**Zeitschrift:** Cahiers d'archéologie romande
**Herausgeber:** Bibliothèque Historique Vaudoise
**Band:** 54 (1992)

**Artikel:** L'établissement sidérurgique de Montcherand
**Autor:** Abetel, Emmanuel / Klausener, Max / Serneels, Vincent
**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-835416

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

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

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

**Download PDF:** 06.03.2026

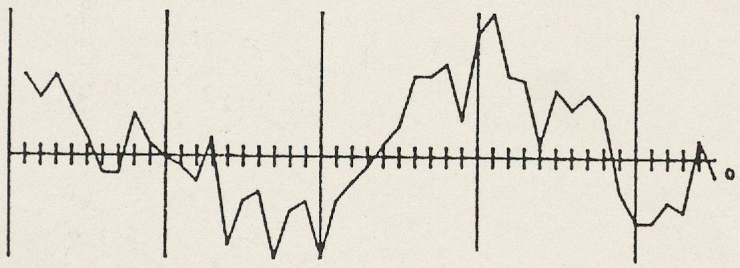
**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch**

CAHIERS D'ARCHÉOLOGIE ROMANDE
collection dirigée par Colin Martin

No 54

EMMANUEL ABETEL

# L'ETABLISSEMENT SIDERURGIQUE DE MONTCHERAND



Institut d'archéologie et d'histoire ancienne
de l'Université
LAUSANNE

1992

*Couverture:*
La courbe dendrochronologique des charbons de bois provenant du bas-fourneau III' de Montcherand permet de faire remonter à l'hiver 609/610 l'abattage des bois destinés au charbonnage.

# L'ÉTABLISSEMENT SIDÉRURGIQUE DE MONTCHERAND

Les
**Rapports et mémoires**
de l'Institut d'archéologie et d'histoire ancienne de l'Université de Lausanne

**Vol. 1 (1984)**
D. Paunier et alii. Le vicus gallo-romain de Lousonna-Vidy. Rapport préliminaire sur la campagne de fouilles 1983 (Lousonna 5). (Cahiers d'archéologie romande, N° 38.) Fr. 20.-

**Vol. 2 (1984)**
D. Paunier, S. Amstad. L'établissement gallo-romain de Bavois (VD): sondages 1973. (Cahiers d'archéologie romande, N° 39.) Fr. 10.-

**Vol. 3 (1987)**
D. Paunier et alii. Le vicus gallo-romain de Lousonna-Vidy. Rapport préliminaire sur la campagne de fouilles 1984 (Lousonna 6). (Cahiers d'archéologie romande, N° 40.) Fr. 50.-

**Vol. 4 (1987)**
D. Castella. La nécropole du port d'Avenches (Aventicum IV). (Cahiers d'archéologie romande, N° 41.) Fr. 50.-

**Vol. 5 (1988)**
P. Bonnard. La ville romaine de Nyon. Répertoire des fouilles et trouvailles; bibliographie (Noviodunum 1). (Cahiers d'archéologie romande, N° 44.) Fr. 48.-

**Vol. 6 (1989)**
D. Paunier et alii. Le vicus gallo-romain de Lousonna-Vidy. Rapport préliminaire sur la campagne de fouilles 1985 (Lousonna 7). (Cahiers d'archéologie romande, N° 42.) Fr. 50.-

**Vol. 7 (1992)**
E. Abetel et alii. L'établissement sidérurgique de Montcherand. (Cahiers d'archéologie romande N° 54) Fr. 60.-

ainsi que les

**Résumés d'archéologie suisse.**
**Epoque romaine:**

R.A.S. 1981 (1982) Fr. 6.-
R.A.S. 1982 (1983) Fr. 10.-
R.A.S. 1983 (1984) Fr. 10.-
R.A.S. 1984 (1985) Fr. 10.-
R.A.S. 1985 (1986) Fr. 12.-
R.A.S. 1986 (1988) Fr. 13.-
R.A.S. 1987 (1989) Fr. 12.-
R.A.S. 1988 (1990) Fr. 13.-
peuvent être obtenus à l'adresse suivante:

Institut d'archéologie et d'histoire ancienne
Université de Lausanne
BFSH II
**CH-1015 Lausanne**
Tél.: (021) 692.45.52

CAHIERS D'ARCHEOLOGIE ROMANDE
collection dirigée par Colin Martin

N° 54

EMMANUEL ABETEL

(avec la collaboration de Max Klausener
et de Vincent Serneels)

# L'ÉTABLISSEMENT SIDÉRURGIQUE DE MONTCHERAND

RAPPORTS ET MEMOIRES
DE L'INSTITUT D'ARCHEOLOGIE ET D'HISTOIRE ANCIENNE
DE L'UNIVERSITE DE LAUSANNE

Volume 7

Lausanne, 1992

Code de citation préconisé:

Emmanuel Abetel.
L'établissement sidérurgique de Montcherand
(Cahiers d'archéologie romande, N° 54),
Lausanne, 1992.

Ouvrage publié avec l'aide du Département de l'instruction publique et des cultes du canton de Vaud et de la Fondation van Walsem Pro Universitate, de la Société Académique Vaudoise, de la Compagnie vaudoise d'Electricité, du Crédit Foncier Vaudois, de l'Association pour le développement du Nord vaudois, de la Municipalité de Vallorbe, ainsi que celle des Usines Métallurgiques de Vallorbe, de Precisa S.A. à Yverdon-les-Bains, de Geilinger S.A. Département Constructions Métalliques à Yvonand, de CETOP S.A. Compagnie d'études techniques et de topographie à Lausanne et de la Société coopérative Migros Vaud.

ISBN 2-88028-054-0

Les commandes et les demandes d'échange pour le présent ouvrage doivent être adressées à la Bibliothèque historique vaudoise.
Me Colin Martin, Petit-Chêne 18, CH-1003 Lausanne.
Tous droits de traduction, de reproduction et d'adaptation réservés pour tous pays.

© 1992 by Bibliothèque historique vaudoise, Lausanne
Impression: Presses Centrales Lausanne S.A.

# *PRÉFACE*

En automne 1978, lors du contrôle du tracé de la future autoroute N9 entre Orbe et la frontière franco-suisse près de Vallorbe, Roland Jeanneret découvre à la Léchère (commune de Montcherand), dans un pré en talus, les scories d'une ferrière inconnue. Elle est située à l'extérieur de la zone étudiée dans Paul-Louis PELET, *Fer charbon acier dans le Pays de Vaud, - Les sources archéologiques*[1], premier des trois volumes qui reconstituent les étapes de l'histoire du fer au pied du Jura vaudois.

Entre 1978 et 1983, les chercheurs de l'Institut de recherches interdisciplinaires sont accaparés par la rédaction des deux volumes qui conduisent des bas fourneaux aux ferrières hydrauliques, aux hauts fourneaux, aux affineries, aux aciéries, à la petite métallurgie qui prolifère autour de ces usines[2].

Pendant ce temps, en 1981, Pascal Kissling repère des amas de scories en Tiléria z (commune d'Eclépens). Bernard Vauthier en découvre à Concise, entre La Raisse et la frontière Vaud-Neuchâtel, en 1985. Le bassin sidérurgique gallo-romain et médiéval ne se confine plus entre L'Isle et Romainmôtier; il se prolonge tout le long du Jura. Son étude mérite d'être reprise systématiquement et étendue au-delà de la zone déjà prospectée.

S'appuyant sur les recherches archéométriques les plus récentes, le minéralogiste Vincent Serneels analyse et compare les scories relevées dans un plus grand nombre de sites, pour répondre aux questions que *Fer charbon acier* laissait en suspens.

A l'Archéodrome de Beaune, la reconstitution et la mise à feu en 1983 et 1984 d'un fourneau des Bellaires démontre l'efficacité des deux tuyères placées à angle droit, à deux niveaux différents. Les expérimentations de Philippe Andrieux confirment l'intérêt et l'importance des découvertes faites au pied du Jura. Elles servent de référence aux recherches en archéologie sidérurgique qui se multiplient en Europe occidentale.

Une fois le tracé définitif de la future autoroute adopté, le Service archéologique cantonal confie à Max Klausener la fouille du site de Montcherand. Avec son équipe, il met au jour, en été 1983, les substructures de 9 fourneaux à fer. Une découverte de cette ampleur ne doit pas rester consignée dans les cartons du Service archéologique. Elle mérite une analyse détaillée et une publication. En acceptant de s'en charger, M. Emmanuel Abetel, de l'Institut d'archéologie et d'histoire ancienne de la Faculté des lettres se lance dans une entreprise de longue haleine et riche en difficultés.

Découvert en zone agricole, le site de Montcherand n'a pas été protégé par la forêt comme Prins-Bois ou Les Bellaires. Des labours toujours plus profonds ont éventré et éparpillé la superstructure des fourneaux. Mais le soin apporté au relevé des 9 substructures et à leur description permet de les comparer aux modèles mis au jour antérieurement.

A Montcherand, comme aux Bellaires, on retrouve la juxtaposition ou la superposition de fourneaux tronconiques et de modèles asymétriques dont la cuve est prolongée d'un côté par une sorte d'alcôve. Les modèles asymétriques apparaissent ici aussi après la dislocation de l'Empire romain.

Les analyses montrent une nouveauté: l'emploi conjugué de deux types de minerai, - inconnu dans les sites dégagés autour de Ferreyres, jamais clairement décelé à si haute époque.

Soigneusement recueilli, le charbon reflète une forêt différente de celle que coupaient les forgerons des Bellaires. A Montcherand, à la lisière du bois de *Chassagne,* la chênaie fournit 90% du combustible.

Implantée à 2 kilomètres à l'ouest de la villa de Boscéaz, l'exploitation sidérurgique débute après les premières invasions germaniques qui font enfouir dans le bois de Châtillon (à mi-chemin entre la ferrière et la villa) un trésor de plus de mille monnaies romaines[3].

---

[1] BHV, N° 49, Lausanne, 1973.

[2] Paul-Louis PELET et collaborateurs, *Fer charbon acier dans le Pays de Vaud,* volume 2: *La Lente victoire du Haut fourneau,* BHV, N° 59, 1978; volume 3: *Du Mineur à l'Horloger,* BHV, N° 74, 1983.

[3] Lettre de J.F.H. Venel à G. de Bonstetten, dans Maurice BARBEY, Louis DECOLLOGNY et Samuel-Walter POGET, Urba, mosaïque et vestiges romains de Boscéaz près Orbe, in *RHV* 1929, pp. 371-372, annexe II.

Elle cesse au 7e siècle, quelques années après la capture de la reine Brunehaut qui s'était réfugiée dans le palais royal successeur de la grande villa. Les fouilles bien menées permettent une description d'une grande rigueur. M. Abetel se fait un devoir d'attirer l'attention des archéologues formés dans une Faculté des lettres sur des détritus qui, en cours de fouille leur paraissent au premier abord sans intérêt: les cendres, le charbon, les scories, les déchets de fer rouillés et tordus. Ce sont eux qui révéleront, les savoir-faire techniques.

Les fouilles de Montcherand accroissent l'importance des découvertes faites antérieurement sur le versant suisse du Jura. Elles relient les sites devenus classiques des Bellaires aux fourneaux découverts en 1989 à Boécourt (canton du Jura)[3]. Elles rapprochent les ferrières des cantons romands de celles que le Professeur Michel Mangin et ses chercheurs inventorient en Franche-Comté et en Bourgogne.

Il sera possible dorénavant de rattacher la sidérurgie antique et médiévale du versant suisse du Jura avec ses spécificités et ses analogies, aux grands ensembles que l'archéologie et l'archéométrie sidérurgiques dégagent actuellement en Europe.

Lausanne, le 24 mars 1992.

Paul-Louis PELET

[3] ESCHENLOHR, Ludwig et SERNEELS, Vincent, *Les bas fourneaux mérovingiens de Boécourt, Les Boulies (JU)*, Porrentruy, 1991.

## *LE TRÉSOR MONÉTAIRE DE MONTCHERAND*

Alexandre Sévère
222-235

Gallien
253-268

Probus
276-282

L'étude d'Emmanuel Abetel porte sur la période du VIIe siècle. L'auteur laisse toutefois entendre que par le carbone 14 on avait décelé sur le site des vestiges du IIIe siècle (p. 91). A cette même page, il rappelle, en note, avec raison, la trouvaille de 1200 monnaies romaines.

La numismatique vient souvent au secours de l'archéologie, ce qui nous incite à décrire plus en détail le trésor et la date probable de son enfouissement.

La trouvaille a été faite sur le territoire de Montcherand, sur la petite colline de Châtillon, sise à moins de 1000 mètres de l'église, au nord-est. Il se trouve être à mi-distance des fouilles d'E. Abetel et du site de Boscéaz, riche en mosaïques romaines.

Découvert aux environs de 1840, le trésor comptait 1200 petits bronzes romains, frappés par les empereurs Alexandre Sévère (222-235), Volusien (252-254), Valérien (253-259), Gallien (253-268) et Probus (276-282).

Rapidement dispersé entre les habitants de Montcherand, il n'en reste aucune trace au Cabinet vaudois des médailles.

Seul le Musée de Neuchâtel en aurait reçu, à l'époque, 88 pièces, dont seule la moitié serait à son Cabinet numismatique.

Les notices de l'époque de la trouvaille précisent qu'un tiers était à l'effigie d'Alexandre Sévère, et autant à celle de Probus. L'enfouissement – dans un récipient de métal – remonterait au dernier quart du IIIe siècle.

Cette constatation, rapprochée de celle évoquée par E. Abetel, permettrait de penser que le site des bas-fournaux était aussi occupé à cette même époque.

Saint-Prex, le 11 mars 1992

Colin MARTIN

# L'ÉTABLISSEMENT SIDÉRURGIQUE DE MONTCHERAND

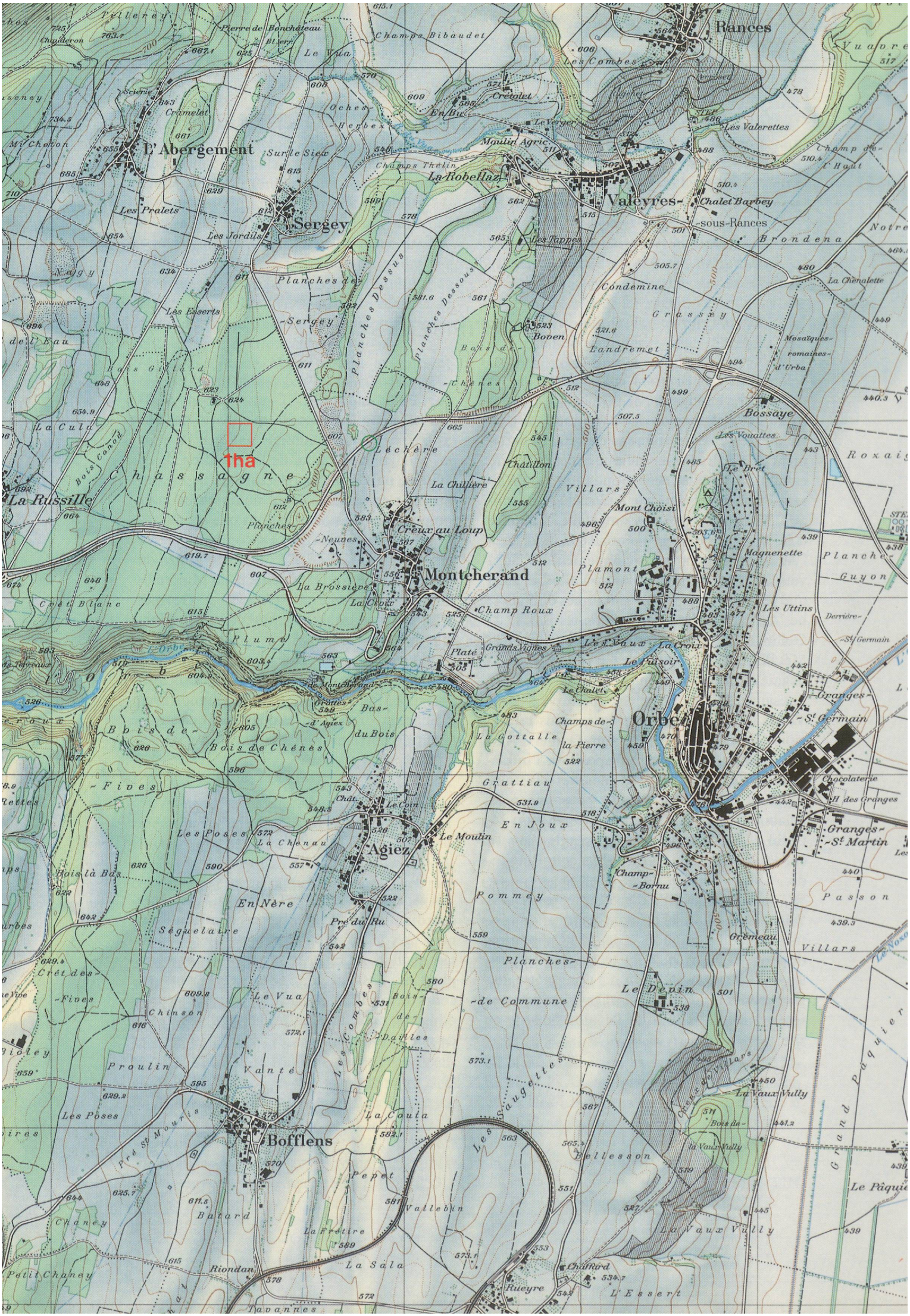
## REMERCIEMENTS

Les frais des diverses études scientifiques ont été pris en charge par l'Office Fédéral des Routes et l'impression de ce volume a été possible grâce aux aides financières du Département de l'instruction publique et des cultes du canton de Vaud et de la Fondation van Walsem Pro Universitate, de la Société Académique Vaudoise, de la Compagnie vaudoise d'électricité, du Crédit Foncier Vaudois, de l'Association pour le développement du Nord vaudois, de la Municipalité de Vallorbe, ainsi que celle des Usines Métallurgiques de Vallorbe, de Precisa S.A. à Yverdon-les-Bains, de Geilinger S.A. Département Constructions Métalliques à Yvonand, de CETOP S.A. Compagnie d'études techniques et de topographie à Lausanne et de la Société coopérative Migros Vaud: nous leur en savons gré. Nous remercions également le Professeur Daniel PAUNIER qui a mis à notre disposition l'infrastructure de l'Institut d'archéologie et d'histoire ancienne de l'Université de Lausanne pour l'élaboration de ce document, ainsi que Me Colin MARTIN qui nous a accepté dans sa collection des Cahiers d'Archéologie Romande.

Toute notre gratitude va de même à Denis WEIDMANN – archéologue cantonal du canton de Vaud – qui nous a confié l'élaboration de ce dossier, ainsi qu'à son technicien de fouilles, Max KLAUSENER, qui a mis à notre disposition les informations qu'il avait minutieusement récoltées lors de l'exploration de ce site.

Nous tenons surtout à remercier le Professeur Paul-Louis PELET et Vincent SERNEELS pour les conseils que, forts de leur expérience de la métallurgie antique, ils nous ont prodigués au cours de la rédaction de ce volume, puis pour la relecture qu'ils en ont assuré: c'est grâce à leurs nombreuses mais toujours amicales observations que cet ouvrage a pu voir le jour. Notre reconnaissance va aussi à Ian G. HEDLEY, du Laboratoire de Pétrophysique du Département de Minéralogie de l'Université de Genève, à Georges BURRI, responsable de la microsonde de l'Institut de Physique Expérimentale de l'Université de Lausanne, de même qu'à Christian ORCEL du Laboratoire Romand de Dendrochronologie à Moudon: tous trois ont répondu avec patience aux nombreuses questions que suscitaient de notre part les résultats des analyses qu'ils avaient effectuées.

Avec celle de Violaine CHAUVET, patiente coordinatrice de leurs diverses contributions, nous ne voudrions oublier de signaler la constante collaboration de tous ceux qui, photographes ou dessinateurs, encore étudiants en cours de formation à l'Institut d'archéologie et d'histoire ancienne, ont réalisé les illustrations de notre ouvrage.


Rances
L'Abergement
Sergey
La Robellaz
Valeyres-
-sous-Rances
Montcherand
Orbe
Agiez
Bofflens
tha

# INTRODUCTION

Le tracé de la liaison autoroutière transjurane N9b de Lausanne à Dijon traverse le lieu-dit *Léchère* (CN 1202 528790/176850) sur le territoire de la commune de Montcherand[1], où des traces d'activités sidérurgiques ont été découvertes lors des sondages pratiqués en novembre 1978 par R. JEANNERET; une intervention archéologique fut nécessaire, de nombreux vestiges étant irrémédiablement condamnés (fig. 1).

Les fouilles se déroulèrent du 15 août au 21 septembre 1983 (D. WEIDMANN, 1984) sous la direction de M. KLAUSENER, du Service des Monuments Historiques du Département des Travaux Publics du Canton de Vaud[2]; elles ont mis au jour les bases de neuf bas-fourneaux et les restes d'une aire de préparation proche de certains d'entre eux; l'absence de produits finis indique clairement que ce n'est pas la transformation complète du minerai qui était pratiquée à cet endroit mais seule la fusion des éponges[3] à partir du minerai sidérolithique local put y être attestée.

L'étude de ce site sera pour nous l'occasion d'une description technique du cycle complet des opérations métallurgiques; elle devrait donner à nos camarades archéologues l'occasion de se familiariser – tout au moins nous espérons que la clarté de notre exposé le permettra – avec la terminologie[4] et le déroulement du traitement du minerai de fer: rendus ainsi attentifs aux diverses étapes d'un processus principalement connu par les scories qu'il a produites, ils n'hésiteront plus à l'avenir à traiter celles-ci avec les précautions stratigraphiques et topographiques ordinairement réservées à la céramique ou à tout autre témoignage archéologique.

Les bas-fourneaux, très démolis, n'apportent en eux-mêmes que peu d'éléments nouveaux, après la présentation que P.-L. PELET (1973) a faite de la sidérurgie antique du pied du Jura vaudois. Mais le recours aux procédés modernes d'analyse, l'application de démarches parfois inédites, peuvent faire de Montcherand un exemple méthodologique pour des fouilles futures.

Une fois ce matériel analysé en appliquant les techniques scientifiques actuelles, démarche assortie de la comparaison avec les méthodes modernes de production du fer, l'établissement de Montcherand pourra être inséré dans le contexte économique de la fin de l'époque romaine et du royaume burgonde au moment où celui-ci passa sous la domination franque.

◀ Fig. 1 Région Orbe-Montcherand - Extrait de la carte au 1:25000. Un carré représente une surface de 1 ha *(Reproduit avec l'autorisation de l'Office fédéral de topographie du 29.4.1991).*

---

[1] Le site de Montcherand se trouve à proximité de la petite ville d'Orbe: connue aujourd'hui pour les importantes mosaïques de sa villa gallo-romaine, elle fut un fréquent lieu de résidence des souverains du second royaume de Bourgogne (888-1032).

[2] L'équipe de fouilles était formée de M. Klausener, N. et T. Elbiali, A. Frost, C. Grand, I. Guignard et J. Morel.

[3] Voir la note ci-dessous concernant les problèmes de terminologie rencontrés.

[4] Au-delà de tous les progrès proprement scientifiques qui restent à réaliser, un des problèmes majeurs qui se posent aux chercheurs est celui de l'homogénéité du vocabulaire utilisé dans l'étude de la métallurgie antique, les mêmes mots ne correspondant pas toujours à des concepts semblables. Nous avons eu recours à la terminologie proposée par V. SERNEELS en ce qui concerne les foyers dans lesquels se dérouleront les diverses opérations sidérurgiques, ainsi que pour leurs produits respectifs. La *réduction* se déroule dans un *bas-fourneau;* lui succède le *raffinage* qui sera pratiqué dans un *bas-foyer;* tandis que le produit de la première opération serait une *éponge,* la *loupe* résulterait du raffinage: cette distinction est d'autant plus notable que la discrimination entre ces deux phases successives n'est pas encore acceptée de tous. Les lingots ou les objets de fer sont fabriqués dans un *foyer de forge.*

Pour une approche générale de la métallurgie dans l'Antiquité, nous renvoyons le lecteur aux ouvrages de H. MOESTA (1986) et R.F. TYLECOTE (1987).

