, 1964, 150 p.
- SENN, M., 1992: *Eisenfunde und Metallverarbeitungsabfälle aus dem römischen Gutshof in Dietikon (ZH)*. 1992, 192 p., 33 pl. manuscrit (Mém. Licence, Univ. Zurich).
- SERNEELS, V., 1988: Recherches archéométriques sur la sidérurgie antique en Suisse romande: un nouveau programme. *Minaria Helvetica*, 8a, 1988, pp. 48-54.
- SERNEELS, V., 1992: La sidérurgie ancienne en Suisse: histoire d'une recherche. *Minaria Helvetica*, 12a, 1992, pp. 3-10.
- SERNEELS, V., (sous presse 1): A propos de quelques scories: le fer en Suisse romande. in: *Actes du Symposium international «Paléométagurgie du Fer et Cultures», 1-3.10.1990, Sévenans*. (sous presse).
- SERNEELS, V., (sous presse 2): De la réduction à la forge. in: *Rencontres archéologiques de Guiry «Autour du fer», 9-11.04.1992, Guiry-en-Vexin*. (sous presse).
- SERNING, I., 1976: Tidig Järnframställning Skandinavien, *När järnet kom. Polen-Vendsyssel-Göteborg vid tiden omkring Kr.F.*, Göteborg, 1976, p.41-71.
- SHAND, J.D., 1943: *Eruptive Rocks. Their Genesis, Composition, Classification and their Relations to Ore-Deposits*. New York, 1943, 444p.
- SHEPERD, R., 1980: *Prehistoric Mining and Allied Industries*. Londres, 1980, 275p.
- SMITH, C.S., 1988: *A History of Metallography: the development of ideas on the structure of metals before 1890*. Cambridge Mas., 1988, 297 p.
- SPERL, G., 1980: *Über die Typologie urzeitlicher, frühgeschichtlicher und mittelalterlicher Eisenhüttenschlacken*, Vienne, 1980, 68 p., 61 pl. Collab. Reinmann, C., Nöbauer, O. et Rudolfs, M. (Stud. Industrie-Archäol. 7).
- SSPA 1986: Société Suisse de Préhistoire et d'Archéologie: *Chronologie: Datation archéologique en Suisse*. Bâle, 1986, 241 p. (Antiqua 15).
- SSPA 1989: Bonnard, P. réd. Société Suisse de Préhistoire et d'Archéologie: *Nyon, la ville romaine et le musée*. Nyon 1989, 57 p. (Guides archéol. Suisse 25).
- STAUBE, H., 1989: Untersuchungen an norischen Fundluppen. p.43-52, pl.3-7 in Pleiner, R. (éd.): *«Archaeometallurgy of Iron 1967-1987», Symposium Liblice 5-9.09.1987*, Prague 1989, 496 p., 34 pl.
- STEHLIN, H.G., 1903: Die Säugetiere des schweizerischen Eocaens, 1. *Mémo. Soc. paléont. suisse*, 30, 1903, 596 p., 11 pl.
- STEHLIN, H.G., 1909-10: Die Säugetiere des schweizerischen Eocaens, 2. *Mém. Soc. paléont. suisse*, 36, 1909-10, pp. 597-1165, 20 pl.
- STEINER, M., 1979: Découverte d'une industrie sidérurgique de type archaïque à Lajoux (Suisse, canton du Jura). pp. 179-186 in *C.R. 104ème Congrès des Sociétés Savantes, Bordeaux, vol.5*, Paris, 1979.
- STEINHAUSER, N. et CHAROLLAIS, J., 1971: Observations nouvelles et réflexions sur la stratigraphie du «Valanginien» de la région neuchâteloise et ses rapports avec le Jura méridional. *Geobios*, 4/1, pp. 7-60.
- SUTER, H. et LÜTHI, E., 1969: *Notice explicative de la feuille Val de Ruz (1144)*. Atlas géol. Suisse 1:25000, Berne, 1969, 32 p.
- TARDY, Y. et NAHON, D., 1985: Geochemistry of Laterites, Stability of Al-Goethite, Al-Hematite and Fe3+-Kaolinite in Bauxites and Ferricretes. *Amer. J. Sci.*, 285, 1985, pp. 865-903.
- TAUBER, J., 1992: Zum Stand der Eisenarchäologie im Kanton Bael-Landschaft. *Minaria Helvetica*, 11a, 1991, pp. 22-30.
- THOUVENIN, A., 1984: Lingots de fer gaulois et techniques de forge. *Rev. archéol. Est Centre Est*, 35/1-2, 1984, pp. 368-372.
- TISSIERES, P., 1988: L'activité minière dans le Mont Chemin. *Ann. valaisannes*, (2) 63, 1988, pp. 65-83.
- TRIBOLET, M. de, 1877: Note sur les différents gisements du Bohnerz dans les environs de Neuchâtel. *Bull. Soc. neuchâteloise Sci. nat.*, 11, 1877, pp. 24-31.
- TROHLER, B., 1966: *Geologie der Glockhaus-Gruppe mit besonderer Berücksichtigung des Eisenoolithes der Erzegg-Planplatte*. Berne, 1966, 137 p., 4 pl. (= Matér. Géol. Suisse, Sér. géotech., Die Eisen- und Manganerze der Schweiz, 13/10).
- TROGER, W.E., 1967: *Optische Bestimmung der gesteinbildenden Minerale, Teil 2: Textband*. Stuttgart, 1967,