# CHAPITRE I

# LA DÉMARCHE ARCHÉOLOGIQUE

En présence d'un genre de site nouveau pour eux, les archéologues appliquèrent avec succès les méthodes de fouille modernes: de moins en moins destructrices elles s'efforcent de placer les diverses structures en liaison les unes avec les autres. Ainsi M. KLAUSENER nous écrivait-il:

*«La fouille fut pratiquée par décapages successifs qui, par la juxtaposition des relevés de surface permirent d'interpréter l'évolution des structures dans la matrice géologique naturelle. En complément, des banquettes maintenues comme témoins dans l'axe principal du site permirent l'observation stratigraphique des dépôts et structures. Sans l'application de ces méthodes il n'aurait pas été possible de préciser la position chronologique des échantillons prélevés à des fins d'analyse.»*

Il peut être intéressant de relire les précisions que donnait déjà au siècle passé A. QUIQUEREZ (1871, p. 87) pour le Jura bernois et qui seraient valables de nos jours encore quant à la façon d'appréhender les installations de traitement du minerai de fer:

*«Pour cela il ne s'agit que d'observer le mode de dépos (sic) des scories de fer qui ont été constamment jetées en demi cercle, à quelques pas en avant de la porte des fourneaux. On peut donc presque toujours trouver les vestiges de ceux-ci, en fouillant le sol vers le point central de ce demi cercle.*

*Nous nous sommes rarement trompé d'un pied en indiquant la place du creuset même, avant de donner le premier coup de pioche. Si en arrière des scories on remarque une petite butte, celle-ci renferme sans faute le fourneau, dont la porte est tournée vers les scories, et c'est par-là qu'il faut fouiller en commençant à une certaine profondeur, après que, préalablement, on s'est assuré du centre du fourneau, très facile à reconnaître en raison des argiles qui l'entourent.»*

P.-L. PELET (1974, p. 798) avait donné lui aussi d'intéressantes précisions concernant la mise en chantier d'une fouille de ce type particulier:

*«Les excavations carrées ou rectangulaires recommandées pour la fouille d'une insula ou d'un refuge fortifié s'adaptent mal à un atelier sidérurgique implanté dans un talus abrupt. La pente, des rochers souvent, et des centaines de mètres cubes de déchets d'intérêt limité obligent à des compromis. Tant qu'une construction n'est pas repérée, des tranchées étroites (60 cm) suffisent pour la stratigraphie; elles économisent du travail et du temps, limitent les brouettages inutiles. Un quadrillage de la halde détermine si les scories recouvrent des exploitations plus anciennes, et où elles le font. L'emploi de méthodes relativement expéditives ne veut pas dire un déblaiement aveugle...»*

Pour instructif qu'il soit, le rappel de ces deux exemples, c'est bel et bien d'histoire de l'archéologie dont il s'agit, montre que le choix d'une méthode est déterminé par la nature et l'aspect du site: aucun procédé, aussi éprouvé soit-il, ne pourra sans autre être mis en pratique; c'est par des déductions faites à partir de la connaissance du fonctionnement de l'installation que ces spécialistes de la sidérurgique antique ont défini la stratégie de leurs fouilles.

P.-L. PELET (1974, p. 798), concluait en mentionnant presque textuellement les méthodes auxquelles les archéologues eurent par la suite recours à Montcherand:

*«Ces sites, les plus pauvres en éléments traditionnels de datation, sont en fait les plus intéressants, les plus riches pour l'histoire du fer. Mais leur étude doit se fonder sur d'autres méthodes d'approche: physique du carbone, minéralogie, chimie, géobotanique, et surtout sur l'analyse des techniques de production.»*

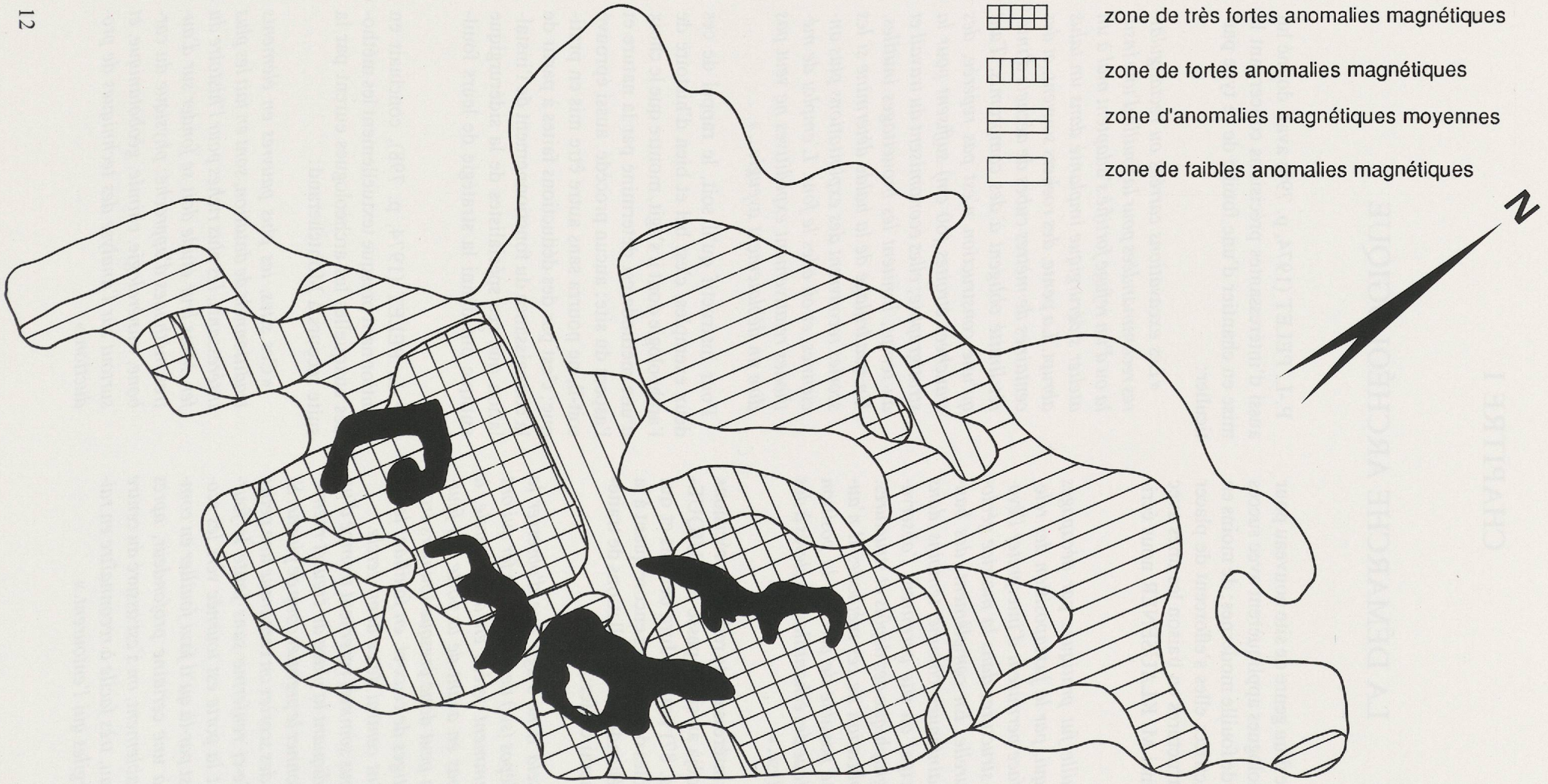



Fig. 2a Relevé géomagnétique par magnétomètre à protons; superposition du résultat de l'intervention archéologique. La valeur mesurée était celle du champ magnétique total *(Dessin MHAVD/IAHA)*.

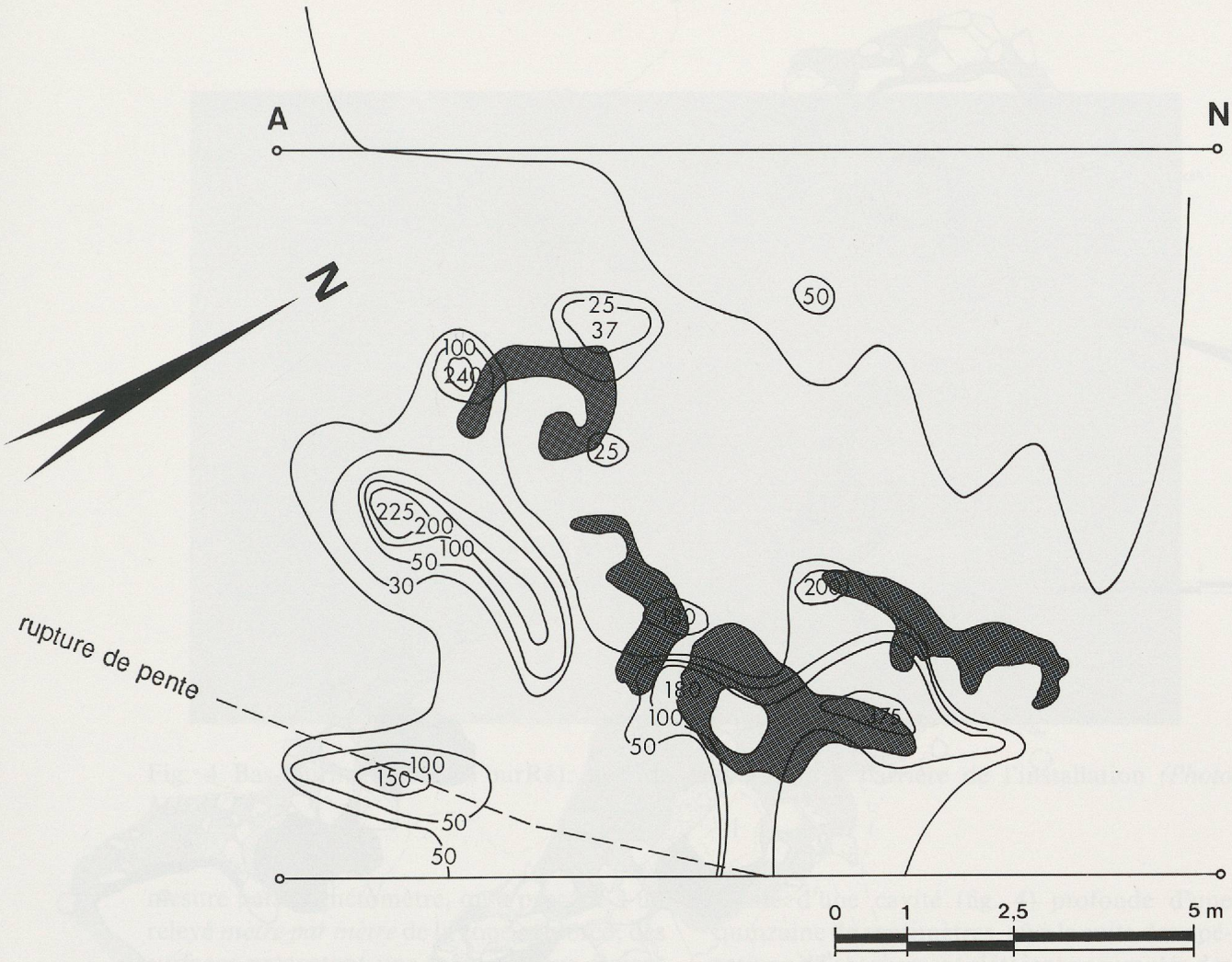



Fig. 2b Relevé géomagnétique par gradiomètre; superposition du résultat de l'intervention archéologique. Bien qu'effectuées après le début des travaux alors qu'une partie des scories avait été évacuée, les mesures confirment dans l'ensemble les résultats obtenus à l'aide du magnétomètre à protons. Les relevés sont faits en partant de la ligne A-N, les valeurs indiquées sont celles du gradient vertical du champ magnétique en Nanotesla/m *(Dessin I. G. Hedley/IAHA).*

Ainsi le site de Montcherand, découvert au cours des sondages préliminaires sur le tracé de l'autoroute, a-t-il été d'abord reconnu par prospection magnétique. Malgré le peu de matériel archéologique que cela a permis de mettre au jour, la fouille a pu être datée par examen dendrochronologique des charbons de bois utilisés pour le chauffage des bas-fourneaux ou, dans certains cas, à partir d'analyses du $C^{14}$. Des mesures de la rémanence magnétique des bas-fourneaux furent pratiquées et les diverses essences de bois identifiées.

Par les analyses minérales auxquelles elle donna lieu, cette étude est à l'origine d'un programme de recherches qui a pu être étendu à l'ensemble du matériel sidérurgique du canton de Vaud[5].

*1. Localisation du site*

Une exploration du périmètre fut effectuée par prospection géomagnétique à l'aide d'un *magnétomètre à protons:* s'il signale la présence d'une masse magnétique, ce dispositif n'est toutefois d'aucun apport pour son identification, qui correspondra à des dépôts de minerai, à des amas de scories ou, dans une moindre mesure, aux bas-fourneaux eux-mêmes. Dans le cas de Montcherand, les zones à fort gradient

[5] Cette dernière partie sera exploitée dans le cadre du travail de doctorat de V. SERNEELS, actuellement en cours grâce à un subside de recherche en sciences humaines et sociales du Fonds National Suisse de la Recherche Scientifique (1.565.87) intitulé *Recherches archéométriques sur la sidérurgie antique en Suisse romande.*

Fig. 3 Plan d'ensemble des bas-fourneaux. Voir aussi le dépliant en fin de volume *(Dessin MHAVD)*.

magnétique se sont avérées être celles d'évidement des bas-fourneaux, les scories s'entassant devant ceux-ci lors des vidanges successives: souvent, quand un bas-fourneau se trouvait sur un point aux caractéristiques magnétiques favorables, c'est qu'il était construit sur la surface de vidange de l'installation qui l'avait précédé. Conduite par S. GILLIERON de l'*Institut de Géophysique de la Faculté des Sciences de l'Université de Lausanne*, cette campagne de prospection magnétique porta sur 56 profils totalisant 2100 mesures et couvrant une surface de plus de 2000 m²: les anomalies (fig. 2a) semblaient indiquer deux bas-fourneaux ou groupes de bas-fourneaux distincts[6].

A des fins de comparaison, la localisation des masses magnétiques présentes a été effectuée par un autre procédé – à l'aide d'un *gradiomètre* (fig. 2b) cette fois-ci – par I.G. HEDLEY[7].

Le principe adopté pour la visualisation des résultats diffère d'un cas à l'autre. Lors de la

---

[6] *«... nous avons constaté que les anomalies, à part une petite zone située sur les profils n° 3, 4 et 5 (...), et probablement due à un prélèvement (anomalies moyennes), se situent toutes dans la partie N-E de la zone prospectée (...). Elles couvrent une surface d'environ 300 m². D'autres anomalies (faibles) apparaissent, mais sont causées par les fils de fer situés au sud le long du chemin (...). En conclusion, nous pensons (...) que les fours se trouvent très probablement dans les secteurs indiqués »très fortes anomalies« ».* Extrait du rapport du 10 juillet 1979.

[7] *Laboratoire de Pétrophysique du Département de Minéralogie de l'Université de Genève.*

Fig. 4 Bas-fourneau I (ex FourRé): aire de préparation à l'arrière de l'installation *(Photo MHAVD)*.

mesure par magnétomètre, on a procédé à un relevé *mètre par mètre* de la zone explorée; des surfaces présentant une même valeur étaient ensuite hachurées sur un plan. Dans le cas du gradiomètre, la mesure est prise en continu le *long des parallèles* parcourues, et les points de valeur identique sont reliés par des courbes de niveau; bien évidemment, ces données permettraient une présentation semblable à la précédente.

*2. Description du site* (fig. 3 et tabl. 1)

Les neuf bas-fourneaux se répartissent sur une surface de 300 m² sur la bordure orientale d'une terrasse fluvio-glaciaire culminant à 580 mètres. L'essentiel des niveaux archéologiques était constitué par près de 300 m³ de scories mêlées de débris de bas-fourneaux. Les déblais provenant de l'exploitation et de la destruction des cuves ont été rejetés sur les restes des bas-fourneaux voisins, ce qui a rendu très difficile l'établissement d'une chronologie des diverses installations (fig. 7). Il ne subsiste malheureusement que les bases des bas-fourneaux: leur fond était creusé directement dans les graviers en dessous du niveau desquels descendait aussi une partie de la paroi.

A côté de deux des installations, une aire de préparation a été mise en évidence, sous la forme d'une cavité (fig. 4) profonde d'une quinzaine de centimètres, où à la suite des opérations de chargement s'étaient accumulés des restes de charbon de bois et de minerai de fer; la surface de cette structure est de 3 m² pour le bas-fourneau I, et de 1,8 m² pour le bas-fourneau IV. Le fond de ces fosses présentait des traces de recreusement.

Une légère rampe permettait sans doute de s'approcher du gueulard pour le chargement du bas-fourneau ou pour en achever la construction; c'est aussi une des raisons pour lesquelles il était avantageux de placer de telles installations sur le flanc d'un talus ou d'une terrasse naturelle, la position dominante en facilitant l'accès (fig. 5) et les diverses exploitations se succédant ensuite sur le flanc du coteau.

Les trous de poteau mis au jour nous font penser que certains des bas-fourneaux étaient coiffés d'une construction légère; mais il n'est pas exclu que ces aménagements soient d'époque postérieure, correspondant, qui sait, à un enclos délimitant un pâturage.

Quatre des bas-fourneaux avaient fonctionné isolément (I, III – III' le remplaçant ensuite – IV et Va), d'autres étaient groupés par deux (IIa-IIb et Vb-Vc). A l'exception de IIa et de III dont la cuve avait été complètement refaite, tous les bas-fourneaux révélaient au moins

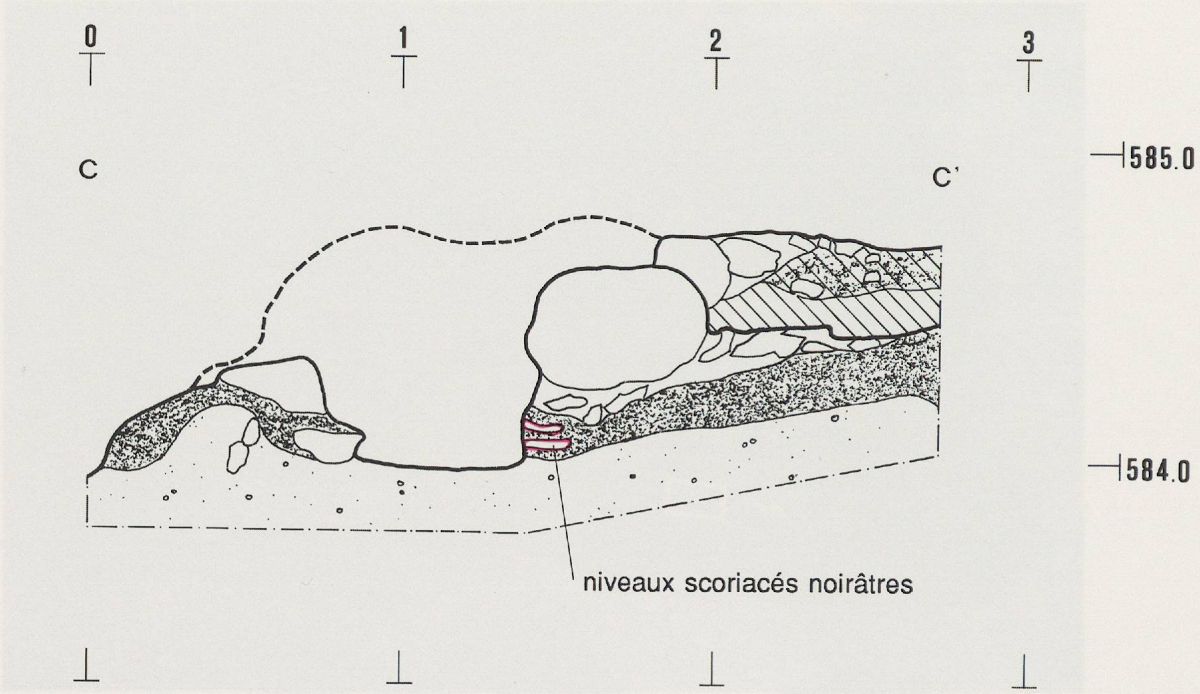
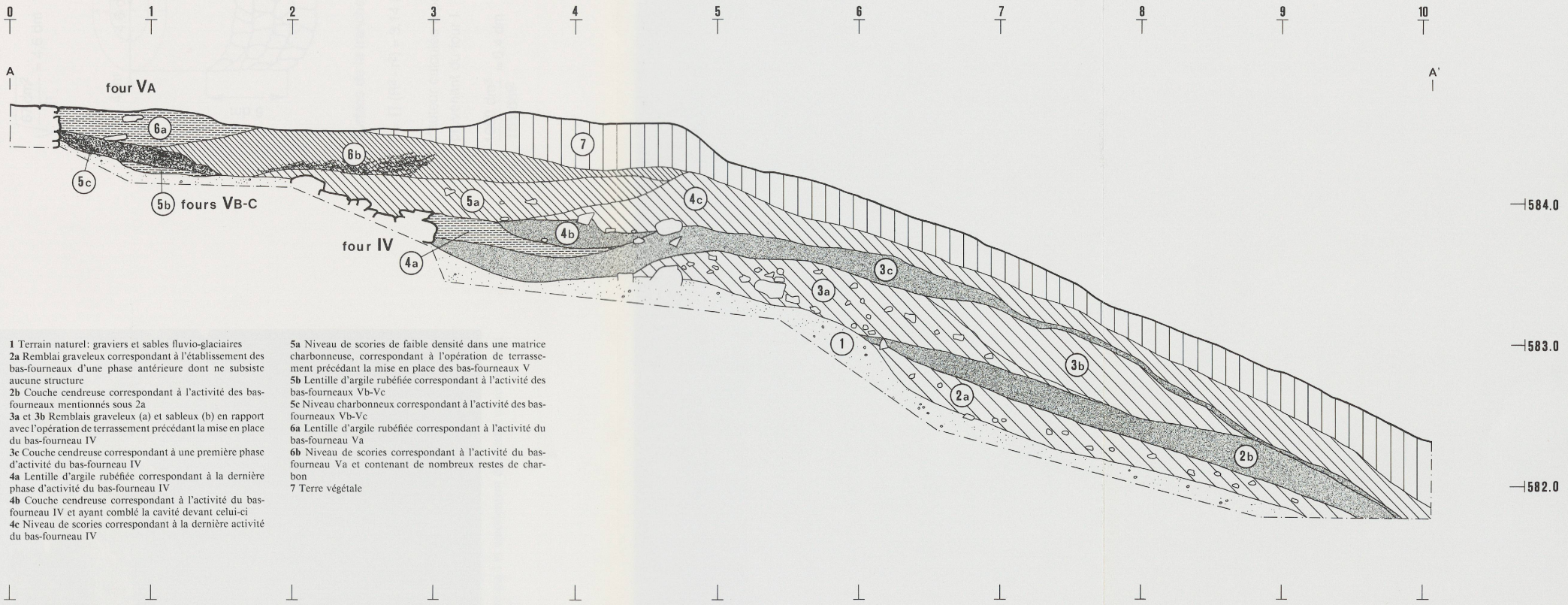



Fig. 5 Coupe C-C' à travers le bas-fourneau I *(Dessin MHAVD/IAHA).*

Fig. 6 Paroi de bas-fourneau avec l'empreinte des doigts ayant modelé l'argile. Echelle 1:2 *(Photo MHAVD).*




**1** Terrain naturel: graviers et sables fluvio-glaciaires
**2a** Remblai graveleux correspondant à l'établissement des bas-fourneaux d'une phase antérieure dont ne subsiste aucune structure
**2b** Couche cendreuse correspondant à l'activité des bas-fourneaux mentionnés sous 2a
**3a** et **3b** Remblais graveleux (a) et sableux (b) en rapport avec l'opération de terrassement précédant la mise en place du bas-fourneau IV
**3c** Couche cendreuse correspondant à une première phase d'activité du bas-fourneau IV
**4a** Lentille d'argile rubéfiée correspondant à la dernière phase d'activité du bas-fourneau IV
**4b** Couche cendreuse correspondant à l'activité du bas-fourneau IV et ayant comblé la cavité devant celui-ci
**4c** Niveau de scories correspondant à la dernière activité du bas-fourneau IV
**5a** Niveau de scories de faible densité dans une matrice charbonneuse, correspondant à l'opération de terrassement précédant la mise en place des bas-fourneaux V
**5b** Lentille d'argile rubéfiée correspondant à l'activité des bas-fourneaux Vb-Vc
**5c** Niveau charbonneux correspondant à l'activité des bas-fourneaux Vb-Vc
**6a** Lentille d'argile rubéfiée correspondant à l'activité du bas-fourneau Va
**6b** Niveau de scories correspondant à l'activité du bas-fourneau Va et contenant de nombreux restes de charbon
**7** Terre végétale

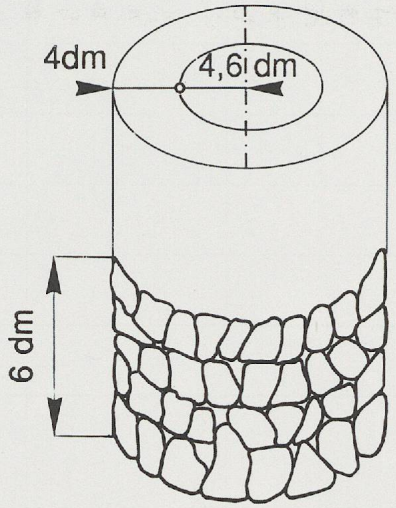
*Fig. 7 Coupe NO/SE au travers du site - Stratigraphie A-A' (Dessin MHAVD/IAHA).*

Fig. 8a Bas-fourneau I et empilement de pierres correspondant *(Photo MHAVD)*.

Rayon du fond du four

$$\sqrt{\frac{67\ dm^2}{\Pi}} = 4{,}6\ dm$$

Fig. 8b Calcul du volume reconstitué à partir de sa forme géométrique *(Dessin IAHA)*.




Surface de la tranche

$$S = \Pi\ (R^2 - r^2) = 3{,}14\ (8{,}6^2 - 4{,}6^2) = 166\ dm^2$$

Hauteur calculée à partir des pierres éparses provenant du four I

$$\frac{1060\ dm^3}{166\ dm^2} = 6{,}4\ dm$$

| Bas-fourneau | I | IIa | IIb | III | III' | IV | Va | Vb | Vc |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Position des bas-fourneaux** | | | | | | | | | |
| Bas-fourneau seul | × | | | × | × | × | × | | |
| Bas-fourneaux groupés | | × | × | | | | | × | × |
| Plusieurs utilisations | × | | × | | × | × | × | × | × |
| **Matériaux** | | | | | | | | | |
| Scories en réemploi | | | | | × | × | × | | |
| **Aspect extérieur** | | | | | | | | | |
| Présence d'une porte | × | | (×) | | × | (×) | | (×) | (×) |
| **Aspect intérieur** | | | | | | | | | |
| Fond de gravier | × | × | × | | × | × | × | × | × |
| Restes d'argile sur le fond | | | | (×) | | × | × | × | |
| Parois verticales | × | | | | × | × | | | |
| Parois inclinées | | × | × | | | | | | |
| **Revêtement interne** | | | | | | | | | |
| Un seul glaisage | | × | | | × | | × | | |
| Plusieurs glaisages | × | | × | | | | | × | × |
| **Scories sur les parois** | | | | | | | | | |
| Forte scorification | | | × | | × | | × | × | |
| Scorification moyenne | × | × | | | | | | | |
| Scories sous le glaisage | × | | × | | | | × | × | |
| **Dimensions des bas-fourneaux** | | | | | | | | | |
| Epaisseur des parois ≥ 40 cm[1] | × | | × | × | × | × | × | × | × |
| Hauteur conservée (cm) | 60 | 58 | 55 | | 34 | 42 | 34 | 15 | 30 |
| Volume conservé ($m^3$) | 0,4 | 0,2 | 0,2 | | 0,1 | 0,2 | 0,1 | | 0,1 |
| Surface du fond ($dm^2$) | 67 | 35 | 42 | 25 | 40 | 50 | 50 | –[2] | 40 |
| Volume des pierres ($m^3$)[3] | 1,06 | 0,5 | | 0,6 | | | 0,25 | | |
| Fragments de tuyères | × | | | | × | | | | |

Tabl. 1 Tableau descriptif des bas-fourneaux de Montcherand

[1] Seul IIa a des parois épaisses de moins de 40 cm.

[2] La mesure de la surface du fond du bas-fourneau Vb n'a pas été possible, l'avant de celui-ci s'étant effondré.

[3] Une valeur minimale de ce volume est estimée par empilement des pierres provenant d'une même structure (fig. 8a et b): le bas-fourneau I est le seul n'ayant eu qu'une phase d'utilisation et pour lequel cette valeur a pu être calculée: à partir de celle-ci nous avons estimé la hauteur de l'ensemble, en assimilant sa forme à celle d'un tube cylindrique dont auraient été connus la surface intérieure, l'épaisseur et le volume, valeurs qui sont reportées dans le tableau: nous aurons une hauteur totale (hauteur conservée + hauteur calculée) d'*au moins 124 cm,* qui correspond d'ailleurs aux estimations de P.-L. PELET (1973, p. 124, tabl. V).

deux phases d'utilisation; visibles en stratigraphie pour le four IV, ailleurs elles étaient caractérisées par des parois scoriacées recouvertes par un nouveau glaisage, ou par une réfection directement sur le premier revêtement comme pour Vc. Des réparations de cette nature étaient aussi attestées sur les bas-fourneaux I, IIb et Vb (fig. 6) où l'apport d'argile colmatait des cavités qui s'étaient formées durant l'utilisation précédente; le glaisage, plaqué et lissé à la main, recouvrait totalement ou partiellement, selon les cas, les parois des cuves. Verticales dans la partie basse, plus haut celles-ci semblaient s'incliner vers l'extérieur, alors que dans un seul cas l'épaisseur de la paroi était inférieure à 40 cm.

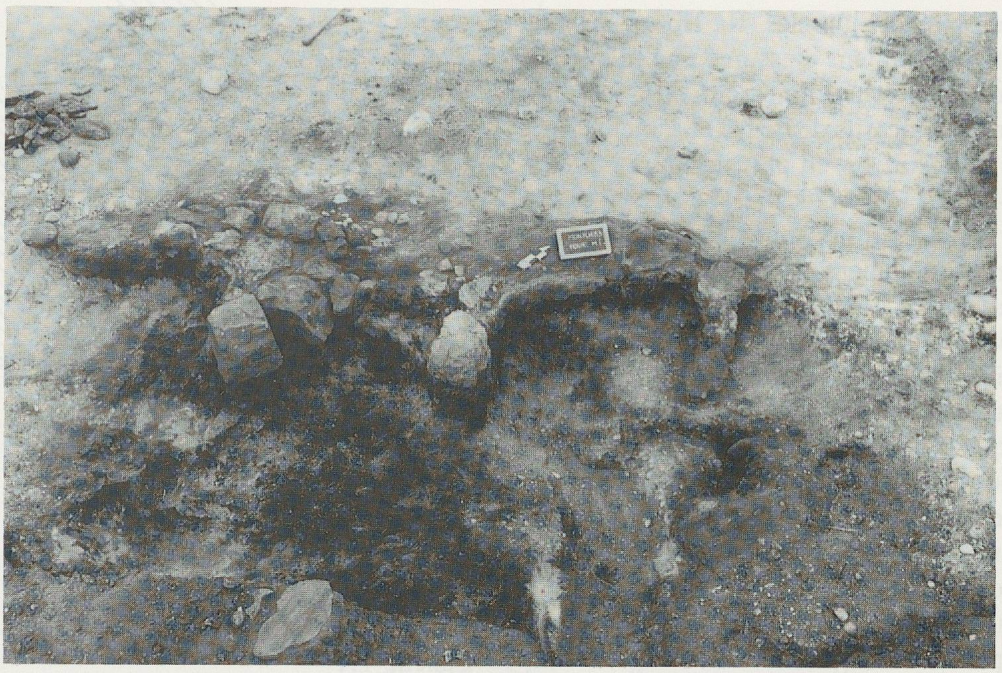


Fig. 9 Bas-fourneaux Va à Vc (ex FourMI) encastrés dans la pente *(Photo MHAVD).*

La scorification variable sur les parois des cuves serait significative du fonctionnement plus ou moins satisfaisant: P.-L. PELET[8], qui a assisté aux expériences faites en 1978 à Vordernberg par G. SPERL, indique que l'épaisseur de la couche de scories à l'intérieur du bas-fourneau est *inversement proportionnelle* à la bonne marche de l'installation: entre deux cuissons successives l'épaisseur des scories pouvait même diminuer. Selon ce critère, le bas-fourneau Vc aurait fonctionné de façon satisfaisante, suivi de IIa et I, ce dernier étant le plus récent du site.

Tous encastrés dans le talus (fig. 9), ces bas-fourneaux sont constitués de pierres morainiques, avec une dominance gneiss-schiste, liées avec de la glaise, provenant des flancs de la colline dans laquelle ils sont implantés; dans trois cas (III', IV et Va) des scories paraissent avoir été utilisées pour la construction des parois; leur forme extérieure présente l'aspect d'un rectangle aux angles arrondis.

Le fond des foyers était formé par les graviers morainiques cuits et fusés, dans quelques cas y subsistait une partie du revêtement en argile (IV, Va et Vb); une observation semblable a pu être faite à Bliesbruck (Moselle), où les fonds des foyers étaient soit implantés dans le sol naturel, soit garnis de sables alluvionnaires (C. FORRIERES et alii., 1987, p. 40). Si dans notre cas la forme exacte des fonds ne peut généralement pas être reconstituée, elle reprend dans les grandes lignes le pourtour extérieur des structures, certains bas-fourneaux présentant une entrée décentrée par rapport au côté qu'elle occupe, tandis que dans d'autres des blocs de pierre forment les montants de la porte[9].

A part le bas-fourneau III, ces installations ont des dimensions relativement fortes si nous comparons la surface de leur fond à celles mesurées par P.-L. PELET (1973, p. 124).

La présence de fragments d'une tuyère (fig. 10a et b) d'un diamètre intérieur de 3,4 cm indique une ventilation artificielle, l'orifice étant trop faible pour l'entrée du vent[10]. Les vents dominants qui favorisaient le tirage des installations et assuraient l'évacuation de la fumée auraient aussi permis le fonctionnement de bas-fourneaux à tirage naturel, n'y produisant toutefois une température suffisante que lorsqu'ils mesuraient plus de deux mètres de haut.

---

[8] Entretien du 24 janvier 1991.

[9] Voir le catalogue des bas-fourneaux, pp. 23-29.

[10] Dans le cas d'une ventilation naturelle, le diamètre variera entre 5 et 8 cm (entretien du 24 janvier 1991 avec P.-L. PELET).

Les ensembles jumelés IIa-IIb et Vb-Vc (fig. 11) permettaient d'assurer une meilleure continuité de fonctionnement, ils seraient peut-être significatifs de deux traitements successifs: à Bellaires I, en plus de fours jumelés I-II (P.-L. PELET, 1973, p. 91) et III-IV (ibid. p. 94)[11] d'autres fours sont dédoublés par un foyer vraisemblablement destiné au recuit des éponges (ibid. p. 161) placé à gauche de la cuve qui servait à la réduction, les axes des entrées respectives faisant alors un angle de 90° entre eux (fours XV et XI, XVI et XII).

Lorsqu'elles avaient une telle orientation ces cuves pouvaient correspondre à un geste déterminé de l'artisan[12], mais il est difficile de proposer une même opération à Montcherand, où les restes du bas-fourneau Vb ne suffisent pas pour en positionner avec exactitude l'axe de la porte: partant de la courbe de niveau 584.2, immédiatement en amont des structures Vb et Vc, leurs axes seraient même divergents. Ces considérations topographiques ne s'opposent certes pas à une utilisation en alternance dans le cadre d'un cycle sidérurgique préétabli au cours duquel il fallait avoir le second four prêt, à la bonne température au moment voulu. La scorification différente d'un groupe de fours à l'autre[13] suggère plutôt l'interchangeabilité des cuves (P.-L. PELET, 1973, p. 159) lorsque l'une aurait été endommagée au cours de l'extraction de l'éponge précédente: la réfection d'un four momentanément hors service tandis que le voisin continuait à fonctionner aurait permis le maintien d'une cadence soutenue de production[14].

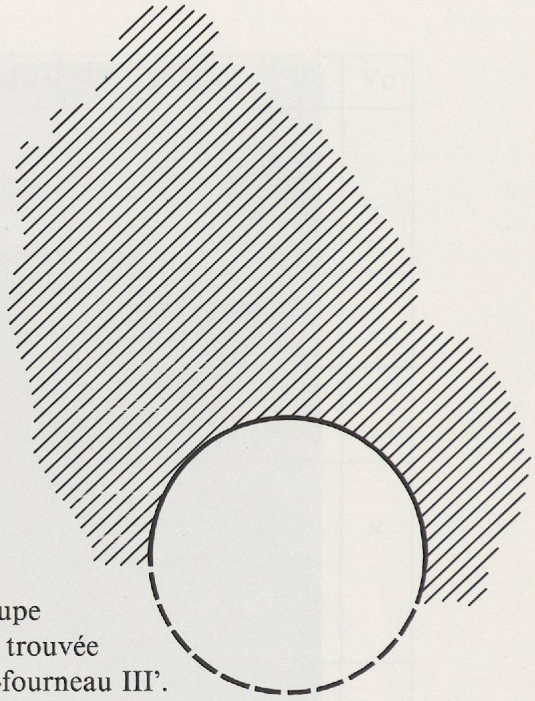



Fig. 10a Coupe de la tuyère trouvée près du bas-fourneau III'. Echelle 1:1 *(Dessin MHAVD).*

[11] A Bellaires III les cuves XIX et XX (P.-L. PELET, 1973, p. 98) présentent aussi cette disposition.

[12] La nature de ce geste reste naturellement difficile à préciser: l'artisan sort-il l'éponge d'une cuve pour la placer aussitôt dans l'autre? A ce sujet, voir P.-L. PELET (à paraître).

[13] Alors qu'à Montcherand un fort dépôt de scories est tour à tour visible sur l'une ou l'autre des cuves d'un même groupe, à Bellaires – fours III et IV (P.-L. PELET, 1973, p. 95 et fig. 46A) et XIX et XX (ibid. p. 100 et fig. 50) – c'est les deux fois la cuve de gauche qui est la plus scoriacée (fig. 12).

[14] D'après P.-L. PELET (entretien du 24 janvier 1991) qui a participé à la reconstitution de plusieurs opérations sidérurgiques, les conditions de travail dans un environnement particulièrement torride n'auraient pas été un obstacle majeur.

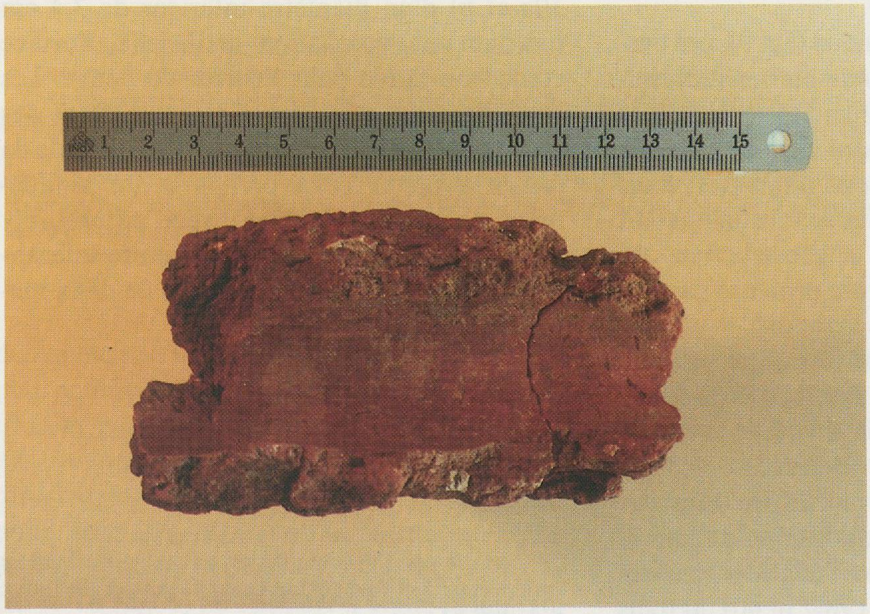


Fig. 10b Fragment de tuyère *(Photo MHAVD).*

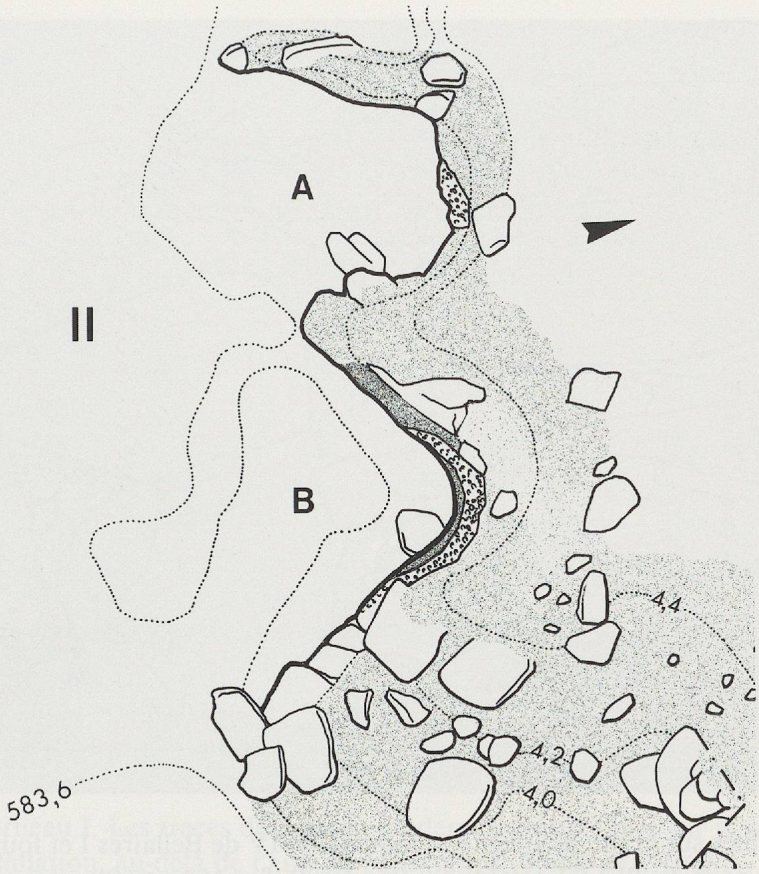
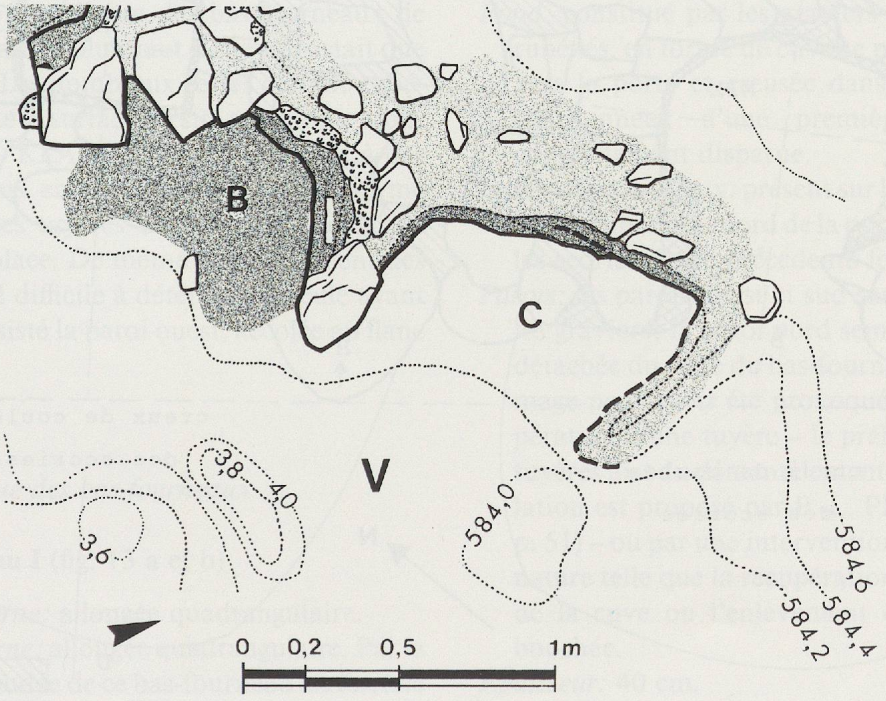



Fig. 11 Bas-fourneaux IIa-IIb et Vb-Vc *(Dessin MHAVD/IAHA).*



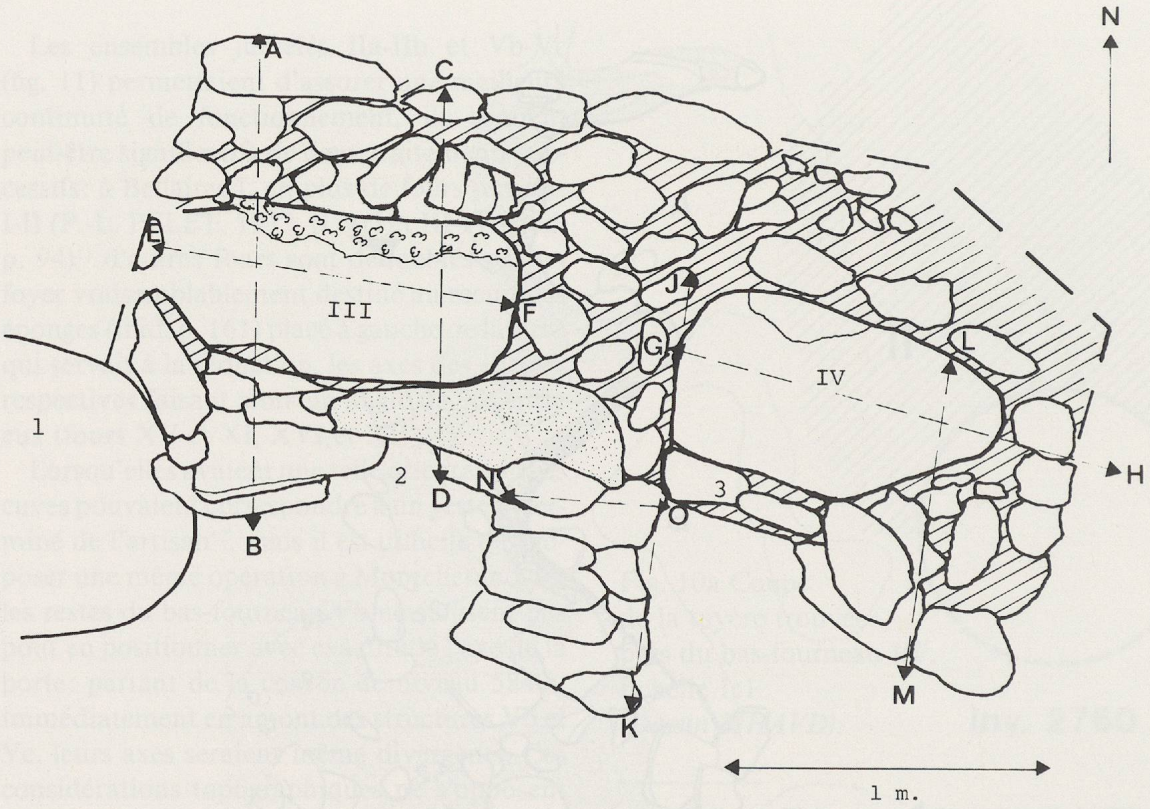



Fig. 12 Fours doubles sur le site de Bellaires; fours III et IV de Bellaires I et fours XIX et XX de Bellaires III, tirés de P.-L. PELET (1973, pp. 95 et 100, fig. 46A et 50).

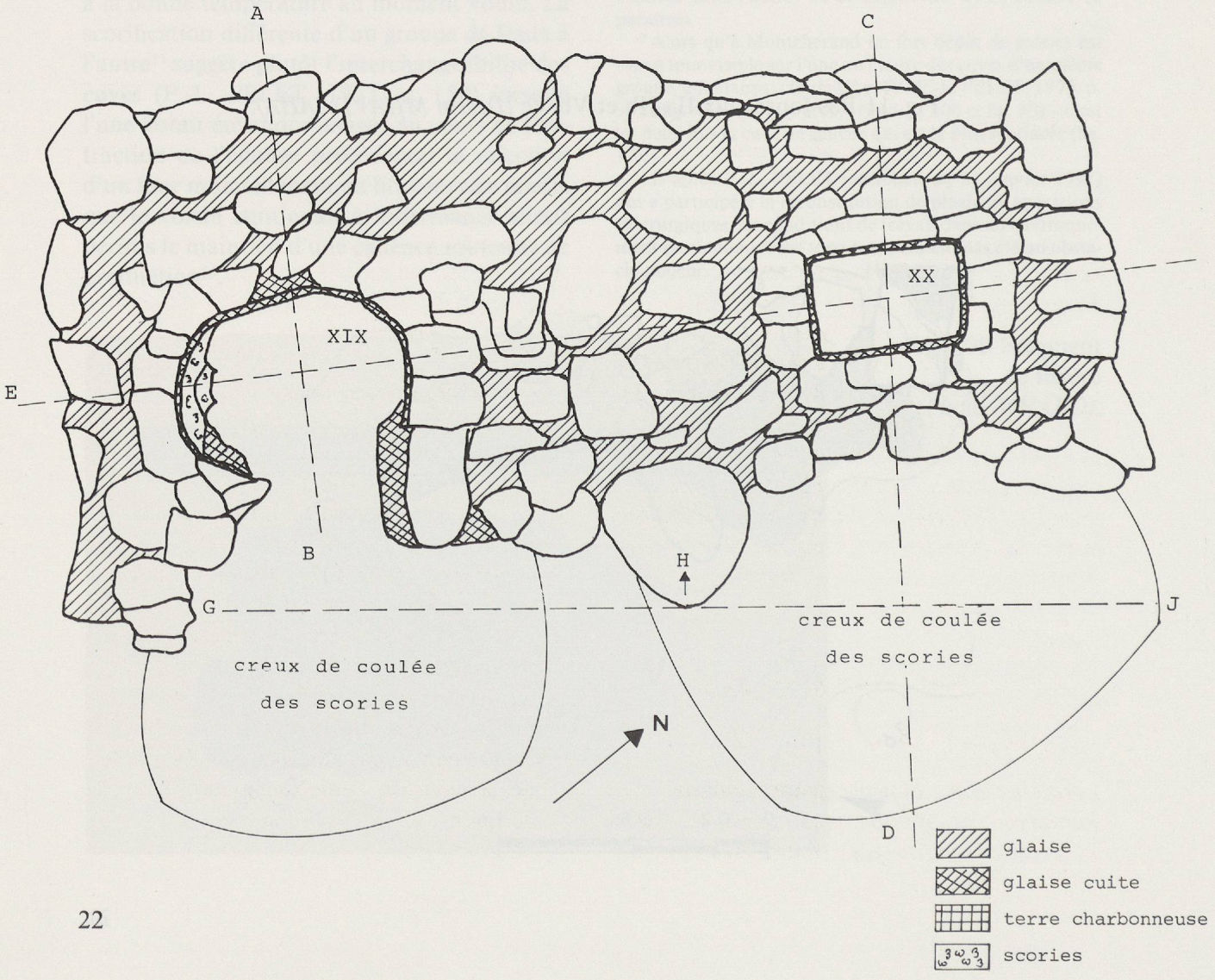


Fig. 13a Bas-fourneau I. Les traces de labours modernes sont visibles sur la gauche du cliché, à l'arrière de l'installation, au-delà de l'aire de préparation *(Photo MHAVD).*

En l'absence de plus de précisions, au cours de notre étude nous conserverons la désignation de bas-fourneaux même pour les cuves jumelées de Montcherand.