- TRÖGER, W.E., 1979: *Optical Determination of Rock-Forming Minerals, Part 1: Determinative Tables*. Stuttgart, 1979, 188 p. (Trad. Hoffmann, C. 4e éd. allemande revue par Bambauer, H.U., Taborsky, F. et Trochim, H.D.).
- TROYON, F.-L., 1860: Habitations lacustres des temps anciens et modernes. *Mém. Doc. Soc. Hist. Suisse romande*, (1) 17, 1860.
- TSHUMI, O., 1929: Der Massenfund von der Tiefenau auf der Engehalsinsel bei Bern 1849-1851. *Annu. Soc. suisse Préhist. Archéol.*, 21, 1929, pp. 131-148.
- TURNOCK, A.C. et EUGSTER, P., 1962: Fe-Al Oxides: Phase Relationships below 1000°C. *J. Petrol.*, 3/3, 1962, pp. 533-565.
- TYLECOTE, R.F., 1976: *A History of Metallurgy*. Londres, 1976, 182 p.
- TYLECOTE, R.F., 1987: *The early history of metallurgy in Europe*. Londres, 1987, 391 p.
- TYLECOTE, R.F., 1990: *The Prehistory of Metallurgy in the British Isles*. Londres, 1990, 2e éd., 257 p.
- TYLECOTE, R.F., AUSTIN, J.N. et WRAITH, A.E., 1973: Iron Smelting Experiments with a shaft Furnace of the Roman Period. p.25-50 in Guyan, W., Pleiner, R. et Fabesova, R. (éd.): «Die Versuchschmelzen und ihre Bedeutung für die Metallurgie des Eisens und dessen Geschichte» *Symposium 9-12.10.1970, Schaffhausen*. Schaffhouse, 1973, 90 p., 4 pl..
- VAUTHEY, P.A., 1985: *Riaz, Tronche-Bélon, le sanctuaire gallo-romain*. Fribourg, 1985, 117 p. (= Archéol. Fribourgeoise 2).
- VAUTHEY, P.A., 1985 b: Marsens, En Barras. pp. 60-62 in Schwab, H.: *Chronique archéologique 1983*. Fribourg, 1985, 184 p. (Archéol. Fribourgeoise).
- VAUTHEY, P.A., 1988: Marsens, En Barras. pp. 57-58 in Schwab, H.: *Chronique archéologique 1985*. Fribourg, 1988, 251 p. (Archéol. Fribourgeoise).
- VAUTHEY, P.A., 1989: Marsens, En Barras. pp. 62-63 in Schwab, H.: *Chronique archéologique 1986*. Fribourg, 1989, 180 p. (Archéol. Fribourgeoise).
- VDE, 1981: Verein Deutscher Eisenhüttenleute: *Schlackenatlas / Slag atlas*. Düsseldorf, 1981, 282 p.
- VERNET, J.P., 1959: Etude sédimentologique et pétrographique des Formations Tertiaires et Quaternaire de la plaine occidentale du Plateau Suisse. *Eclogae geol. Helv.*, 51/3, 1959, pp. 1115-1152.
- VERNET, J.-P., 1962: Hypothèse sur la genèse de certains minéraux du groupe de la kaolinite dans une poche de sables sidérolithiques du Mont Vuache (Savoie). *Bull. Groupe franç. Argiles*, 13, 1962, pp. 47-57.
- VERNET, J.-P., 1963: Le Sidérolithique du Mormont (Vaud). *Bull. Soc. vaudoise Sci. nat.*, 68/7, 1963, pp. 313-331.
- VERNET, J.-P., 1973: *Notice explicative de la feuille 1242 (Morges)*. Atlas géol. Suisse 1:25000. Berne, 1973, 18 p.
- VIOLLIER, D., 1927: *Carte archéologique du Canton de Vaud, des origines à l'époque de Charlemagne*. Lausanne, 1927, 431 p., 4 pl., carte.
- VISSER, W. et KOSTER VAN GROOS, A.F., 1979: Phase Relations in the System K<sub>2</sub>O-FeO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> at 1 Atmosphere with Special Emphasis on Low Temperature Liquid Immiscibility. *Amer. J. Sci.*, 279, 1979, pp. 70-91.
- VOUGA, P., 1923: *La Tène, monographie de la station*. Leipzig, 1923, 169 p., 50 pl.
- WALDBAUM, J.C., 1980: The First Archaeological Appearance of Iron and the Transition to the Iron Age. p. 69-98 in Wertime, T.A. et Muhly, J.D. (éd.): *The Coming of the Age of Iron*, Londres, 1980, 555 p.
- WARNIER, J.P., FLOWER, I., 1979: A Nineteenth-Century Ruhr in Central Africa. *Africa*, 49/4, pp. 329-351.
- WAYCHUNAS, G.A., 1991: Crystal Chemistry of Oxides and Oxyhydroxides. p.11-68 in: Lindsley, D.H. (éd.), *Oxide Minerals: petrologic and magnetic significance*. Chelsea Mich., 1991, 509 p. (Reviews Mineral. 25).
- WEIDMANN, D., 1984: Chronique archéologique, Montcherand. *Rev. hist. vaudoise*, 92, 1984, pp. 242-244.
- WEIDMANN, D., 1987: Environnement et archéologie du canal. p.27-38, in *Le canal d'Entreroches*. Lausanne, 1987, 140 p. (Cah. Archéol. romande 30).
- WEIDMANN, M., 1984: Le Sidérolithique et la molasse basale d'Orbe (VD). *Bull. Soc. vaudoise Sci. nat.*, 77, 1984, pp. 135-141.
- WEIDMANN, M., 1988: *Notice explicative de la feuille Lausanne (1243)*. Atlas géol. Suisse 1:25 000, 1988, 44 p., 3 pl. Collab. Rigassi, D.
- WENGER C et STREIGER.R., 1990: Erläuterungen des Blatt Tes-sin / Uri. Karte der Vorkommen mineralischer Rohstoffe der Schweiz 1:200000, Zurich, 1990, 114 p..
- WIELAND, B., 1979: Zur Diagenese und schwachen Metamorphose eozäner siderolithischer Gestein des Helvetikums. *Bull. suisse Minéral. Pétrogr.*, 1979, pp. 41-60.
- WILLIAMS, A., sous presse: Slag Inclusions in Armour Plate (1400-1600). in Espelund, A., (éd.), «*Bloomery Ironmaking during 2000 Years*», *Seminar in Budalen 26-30.08 1991, vol.3.* Trondheim, sous presse
- WILSON, A.D., 1960: The Micro-determination of Ferrous Iron in Silicates Minerals by a Volumetric and Colorimetric Method. *The Analyst*, 85, 1960, pp. 823-827.
- WUTZLER, B., 1983: *Geologisch-lagerstättenkundliche Untersuchungen am Mont Chemin (Nordöstliches Mont Blanc-Massiv)*. Clauthal-Zellerfeld, 1983, 111 p., 6 pl. (= Clauthaler geol. Abh. 42)
- ZARZYCKI, J., 1982: *Les verres et l'état vitreux*. Paris, 1982, 391 p.
- ZIEGLER, P.A., 1982: *Geological Atlas of Western and Central Europe*. Amsterdam, 1982, 2 vol., 130 p. et 40 pl.
- ZITZMANN, A., 1977-8: *The Iron Ore Deposits of Europe and adjacent Areas*. Hanovre, 2 vol., 1977 et 1978, 418 et 386 p.