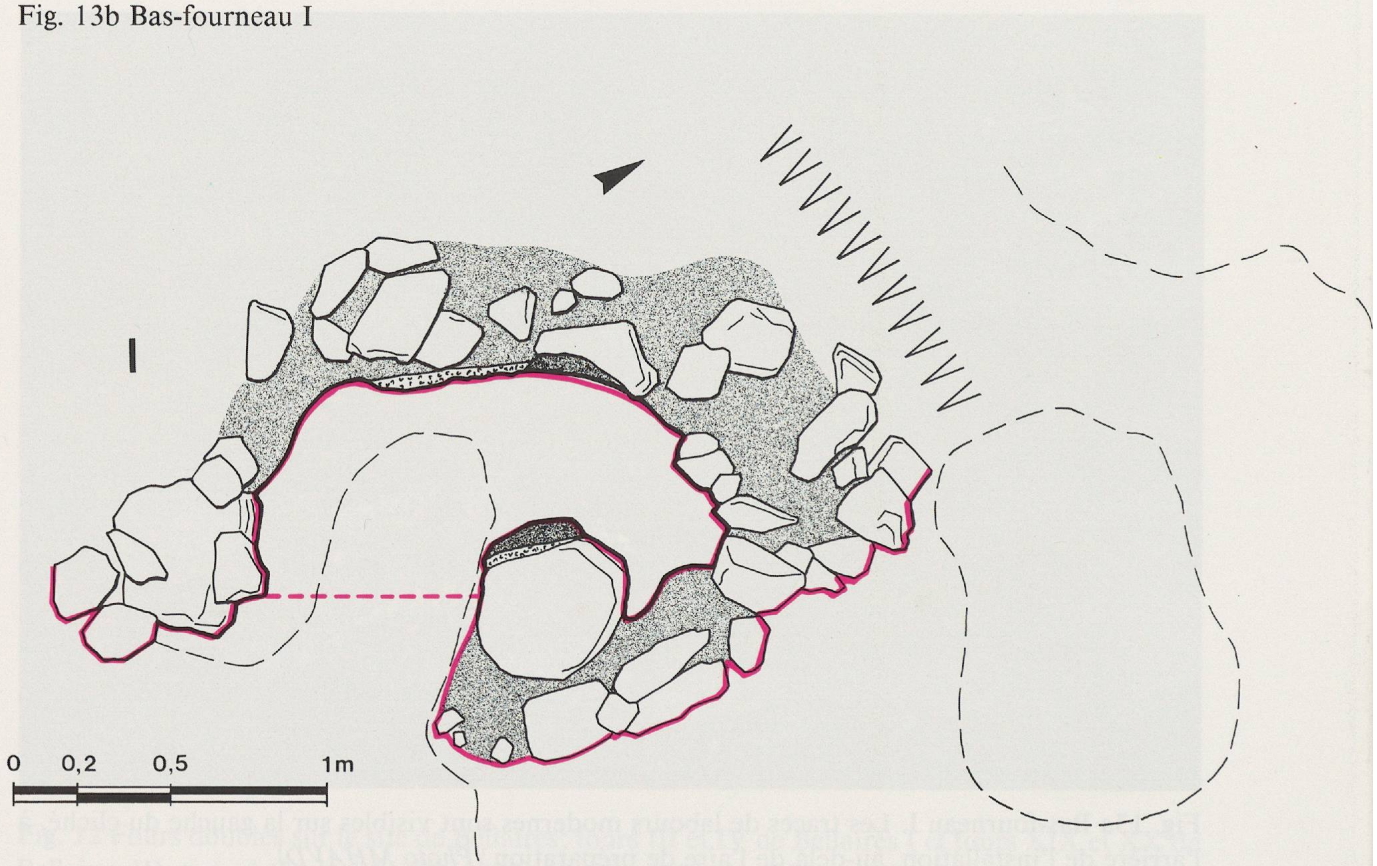
Il convient toutefois de souligner l'état de conservation médiocre des bas-fourneaux de Montcherand: le plus haut (I) ne subsistait que sur 60 cm. Les nombreux restes d'argile rubéfiée sur toute la surface du site permirent néanmoins à M. KLAUSENER de conclure à des constructions en élévation, ce que confirme l'absence des tuyères dans les parties basses encore en place. De même l'emplacement des portes fut-il difficile à déterminer, seule ayant parfois subsisté la paroi ouest, accolée au flanc du coteau.

### *3. Catalogue des bas-fourneaux*

**Bas-fourneau I** (fig. 13 a et b)

*Forme externe:* allongée quadrangulaire.
*Forme interne:* allongée quadrangulaire. Par la forme coudée de ce bas-fourneau les ferriers peuvent avoir essayé de contrôler les effets du vent en protégeant une partie de la cavité: une erreur de construction paraît peu plausible et on voit mal comment les artisans auraient pu exploiter cette configuration particulière.
*Fond:* constitué par les graviers morainiques rubéfiés, en forme de cuvette plus profonde vers la porte et creusée dans les niveaux charbonneux d'une première structure complètement disparue.
*Revêtement argileux:* présent sur la paroi ouest et sur le montant nord de la porte il recouvre les scories d'une précédente fournée.
*Parois:* les parois ouest et sud sont posées sur les graviers; la paroi nord semble avoir été détachée du reste du bas-fourneau; ce dommage peut avoir été provoqué par la récupération d'une tuyère – le prélèvement des tuyères lors du démantèlement d'une installation est proposé par P.-L. PELET (1973, p. 51) – ou par une intervention d'une autre nature telle que la récupération du contenu de la cuve ou l'enlèvement d'une tuyère bouchée.
*Epaisseur:* 40 cm.

Fig. 13b Bas-fourneau I




*Porte:* dans la paroi est, d'une largeur de 70 cm, elle est matérialisée par deux grosses pierres qui en supportaient les montants; elles reposaient sur un niveau charbonneux qui contenait des lentilles d'argile rubéfiée et dans lequel a été trouvé un tesson préhistorique (inv. 2735).

*Remplissage:* composé en alternance de scories, de couches charbonneuses contenant des morceaux de minerai et des cendres, et recouvert par un niveau de pierres et d'argile rubéfiée provenant de la destruction des superstructures.

*Chronologie relative:* ce bas-fourneau étant situé le plus haut dans le talus, on peut admettre qu'il appartient à la dernière phase d'exploitation du site. C'est dans sa zone de préparation que furent retrouvés les tessons haut-médiévaux (inv. 2719). Sa paroi est repose sur des couches charbonneuses, deux niveaux scoriacés noirâtres apparaissent dans le profil (fig. 5), ce qui confirme un réaménagement sur une structure antérieure.

**Bas-fourneau IIa** (fig. 14a et b)

*Forme externe:* quadrangulaire.

*Forme interne:* quadrangulaire.

*Fond:* constitué par les graviers morainiques rubéfiés.

*Revêtement argileux:* il ne subsistait ici qu'une partie de la cuve.

*Parois:* creusées dans les graviers du talus, les parties subsistantes sont faiblement scoriacées; la paroi sud manque, de même que la majeure partie de la liaison avec le bas-fourneau IIb.

*Epaisseur:* inférieure à 40 cm.

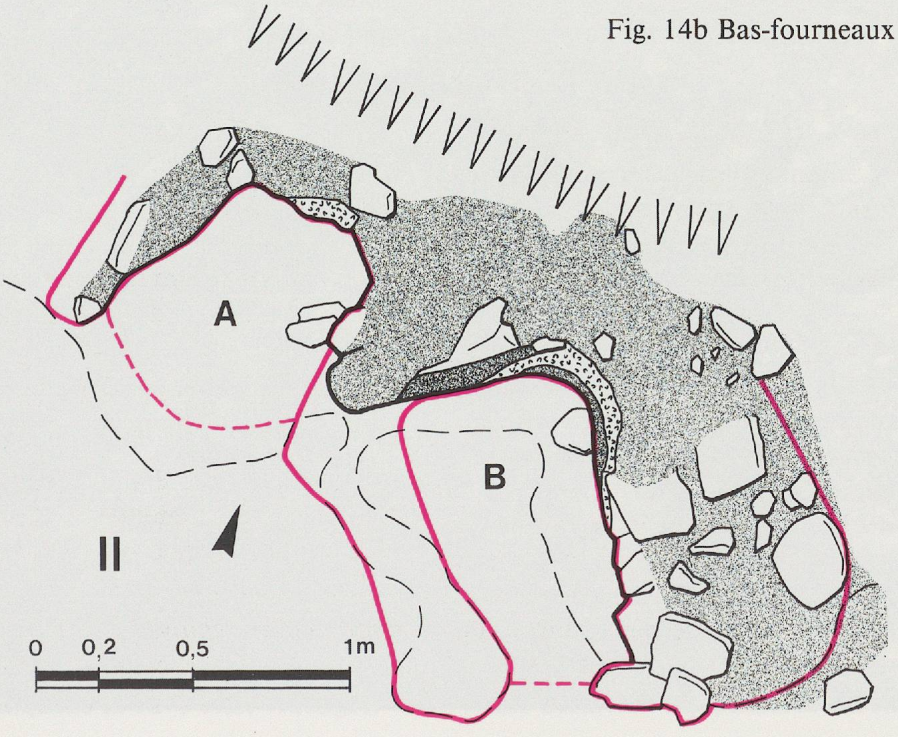
*Porte:* détruite.

*Remplissage:* formé de scories, couches charbonneuses et cendres, sur lesquelles étaient tombées l'argile rubéfiée et les pierres de la superstructure.

*Chronologie relative:* contemporain du bas-fourneau IIb, il pourrait avoir été construit après l'abandon de III'.

Fig. 14a Bas-fourneaux IIa et IIb vus depuis le nord-ouest *(Photo MHAVD)*.

Fig. 14b Bas-fourneaux IIa et IIb



**Bas-fourneau IIb** (fig. 14a et b)

*Forme externe:* quadrangulaire.
*Forme interne:* quadrangulaire.
*Fond:* constitué par les graviers morainiques rubéfiés.
*Revêtement argileux:* présent sur la paroi nord-est, il recouvrait une couche de scories, ce qui impliquerait deux phases d'utilisation au moins.
*Parois:* la structure est adossée au bas-fourneau III' vers le nord-est: la paroi glaisée est légèrement inclinée vers l'extérieur. Epaisseur supérieure à 40 cm.
*Porte:* bien que ses montants n'aient laissé aucune trace, elle pourrait se situer dans la partie est, l'emplacement du seuil y serait en effet représenté par une épaisse couche de scories oxydées.
*Remplissage:* semblable à celui du bas-fourneau IIa.
*Chronologie relative:* contemporain du bas-fourneau IIa; dans la paroi nord-est ont été relevés des niveaux charbonneux pris dans l'argile et les pierres: ils pourraient appartenir au bas-fourneau III' et seraient ainsi un indice situant la construction de l'ensemble IIa-IIb après la deuxième phase de III.

**Bas-fourneau III-III'** (fig. 15a et b)

*Forme externe:* trapézoïdale.
*Forme interne:* ovale à circulaire.
*Fond:* graviers morainiques plus ou moins rubéfiés à l'endroit où le glaisage de la première phase a été curé.
*Revêtement argileux:* présent au sud ainsi que sur la paroi nord qui est recouverte de scories.
*Parois:* verticales, les éléments les composant sont descellés.
*Porte:* bien matérialisée par deux glaisages présentant un arrondi sur les montants, elle s'ouvre à l'ouest; largeur: 40 cm.

Fig. 15a Bas-fourneaux III' et IV vus depuis le sud-ouest *(Photo MHAVD).*

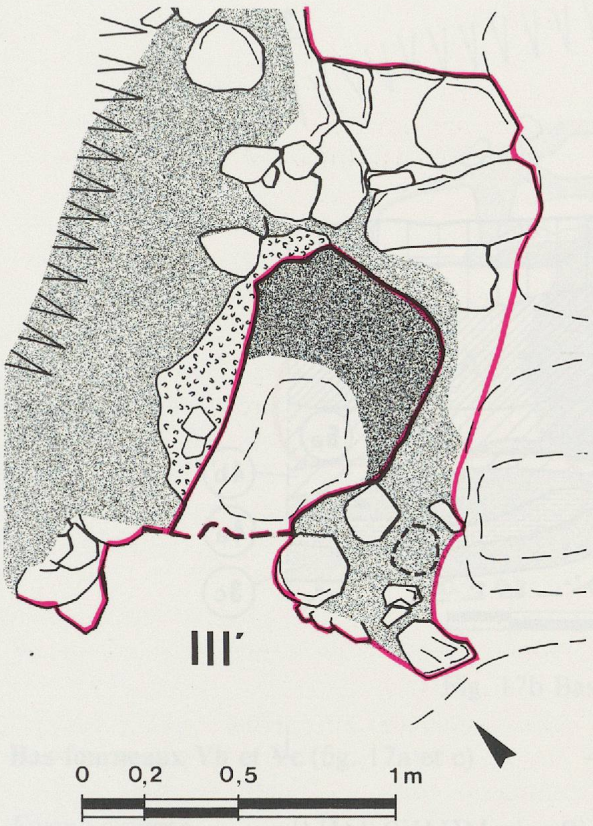



Fig. 15b Bas-fourneau III'

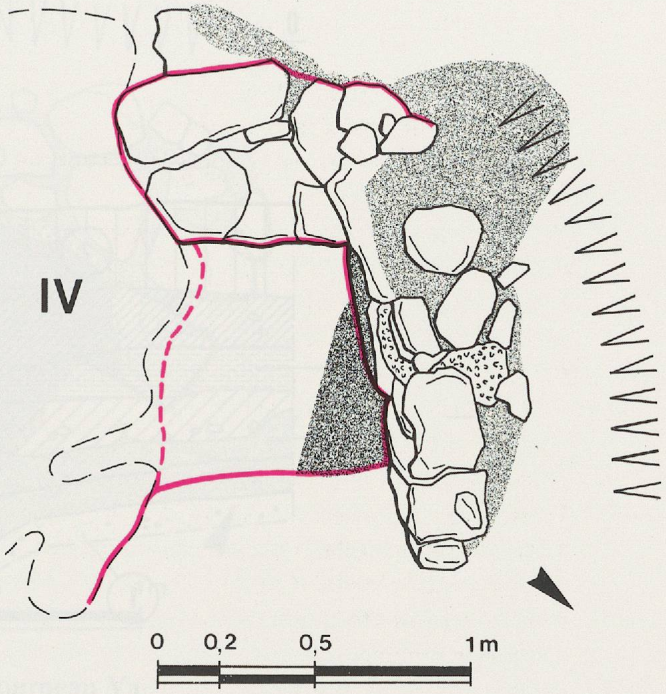



Fig. 15c Bas-fourneau IV

*Remplissage:* avant d'être remplacé par le groupe IIa-IIb le bas-fourneau III' aurait été vidé, ou pour le moins passablement perturbé à cette occasion.

*Chronologie relative:* se situe avant le groupe IIa-IIb.

La démolition de ce bas-fourneau contenait de nombreux morceaux de tegulae, tandis qu'à proximité furent découverts trois fragments d'une tuyère. La deuxième phase se distingue par un volume interne plus grand, la forme tendant à s'arrondir.

**Bas-fourneau IV** (fig. 15a et c)

*Forme externe:* quadrangulaire.

*Forme interne:* quadrangulaire.

*Fond:* présente une petite surface d'argile cuite qui pourrait aussi être le vestige d'une étape antérieure: le reste est constitué par les sables morainiques.

*Revêtement argileux:* traces sur la paroi nord-ouest.

*Parois:* seul l'angle sud-ouest est conservé, formé d'assises de pierres liées à l'argile.

*Porte:* aucune trace n'en a subsisté; un creusement au sud-est pourrait indiquer la direction dans laquelle la cuve était vidangée.

*Remplissage:* aurait lui aussi été perturbé au cours des phases successives.

*Chronologie relative:* très détruit, ce bas-fourneau est placé sous les fours V (fig. 16); recouvert en partie par la destruction de III-III', c'est le plus ancien du site.

**Bas-fourneau Va** (fig. 17a et b)

*Forme externe:* indéterminée.

*Forme interne:* allongée.

*Fond:* recouvert d'argile surcuite.

*Revêtement argileux:* recouvre les scories collées aux parois.

*Parois:* peu conservées, elles présentent une forte scorification.

*Porte:* aucun élément.

*Remplissage:* très riche en argile rubéfiée qui recouvre en partie les niveaux charbonneux et cendreux ainsi que les scories.

*Chronologie relative:* placé à l'extrémité ouest du groupe Vb-Vc, il entame Vb et lui est donc postérieur. Cet ensemble recouvre le bas-fourneau IV, tandis que sa position en retrait du bas-fourneau III' le place à une époque plus tardive que celui-ci: c'est une des dernières exploitations du site.

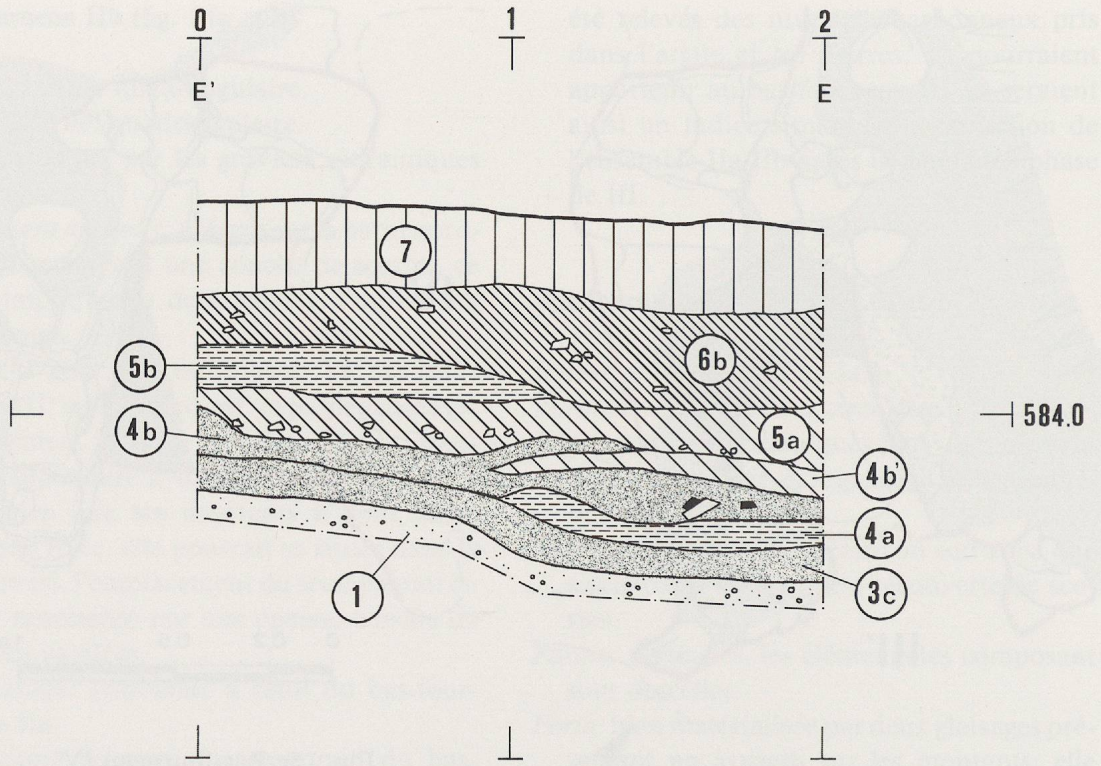
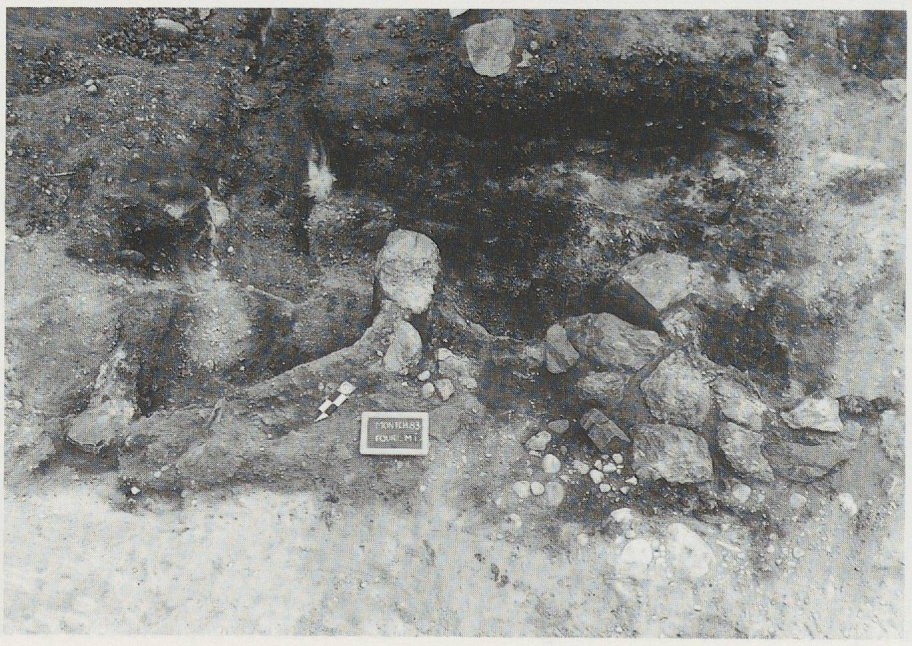



Fig. 16 Stratigraphie E-E' *(Dessin MHAVD/IAHA).*

**1** Terrain naturel: graviers et sables fluvio-glaciaires
**3c** Couche cendreuse correspondant à une phase d'activité antérieure du bas-fourneau IV
**4a** Lentille d'argile rubéfiée correspondant à la dernière phase d'activité du bas-fourneau IV
**4b** Couche cendreuse en rapport avec les activités du bas-fourneau IV
**4b'** Graviers calcaires fusés correspondant à l'activité du bas-fourneau IV
**5a** Niveau de scories de faible densité dans une matrice charbonneuse, correspondant à l'opération de terrassement précédant la mise en place des bas-fourneaux V
**5b** Lentille d'argile rubéfiée correspondant à l'activité des bas-fourneaux Vb-Vc
**6b** Niveau de scories correspondant à l'activité du bas-fourneau Va
7 Terre végétale

Fig. 17a Bas-fourneaux Va à Vc (ex FourMI) *(Photo MHAVD).*



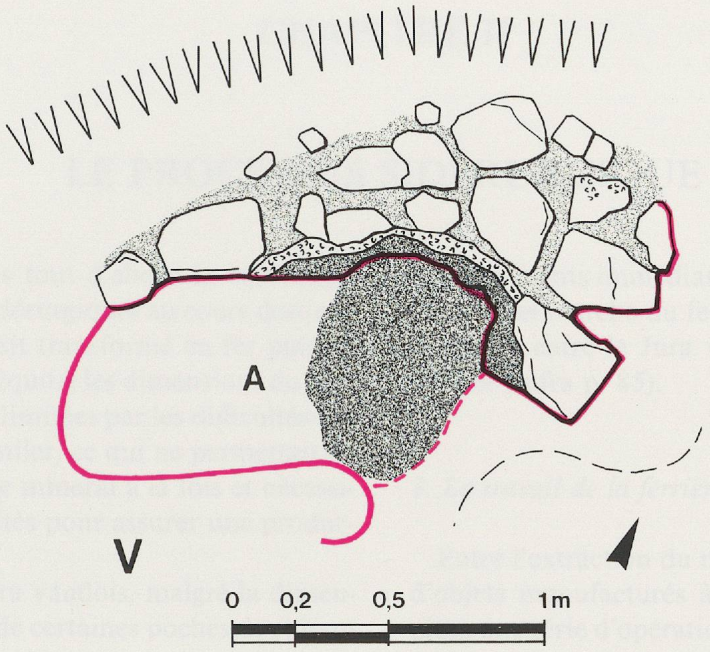



Fig. 17b Bas-fourneau Va

**Bas-fourneaux Vb et Vc** (fig. 17a et c)

*Forme externe*

Vb: indéterminée, peut-être arrondie.

Vc: allongée quadrangulaire.

*Fond*

Vb: recouvert d'argile surcuite.

Vc: creusé dans les graviers morainiques très rubéfiés.

*Parois*

Vb: fortement scoriacées, se raccordent à Vc par un glaisage continu formant un arrondi.

Vc: ne présentent que des traces minimes de scories, alors que la paroi nord est mal définie.

*Revêtement interne*

Vb: le glaisage assurant le raccord avec Vc recouvre une couche de scories.

Vc: présence de deux glaisages successifs.

*Portes:* peuvent être suggérées de part et d'autre de la séparation entre Vb et Vc.

*Remplissage:* de même nature que pour le bas-fourneau Va.

*Chronologie relative:* le bas-fourneau Va recoupe Vb. Bien qu'ils présentent un état de conservation différent, Vb et Vc font partie d'une même structure.

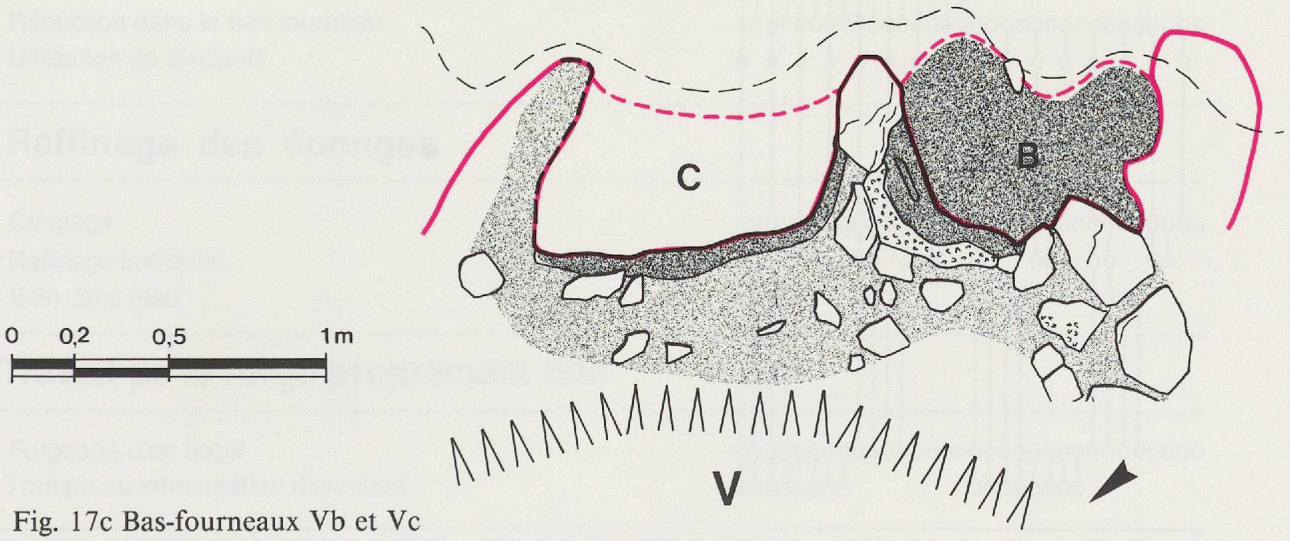



Fig. 17c Bas-fourneaux Vb et Vc

# CHAPITRE II

# LE PROCESSUS SIDÉRURGIQUE

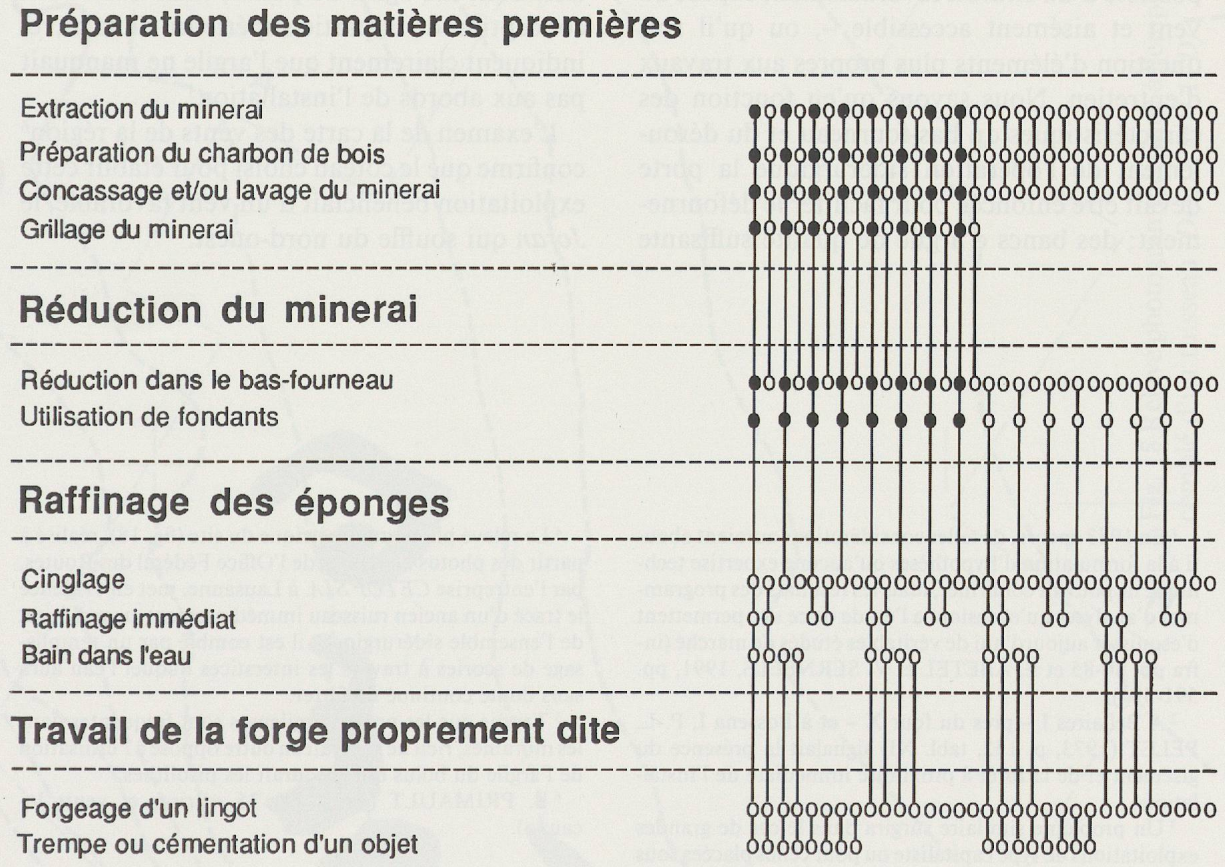
Nous décrirons tout d'abord la succession des opérations sidérurgiques au cours desquelles le minerai était transformé en fer puis en acier. Dans l'Antiquité, les dimensions du bas-fourneau étaient limitées par les difficultés à le chauffer et le ventiler, ce qui ne permettait de traiter que peu de minerai à la fois et nécessitait plusieurs unités pour assurer une production suffisante.

Au pied du Jura vaudois, malgré la dimension importante de certaines poches de sidérolithique, le rapide épuisement des réserves de bois était un obstacle à une exploitation de type industriel entendue comme celle impliquant un marché d'exportation pour écouler sa production. Dans la plupart des cas les quantités produites ne répondaient qu'aux besoins des établissements immédiatement voisins; l'existence d'un marché du fer ne fait toutefois pas de doute entre le Jura vaudois et les grands centres (infra p. 85).

## *1. Le travail de la ferrière*

Entre l'extraction du minerai et la livraison d'objets manufacturés à leurs utilisateurs se place une série d'opérations dont la succession pourra présenter diverses variantes illustrées dans le tableau 2. L'une ou l'autre des étapes indiquées pourra manquer si elle se déroulait dans un autre endroit ou si on y renonçait: ainsi en est-il de celles des opérations qui ne sont pas attestées à Montcherand.

Tabl. 2 Cycles de production possibles (En noir, ceux susceptibles d'avoir été réalisés à Montcherand)



Aucune de ces filières ne peut être suivie jusqu'au bout, mais si certaines phases ne sont que fortement pressenties, d'autres sont obligatoires: ainsi pouvons-nous considérer que le minerai était forcément cassé – ou libéré de la matrice l'entourant lorsqu'il s'agissait de pisolithes (infra p. 39) –, puis trié par contrôle visuel ou par lavage – ou simplement passé au travers d'un crible –, avant d'être chargé avec du charbon de bois dans le bas-fourneau préalablement chauffé. L'éponge, obtenue en utilisant parfois des fondants, devait subir un martelage, indispensable pour éliminer les morceaux de scories qu'elle contenait encore, et destiné à isoler le fer dont la compression de plusieurs morceaux donnait un lingot; un nombre variable de recuits de cette éponge peut être suggéré.

Le fonctionnement d'une exploitation était lié à la distance séparant les trois centres que sont le gisement, le lieu de production et l'endroit où était écoulée celle-ci[1]. Dans le choix de ces emplacements il était indispensable de tenir compte de toutes les matières premières nécessaires au déroulement des opérations techniques, ainsi que des facteurs logistiques: qu'il s'agisse d'éléments majeurs – la mine et la réserve de bois[2] devront être aussi proches que possible d'un endroit favorablement exposé au vent et aisément accessible –, ou qu'il soit question d'éléments plus propres aux travaux d'entretien. Nous savons qu'en fonction des caractéristiques du bas-fourneau et du déroulement de l'opération sidérurgique la porte devait être enfoncée pour faciliter le défournement; des bancs d'argile de qualité suffisante pour permettre la réparation des cuves étaient nécessaires de même que des sources pour l'eau indispensable à la préparation de l'argile.

Il conviendrait encore d'évoquer la distance séparant les endroits où se déroulait une même activité qui, en cas d'exploitations contemporaines prenant trop d'ampleur, aurait naturellement posé, de façon plus ou moins prononcée, des problèmes autant lors de l'abattage des bois destinés au charbonnage que lors de la répartition du marché entre les différents producteurs[3].

La majeure partie des conditions nécessaires au fonctionnement optimal de l'installation existait à Montcherand: ainsi de grandes forêts se trouvent à 200 mètres de là de nos jours encore, tandis que le minerai provenait des gorges d'une rivière dans le voisinage immédiat et que plusieurs sources jaillissaient en contrebas de l'installation sidérurgique[4]. Les pierres ayant servi à la construction des dômes (infra p. 56) étaient extraites du talus même dans lequel étaient encastrés les bas-fourneaux. Les fréquentes réfections du glaisage intérieur des installations (supra p. 18 et tabl. 1), dans certains cas c'est même de reconstruction dont il s'agira de parler, mais surtout la conception de la partie supérieure de la cuve, indiquent clairement que l'argile ne manquait pas aux abords de l'installation[5].

L'examen de la carte des vents de la région[6] confirme que le coteau choisi pour établir cette exploitation bénéficiait d'un vent favorable, le *Joran* qui souffle du nord-ouest.

---

[1] En 1983 encore, de telles considérations auraient abouti à la formulation d'hypothèses qu'aucune expertise technique ne pouvait confirmer, mais les résultats des programmes d'analyses qu'occasionna l'étude de ce site permettent d'esquisser aujourd'hui de véritables études de marché (infra pp. 84-85 et E. ABETEL et V. SERNEELS, 1991, pp. 591-594).

[2] A Bellaires I – près du four X – et à Bossena I, P.-L. PELET (1973, p. 152, tabl. XI) signalait la présence du gisement et de la forêt à proximité immédiate de l'installation.

[3] Un problème similaire surgira dans le cas de grandes exploitations de type capitaliste ou pour celles placées sous contrôle du pouvoir central.

[4] Le relevé photogrammétrique du site (fig. 18), réalisé à partir des photos aériennes de l'Office Fédéral des Routes, par l'entreprise *CETOP S. A.* à Lausanne, met en évidence le tracé d'un ancien ruisseau immédiatement au sud-ouest de l'ensemble sidérurgique; il est comblé par un remplissage de scories à travers les interstices duquel l'eau aura sans doute continué de filtrer.

[5] Tandis que les poches argileuses sont fréquentes dans les moraines, rien ne se serait en outre opposé à l'utilisation de l'argile du bolus qui entourait les pisolithes.

[6] B. PRIMAULT (1972, fig. 35 «Brises et vents locaux»).

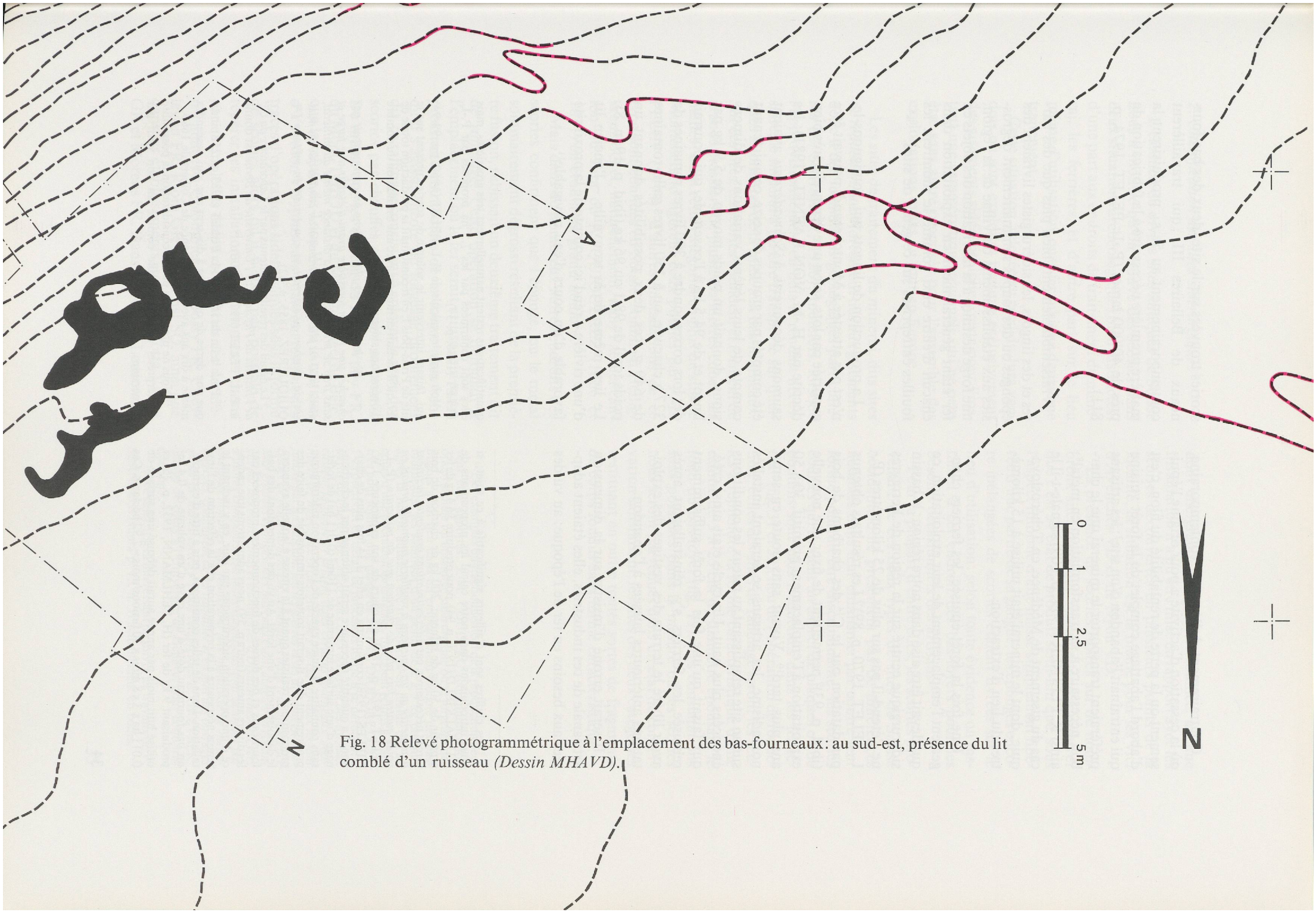



Fig. 18 Relevé photogrammétrique à l'emplacement des bas-fourneaux : au sud-est, présence du lit comblé d'un ruisseau *(Dessin MHAVD)*.

Contrairement à l'époque contemporaine, où la cessation d'activité a pour origine l'épuisement ou la perte de rentabilité du filon, c'est d'abord l'abattage complet de la forêt voisine qui entraînait l'abandon d'un site[7]; les artisans préféraient transporter le minerai que le charbon nécessaire à sa transformation en métal[8]: ainsi R. PLEINER (1977, p. 109) signale-t-il le cas du gisement de Měděnec, en Tchécoslovaquie, dont le minerai était utilisé à 15 kilomètres du lieu d'extraction.

Une fois la forêt épuisée, les ferriers changeaient l'emplacement de leur exploitation, ce qui devait être aisé dans notre région: le bassin sidérurgique centré sur la région de Ferreyres ne s'étend-il pas sur plus de 25 kilomètres (P.-L. PELET, 1970, p. 89)? Les résultats obtenus par datation par le $C^{14}$ des charbons de bois (ibid. p. 93)[9] permettent de fixer une nouvelle exploitation à l'emplacement primitif, 30 à 50 ans plus tard[10]. Vivant sans doute en seminomadisme, les artisans se seraient installés sur un site remplissant au mieux les conditions énoncées plus haut. Un cycle était ainsi créé, qui faisait qu'une fois la forêt suffisamment reboisée les ferriers s'y réinstallaient après avoir libéré le terrain des vestiges des exploitations antérieures laissées à l'abandon.

Il serait erroné d'insister sur la dimension artisanale de ces industries, elles étaient adaptées aux besoins en fer de l'époque: au vu des scories trouvées sur le site, deux des bas-fourneaux de Bellaires III, qui travaillèrent contemporainement au 5e s., produisirent la matière première nécessaire à la fabrication de près de 40'000 lames (P.-L. PELET, 1974, p. 811).

Vraisemblablement, bien plus que des barres et des lingots, les sidérurgistes livraient des éponges ou des loupes sommairement dégrossies aux établissements ou villae de la région, une forge destinée à la fabrication des objets en fer étant généralement en exploitation dans chacun d'entre eux, comme le montrent les fouilles entreprises sur ce genre de sites.

La production de lingots qui, soulignons-le, n'est pas attestée à Montcherand, pouvait être exportée par lots, selon une démarche très bien décrite par H.-M. VON KAENEL (1981): les saumons découverts à *Schwadernau* avaient été comptés par groupes de seize, ce qui, tenant compte de leurs légères variations de dimensions, donnait un poids moyen de 5,9 kg par lingot et de 94,5 kg à l'ensemble, qui pourrait dès lors correspondre à 300 livres romaines de 327 g chacune, ou à 150 livres gallo-romaines de 640 g, ces deux possibilités donnant un poids total de 98,1 ou 96 kg (ibid. p. 19, n. 8). Le lieu même de la trouvaille – l'ancien lit d'une rivière – rend ici compte de la proximité favorable d'un cours d'eau navigable[11].

---

[7] Les chiffres sont d'ailleurs significatifs à ce sujet: si nous introduisons dans notre calcul les propositions de L.U. SALKIELD (1970, p. 94), pour produire 3 à 4 kg de fer à partir de 50 kg de minerai, 200 kg de charbon de bois seront nécessaires, car *« des estimations prudentes inclinent à admettre qu'un fourneau à soufflerie manuelle brûlait en poids quatre fois plus de charbon que de minerai »* (P.-L. PELET, 1973, p. 184): au cours de son expérience J.W. GILLES (1958) consomma en effet 3,34 fois plus de charbon. La quantité nécessaire serait obtenue par le charbonnage d'une surface moyenne de 110m² (0,011 ha) de forêt; sans connaître la durée exacte de l'opération sidérurgique proprement dite il serait toutefois impossible de faire des propositions réalistes quant à la vitesse à laquelle avancera le déboisement d'une forêt. Au vu des dimensions des bas-fourneaux et des durées de fonctionnement proposées par les divers auteurs (infra p. 59), nous admettrons une cadence d'une opération sidérurgique par jour, en y incluant le temps nécessaire à la préparation et à la réfection de l'installation. Dans de telles conditions, pris à titre d'exemple, un bas-fourneau doté d'une cuve d'un volume de 0,4 m³ produisant 9 kg de fer (H. FEHLMANN, 1932, p. 25) et utilisé huit mois par année aurait déboisé une surface de 0.011 ha x 3 x 8 mois x 30 fusions/mois = 7,92 hectares. Ces quantifications restent naturellement très grossières, mais elles sont confirmées par les 7,5 ha proposés par P.-L. PELET (1988, p. 37).

Voir aussi les calculs de P.-L. PELET (1960, pp. 93-94) qui, faisant intervenir le volume de scories présent sur le site de Prins-Bois I, en reconstituait la production totale de fer, qu'il mettait en rapport avec une estimation du nombre d'opérations sidérurgiques.

[8] *« ... dès les temps les plus anciens on commençait par chercher une région forestière avant d'établir une forge et sans trop se préoccuper de la distance même du minerai, parce qu'il est plus facile de transporter celui-ci que les masses de charbon qu'exigeait sa conversion en métal. »* (A. QUIQUEREZ, 1855, p. 42).

[9] Le détail des résultats obtenus par le *Laboratoire du $C^{14}$ de l'Institut de Physique de l'Université de Berne* est donné in P.-L. PELET (1973, p. 206).

[10] Pour la fin du 16e s. P.-L. PELET (1983, p. 258) indique une durée de quatorze à dix-sept ans, qui descendra même à dix ans avec l'ordonnance de Colbert de 1669.

[11] Nous ne prendrons pas en considération la possibilité d'interpréter cette trouvaille comme un don votif par immersion.

*2. Classification des sites sidérurgiques*

L'examen de divers sites antiques de Suisse nous a montré qu'on trouve des scories dans deux situations archéologiques bien distinctes: d'une part aux endroits de traitement du minerai, les ferrières, et d'autre part sur le lieu même d'utilisation, où le fer subit un deuxième traitement.

Cette situation, relevée au pied du Jura vaudois où sont exploités presque exclusivement des gisements sidérolithiques, reste pour l'instant une caractéristique régionale qui ne peut être sans autre proposée pour l'ensemble des exploitations mises au jour en Europe.

Les sites de traitement du minerai, dits sites de *réduction,* sont forcément liés aux gisements donc à des formations géologiques particulières (C. SCHMIDT, 1920); toutefois, lorsque l'approvisionnement en bois le rendait nécessaire, le minerai a pu être transporté sur quelques kilomètres de la mine aux bas-fourneaux. Sur ces sites, les scories abondent et forment de grands crassiers de plusieurs mètres cubes, les haldes; dans cette catégorie, en plus du site de Montcherand figurent ceux publiés par P.-L. PELET (1973); d'autres installations de ce type sont connues en Suisse, comme à Heiligkreuz SG et, naturellement, dans l'actuel canton du Jura où A. QUIQUEREZ (1866 et 1871) en étudia un grand nombre.

Mais dans de nombreux autres endroits des scories confirment que l'éponge, ou le métal sommairement dégrossi résultant de la première fusion, subissait un deuxième traitement dit de *raffinage.* Cette opération se déroulait à l'emplacement où le fer serait utilisé, qui sait à proximité immédiate de la forge, mais sans qu'il s'agisse encore du forgeage proprement dit, ce raffinage consistant à enlever le reste des scories par chauffes et martelages successifs. De même que les oppida du Mont-Vully FR, du Mont-Terri JU et du Münsterhügel de Bâle, que le refuge de Toos-Waldi TG ou le castrum d'Yverdon VD, plusieurs villae ont restitué des traces d'opérations sidérurgiques sous la forme de scories alors qu'il n'était pas possible de repérer les installations de traitement: citons par exemple les découvertes faites ces dernières années à Colombier NE, Bussy FR, Courlevon FR, Riom GR et Biberist SO, ainsi que dans les établissements isolés de Motta Vallac GR et Morens FR. Dans le vicus de Lousonna, dont une grande partie a été fouillée, aucune installation n'a pu être mise en rapport avec les scories découvertes en plusieurs points de la localité, la situation est la même pour les vici d'Avenches VD et de Nyon VD.

La présence de scories isolées sur de nombreux sites d'époque romaine tend à prouver que c'est à l'état de produit semi-fini que, sous l'aspect informe d'une masse simplement libérée d'une partie de sa gangue, les éponges encore mélangées de scories étaient livrées sur le lieu d'utilisation: selon toute évidence on installait à cet endroit des bas-foyers pour les besoins occasionnels des artisans[12].

Pour la plupart d'entre elles, les scories provenant de ces deux types de sites de Suisse occidentale ne présentent pas de différences notables dans leur chimisme, par contre leur forme pourrait être discriminante: les scories coulées qui avaient un aspect de plaques ou de boudins sont plus fréquentes dans les ferrières[13] (fig. 31 et 32), lieu de l'opération de réduction; celles des sites de raffinage seront les seules à reprendre la forme caractéristique d'une calotte de 5 à 25 cm de diamètre épousant le fond du bas-foyer (fig. 19). Ces constatations sont possibles dans la mesure où les scories nous seront parvenues dans un état de conservation satisfaisant, les sites des deux catégories restituant en outre toutes sortes de fragments de corps fondus sans forme caractéristique.