## 2 Cartes géologiques

**Carte géologique de la Suisse** 1:500 000 par A. Spicher, 2e éd. 1980.

**Carte tectonique de la Suisse** 1:500 000 par A. Spicher, 2e éd. 1980.

*Atlas Géologique de la Suisse 1:25 000:*

**Feuille 1144 (Val de Ruz)** par Lüthi, E., Bourquin, P., Suter, H., Muhlethaler, C., Frei, E., Ryniker, K. et Buxtorf, R., 1968. (notice: Suter et Lüthi 1969).

**Feuille 1145 (Bieler See)** par Schär, U., Häfeli, C., Rutsch, R.F., Ryniker, K. et Schmid, K., 1971. (notice: Schär 1971).

**Feuille 1162 (Les Verrières)** par Muhlethaler, C., 1930. (notice Muhlethaler 1930).

**Feuille 1164 (Neuchâtel)** par Becker, F., Büchi, O., Buxtorf, R., Frei, E., Meia, J., Ryniker, K. et Suter, H., 1974. (notice: Meia et Becker 1976).

**Feuille 1165 (Murten)** par Becker, F. et Ramseyer, R., 1972. (notice: Becker 1973).

**Feuille 1202 (Orbe)** par Aubert, D. et Dreyfuss, M., 1963. (notice: Aubert 1963).

**Feuille 1221 (Le Sentier)** par Aubert, D., 1941. (notice: Aubert 1941).

**Feuille 1222 (Cossonay)** par Custer, W., 1935. (notice: Custer 1935).

**Feuille 1223 (Echallens)** par Bersier, A., 1952. (notice: Bersier 1953).

**Feuille 1241 (Marchairuz)** par Falconnier, A., 1950. (notice: Falconnier 1951).

**Feuille 1242 (Morges)** par Vernet, J.-P., 1972. (notice: Vernet 1973).

**Feuille 1243 (Lausanne)** par Weidmann, M., 1988. (notice: Weidmann 1988).

**Feuille 1264 (Montreux)** par Badoux, H., 1965 (notice: Badoux 1965).

**Feuille 1301 (Genève)** par Lombard, A. et Paréjas, E., 1965. (notice: Lombard 1965).

*Carte Géologique de la France 1:50 000:*

**Feuille 557 (Pontarlier)** par Glangeaud, L., Castany, G., Chauve, P., Custer, W., Dreyfuss, M. et François, S., 1930.

**Feuille 583 (Mouthe)** par Dreyfuss, M., Aubert, D., Chuve, P., Guillaume, S. et Tricart, J., 1943.

**Feuille 678 (Annecy-Bonneville)** par Charollais, J., Dondey, D., Ginot, C., Lombard, A., Muller, J.-P., Rosset, J. et Ruchat, C., 1986.

**Feuille 677 (Seysssel)** par Donze, P. et Enay, R., 1972.

*Cartes spéciales:*

**Carte géologique de l'anticlinal du Mont Salève** 1:20000, par Ruchat, C. et Michel R.C., 1959, inédit.

**Carte spéciale n°88 (région de la Dôle)** 1:25000, par Lagotala, H., Commission Géologique Suisse, Francke, Berne, 1920.

**Karter der Vorkommen mineralischer Rohstoffe der Schweiz:** Tessin / Uri, par Wenger, C. et Streiger, R., Zurich, 1990. (notice: Wenger et Steiger 1990).

# TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION .....	7
Pourquoi les scories?.....	7
Le cadre du travail.....	7
Aperçu de l'histoire de la sidérurgie en Europe .....	9
<b>I LES SCORIES, LES MINERAIS ET LES TECHNIQUES .....</b>	<b>11</b>
<b>Chapitre 1: Les scories : aspects chimiques et minéralogiques .....</b>	<b>13</b>
Chimie .....	13
Les analyses chimiques .....	13
La composition chimique des scories et le système SiO <sub>2</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -CaO-FeO .....	14
Calcul de production .....	17
Minéralogie .....	19
Déterminations minéralogiques .....	19
Le fer métallique et ses alliages .....	20
Les oxydes de fer et les spinelles .....	22
Les silicates .....	24
Saturation en oxydes de fer .....	29
Les minéraux saturés.....	29
Rôles des différents cations.....	29
Indice de saturation en oxydes de fer .....	30
Calcul de norme .....	31
<b>Chapitre 2: Les minerais de fer .....</b>	<b>32</b>
Les minéraux des minerais de fer.....	32
Classification des minerais de fer d'après les conditions de formation.....	33
Les minerais de fer suisses .....	34
Le Sidérolithique .....	36
Les produits sidérolithiques .....	36
Les modes de gisement .....	36
Age et formation du Sidérolithique.....	37
Répartition du Sidérolithique .....	37
Les formations à pisolithes ferrugineux plio-quatérnaires.....	37
Caractères chimiques et aspects miniers .....	40
Les minerais oolithiques .....	40
Les oolithes .....	40
Répartition stratigraphique et géographique .....	40
Caractères chimiques principaux et les aspects miniers .....	41
Les autres minerais .....	41
La Limonite du Valanginien .....	41
Le Mont Chemin et les amas de magnétite .....	41
Le Gonzen et les minerais à hématite et sidérite.....	41
Divers .....	42
Archéologie minière et histoire de l'exploitation des minerais suisses.....	42
Les rares découvertes archéologiques minières .....	42
Les mines de fer historiques.....	42