---

[12] Des exemples du fractionnement de la production peuvent être apportés: J.-M. COUDERC (communication orale) signale un ensemble sidérurgique où le forgeage des lingots avait lieu dans un emplacement éloigné des bas-fourneaux: les saumons d'un poids de 2 à 3 kg obtenus après la fusion auraient été transportés en plaine où, au cours d'une opération de cinglage, ils étaient réunis à d'autres pour former une masse de 5 à 6 kg. DIODORE (5, 13, 1-2) décrivait en détail ce processus tel qu'il se déroulait à partir de l'île d'Elbe: *« Car ceux qui s'occupent des travaux cassent la pierre et brûlent dans certains fourneaux ingénieux les morceaux brisés. Au cours de ces travaux ils font fondre par un puissant feu les pierres et les divisent en morceaux de petite dimension, semblables dans leur apparence à de grandes éponges. Ces morceaux sont achetés ou échangés par des marchands et transportés à Dikaiarcheia ou vers d'autres comptoirs. De telles cargaisons sont achetées par quelques hommes qui, réunissant une multitude de métallurgistes, continuent de les travailler et en font des ouvrages en fer de toutes sortes. »* Nous remercions E. GRZYBEK, chargé de cours à l'Université de Genève, pour cette traduction.

[13] A ce sujet, il sera intéressant de suivre les travaux de V. SERNEELS (supra p. 13, n. 5) actuellement en cours.

*3. Les matières premières*

*3.1. Le minerai*

Le fer est un des éléments chimiques les plus abondants de la croûte terrestre, il entre dans la composition d'un très grand nombre de minéraux. Parmi ceux-ci citons:

- les *oxydes,* dont l'*hématite* ($Fe_2O_3$) avec 70% de Fe, et la *magnétite* ($Fe_3O_4$) avec 72,4% de Fe,
- les *hydroxydes,* dont la limonite ($Fe_2O_3 \cdot H_2O$) avec 59,9% de Fe,
- les *carbonates,* dont la sidérose ($FeCO_3$) avec 48,3% de Fe et
- les *sulfures,* dont les pyrites ($FeS_2$) avec 46,6% de Fe[14].

Dans certaines roches, ils peuvent former des accumulations importantes, qu'ils soient seuls ou en association; mais tous les *minéraux* dans la composition desquels entre le fer ne sont pas nécessairement utilisables comme *minerais.* C'était le cas dans l'Antiquité, où certains matériaux ne pouvaient que difficilement être traités en raison des faibles températures atteintes et de l'absence de fondants, d'autres filons étant inaccessibles par manque de moyens d'extraction appropriés.

C'est à partir de ces quatre familles que se sont formées les roches utilisables comme minerais, L. BUBENICEK (1968, p. 1024) en compte jusqu'à douze catégories. Les classifications proposées pour les minerais se différencient selon des critères qui, tour à tour pétrographiques ou visuels, sont à l'origine de fréquentes confusions.

Les minerais le plus souvent cités ont repris directement le nom du minéral ferrifère dont ils proviennent, mais leur teneur ne sera pas celle que nous aurions déduite de la formule chimique de celui-ci; il s'agit:

- des *hématites* avec 40 à 66% de fer[15]: présentes en de nombreux endroits, elles sont très manganifères, avec de fréquentes inclusions de limonites: mates d'aspect, l'espèce dominante en est l'*hématite rouge.* Généralement rocheuses ou pulvérulentes, avec une perte au feu très faible, elles sont souvent fragiles avec une porosité non négligeable;
- des *magnétites* qui ont de 60 à 68% de fer: seules à avoir un aspect métallescent, elles présentent souvent un gain au feu et sont habituellement dures, massives, compactes et difficilement fusibles;
- des *limonites* – dites aussi *hématites brunes* – qui ont une teneur variant entre 25 et 55% de fer: plutôt siliceuses, elles sont fragiles, scoriacées et poreuses, avec une teneur en eau qui occasionnera une forte perte au feu;
- des *sidéroses,* carbonates de fer avec 25 à 44% de fer enfin: massives, compactes, dures, non poreuses et présentant une perte au feu considérable, elles n'ont pas l'aspect d'un métal.

Dans le Jura vaudois les teneurs indiquées par P.-L. PELET (1973, p. 167, tabl. XIII) ainsi que celles relevées à Montcherand (infra p. 41, tabl. 4) n'atteignent que difficilement 50% et sont donc inférieures à celles recherchées pour l'approvisionnement des installations sidérurgiques contemporaines[16].

De ces minerais, trois sont connus dans nos régions (E. ABETEL et V. SERNEELS, 1987, pp. 217-218 et P.-L. PELET, 1960, p. 86) et par leur nature joueront un rôle non négligeable dans l'aspect même des installations sidérurgiques, influençant sans doute jusqu'à la forme des cuves.

L'*oolithe du callovien* – une limonite –, qui est présente aux abords du bassin de Delémont avec des lambeaux de couches allant jusqu'à l'extrémité sud-ouest du Jura: ses principaux gisements se trouvent dans le Fricktal, alors que dans le canton de Vaud on relève son existence au Mont-de-Baulmes; la *limonite valanginienne* correspondant à des sables de plage des couches du Crétacé des Jura neuchâtelois et vaudois, et qui se prolonge jusqu'à la Vallée de Joux; enfin le *sidérolithique* – lui aussi un hydroxyde de fer –, qui représente les restes d'une croûte latéritique et d'un remplissage

---

[14] L'utilisation des pyrites dans l'Antiquité reste à confirmer: courantes et riches en fer, elles auraient été difficiles à exploiter, la présence du soufre donnant naissance à un fer de mauvaise qualité.

[15] Nous reprenons les teneurs proposées par R.J. FORBES (1950, p. 381).

[16] A la fin du 18e s. les hauts-fourneaux du Jura vaudois avaient utilisé des minerais contenant 22% de fer (P.-L. PELET, 1983, pp. 116 et 118). Au début du 20e s. les grands complexes sidérurgiques ne recourent plus qu'à des minerais présentant au moins 40% de fer et vers 1980 ils ne seront intéressants qu'à partir de 50%; les gisements de Lorraine – 32,5 % –, du Luxembourg – 26-28 % – et de Czestochowa en Pologne – 30% – (L. BUBENICEK 1968, pp. 1025-1026) représentent des situations exceptionnelles.

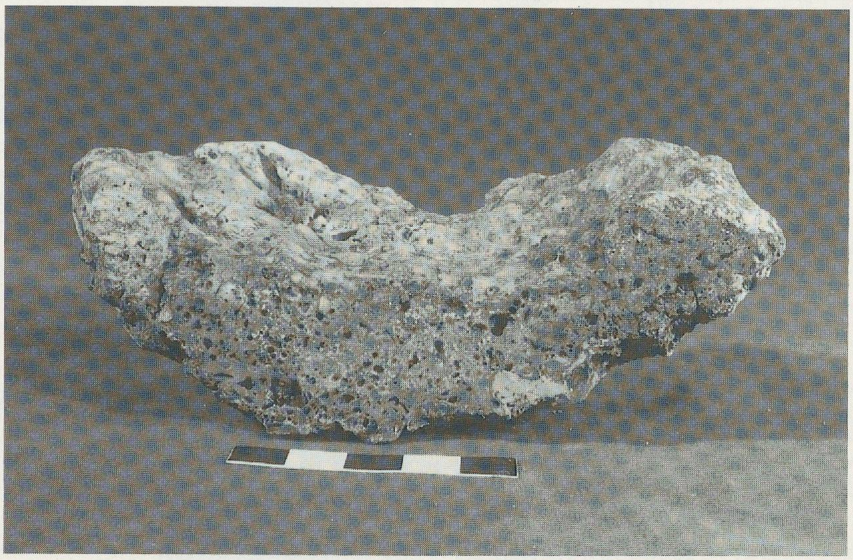


Fig. 19 Calotte provenant du fond d'un bas-foyer, sciée par son milieu: il s'agit de l'objet décrit par P.-L. PELET (1973, p. 226) et découvert à Yverdon (nº 64) sur le chantier du Technicum *(Photo IAHA).*

Fig. 20 Minerai - échantillon nº 1 *(Photo IAHA).*

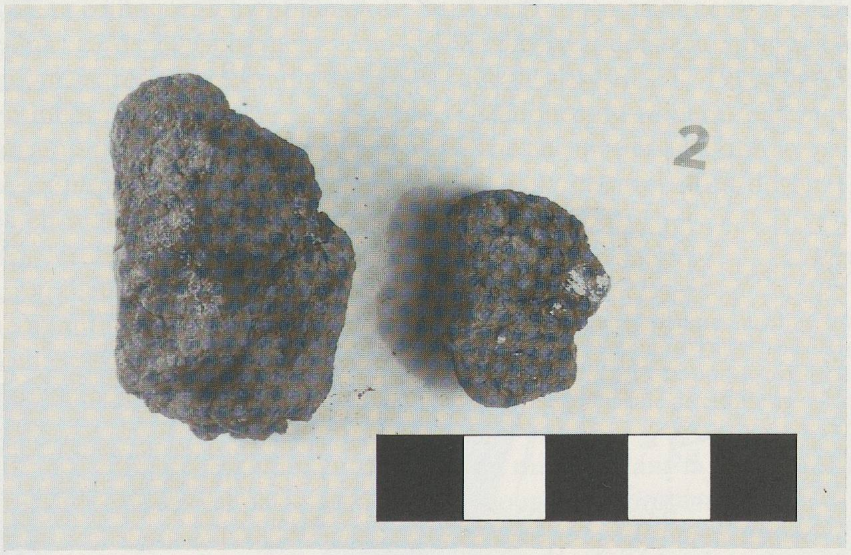
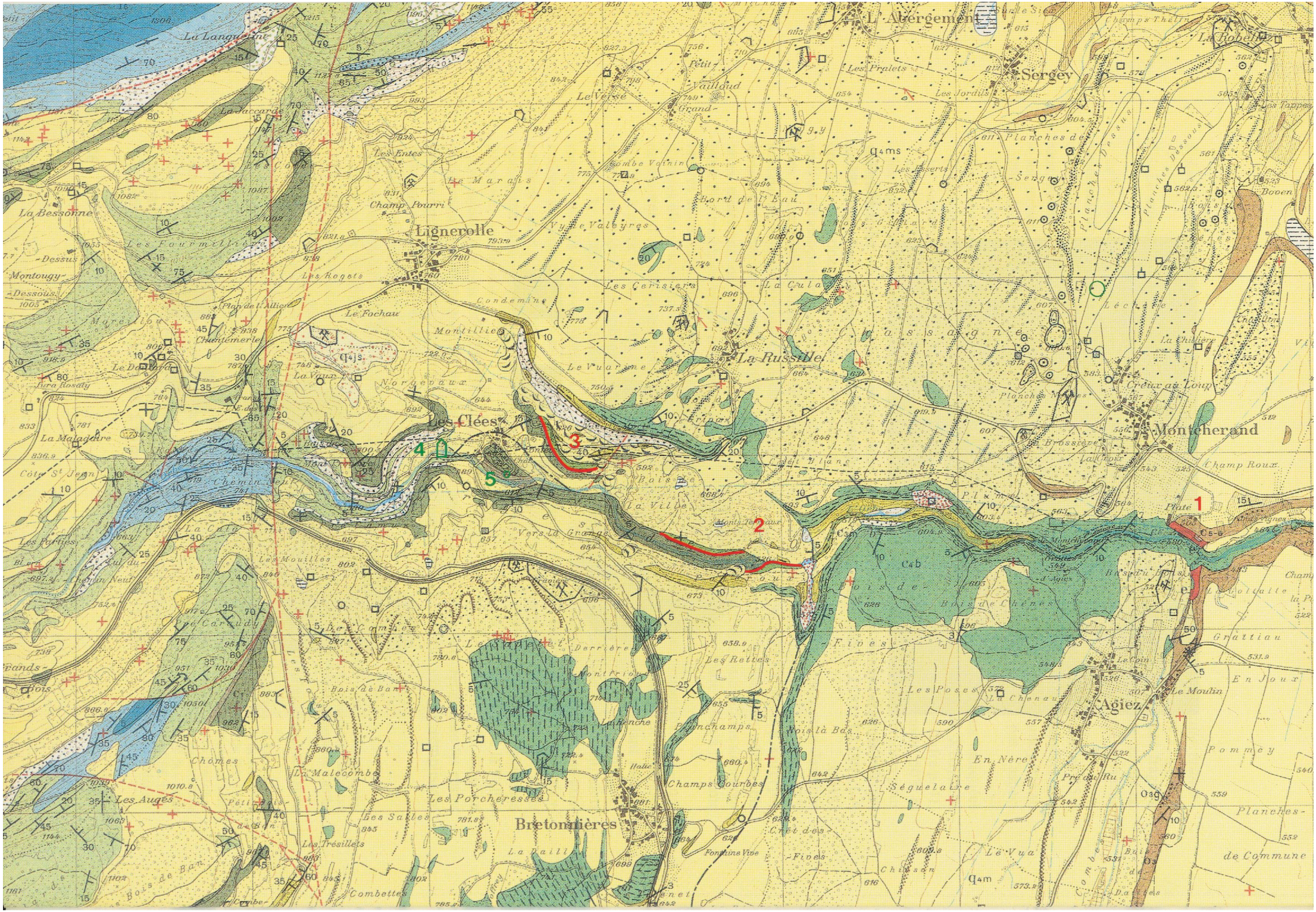



Fig. 21 Minerai - échantillon nº 2 *(Photo IAHA).*


L'Abergement
Sergey
Lignerolle
La Russillet
Les Clées
Montcherand
Agiez
Bretonnières
1
2
3
4
5

| N° | Description | Provenance Bas Fourneau IIb | V | site | Remarques | Section polie |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Minerai | | | × | Sidérolithique (fig. 20). Aspect compact, couleur rougeâtre, tendant au violet: la section polie montre une grande quantité d'oxydes et d'hydroxydes de fer (iddingsite) cimentant une gangue quartzo-feldspathique fine. | × |
| 2 | Minerai | | | × | Sidérolithique (fig. 21). Matrice argileuse de couleur rouge contenant des pisolithes. La texture vacuolaire et l'aspect fritté de cet échantillon indiquent une première opération de grillage. | |
| 55 | Minerai | | | | Bloc de marno-calcaire ferrugineux. | |
| 11 | Grenaille | × | | | Petits nodules sphéroïdaux brun-rouges d'un diamètre de 0,5 à 1 cm qui pourraient avoir subi un traitement thermique. | |
| 12 | Grenaille | | × | | | |

Tabl. 3 Examen visuel du minerai prélevé à Montcherand dans le périmètre des bas-fourneaux

karstique, et est répandu du canton de Schaffhouse à la Vallée de Joux, les gisements les plus intéressants étant ceux du canton du Jura; en sus de celle de Montcherand, les principales occurences dans le canton de Vaud sont celles du Mormont, de la colline de Chamblon et de Goumoens-le-Jux: ce dernier gisement, volumineux, massif, mais très pauvre en pisolithes, ne fut apparemment pas exploité[17].

Dans les terrains sidérolithiques on trouve des nodules – les *pisolithes* – allant jusqu'à 5 cm, composés en majeure partie d'oxydes et d'hydroxydes de fer. Ils sont généralement pris dans une masse argileuse – le bolus – contenant elle même une quantité appréciable de fer, ou forment localement des accumulations très riches sous forme d'agrégats pouvant aller jusqu'à 20 cm: il est difficile de définir avec certitude quelle est la partie utilisée par les anciens métallurgistes, mais les pisolithes lavés et triés devaient représenter le minerai le plus intéressant. Dans l'Antiquité, la majeure partie de l'approvisionnement des ferriers du pied du Jura vaudois est composée de sidérolithique (P.-L. PELET, 1960, fig. 3); les analyses chimiques du minerai ont montré qu'il était riche en silice et en alumine, pauvre en calcaire, avec environ 40% de fer (P.-L. PELET, 1974, p. 807).

[17] Des gisements d'autres natures sont aussi présents, comme par exemple en Valais, sous forme de lentilles de magnétite au Mont-Chemin, de pyrites à Aproz, de sidérite à l'Amône, ou même de chamosite à Chamoson...

◀ Fig. 22 Extrait de la carte géologique: l'apparition du minerai dans la zone de contact entre les diverses couches géologiques est parfois trop diffuse pour être représentée sur la carte *(Extrait de l'Atlas géologique de la Suisse, 1202 Orbe, reproduit avec l'autorisation du Service hydrologique et géologique national et de l'Office fédéral de topographie du 24. 5. 1991).*

A Montcherand nous sommes en présence de minerai sidérolithique *«sous forme massive et pisolithique»*[18]. Comme le montre bien l'Atlas géologique de la Suisse (feuille 1202, D. AUBERT, 1963), l'occurence sidérolithique dans les gorges de l'Orbe (fig. 22[1]), à près de 1500 mètres du site, est le gisement susceptible de l'avoir approvisionné[19] et qui par la suite (P.-L. PELET, 1978, p. 80) dut être exploité par la ferrière des Clées[20]: sa localisation n'aurait pas échappé aux artisans car la couleur rougeâtre propre à ce matériau tranchait sur celle des roches voisines.

Le sidérolithique peut avoir été exploité à même la falaise dans le ravin encaissé où coule la rivière ou a été recueilli au bord de celle-ci lorsqu'il tombait de la paroi: l'absence de traces de roulage sur les échantillons examinés indique qu'ils ne provenaient pas du cours d'eau[21]. Dans l'état actuel de la recherche, la ferrière que nous étudions est la seule à s'être approvisionnée à cet endroit.

Dans le Jura vaudois la *limonite valanginienne* est aussi présente, qui bien développée occupe le sommet du Valanginien supérieur à sa jonction avec l'Hauterivien inférieur. En raison de ses faibles dimensions, cette croûte limoniteuse riche en oxyde de fer n'est habituellement pas représentée sur les cartes géologiques: en remontant l'Orbe en amont de Montcherand, nous avons indiqué (fig. 22[2] et [3]) la jonction entre ces deux formations géologiques en aval des Clées et au nord-est du village sous la route: comme nous le verrons, il est possible que ces niveaux aient fourni du minerai aux ferriers de Montcherand.

Les résultats des analyses[22] permettent de distinguer les échantillons de minerai à leur forte teneur en oxyde ferrique ($Fe_2O_3$) par rapport à l'oxyde ferreux (FeO): lorsque ce dernier composé est présent, il indique un traitement thermique de grillage ou de réduction partielle, discrimination qui était d'ailleurs possible à l'oeil nu: Mo1 n'aurait subi aucun traitement préliminaire tandis que le grillage de Mo2 a éliminé une partie de l'oxyde ferrique.

Mo11 et Mo12 – de nature proche de Mo3 (infra p. 78, tabl. 12) et produits dans une partie peu réductrice du bas-fourneau – auraient été séparés des scories qui les entouraient par concassage après une réduction incomplète[23].

Mo55, riche en CaO et en $CO_2$, est un minerai carbonaté qui se différencie clairement des autres échantillons. Il peut correspondre aux indices minéralisés de la région des Clées (fig. 22[2] et [3]), éventuellement au produit de l'altération des roches encaissantes du gisement de Montcherand: le spectre des éléments traces est également très différent.

Sauf pour Mo55, les analyses sont celles de minerais silico-alumineux typiques du sidérolithique: les teneurs chimiques (tabl. 4 et 5) de ces échantillons correspondent à celles des pisolithes analysés par P.-L. PELET (1960, p. 88, tabl. III) et se différencient de celles qu'il avait obtenues pour la limonite et l'oolithe. Les teneurs en manganèse (Mn) sont élevées, mais très variables.

### *3.1.1. Le concassage*

Extrait aux endroits où il affleurait, le minerai subissait une première opération de concassage au cours de laquelle il devait être cassé en menus morceaux et ensuite trié par un contrôle visuel afin d'obtenir une charge optimale du bas-fourneau; c'est sans doute leur couleur qui permettait de discriminer les parties les plus riches en métal. Peut-être subissait-il un tri par *lavage* ou par *gravité,* opération au cours de laquelle les morceaux de minerai se déposent au fond d'un déversoir selon leur poids, un procédé qu'attestent parfois des installations particulières et dont le principe, sensiblement amélioré, s'applique encore de nos jours.

---

[18] *«Comblement de grottes par remplissage karstique en milieu continental»* selon le rapport établi par V. SERNEELS du *Centre d'Analyse Minérale de la Faculté des Sciences de l'Université de Lausanne.*

[19] A une plus grande distance, P.-L. PELET (1973, carte p. 9) reporte les mines de Bellaires, de la Bossena et de Baulmes. La carte des sites montre bien la densité des exploitations dans une région où l'approvisionnement en minerai était possible en de nombreux endroits.

[20] La ferrière des Clées est mentionnée dès 1438 (fig. 22[4] et P.-L. PELET, 1978, p. 52): en 1551 il faut signaler l'implantation de l'affinerie Duvillard (fig. 22[5] et P.-L. PELET, 1978, p. 81).

[21] Le minerai pourrait en effet provenir du lit de la rivière (P.-L. PELET, 1960, p. 91): une fois tombé à l'eau il s'accumule dans des marmites – les «gors» ou «gours» – cavités circulaires pouvant atteindre quelques mètres et creusées dans le rocher par le mouvement tourbillonnaire des galets.

[22] La méthode utilisée pour les analyses est décrite au Chapitre IV, p. 75.

[23] Malgré des dimensions et un aspect général fort proches, il ne nous a pas été permis de déterminer s'il s'agissait de pisolithes qui auraient subi un grillage.

| | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | CaO | $Fe_2O_3$ | FeO | $TiO_2$ | MnO | MgO | $Na_2O$ | $K_2O$ | $P_2O_5$ | $H_2O+$ | $CO_2$ | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Mo1 | 33,53 | 6,48 | 1,16 | 55,92 | 0,00 | 0,40 | 0,91 | 0,49 | 0,11 | 0,11 | 0,65 | 1,17 | 0,62 | 101,55 |
| Mo2 | 30,56 | 6,44 | 3,18 | 44,87 | 6,37 | 0,36 | 4,62 | 0,94 | 0,05 | 0,12 | 0,81 | 1,88 | 1,28 | 101,48 |
| Mo55 | 3,26 | 1,87 | 32,47 | 35,14 | 0,00 | 0,13 | 0,46 | 0,20 | 0,10 | 0,01 | 0,42 | 0,26 | 25,32 | 99,64 |
| Mo11 | 21,04 | 7,14 | 5,56 | 42,91 | 10,67 | 0,39 | 2,05 | 0,59 | 0,06 | 0,41 | 0,78 | 0,00 | 9,35 | 101,75 |
| Mo12 | 20,08 | 5,29 | 3,19 | 32,40 | 30,79 | 0,29 | 1,82 | 0,59 | 0,08 | 0,38 | 1,00 | 0,00 | 6,30 | 102,21 |

Tabl. 4 Teneurs des éléments majeurs contenus dans le minerai, exprimées en %

| | Zr | Y | Sr | Rb | Ba | V | Sn | S | Ag | As | Pb | Zn | Cu | Ni | Cr | Co |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Incertitude ± | 4 | 1 | 4 | 1 | 3 | 10 | 3 | 3 | 2 | 9 | 3 | 8 | 4 | 4 | 16 | 7 |
| Mo1 | 156 | 21 | 49 | 5 | 77 | 797 | <5 | <5 | <2 | 412 | 19 | 146 | 57 | 289 | 65 | 210 |
| Mo2 | 145 | 21 | 57 | 9 | 55 | 854 | <5 | <5 | <2 | 370 | 21 | 147 | 72 | 258 | 53 | 161 |
| Mo55 | 49 | 13 | 60 | 3 | 57 | 335 | <5 | <5 | 3 | 306 | 17 | 87 | 55 | 118 | 5 | 28 |
| Mo11 | 123 | 26 | 92 | 23 | 247 | 845 | <5 | 6 | <2 | 336 | 56 | 342 | 69 | 227 | 61 | 141 |
| Mo12 | 126 | 23 | 69 | 23 | 141 | 885 | <5 | 8 | <2 | 427 | 20 | 237 | 96 | 268 | 65 | 148 |

Tabl. 5 Teneurs des éléments traces contenus dans le minerai, exprimées en ppm

C'est non seulement afin de séparer le minerai d'une partie de la gangue qui, suivant son origine, l'entourerait encore, mais aussi pour en faciliter la fusion, qu'il était opportun de le réduire préalablement en petits morceaux[24].

### *3.1.2. Le grillage*[25]

La formation de FeO dans l'échantillon Mo2, relevée sur de nombreux spécimens provenant d'autres sites, a permis de confirmer que les traces de rubéfaction correspondaient à une opération de grillage; les morceaux prélevés présentaient des indices de frittage corroborant la présomption d'une première cuisson destinée à supprimer l'humidité du minerai[26].

Si le grillage semble s'être imposé surtout dans le cas des minerais sulfureux[27], et selon H. CLEERE (1976, pp. 129-130) pour ceux limoniteux et carbonatés, cette opération, qui aurait pu se dérouler dans des fosses aux parois revêtues d'argile comme au Hüttenberg (infra p. 50), mais aussi sur un simple feu de bois, améliorait sensiblement le rendement des bas-fourneaux. La cuisson de la limonite ($Fe_2O_3 \cdot H_2O$) contribuera à en éliminer l'eau, tandis que pour les minerais carbonatés ou sulfurés elle supprimera l'excès de $CO_2$, respectivement de soufre. Une température de 500 à 600° sera suffisante et contribuera en outre à brûler une partie de la gangue, allégeant l'ensemble destiné à charger le bas-fourneau, l'*«enrichissant»* selon le langage des métallurgistes.

### *3.1.3. Le «vieux fer»*

Par cette expression, tirée du langage des anciens mécaniciens, nous voulons désigner le recyclage des divers déchets ferreux qui peuvent être utilisés au cours d'opérations sidérurgiques. Cette pratique est attestée dans l'Antiquité par la découverte de masses métalliques ayant subi un premier traitement thermique et qui contenaient encore des clous et d'autres

[24] Selon H. CLEERE (1976, p. 130), de trop petits morceaux auraient toutefois pu boucher le bas-fourneau, sans qu'il en précise le format idéal; P.-L. PELET (lettre du 12 août 1989) parle des dimensions d'une noix.

[25] Alors que formellement ce terme est utilisé pour l'opération d'élimination du soufre, absent dans le minerai employé à Montcherand et où il s'agirait plutôt d'une opération de déshydratation, nous l'avons jugé plus explicite que celui de chauffage préliminaire.

S. GARILLOT (1967, pp. 95-96) décrit avec clarté le déroulement de cette opération, bien qu'il s'agisse dans ce cas d'une présentation d'installations modernes.

[26] Portant essentiellement sur des éléments volatils, en plus de l'eau cette opération éliminait aussi les matières organiques. Si, au cours des siècles, l'humidité peut avoir rétabli la teneur en $H_2O$, des analyses répétées viseront à confirmer l'apparition de FeO.

[27] Communication orale de Y. RIALLAND.

objets de fer usagés[28], comme à Bliesbruck, en Moselle, où les agrégats de clous à tête ronde forment des «boulets» d'oxyde de fer, aptes à une nouvelle réduction par combustion en atmosphère oxydante (C. FORRIERES et alii., 1987, p. 101).

Il est toutefois impossible de se prononcer sur d'éventuels dosages qui auraient été tentés pour obtenir des produits aux caractéristiques particulières, rappelant celles des objets récupérés.

### *3.2. Le charbon de bois*[29]

Le rôle du charbon de bois est fondamental: combustible indispensable pour atteindre les températures nécessaires à approcher le point de fusion au cours de l'opération sidérurgique[30], il fonctionnera en outre comme agent réducteur, contribuant à fixer l'oxygène du minerai dans le dioxyde de carbone ($CO_2$) qui s'échappe du bas-fourneau sous forme gazeuse (infra p. 56).

Si nous nous en tenons aux données transmises par P.-L. PELET (1973, p. 184) et H. FEHLMANN (1932, p. 50) pour un bas-fourneau doté de tuyères, le rapport entre le poids du charbon de bois et celui du minerai aurait oscillé entre 4 et 7.

La présence de fosses, possible sur le site Montcherand (P.-L. PELET, 1983, p. 265), tendrait à prouver que dans l'Antiquité, pour le Jura vaudois tout au moins, c'est la carbonisation en *fosses* de faibles dimensions qui aurait été pratiquée[31]; le passage à la *meule,* que semble pourtant déjà mentionner THEOPHRASTE (5, 9, 4) repris plus tard par PLINE L'ANCIEN (16, 23), serait plutôt lié aux besoins accrus d'une sidérurgie qui dès la fin du Moyen Age applique le procédé de la fusion indirecte.

C'est peut-être à cette époque que remontaient les meules dont le fonctionnement est décrit par A. QUIQUEREZ (1871, p. 76); le charbon était fabriqué à partir de troncs débités en bûches de mêmes dimensions et groupées autour d'un mât central. L'ensemble était recouvert par une couche d'argile et de gazon, de façon à créer une enceinte thermique dans laquelle, une fois allumé par le bas, le bois n'aurait pas brûlé, mais se serait lentement carbonisé en raison du manque d'air. Dès la fin de la combustion la meule était démantelée et les bûches de charbon encore chaudes arrosées d'eau. Les branchages et les racines étaient traités de la même façon, mais étaient placés dans une fosse.

P.-L. PELET (1983, p. 259) dresse un tableau présentant les diverses essences de bois mentionnées pour les opérations de réduction; nous y ajouterons le bois de pin qui, selon PLINE L'ANCIEN (33, 94), était excellent pour fondre le cuivre et le fer. Au cours des fouilles de sites d'Europe occidentale remontant à l'époque romaine, en sus du matériau trouvé au pied du Jura vaudois (P.-L. PELET, 1973, p. 186), ce tableau signale l'exploitation de bouleau, noisetier et prunier dans le Weald en Grande-Bretagne; à Populonia, C. DAREMBERG et E. SAGLIO (1896, sv *ferrum*, p. 1087) relatent la découverte de charbon de bois de châtaignier en plus du chêne omniprésent.

P.-L. PELET (1973, p. 185) proposait avec prudence une production de 30 tonnes de charbon de bois par hectare, valeur sans doute proche de la réalité puisque d'un même ordre de grandeur que celle suggérée par L.U. SALKIELD (1970, p. 94): ce dernier précise qu'un chêne de quarante ans produit 60 kg de charbon et qu'on pourrait dénombrer 300 arbres de cette essence par hectare, fournissant 18 tonnes de combustible.

Quels que soient les rendements des diverses essences, il est certain que le charbon de bois sera d'un transport plus facile que les bûches elles-mêmes: il aura aussi un meilleur pouvoir calorifique, permettant d'atteindre des températures auxquelles on ne peut arriver par la flamme vive d'un morceau de bois, même sec: enfin, il produira un bain de braises homogène tout autour du minerai.

---

[28] Le procédé est connu dès l'Age du bronze (communication orale de M. KLAUSENER). P.-L. PELET nous a rendu attentif à la découverte de conglomérats de ce type qui s'étaient formés lors d'incendies: on verra à ce sujet le spécimen conservé au *Musée du fer* de Vallorbe (lettre du 12 août 1989).

[29] Pour un état de la question sur le charbonnage jusqu'aux temps modernes, le lecteur pourra parcourir avantageusement P.-L. PELET (1983, pp. 257-267).

[30] A. BOUTHIER (1973, pp. 155-156) signale plusieurs découvertes de houille remontant à l'époque romaine: relevons cependant que les trop fortes teneurs en soufre de ce combustible auraient difficilement permis d'y avoir recours pour le traitement du fer.

[31] P.-L. PELET (lettre du 12 août 1989) qui a reconnu le site, mentionne en effet une fosse creusée dans le sable pur et au fond de laquelle des restes de charbon de bois correspondraient à la préparation du combustible.

*3.2.1. Analyse des essences utilisées*

A Montcherand, 2735 échantillons ont été examinés: les recherches entreprises par le *Laboratoire de paléoethnobotanique du Département d'Anthropologie de l'Université de Genève* ont confirmé que c'est principalement l'essence de chêne qui a été utilisée pour ces bas-fourneaux. Comme c'est fréquemment le cas, ne serait-ce qu'à l'allumage où ils recouraient même à des racines ou des branchages pas encore secs[32], les ferriers n'ont pas hésité à employer d'autres bois, tels le hêtre, l'aulne, l'érable, le frêne, le noisetier ou l'épine noire fréquente dans la région.

1504 g de charbon de bois ont été prélevés: leur répartition par essences est donnée dans le tableau 6[33].

Dans tous les bas-fourneaux le chêne fournit au moins 90% du charbon: le I (89,9% de chêne) utilise aussi 9,8% de hêtre, le IV (90% de chêne) 6,3% d'aulne. La nette prédominance du chêne ne permet pas de mettre l'apparition d'autres essences en rapport avec un changement dans l'approvisionnement du site, elles auraient été de toute manière minoritaires dans les forêts de feuillus du piémont jurassien. Le chêne caractérisait les forêts de la région de Montcherand et est même à l'origine de leur nom: au Moyen Age la forêt de Chassagne (1141 Cassanea) s'étendait d'Orbe aux Clées (E. MOTTAZ, 1914, vol. 1, sv *Chassagne*, p. 366). De nos jours encore les massifs forestiers immédiatement au nord-est de la Léchère et sur la rive droite de l'Orbe au sud-ouest de l'établissement sidérurgique portent le nom de *Bois de Chênes*.

Si l'examen dendrochronologique (infra p. 89) des bois de Montcherand confirme la présence d'arbres âgés, le chêne pubescent même vieux de quatre-vingts ans ne dépassant guère une vingtaine de centimètres de diamètre il ne sera pas possible de proposer l'abattage de futaies: en effet, alors que P.-L. PELET (1973, p. 187) a montré la forte exploitation dont faisaient l'objet les taillis, les plantes de faibles dimensions présentent en outre de meilleures aptitudes au charbonnage (P.-L. PELET, 1973, p. 189); ces dernières auraient toutefois pu être utilisées intentionnellement en même temps que des arbres plus âgés, des dosages étant pratiqués en fonction, qui sait, des résultats escomptés lors de l'opération sidérurgique.

Les résultats obtenus par P.-L. PELET (1973, p. 186, tabl. XXIV), s'ils plaçaient le hêtre en tête des bois utilisés (44% des morceaux examinés) ne situaient le chêne qu'en deuxième position (34%) et ignoraient l'aulne. L'érable y était lui aussi relativement bien représenté (10,5%); le peuplier, l'orme et les arbres fruitiers, tels que pommiers ou poiriers, répertoriés à Bellaires, Bossena ou Prins-Bois, sont absents à Montcherand.

Ces données confirment que ce sont le chêne et le hêtre qui, en raison de leur abondance au pied du Jura et de leur haut pouvoir calorifique, avaient la faveur des ferriers[34].

*3.3. Les fondants*

Dans la métallurgie moderne, les fondants sont utilisés pour faciliter la scorification des composants non ferreux du minerai que les opérations de tri et de lavage n'auraient pas éliminés complètement; une scorie dont le point de fusion aura ainsi été abaissé sera plus vite liquéfiée, assurant rapidement l'évacuation des résidus.

Par ailleurs, dans les conditions habituelles, jusqu'à 75% du fer était perdu: il se combinait à la silice pour donner naissance à la fayalite de laquelle les moyens de l'époque n'auraient plus permis de le dissocier; les métallurgistes se seraient rendus compte qu'une manière de pallier cet inconvénient était de recréer l'équilibre entre chaux et silice en ajoutant celui de ces deux composants qui aurait fait défaut[35], un dosage de l'alumine pouvant aussi intervenir. En compensant la présence de silice on aurait évité qu'elle se fixe à l'oxyde de fer, un apport de chaux pouvant aussi contribuer à abaisser le point de fusion des scories: à l'inverse, si la gangue était calcaire, il s'agissait précisément d'y ajouter de la silice.

---

[32] A Bouhy, dans la Vallée Saint-Pélerin, A. BOUTHIER et alii. (1987, p. 264) ont découvert des empreintes de feuilles dans des scories, ce qu'ils interprètent comme la preuve de l'utilisation de bois vert lors de l'opération sidérurgique.

[33] Le poids total de 1400 g reporté dans le tableau au lieu de 1504 g ne tient pas compte du matériel provenant d'une couche commune aux bas-fourneaux III et IV.

[34] A cette époque, le charme, excellent combustible lui aussi, n'a pas encore colonisé le *querceto-fagetum* traditionnel.

[35] C'est une répartition économique des quatre constituants principaux du minerai – $Al_2O_3$ (présent dans l'argile), $SiO_2$ (sable), CaO (calcaire) et $Fe_2O_3$ – qui régit l'opération sidérurgique.

| | Poids total | % du poids de chaque essence par rapport au poids de charbon trouvé dans le bas-fourneau | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Bas-fourneau | 1400 g | I | II | III | IV | V |
| Chêne | 1330 g | 89,9%<br>128 g | 96,2%<br>77 g | 96,61%<br>834 g | 90,0%<br>143 g | 95,5%<br>148 g |
| Hêtre | 17 g | 9,8%<br>14 g | | 0,23%<br>2 g | 0,6%<br>1 g | |
| Aulne | 32,7 g | 0,2%<br>0,3 g | | 2,59%<br>22,4 g | 6,3%<br>10 g | |
| Erable | 19 g | | 3,8%<br>3 g | 0,46%<br>4 g | 3,1%<br>5 g | 4,5%<br>7 g |
| Frêne | 0,7 g | | | 0,07%<br>0,7 g | | |
| Epine noire | 0,2 g | 0,1%<br>0,2 g | | | | |
| Noisetier | 0,4 g | | | 0,04%<br>0,4 g | | |

Tabl. 6 Résultats de l'étude anthracologique

Les ferriers antiques n'auraient pu se passer des fondants que dans le cas idéal où ils utilisaient un minerai extrêmement pur, au point de fusion bas: il n'y aurait alors eu que peu de matériau à scorifier, et l'action du carbone aurait été suffisante pour obtenir le métal. Des difficultés devaient apparaître avec le recours à des minerais moins riches: agissant par empirisme alors qu'ils ignoraient les modalités du processus chimique engendré, les artisans réussirent pourtant à résoudre ces problèmes en mélangeant des minerais de provenances différentes[36] afin d'obtenir une charge de composition optimale, ou par l'adjonction de matériaux spécialement adaptés.

A. BOUTHIER et alii. (1987, p. 266) ont constaté la présence de grains de quartz dans des scories: les contours anguleux de ces inclusions indiquaient qu'elles ne pouvaient se trouver dans le minerai d'origine, mais avaient été ajoutées intentionnellement lors de la charge du bas-fourneau: la formation de cryptes d'érosion montrait bien que ces grains avaient cédé de leur substance au mélange réactionnel.

Dans une installation dont les parois étaient souvent refaites on peut se demander s'il n'eût pas été opportun d'utiliser un matériau aux caractéristiques proches de celles d'un fondant pour le revêtement intérieur de la cuve: pour A. QUIQUEREZ (1871, p. 78) les artisans antiques auraient déjà eu conscience de ce détail technique en utilisant des pierres calcaires pour construire le dôme de leurs bas-fourneaux[37] puisque ce matériau fixait le $SiO_2$ de la gangue.

---

[36] Une opération que confirment les découvertes de Montcherand, des gisements de nature différente se trouvant à proximité immédiate (supra p. 40).

[37] Ainsi en 1871 A. QUIQUEREZ écrivait-il: *«Les pierres calcaires bordant l'orifice du gueulard, se calcinaient plus ou moins durant l'opération et les parcelles, qui tombaient dans la cuve, servaient de fondant.»* Il peut être intéressant de replacer ce propos dans le contexte scientifique de l'époque: vers 1863, en effet, P. MARTIN avait mis au point un four dont la couverture de la sole aurait joué un rôle actif durant la fusion; la réduction du silicium contenu dans le sable de quartz la recouvrant exerçait une action désoxydante sur les aciers produits à partir de minerais à forte teneur en $SiO_2$ (50-55%), avec pour corollaire une usure rapide du fond du four; ingénieur des mines, sans doute au courant des découvertes techniques les plus récentes, A. QUIQUEREZ s'en inspira-t-il dans son interprétation des restes qu'il mit au jour?

En 1878 – huit ans après les propositions de l'auguste archéologue jurassien –, les cousins Sidney et Percy GILCHRIST réaliseront un four, dont les briques réfractaires étaient en dolomie (mélange de chaux et de magnésie), à laquelle serait venu se combiner le phosphore du bain de fonte, de la chaux étant en outre utilisée comme fondant.

Il est certes difficile d'interpréter la teneur en chaux (CaO) des scories analysées, mais dans les échantillons Mo5 et Mo13 (infra p. 76 et p. 78, tabl. 12) l'excès de CaO suggère l'usage de fondants; cette teneur inhabituelle pourrait être mise en rapport avec l'apparition d'un procédé d'enrichissement et les scories présentant de fortes teneurs de cet oxyde semblent en outre correspondre aux bas-fourneaux les plus récents[38]: nous avons vu que du minerai carbonaté est précisément susceptible de provenir d'un gisement voisin et sa gangue étant de la calcite $CaCO_3$ – un des fondants les plus utilisés de nos jours sous le nom de *castine* –, il aurait pu être ajouté au matériau de base pour améliorer les conditions de fusion de l'ensemble, dont les scories vitreuses ont d'ailleurs la coloration bleue caractéristique de la présence de CaO.

Au vu des procédés sidérurgiques modernes, nous serions tenté d'attribuer un rôle important au revêtement des cuves dans le déroulement de l'opération sidérurgique[39]: sans que les artisans s'expliquent forcément la nature des processus chimiques qu'ils créaient, auraient-ils eu recours à des argiles basiques lorsque les minerais étaient acides et inversement? Une pareille démarche, si elle ne peut être prouvée archéologiquement – le revêtement existe en fonction de son rôle premier de couverture –, doit en tout cas être prise en compte car elle aurait complété – si ce n'est même rendu inutile – le recours à des fondants.

[38] Certes les mêmes considérations que pour la chronologie des bas-fourneaux (P.-L. PELET, 1973, pp. 133-134 ou 1982b, p. 210) pourraient être faites ici: leur évolution sera influencée autant par le progrès technique que par le retour à des procédés traditionnels.

[39] Dans sa thèse P. ANDRIEUX (1990) précise le comportement et le rôle du revêtement intérieur des bas-fourneaux au cours du processus de réduction.

# CHAPITRE III

# LES BAS-FOURNEAUX

La comparaison des structures mises au jour avec des éléments déjà existants ou répertoriés dans les typologies disponibles est un passage obligé de tout travail archéologique, et dans ce contexte deux approches auraient été envisageables, à partir des classifications mises en place par P.-L. PELET.

## *1. Propositions de typologies*[1]

Une première typologie (P.-L. PELET, 1974, p. 805 et 1976, p. 710, fig. 2) répertorie *sept types de cuves* en Europe (fig. 23):

1. *creusée en marmite* (dès la période de Hallstatt),
2. *en entonnoir* (creusée ou bâtie, cette variante de **1.** aurait permis la production d'éponges plus denses),
3. *tubulaire* (haute plus de 2 m, tirage naturel: parfois inclinée pour faciliter la circulation d'air),
4. *à panse élargie* (permettant une meilleure conservation de la chaleur),
5. *conique* (provoquant une réverbération de la chaleur tout comme le type suivant),
6. *en forme de coupole,*
7. *en double cône* (dont la forme, facilitant le chargement et permettant la formation d'éponges plus denses, sera reprise dans les hauts-fourneaux modernes).

Relevant les difficultés qu'il y avait à exploiter une telle typologie, P.-L. PELET (1982b, pp. 208-211) préféra un autre classement dont il avait déjà déterminé les lignes conductrices en 1973[2] et qui porte sur les *caractéristiques fondamentales* du bas-fourneau: la situation la plus favorable serait celle où elles ont toutes leur valeur optimale; P.-L. PELET (1982b) explique comment, en raison aussi de l'impossibilité de lier le progrès technique à une chronologie, c'est cette deuxième classification qui est appelée à s'imposer.

| | |
|---|---|
| **1** | isolation |
| **2** | ventilation |
| **3** | réfraction |
| **4** | forme du fond |
| **5** | porte |
| **6** | nature des tuyères |

Alors que la valeur synthétique de la *classification des formes* ne peut être contestée, il convient de relever qu'en raison des particularismes régionaux – autant culturels que technologiques – un tel regroupement, par ailleurs «diachronique», est difficilement justifiable

[1] Concernant la typologie des bas-fourneaux, en plus des articles de P.-L. PELET, il convient de consulter H. CLEERE (1972). Cet article fait une distinction majeure entre les bas-fourneaux de nos régions et ceux d'Europe centrale – à scorie «piégée» – où l'éponge se forme dans une cavité placée sous l'installation: celle-ci sera complètement détruite lors du prélèvement de la masse ferreuse produite au cours du processus sidérurgique. Les bas-fourneaux de ce type sont décrits par R. PLEINER (1965) et K. BIELENIN (1974).

Toutes ces installations appliquent la méthode *directe* qui produit du fer faiblement carburé; elles se différencient du *haut-fourneau* moderne dans lequel on procède par méthode indirecte, la *fonte* produite devant ensuite être décarburée afin de donner du fer.

[2] P.-L. PELET (1973, p. 121), après avoir défini quatre-vingt-onze caractéristiques d'un bas-fourneau, retenait sept points principaux: a) l'isolation, b) la ventilation, c) la hauteur, d) la surface du fond, e) la forme de la cuve, f) la forme du fond, g) la présence d'une porte. Cette typologie, revue une première fois (1977, pp. 174-176), sera ramenée à six points, ne tenant finalement pas compte de la hauteur du bas-fourneau, de la surface de son fond et de la forme de la cuve; interviendront par contre la réfraction et la nature des tuyères.

dans une optique archéologique[3]: ce sera encore plus le cas si nous évoquons le possible retour à des procédés archaïques lorsqu'une technique de pointe s'avérait difficilement maîtrisable; toute chronologie des formes des bas-fourneaux étant exclue (P.-L. PELET 1982a, p. 330), leur typologie ne se justifiera que dans un contexte d'histoire des sciences et des techniques. Dans la présentation du site de Montcherand, un classement des bas-fourneaux établi sur des bases aussi précises est de toute façon impossible en raison du mauvais état de conservation des structures qui y ont été découvertes.

Si le classement des *facteurs influençant le fonctionnement* des bas-fourneaux est extrêmement intéressant car, établi selon des critères technologiques, il est applicable à toute installation quelle qu'en soit la forme, à Montcherand les structures fortement endommagées pouvaient difficilement être mises en rapport avec ces données.

L'état fragmentaire des autres installations n'a donné lieu qu'à quelques appréciations concernant la forme de leur fond, tandis que l'absence de renseignements sur l'isolation (**1.**) et la réfraction (**3.**) rend bien aléatoire toute considération au sujet du fonctionnement de l'ensemble.

*2. Développement technique*

Devant les difficultés qu'il y avait à interpréter ces classements, nous avons préféré privilégier la présentation des étapes de l'évolution des bas-fourneaux, en nous limitant à une progression quelque peu schématisée:

> *une simple cavité dans le sol dans laquelle la fusion du minerai est activée par un soufflet, plus tard protégée par un dôme, l'ensemble étant finalement équipé de tuyères.*

| Bas-fourneau | IV | III | III' | Va | Vb | Vc | IIa | IIb | I |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1. isolation | | | | | | | | | |
| 2. ventilation | | | × | | | | | | × |
| 3. réfraction | | | | | | | | | |
| 4. forme du fond | (×) | | X | **(X)** | (×) | (×) | (×) | (×) | **X** |
| 5. porte | (×) | | × | | (×) | (×) | | (×) | × |
| 6. tuyères | | | × | | | | | | × |

**X** valeur optimale  X valeur intermédiaire  x simple présence

Tabl. 7 Facteurs influençant le fonctionnement des bas-fourneaux de Montcherand

**Commentaire**: pour P.-L. PELET (lettre du 12 août 1989) la réfraction est le facteur principal affectant le fonctionnement d'un bas-fourneau. La forme de la cuve (fig. 23) d'une part, sa hauteur et la surface de son fond d'autre part, n'étant que des composantes destinées à améliorer la réfraction, celle-ci sera représentative de toutes ces données (supra p. 47, n. 2) et s'y substituera comme facteur déterminant.

Le bas-fourneau I peut être confronté à cette classification – tableau 7 –, encore la comparaison se limite-t-elle à quatre des six points: il est muni d'une ventilation (**2.**), la forme de son fond (**4.**) est la plus évoluée[4], il est doté d'une porte (**5.**), la tuyère (**6.**) trouvée à proximité a un diamètre acceptable[5]. Le bas-fourneau III' présente lui aussi quatre de ces caractéristiques: vraisemblablement muni d'un dispositif de ventilation (**2.**), la forme de son fond (**4.**) est d'un type intermédiaire et il est doté d'une porte (**5.**), mais aucune mesure n'a pu être faite du fragment de tuyère (**6.**) qui lui est rattaché.

Une telle retenue nous permet de rester proches du contexte technologique qui était celui

[3] Les travaux en cours tendent à prouver que chaque région aura ses particularités, et ceci déjà au niveau de la Suisse. Relevons aussi les difficultés qu'il y a à comparer les descriptions que les générations successives de fouilleurs ont faites de ces structures.

[4] Dans la mesure où nous pouvions la reconstituer, la forme du fond des bas-fourneaux a donné lieu à d'intéressantes conclusions, suggérant l'établissement d'une typologie à partir de cet élément (infra p. 92 et fig. 49, mais aussi P.-L. PELET, 1973, p. 127, tabl. VIII).

[5] Supra fig. 10a. Selon P.-L. PELET (1982b, p. 210), les tuyères les plus archaïques ont un diamètre de 5 cm, les plus efficaces de 2,5 cm.

de Montcherand où seules la présence des dômes et l'apparition des tuyères peuvent être attestées à partir des restes archéologiques.