<b>Chapitre 3: La chaîne opératoire de la sidérurgie</b> .....	43
La chaîne opératoire.....	43
L'extraction minière.....	43
Les traitements préliminaires du minerai.....	44
La réduction.....	44
Le raffinage.....	47
La forge.....	48
Le comportement des éléments chimiques au cours du processus sidérurgique.....	49
La réduction.....	49
Les travaux post-réduction.....	49
Essai de modélisation.....	49
<b>II LES VESTIGES MÉTALLURGIQUES DE SUISSE OCCIDENTALE</b> .....	53
Avertissement.....	55
<b>Chapitre 4: Le district sidérurgique du Mont Salève (Savoie, France)</b> .....	57
Le Mont Salève.....	57
Le minerai.....	59
Formation des grès du Sidérolithique.....	59
Le fer dans les grès du Sidérolithique.....	60
Les autres faciès du Sidérolithique.....	61
Les sites métallurgiques et miniers.....	62
Catalogue des sites miniers et métallurgiques.....	62
Répartition des sites miniers et métallurgiques.....	70
Les fourneaux.....	72
Les scories du Salève.....	73
Les SVN : scories coulées vitreuses noires.....	75
Les SGD : scories coulées grises denses.....	75
Les scories non coulées.....	79
Signification et répartition des différentes catégories de scories.....	79
Relations entre le minerai et les scories.....	81
Les analyses chimiques.....	81
Réaction avec la paroi et apport de la cendre.....	83
Les éléments mineurs et traces.....	83
L'ancienne industrie du fer dans la région du Salève.....	83
Problème de datation des ateliers de réduction.....	83
La production.....	84
Les régions de Genève et Annecy.....	85
Le Sidérolithique de la chaîne du Reculet et du Vuache.....	85
Les vestiges métallurgiques anciens de Genève et du Genevois.....	85
Le Sidérolithique de la Montagne de Mandallaz.....	86
Les vestiges métallurgiques anciens de la région d'Annecy.....	86
<b>Chapitre 5: Le district sidérurgique du Mormont (Vaud, Suisse)</b> .....	88
Le minerai.....	89
Les affleurements de la colline du Mormont et du pied du Jura.....	90
Les affleurement dans le lit du Talent.....	91
Le fer dans le Sidérolithique.....	91
Le Sidérolithique comme minerai de fer.....	93
Les sites métallurgiques et miniers.....	97
Les fourneaux.....	101
Les fourneaux construits, à scories coulées.....	101
Le fourneau 14 de Bellaires.....	103
Les foyers.....	103

La ventilation .....	105
Les parois .....	105
Les scories de réduction .....	108
Les SVN : scories coulées vitreuses noires .....	108
Les SGD : scories coulées grises denses .....	110
Les scories intermédiaires .....	111
Les scories non coulées .....	111
Répartition des différentes catégories de scories de réduction .....	111
Relations entre le minerai et les scories .....	112
Les analyses chimiques .....	112
Calcul de production .....	113
Influence de la nature de la paroi sur le calcul .....	114
Les éléments mineurs et traces .....	114
Le métal associé aux scories de réduction .....	115
Les vestiges post-réduction .....	118
Les mâchefers modernes .....	119
L'ancienne industrie du fer dans la région du Mormont .....	121
Datation des sites métallurgiques .....	121
La production .....	122
Relations spatiales entre les différents sites .....	123
La façade lémanique entre Nyon et Lausanne .....	124
Les indices miniers .....	124
Les traces de métallurgie extractive (réduction) .....	125
Les traces de métallurgie de transformation (post-réduction) .....	126
Les ateliers de réduction du Mormont et les forges de Vidy .....	130
<b>Chapitre 6: L'atelier de réduction de Montcherand et sa région (Vaud, Suisse) .....</b>	<b>131</b>
Le minerai .....	131
Le Sidérolithique de la région d'Orbe .....	131
Le Sidérolithique comme minerai de fer .....	132
Les autres sources de minerai possibles .....	133
Les fouilles de l'atelier de réduction de Montcherand-La Léchère .....	134
Le site .....	134
Les fourneaux .....	134
Les parois de fourneau .....	135
Les scories de Montcherand-La Léchère .....	138
Les SVN : scories noires vitreuses .....	138
Les SIJ : scories intermédiaires jaunâtres .....	138
Les SGD : scories grises denses .....	140
Les SBD : scories denses à reflets bleus .....	141
Les scories grises denses non coulées .....	143
Quelques cas de scories exceptionnelles .....	143
Répartition des scories et quantification .....	144
Relations entre le minerai et les scories de réduction .....	145
Les analyses chimiques .....	145
Les éléments mineurs et traces .....	147
Le métal associé aux scories de réduction .....	147
Les autres produits scorifiés .....	148
L'atelier de Montcherand et son contexte .....	148
La production .....	148
Relations entre Montcherand et le Mormont .....	148
La région de Vallorbe et l'industrie médiévale et moderne .....	149
<b>Chapitre 7: Les trouvailles de scories dans la région des lacs de Neuchâtel et Bienne .....</b>	<b>150</b>
Les ressources minières potentielles .....	150
Le Sidérolithique .....	150
Les autres ressources potentielles .....	152

Les sites liés à la réduction du minerai.....	153
Les sites liés au travail de post-réduction.....	153
Les sites protohistoriques.....	153
Les sites romains.....	153
Les sites du Haut Moyen Age et du Moyen Age.....	157
Les scories du travail post-réduction.....	157
Le site de Baulmes VD.....	158
Les ateliers et les scories d'Avenches.....	163
La région des lacs de Neuchâtel et Bienn e et ses relations avec les régions voisines.....	167
Les lingots de fer.....	167
<b>Chapitre 8: Les scories de la forge de Marsens, En Barras (Fribourg, Suisse).....</b>	<b>170</b>
La mine de fer de Hautaudon.....	171
Le site de Marsens.....	171
La route et les bâtiments.....	171
Répartition des scories et structures associées.....	172
Les scories de Marsens.....	172
Les parois de foyer.....	173
Les SAS : scories argilo-sableuses.....	173
Les scories en forme de calotte.....	173
Les battitures.....	178
Les analyses chimiques des scories de Marsens.....	178
Principaux caractères chimiques.....	178
La formation des scories en calotte.....	178
L'origine de la matière première.....	180
La métallurgie dans le vicus de Marsens.....	180
<b>Chapitre 9: Les recherches sur la sidérurgie ancienne dans les autres régions de Suisse.....</b>	<b>181</b>
La vallée de Delémont.....	181
Les territoires soleurois, argovien et bâlois.....	182
Le canton de Schaffhouse.....	182
Le domaine alpin.....	183
Etat des recherches et perspectives.....	183
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>184</b>
1 Apports à l'étude des vestiges paléosidérurgiques.....	184
2 Apports à l'histoire de la sidérurgie.....	185
<b>ANNEXES.....</b>	<b>187</b>
Annexe 1 : Chimie et minéralogie.....	189
Méthode d'analyse chimique XRF et application aux corps riches en fer.....	190
Méthode de détermination des minéraux par diffraction rayons X.....	194
Méthode d'analyse chimique des minéraux à la microsonde.....	194
Annexe 2 : Chronologie.....	196
Annexes 3 à 7 : Analyses chimiques.....	198
Nomenclature des scories et matériaux associés.....	198
Tableaux d'analyses.....	199
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>223</b>
<b>TABLE DES MATIÈRES.....</b>	<b>234</b>
<b>RÉSUMÉ.....</b>	<b>238</b>
<b>SUMMARY.....</b>	<b>239</b>
<b>ZUSAMMENFASSUNG.....</b>	<b>240</b>

## RÉSUMÉ

Les scories sont les résidus des opérations métallurgiques. Pratiquement indestructibles, ce sont des matériaux que l'on trouve fréquemment et parfois en abondance au cours des fouilles archéologiques. Dans un tel contexte, elles attestent du travail des métaux et leur étude détaillée permet de décrire précisément cette activité.

Les scories sont des matériaux complexes et, au premier abord, peu engageants. Cependant elles possèdent des caractères propres et significatifs: composition chimique, composition minéralogique, texture microscopique, aspect macroscopique et forme générale. Cet ouvrage propose une méthodologie pour l'étude des scories issues de la métallurgie du fer, basée tant sur une approche macroscopique que sur les analyses de laboratoire.

Du point de vue de l'interprétation archéologique, c'est l'association de diverses catégories de résidus sur un même site qui est significative. Les quantités découvertes sont également une donnée essentielle si l'on cherche à connaître l'importance économique de l'activité métallurgique.

Par cette approche, il est possible de décrire et de situer les différentes étapes de la chaîne opératoire qui mène de la matière première, le minerai, au produit fini, l'objet en fer fonctionnel: extraction, concentration et réduction du minerai, raffinage et forgeage du métal.

L'identification des minerais de fer n'est pas sans poser des problèmes. La notion même de minerai évolue avec les conditions économiques et techniques. De même, les quantités nécessaires pour alimenter une industrie ancienne sont infiniment moindres que celles qui sont utilisées aujourd'hui. Dans la région étudiée, c'est le Sidérolithique, un minerai de fer pisolithique d'âge Eocène, qui a été utilisé au cours des périodes anciennes. Ce n'est qu'au Moyen Âge que d'autres minerais ont fait l'objet d'une exploitation.

La réduction du minerai de fer au bas fourneau est une méthode qui produit de grandes quantités de scories. Elles forment des accumulations importantes, de quelques tonnes à quelques dizaines de tonnes, qui entourent ou recouvrent les vestiges des bas fourneaux. Dans les cas étudiés, les scories de réduction possèdent, dans leur grande majorité, une forme qui témoigne de leur écoulement à l'état liquide. Les détails morphologiques renseignent sur différentes particularités techniques. Ce sont des corps généralement cristallisés (fayalite et hercynite) ou parfois vitreux, riches en fer, en silice et en alumine. Les analyses chimiques permettent de définir la nature du minerai, voire de l'identifier. Sur cette base, on peut établir un bilan chimique de l'opération de réduction et fournir une estimation précise de la production de métal. Les rendements calculés se situent entre 10 et 30%. Les contaminations (charbon, paroi des fourneaux) et les ajouts volontaires (fondant) sont décelables au travers des compositions chimiques, en particulier les teneurs en calcium, strontium et potassium.

Le métal produit dans les bas fourneaux doit ensuite être purifié (raffinage) et mis en forme (forge à proprement parler). Au cours de ces étapes du travail, d'autres résidus sont fabriqués. En particulier, dans le fond du foyer métallurgique, une scorie se constitue par accumulation des matières fondues. Elle présente une forme caractéristique en calotte à laquelle adhère parfois le bord du foyer. Les analyses chimiques montrent des teneurs très élevées en fer. Les minéraux typiques sont la fayalite, la wüstite et le fer métallique. Le spectre des éléments mineurs et traces permet de différencier, au moins dans une certaine mesure, les résidus du raffinage et ceux de la forge. Au cours des premières phases de traitement, la scorie de

réduction encore piégée dans la masse métallique est refondue et contribue à la formation de la scorie en calotte. De fortes teneurs en éléments typiques du minerai et non réduits (Mn, V et Cr) sont donc caractéristiques des scories de raffinage. Lorsque le métal travaillé est pur, les principaux éléments traces qui seront présents dans la scorie sont ceux qui ont été réduits avec le métal (Ni, Co et éventuellement Cu). Enfin, la présence d'autres métaux non ferreux indique probablement une activité polymétallurgique.

L'apport de l'étude des scories à l'histoire de la sidérurgie est significatif. Il fournit des données technologiques (procédés, étape de la chaîne opératoire, degré de perfectionnement), économiques (volume de la production, impact sur l'environnement humain et naturel) et sociales (organisation de la production et du marché).

L'étude régionale de la Suisse occidentale couvre deux districts de métallurgie extractive (réduction) situés au pied de la chaîne du Jura. Celui du Salève (Savoie, France) était pratiquement inconnu. Il s'étend sur une quarantaine de kilomètres carrés et une vingtaine de sites y ont été repérés. Les vestiges métallurgiques du Mormont (Vaud, Suisse) sont parmi les mieux étudiés d'Europe (Pelet 1993). On compte 35 ateliers de réduction sur moins de 50 kilomètres carrés. Grâce aux fouilles archéologiques de plusieurs sites, on connaît bien la chronologie et l'architecture des fourneaux. Il a également été tenu compte des recherches récentes menées dans le canton du Jura (Eschenlohr et Serneels 1991).

Les ateliers de réduction se trouvent près des gisements de minerai sidérolithique, à l'écart des zones habitées, dans des zones qui étaient probablement complètement boisées. Dans une certaine mesure, le paysage actuel témoigne de l'impact sur le couvert forestier.

Sur le Plateau suisse où il n'y a pas de minerai de fer reconnu, aucun vestige se rapportant à la réduction n'a été mis en évidence. Les nombreuses trouvailles de scories témoignent de la présence de forges. Elles sont installées dans les villes, les villages et les habitats ruraux. Il y a donc une nette séparation entre les différentes phases du travail.

L'industrie sidérurgique pendant l'âge du Fer reste très mal connue, faute de découverte archéologique, mais il faut rappeler les importantes trouvailles d'objets en fer de cette époque à La Tène et Berne en particulier.

Pendant la période romaine, la production primaire de fer semble limitée en quantité alors que le métal est largement répandu et que les forges sont très nombreuses. Il est probable qu'une grande partie du fer utilisé à cette époque en Suisse occidentale ait été produite dans d'autres régions de l'Empire.

En ce qui concerne la sidérurgie, le Haut Moyen Âge est une période de développement considérable: la production augmente et les techniques s'améliorent, comme le montrent l'architecture des fourneaux et la nature des scories. En particulier, l'utilisation de fondants calcaires permettant un rendement plus élevé a pu être mise en évidence. Parallèlement, la qualité de certains objets, armes et parures, devient remarquable.

## SUMMARY

Slags are the residua of metallurgical processes. These practically indestructible materials are frequently found, sometimes abundantly, on archaeological sites. In this context, they are indicative of metalworking and detailed study allows to describe precisely this activity.

Slags are complexe materials and, at first glance, not very attractive. However, they have their specific characteristics: chemical composition, mineralogical composition, microscopic texture, macroscopic aspects and general shape. This book provides a method to study the slags from iron metallurgy, based on both a macroscopic approach and laboratory analysis.

From the point of view of archaeological interpretation, the association of different categories of residua from the same site is significant. The quantities recovered are essential data to reconstruct the economic consequence of the metallurgical activities.

Therefore it is possible to describe and locate the different steps of the production line from the raw material, the ore, to the final product, the functional iron object via extraction, concentration and reduction of the ore, bloom- and ironsmithing.

The indentification of iron ores is not easy. Even the idea of ore is related to the technical and economic conditions, changing with time. In the same way, the quantities necessary for an industry in ancient times are infinitely lower than those of today. In the study area, the Siderolithique, a kind of pisolithic iron ore from Eocene age was used during the early periods. Only during the Middle Ages, have other ores been exploited.

Reducing iron ore in low furnaces is a method producing large amounts of slags. They form large heaps, from one to tens of tons, surrounding or covering the furnace remains. In studied cases, the reduction slag shapes show evidence of flowing in a fluid stage. The morphological details yield information concerning furnace use. Slags are vitrified or crystallized materials (mainly fayalite and hercynite) rich in iron, silicium and aluminium. The chemical analyses define the nature of the ore and eventually identify it. On this basis, a chemical balance can be established for the reduction operation from which the metal production can be calculated. The calculated yields range from 10 to 30%. Contamination (charcoal, furnace linings) and additives (flux) can be detected through the chemical compositions, especially, the high levels of calcium, strontium and potassium.

The metal produced in the low furnaces was then purified (bloomsmithing) and shaped (ironsmithing). During these stages of work, others residua are produced. Especially, in the bottom of the metallurgical hearth, a slag is formed by accumulation of melted materials. It has a typical form of a plano-convex cake (PCB) with sometimes a trace of the hearth wall adhering. Chemical analyses indicate very high levels of iron. The typical minerals formed are fayalite, wüstite and metallic iron. Minor and trace elements help to differentiate between the residua of iron- and bloomsmithing. During the first stages of treatment, the slag formed during reduction and entrapped in the metallic body is remelted and contributes to the formation of the plano-convex slag. High levels of elements typical of the ore and not reduced (Mn, V and Cr) are characteristic for bloomsmithing slags. When the iron worked is pure, the most important trace elements in the slag were those reduced with the metal (Ni, Co and eventually Cu). The presence of other non-ferrous metals indicates probably the working of various metals in the same workshop.

This study of slag provides interesting data concerning the history of ironmaking. It shows technological changes (processes, stage in the production line, technical improvements), economical impact (production totals, environmental and social impact) and social organisation of production.

The regional study of western Switzerland covers two districts with primary production of iron (reduction), both located in the western Jura Mountains. The Salève area (Savoie, France) was previously unknown. It covers about 40 square kilometers and about 20 sites have been located. The remains of the Mormont area are one of the best studied examples in Europe (Pelet 1993). 35 reduction workshops are known from an area of less than 50 square kilometers. This study has taken account of the recent discoveries in the canton of Jura (Eschenlohr et Serneels, 1991)

The bloomeries are located near the ore deposits beside the inhabited zones, probably completely covered by forest at this time. The modern landscape shows of the impact on the forest.

On the Swiss Plateau, where there is no known iron ore, no remains related to reduction have been found. The numerous finds of slags indicate the presence of smithies. The workshops are located in the towns, villages and rural settlements, in or outside the mining areas. There is a quite clear division between the different steps in the production line.

Due to the lack of archaeological evidence, the organisation of the industry during the Iron Age, is still poorly understood. It is necessary to remember the important finds from iron objects of this period, for example at La Tène and Berne.

During the roman period, the primary production seems to be limited, later iron is common and smithies numerous. Probably a large part of the metal in use was imported from other parts of the Empire.

As far as iron is considered, during the Early Middle Ages, an important development occurred : production increased and technological advances are demonstrated by furnace designs and slag compositions. The use of lime as a flux has been demonstrated in one case, allowing a better yield. During the same period, some objects, weapons and ornaments, were a better quality.

*Traduction D. Marshall*

## ZUSAMMENFASSUNG

Schlacken sind Überreste metallurgischer Prozesse. Praktisch unzerstörbar, findet man sie häufig und vielfach in grossen Mengen bei archäologischen Ausgrabungen. Eine detaillierte Untersuchung dieser Zeugen einer Metallverarbeitung erlaubt eine präzise Rekonstruktion aller Aspekte dieser menschlichen Tätigkeit.

Schlacken sind komplexe und äusserlich wenig anziehende Stoffe. Sie besitzen jedoch eine ganze Anzahl von spezifischen und bedeutungsvollen Merkmalen: chemische Zusammensetzung, mineralogische Zusammensetzung, mikroskopische Struktur, makroskopische Aspekte und die Gesamtmorphologie. Die vorliegende Arbeit präsentiert eine Methode zur systematischen Untersuchung von Eisenschlacken, welche sowohl auf makroskopischen Untersuchungsmethoden als auch auf Laboranalysen beruht.

Was die archäologische Fragestellung betrifft, ist das gemeinsame Auftreten von verschiedenenartigen Schlackenarten am gleichen Ort am aufschlussreichsten. Auch die vorhandenen Mengen jeder Schlackenart sind wichtig, wenn es darum geht die wirtschaftliche Bedeutung einer Metallverarbeitung zu beurteilen. Mit dieser Arbeitsweise ist es möglich die verschiedenen Etappen der Prozessekette zu rekonstruieren, ausgehend vom Rohstoff Erz bis zum fertigen Produkt, einem Gegenstand aus Eisen: Erzabbau, Vorkonzentration und Verhüttung der Eisenerze (Reduktion), Reinigen (verfeinern, ausheizen) und Schmieden des Metalls.

Es ist nicht immer einfach, genaue Angaben über das Eisenerz zu machen, das zur Verhüttung diente, vor allem auch deshalb weil der Begriff abbauwürdiges Erz von der jeweiligen Wirtschaftssituation und dem Stand der Technik abhängt. Man muss sich dabei auch bewusst sein, dass der Erzbedarf einer frühen handwerklichen oder industriellen Tätigkeit sehr viel kleiner war als heute. In der untersuchten Region war es die eoänzeitliche Bohnerzformation, welche von der Frühzeit bis ins Mittelalter für die Eisenverhüttung gebraucht wurde. Andere Erze (z.B. oolithische Erze der Doggerformation) werden erst ausgebeutet vom Mittelalter an.

Die Verhüttung (Reduktion) der Erze im Rennofen ist eine Methode die grosse Schlackenmengen produziert. Diese treten als mächtige Ansammlungen von einigen Tonnen, aber auch von mehreren Zehnern von Tonnen auf, umgeben und bedecken, welche die Überreste von Rennöfen. In dem meisten untersuchten Fällen weisen die Schlacken Fliebsstrukturen auf. Die morphologischen Details geben Auskunft über Eigenheiten der angewandten Verhüttungstechniken. Bei den Schlacken handelt es sich im allgemeinen um kristallisierte (Minerale Fayalith und Hercynit) oder manchmal um gläserne Materie, immes reich an Eisen, Silikat und Tonerde ( $Al_2O_3$ ). Die chemischen Analysen erlauben, Schlüsse auf den verwendeten Erztyp zu ziehen, oder ihn sogar zu identifizieren. Auf dieser Basis lässt sich eine chemische Bilanz des ganzen Verhüttungsprozesses aufstellen und die Metallproduktion genau abschätzen. Die so berechnete Ausbeute variiert zwischen 10 und 30%. Die Verunreinigungen (Holzkohle, Ofenwände und die absichtlich zugefügten Stoffe, d.h. Flussmittel können ebenfalls aus den chemischen Analysen rekonstruiert werden, insbesondere mit den Kalzium-, Strontium- und Kalium-Gehalten.

Das aus dem Rennofen erhaltene Metall muss anschliessend gereinigt (raffiniert, ausgeheizt) und durch Schmieden in eine bestimmte Form gebracht werden. Während dieser Operationen entstehen andere Ueberreste, insbesondere bildet sich auf dem Boden der Feuerstelle eine Schlacke, die sich durch Ansammlung von geschmolzenem Material bildet. Diese besitzt eine charakteristische Kalottenform, an deren Unterteil oft noch Wandreste der Esse kleben. Hier zeigen die chemischen Analysen sehr hohe Eisenwerte. Typische Minerale sind Fayalith, Wüstit und metallisches Eisen. Das Spektrum

der Neben- und Spurenelemente erlaubt bis zu einem gewissen Grade, Schlacken aus einer Ausheizungsphase und einer Schmiedephase auseinander zu halten. Im Verlauf der ersten Behandlungsphasen sind noch Reste der Verhüttungsschlacke in der Eisenmasse enthalten, die schmelzen und so die Kalottenschlacken mitbilden. Deshalb finden sich hohe Gehalte der im Erz enthaltenen, aber nicht reduzierten Metalle (Mn, V, Cr) in dem Ausheizenschlacken. Nach erfolgter Reinigung des Eisens sind die Schlacken vor allem reich an Spurenelementen, welche mit dem Eisen reduziert werden (Nickel, Kobalt, eventuell Kupfer). Hingegen weist die Anwesenheit von nicht an Eisen gebundenen Metalle auf die gleichzeitige Verarbeitung von anderen Metallen in der gleichen Esse hin.

Das Studium von Schlacken leistet einen grossen Beitrag an die Geschichte der Eisenverarbeitung. Sie liefern Angaben über die verwendete Technik (Prozess, Identifikation des Arbeitsschrittes, Grad der Vervollkommnung), über die wirtschaftlichen (Produktionsvolumen, Auswirkungen auf das natürliche und menschliche Umfeld) und die sozialen Verhältnisse (Organisation der Arbeitsprozesse, Absatzmarkt).

Die durchgeführten regionalen Studien im Rahmen dieser Arbeit in der Westschweiz umfassen zwei metallproduzierende Gebiete am Jurafuss. Das erste Gebiet, der Salève (Savoyen, Frankreich), war praktisch unbekannt. Es erstreckt sich über 40 km<sup>2</sup>, mit ungefähr zwanzig Schlackenfundstellen. Die Ueberreste der Metallverarbeitung in der Mormont-Gegend (Waadt, Schweiz) gehören zu den am besten untersuchten in Europa (Pelet 1993). Auf weniger als 50 km<sup>2</sup> sind 35 Verhüttungsplätzen bekannt. Dank archäologischen Ausgrabungen von mehreren Fundstellen, kennt man die Chronologie und Architektur der Ofen. Bei der Neubeurteilung und Ergänzung dieser Daten sind auch die Resultate der kürzlich erfolgten Ausgrabungen im Kanton Jura (Eschenlohr et Serneels 1991) berücksichtigt worden.

Die Verhüttungsplätze befinden sich durchwegs in der Nähe der Bohnerzlagerstätten, ausserhalb der Wohnzonen, wahrscheinlich in vollständig bewaldeten Gebieten. Bis zu einem gewissen Grad widerspiegelt die heutige Landschaft den Einfluss solcher Werkstätten auf die Waldbedeckung.

Im schweizerischen Mittelland, wo man keine Eisenlagerstätten kennt, sind auch keine Zeugen des Eisenverhüttung gefunden worden. Zahlreiche Schlackenfunde bezeugen hingegen die Existenz von Schmiedewerkstätten. Sie befinden sich in den Städten, Dörfern oder kleinen landwirtschaftlichen Siedlungen. Die zwei Hauptphasen der Eisenerzeugung (Verhüttung und Verarbeitung) sind also ortsmässig getrennt.

Über die Eisenindustrie der Eisenzeit ist, mangels neuer archäologischer Funde, wenig zu berichten, aber es sei daran erinnert, dass aus La Tène und aus Bern zahlreiche Eisenobjekte bekannt sind.

Während der Römerzeit scheint die primäre Eisenproduktion beschränkt gewesen zu sein, grössere Eisenmengen waren jedoch und es gibt im Umlauf waren, gibt es zahlreiche Schmiedewerkstätten. Es scheint wahrscheinlich, dass das meiste in der Westschweiz verwendete Eisen in andern Gebieten des römischen Reiches produziert wurde.

Während des frühen Mittelalters hat sich die Eisenindustrie hingegen gewaltig entwickelt. Die Ofenarchitektur und die Schlackenfunde weisen auf eine Erhöhung der Produktion und eine Verfeinerung der Techniken hin. Im Speziellen erlaubte die Verwendung von Kalk als Flussmittel die Ausbeute stark zu erhöhen. Gleichzeitig verbesserte sich auch die Qualität der daraus produzierten Gegenstände (Waffen und Schmuck).

Les scories, abondantes sur de nombreux sites archéologiques, sont le principal témoignage que laissent les activités métallurgiques. Les méthodes d'analyse des sciences naturelles sont particulièrement bien adaptées à l'étude de ces objets.

Ce travail propose une méthodologie pluridisciplinaire, basée sur une triple approche: morphologique, minéralogique et chimique. Elle permet de distinguer les scories des différentes étapes de la chaîne opératoire de la sidérurgie, de préciser les techniques mises en œuvre et, dans une certaine mesure, de chiffrer la production.

L'inventaire des trouvailles archéologiques liées à la métallurgie et les résultats de prospections récentes contribuent à compléter l'image de la production et du travail du fer en Suisse occidentale.