Cette option représente certes une régression par rapport aux classifications extrêmement affinées de P.-L. PELET; mais aussi frustrante soit-elle, elle est pour nous la seule qui pourrait être appliquée à ces installations très endommagées dont même le pourtour de la partie de la cuve subsistant reste des plus approximatifs.

Il est intéressant de relater ici les impressions de A. QUIQUEREZ (1866, p. 37) au sujet des variations qu'il avait relevées dans la constitution des bas-fourneaux, dans ce cas précis de forme élevée et sans tuyères:

> *«Leur forme intérieure n'est pas plus régulière, passant de celle circulaire à celle ovale, sans autre motif que le défaut de soin de l'ouvrier. Ils vont parfois en s'élargissant un peu de bas en haut, et parfois en sens contraire, mais toujours avec une extrême irrégularité. Nous en avons observé qui offraient, à 25 ou 30 cm au-dessus du creuset, un rétrécissement très sensible de trois côtés, représentant le premier rudiment de l'établissement de nos hauts-fourneaux modernes. Peut-être n'était-ce qu'un caprice de l'ouvrier.»*

Il ajoutait plus loin (pp. 50-51):

> *«... des réparations partielles et fréquentes, occasionnant chaque fois un rétrécissement de la cuve et une déformation plus ou moins grande, selon l'irrégularité du travail...»,*

ou commentait encore (p. 58):

> *«... mais l'étude de ces matières offre des variations nombreuses, qu'on peut attribuer à plusieurs causes provenant des matières premières, comme du minerai plus ou moins siliceux, des fondants naturels et accidentels, de la construction et de la marche des fourneaux, et autres causes.»*

Le progrès technique paraît difficilement être le résultat de cuissons expérimentales réalisées sur des installations aux formes nouvelles; on peut se demander si ce ne sont pas précisément les constatations auxquelles auraient donné lieu ces imperfections bien involontaires qui, alliées à la reprise de techniques déjà éprouvées par d'autres artisans, expliqueraient l'évolution vers des formes assurant une meilleure production: songeons à la cuve du bas-fourneau I, le plus récent du site de Montcherand, qui est précisément ovale.

On se souviendra cependant de la durée de vie de toute façon limitée de ces installations: souvent démantelées en cours de fonctionnement, mais de toute manière provisoires en attendant l'échéance représentée par l'épuisement des matières premières, elles étaient conçues différemment que si elles avaient été bâties pour durer.

Dans notre description des trois types de structures les plus marquants nous avons chaque fois rappelé quelques exemples significatifs d'opérations sidérurgiques effectuées sur des installations reconstituées. L'évocation des séries systématiques d'essais auxquelles a procédé P. ANDRIEUX durant la dernière décennie sort des limites de ce travail en raison de leurs finalités particulières[6].

Le bas-fourneau le plus primitif consiste en un simple trou creusé dans le sol. On y allumait un feu auquel on ajoutait, par quantités successives, le minerai mélangé à du charbon de bois. Au fond de la cuve, au cours d'une combustion activée par des soufflets, se formait peu à peu une éponge composée d'un conglomérat visqueux de métal et de scories.

---

[6] Dans sa thèse, P. ANDRIEUX (1990) exploite les résultats obtenus sur une cinquantaine de bas-fourneaux mis en activité à l'Archéodrome de Beaune entre 1982 et 1988, centrant ses conclusions sur l'influence et le comportement de la paroi des installations au cours de l'opération sidérurgique. Des bas-fourneaux à tirage naturel et à ventilation artificielle ont été testés avec une limonite de provenance australienne, dont la teneur en oxyde de fer se situe entre 70 et 80%. Cinq ou six sondes thermiques distantes de 20 à 25 cm le long d'un axe vertical – disposition empruntée à R.F. TYLECOTE (infra p. 52) – et protégées par un tube en céramique contrôlaient l'évolution de la température. Les essais pratiqués sur les bas-fourneaux à tirage naturel confirmèrent l'importance qu'avait leur hauteur. Pour les fours dotés d'un dispositif de ventilation, P. ANDRIEUX n'utilisa que des soufflerie manuelles, renonçant à tout mécanisme moderne. Les températures atteintes d'une expérience à l'autre varièrent généralement entre 1100° et 1200°, dépassant 1400° près des tuyères. Le rôle des fondants put être démontré et des tentatives de forgeage ont confirmé la nécessité d'une opération complémentaire de raffinage.

On a retrouvé de ces bas-fourneaux notamment en Norique; l'exemple classique est celui des deux foyers juxtaposés du Preisenhof bei Hüttenberg en Carinthie (W. SCHMID, 1932, p. 16(182)).

Le plus grand, de 65 cm environ de profondeur et de 1m60 de diamètre, paraît avoir servi au grillage car il ne contenait pas de scorie adhérente. L'autre, de 95 cm de profondeur et de 1m25 de diamètre, était le bas-fourneau; il contenait encore sa masse de fer en partie réduit, entourée de scories. Certains bas-fourneaux de ce type avaient un diamètre et une profondeur de 15 cm seulement (tabl. 8).

Le sol et les parois de ces deux structures étaient constitués de plusieurs couches d'argile mêlée de quartz atteignant une trentaine de centimètres d'épaisseur. Des fragments des parois calcinées remplissaient le bas-fourneau; à l'origine elles devaient donc dépasser, *au moins légèrement*, le niveau du sol. Les deux foyers étaient réunis par un pavage qui se continuait jusqu'à un tas de scories trouvé un peu plus loin. Ce pavage au mortier de chaux et un fragment de chapiteau trouvé à proximité auraient prouvé que cette installation, aussi primitive fût-elle, remontait à l'époque romaine. Bien qu'aucun fragment de tuyère ne paraisse avoir été retrouvé, un dispositif de ventilation était indispensable à la réussite de l'opération de réduction[7].

Si J. SADZOT (1956, pp. 567 et 569, tabl. 1 et 2) fournit des valeurs chiffrées concernant les résultats obtenus lors d'opérations de réduction effectuées dans de simples cuves munies d'une tuyère, en raison de leur valeur historiographique nous mentionnerons plutôt les premiers essais remontant à 1877: G. WURMBRAND (1877, p. 152) tenta une opération de réduction à partir d'une cuve chargée de couches alternées de charbon de bois et de minerai. Après 26 heures, près de 6 kg de fer s'étaient formés, dont la teneur en carbone permettait d'obtenir de bons résultats au forgeage et desquels il aurait même réussi à tirer divers objets; malheureusement, il ne consigna aucune autre donnée dans son rapport[8].

La deuxième catégorie de bas-fourneaux se caractérise par sa forme élevée, un dôme – mais dans certains cas il conviendrait plutôt de parler de cheminée – surmontant le foyer. Ce type de bas-fourneau est présent en Gaule dès l'époque celtique et jusqu'à l'époque romaine. Dans nos régions, la hauteur peut aller jusqu'à 2m50 et le diamètre atteindre 90 cm. En Europe centrale, comme le relève aussi P.-L. PELET (1974, p. 794), ces installations paraissent avoir eu de plus faibles dimensions[9], hauteur et diamètre descendant jusqu'à 60-70, respectivement 25-30 cm: il est vrai que le principe de fonctionnement y est quelque peu différent[10].

D'après A. QUIQUEREZ (1866, pp. 35-36) qui étudia ces installations dans le Jura bernois, on commençait par creuser à flanc de coteau une fosse d'un diamètre triple de celui du futur foyer; on damait au fond de l'argile puis on construisait tout autour une paroi du même matériau. Le sommet était couronné de pierres brutes. Le tout constituait une sorte de cône tronqué, entouré de terre et de pierres sous un revêtement de pierres sèches (H. FEHLMANN, 1932, pp. 24-25). Il n'y avait pas trace de soufflerie et cependant le tirage avait été assez énergique pour que la face opposée à l'entrée de l'air se soit trouvée scoriacée; un tirage favorable était assuré par les structures hautes, l'air chaud montant alors dans le conduit au lieu de se disperser aussitôt et créant ainsi un courant d'aspiration. Les restes de ces bas-fourneaux sont toujours très ruinés car une fois la fusion terminée, les ouvriers devaient les détruire au moins en partie pour extraire l'éponge qui s'était formée au fond.

Un bas-fourneau de ce modèle fut reconstitué à Siegen, près de Düsseldorf par J.W. GILLES (1958): au cours des essais il obtint une

---

[7] Voir à ce sujet les expérimentations relatées par J. SADZOT (1956, p. 568).

[8] Par ces expériences couronnées de succès, il confirmait l'existence de ce type de bas-fourneaux, qu'un examen critique des rapports de fouilles les mentionnant aurait pu ramener à des installations dont la destruction du dôme avait échappé aux archéologues.

[9]

| Valeurs en cm | D | H | P | Source |
|---|---|---|---|---|
| **Simple cuve ou excavation** | | | | |
| Křepice | 30-40 | | 50 | R. PLEINER, 1965, p. 21 |
| Dolní Počernice | 25-30 | | 55-60 | ibid. p. 22, fig. 2.2 |
| Chýně I | 20-30 | 50 | 22-25 | ibid. p. 21 |
| **Bas-fourneau avec dôme** (sans ventilation) | | | | |
| Prague Podbaba VII | 30-35 | 85-90 | | R. PLEINER, 1965, p. 22, fig. 2.10 |
| Netrěba-Církvice | 30-35 | 60-70 | | ibid. fig. 2.11 |
| **Bas-fourneau avec ventilation** | | | | |
| Loděnice | 25-30 | 70 | | R. PLEINER, 1965, p. 22, fig. 2.9 |

Dimensions des divers types de bas-fourneaux d'Europe centrale
D = diamètre H = hauteur P = profondeur dans le sol

[10] Supra p. 47, n. 1.

température de 1420°, réussissant à produire un métal contenant 91,2% de fer et 0,09% de carbone (p. 1691, tabl. 2): la qualité des morceaux de fer obtenus par martelage de l'éponge, était très irrégulière.

Après un préchauffage du bas-fourneau la fusion avait duré 30 heures et fourni, par martelage d'une masse de 128,5 kg, 17,3 kg d'éléments métalliques qu'il aurait fallu forger en un lingot unique[11].

Si les résultats obtenus étaient quelconques, il convient toutefois d'insister sur l'absence de toute ventilation artificielle, ce qui explique en partie la durée excessive de cette opération et serait un indice supplémentaire quant à la présence presque obligée de soufflets.

Le bas-fourneau était équipé de quatre thermomètres et d'un dispositif de prélèvement des gaz. Après y avoir brûlé 300 kg de charbon de bois destinés à l'assécher, le bas-fourneau fut chargé à 76 reprises par jets de 2 kg de minerai (pour un total de 152 kg), alternés avec 77 fournées de 2,7 kg de charbon de bois. Le minerai provenait de trois différents sites des environs, et avait été réduit en morceaux de moins de 30 mm. L'expérience montra qu'il convenait d'augmenter la proportion de fer des couches successives en utilisant des morceaux de minerai toujours plus petits. Peu à peu, la partie arrière de la cuve s'incrusta de scories, tandis que les expérimentateurs avaient la possibilité de régler le tirage de l'installation en en modifiant l'ouverture inférieure non seulement en dimensions, mais aussi en la déplaçant dans le sens de la hauteur du bas-fourneau; la température la plus élevée fut obtenue exactement en face de l'orifice.

Le perfectionnement suivant consista à adapter une soufflerie à l'adduction d'air ménagée dans le bas de la cuve, rendant ainsi le travail indépendant du vent: dans nos régions, certains auteurs feraient remonter au 2e s. av. J.-C. l'application à la métallurgie du fer de cette technique connue dès la plus haute Antiquité (infra p. 54).

Ces bas-fourneaux, généralement plus bas que le type précédent, peuvent encore avoir jusqu'à 2m de haut et 1m30 de diamètre, bien qu'on en trouve déjà d'un diamètre de 25-30 cm pour 70 cm de haut; la chape est constituée de pierres garnies d'une forte couche d'argile. Une porte, scellée avec de l'argile pendant la cuisson, permet d'extraire l'éponge sans trop endommager la cuve. A la base, un ou plusieurs canaux sont ménagés pour l'adduction de l'air; par un bon vent, on laissait ouvert le canal le mieux exposé, ou aussi le dessus de la porte; lorsque le vent était trop faible, au moyen de buses en terre cuite dont on retrouve souvent les restes, on adaptait une soufflerie à l'appareil.

Dans ce cas, les premiers essais de fusion convenablement documentés paraissent avoir été effectués en 1962 par E. PLOECKINGER et alii. (1964) à partir de bas-fourneaux reconstruits sur le modèle de ceux découverts par W. SCHMID (1932, p. 39(205)); deux structures, l'une haute de 1m50 et d'un diamètre de 75 cm, l'autre aux dimensions de 1m et 45 cm, pour des volumes de 0,55 et 0,13 m$^3$, équipées toutes deux d'une tuyère, furent mises à feu. Le minerai fut chargé après un préchauffage de 9h1/2 suivi d'une ventilation de 1 heure: une pointe de température de 1420° fut atteinte dans le plus grand des bas-fourneaux; à plusieurs reprises les tuyères avaient dû être débouchées.

Les expérimentateurs (ibid. p. 22) insistaient sur les différences notables de température à l'intérieur de la cuve et sur la nécessité d'indications précises sur l'endroit où serait faite la mesure[12]: alors que dans les parties hautes des bas-fourneaux on atteignait 700°, c'est au niveau de la tuyère, située 10 cm plus haut que le fond du foyer, qu'au bout de 15 heures on arriva à la température de 1420°: il convient de relever qu'à 20 cm du fond les températures étaient toujours plus élevées d'une centaine de degrés, mais aucune mesure ne fut faite à ce moment-là.

Pour l'ensemble de l'opération, 375 kg (155 kg) de charbon de bois et 75 kg (45 kg) de minerai furent nécessaires (ibid. p. 21): aucune donnée n'est par contre rapportée sur les quantités produites, les auteurs s'étant fixé pour seul objectif d'obtenir de l'acier.

Après avoir été laissés refroidir durant trois jours, les bas-fourneaux furent démantelés, car c'était la seule manière d'en récupérer le contenu: si la répartition des produits de l'opération sidérurgique dans le bas-fourneau reste difficile à reconstituer à la lecture du rapport scien-

---

[11] Le forgeage de deux masses de particules de fer de 500 g chacune produisit un morceau de 340 g.

[12] *«... einzelne Schrifttumsangaben vorsichtig beurteilt werden müssen und nur unter Berücksichtigung der genauen Angabe der Messstelle aussagekräftig sind.»*

tifique, on constate que, contrairement à ce qu'on serait tenté de penser, le fer ne forma pas un bloc homogène mais se solidifia en différents points du foyer, pris dans des scories dont la nature variait selon des conditions de fusion propres à chaque secteur de la cuve; par endroit le fer apparaissait en fines strates, presque pur de toute inclusion, ailleurs il avait la forme de grains pouvant contenir de la cémentite d'une teneur théorique de 6,67% de carbone; d'autres petites coulées, descendues plus bas que la tuyère, avaient une composition proche de celle de l'acier[13].

Tandis que les strates étaient faites de lamelles de quelques dixièmes jusqu'à 10 mm d'épaisseur, les grains pouvaient atteindre un diamètre de 20 mm. Dans l'axe du courant de ventilation des buses on trouva des blocs de scories d'un diamètre de près de 25 cm *(«zusammengefrittete Kuchen vor den Blasdüsen»)* contenant à la fois des strates de fer et des grains aux teneurs plus élevées en carbone, avec des traces de cémentite.

La tentative de R.F. TYLECOTE et alii. (1973) mérite aussi d'être signalée: un bas-fourneau en briques d'alumine haut de 1m80 et de 30 cm de diamètre fut construit sur le modèle d'une installation fouillée à Ashwicken: le diamètre extérieur était de 1m jusqu'à une hauteur de 1m14, puis se réduisait à 60 cm. Après quatre fusions effectuées en plein air le bas-fourneau fut transféré dans un laboratoire et fonctionna encore 28 fois. Six orifices espacés d'environ 12 cm étaient placés verticalement pour recevoir les sondes destinées aux mesures de température et de pression. La porte du bas-fourneau, dotée d'une tuyère une fois l'opération lancée, avait 38 cm de haut pour une largeur de 23 cm.

Des fusions spécifiques furent faites pour évaluer les diverses variables, dont la hauteur de la charge dans le bas-fourneau et les dimensions du minerai, une partie duquel avait été grillée avant l'opération. Plusieurs dimensions du charbon de bois furent essayées: d'abord des morceaux durs allant jusqu'à 10 cm, puis un mélange de morceaux tendres et durs, tamisés entre 2,5 et 8 cm. Les morceaux de minerai – de la sidérose ($FeCO_3$) – ne devaient pas dépasser 12 mm, leur dimension influençant la fluidité des scories et le début de l'opération de réduction. Le préchauffage de l'installation était réalisé artificiellement par projection d'air chaud. En cours de fonctionnement la température était de 1300° à l'intérieur du four et atteignit 1600° à proximité de la tuyère.

Le combustible et le minerai furent mélangés en proportions variables au cours des diverses fusions, les adjonctions en cours d'opération se faisant de façon à ce que la hauteur de la charge reste constante à l'intérieur de la cuve. Durant les essais, diverses valeurs furent données au rapport charbon/minerai qui passa de 2:1 à 1:4; ce dernier dosage, s'il donnait naissance à des scories s'écoulant facilement, conduisait à une augmentation du fer contenu dans celles-ci, avec comme corollaire une diminution de la teneur en carbone de l'éponge, qui passa de 1,8 à 0,03% (R.F. TYLECOTE et alii., 1973, p. 43, tabl. 5).

Des précisions étaient fournies concernant le moment où on devrait extraire l'éponge, qu'il s'agisse de la nécessité de la laisser se développer suffisamment ou du bruit produit par l'air insufflé dans la masse incandescente lorsque les dimensions de l'éponge tendraient à obturer la tuyère. Le résultat paraît avoir été une éponge homogène, dont R.F. TYLECOTE (ibid. p. 46) donne les dimensions dans son tableau 9[14]. De l'acier – 0,3 à 0,8% C – fut aussi obtenu, mais la forte présence de scories dans l'éponge nécessitait des traitements complémentaires.

G. SPERL (1986) a lui aussi tenté de travailler avec un bas-fourneau du type dit «norique» *(norischer Bauart)*: après un préchauffage par un feu de bois d'une durée d'une heure, l'installation était chargée avec du charbon de bois en petits morceaux de 20/50 mm et continuait de chauffer durant deux heures; une fois fermé, l'orifice inférieur servait de support à une buse de ventilation. Le minerai et le combustible étaient chargés en proportions identiques, avec parfois des fournées comportant exclusivement du charbon de bois: une heure plus tard l'éponge se formait au niveau de la tuyère; le bas-fourneau était encore rechargé durant deux à trois heures[15], puis était ouvert après

[13] La découverte de coulures de fonte – que l'on peut définir comme un acier à la teneur en carbone trop élevée – est relativement fréquente lors de la fouille de bas-fourneaux, ainsi par exemple à Prins-Bois II (P.-L. PELET, 1973, p. 112).

[14] La fusion n° 27 fournit par exemple une éponge de 6,5 kg à partir de 22,7 kg de minerai.

[15] Cette valeur n'est pas spécifiée par G. SPERL (1986) mais nous a été précisée par P.-L. PELET (lettre du 12 août 1989) qui participa à cette tentative de reconstitution. Le recours à un dispositif de ventilation mécanique n'influença que minimement la durée de l'opération.

| Valeurs en cm | D | H | P | Source |
|---|---|---|---|---|
| **Simple cuve ou excavation cylindrique** | | | | |
| | 15-150 | | | P.-L. PELET, 1973, p. 125 |
| Hüttenberg | 125 | | 95 | W. SCHMID, 1932, p. 16(182) |
| Jura | 90 | | 30-40 | A. QUIQUEREZ, 1866, p. 35, pl. 1 |
| **Bas-fourneau avec dôme et sans ventilation** | | | | |
| Montagne Noire | 30-40 | 200 | | C. DOMERGUE et alii., 1982, p. 228, fig. 12 |
| Siegerland | 60-90 | 150 | | R. PLEINER, 1965, p. 16 |
| Jura | 45-48 | 230-250 | | A. QUIQUEREZ, 1866, p. 36 |
| **Bas-fourneau avec ventilation** | | | | |
| | | 120-150 | | P.-L. PELET, 1973, p. 124, tabl. V |
| Feisterweise I | 100 | 200 | | W. SCHMID, 1932, p. 39(205) |
| Jura-Favergeatte | 55 | 200 | | A. QUIQUEREZ, 1866, p. 49, pl. 4 |
| Prins-Bois XIII | 80 | | | P.-L. PELET, 1960, p. 64, fig. 7 |
| Hüttenberg | 100-130 | 160-190 | | W. SCHMID, 1932, p. 17(183) |
| Ashwicken-Norfolk | 30 | 150 | | R.F. TYLECOTE, 1987, p. 171, fig. 5.16 |
| Engsbachofen | 130 | 100 | | P. WEIERSHAUSEN, 1939, p. 9, fig. 2 |
| Montcherand I | 60-140 | (125) | | |
| Montcherand III' | 50-90 | | | |

Tabl. 8 Dimensions des divers types de bas-fourneaux selon la littérature

D = diamètre H = hauteur P = profondeur dans le sol

s'être refroidi d'une demi-heure à une heure: des scories avaient dû être évacuées presque toutes les heures. S'il indique qu'il dut recourir à 50 kg de minerai, G. SPERL (ibid. p. 32) ne fournit aucune autre donnée chiffrée concernant son expérience qui au total dut durer environ sept heures. Dans son bilan (pp. 33-34), parmi les divers points évoqués, il mettait l'accent sur l'importance de la soufflerie.

Les interventions archéologiques récentes, ainsi que les tentatives de reconstitution de traitements sidérurgiques qui s'appuient sur des programmes d'analyses toujours plus complexes, tendraient à confirmer une prépondérance des installations dotées d'un dôme équipé de tuyères, les deux autres variantes n'étant d'ailleurs citées de nos jours encore qu'à partir de rapports de fouilles anciens[16]: une bonne réfraction et le recours à une ventilation ne se sont-ils pas avérés indispensables dans la plupart des opérations de réduction recréées ces dernières années?

Une telle interprétation s'appuierait sur la présence de tuyères presque chaque fois qu'un bas-fourneau est retrouvé en bon état: cette situation reste exceptionnelle puisque dans l'Antiquité ces composantes étaient généralement récupérées des installations dont on interrompait l'exploitation, ce qui expliquerait aussi le mauvais état dans lequel sont retrouvées ces structures.

Il faut aussi remarquer que les dispositifs décrits comme un simple trou dans le sol remontent souvent au siècle passé et que ces témoignages sont rapportés par des ethnologues: il n'est pas hasardeux de dire qu'une sensibilité humaine plus que technique, propre à ces chercheurs, pouvait les amener à négliger l'un ou l'autre détail dans la relation de ce qu'ils avaient vu, comme la présence d'un dispositif de ventilation ou la nature d'un minerai pour le traitement duquel aurait pu suffire un bas-fourneau sans dôme. Ces éléments peuvent induire les chercheurs en erreur au moment où ils *définissent une structure à partir des éléments manquant à celle-ci.*

[16] Supra p. 50 et tabl. 8, ou la date de découverte des structures signalées par R. PLEINER, 1965, p. 61, fig. 15 et R.F. TYLECOTE, 1987, p. 157, fig. 5.6.

*2.1. La ventilation des bas-fourneaux*

Les fragments de tuyères découverts à Montcherand à proximité des bas-fourneaux I et III' confirment que, tout au moins pour ces deux installations, on eut recours à une ventilation artificielle: l'application de ce procédé représente pour l'Antiquité le progrès technique le plus important avec éventuellement l'utilisation des fondants pour abaisser le point de fusion.

Un apport d'air étant nécessaire pour atteindre une température suffisante, le perfectionnement consiste à ouvrir un ou plusieurs orifices vers la base du bas-fourneau: associés à une superstructure élevée assurant un tirage favorable, ils auraient produit une circulation optimale de l'air: un aménagement particulier contribuait à exploiter la direction du vent en le rabattant vers les orifices à l'aide de panneaux mobiles adaptables. L'apport d'air devait toutefois être savamment dosé afin que l'excès n'en oxyde pas le métal au cours de sa réduction. En l'absence de soufflets, il était possible de régler l'aération du bas-fourneau en fermant plus ou moins la porte: pour cela, il suffisait d'un peu d'argile ou de quelques pelletées de menu charbon (A. QUIQUEREZ, 1871, p. 78).

S'ils semblent inconnus en Europe, les soufflets en peau placés sur une coquille de céramique sont déjà attestés sur le bas-relief d'une stèle funéraire thébaine de l'époque de Thoutmosis IV, vers 1425 avant notre ère (fig. 24) et les outres en peau destinées au transport du vin, fréquemment reproduites sur les vases attiques du 5e s. av. J.-C., confirment par ailleurs l'usage de ce matériau[17]. Au siècle passé, les forgerons nomades d'une ethnie tamoule que J. PERCY (1864, p. 261) plaçait au Bengale – il s'agit de tribus que L. BECK (1891², p. 238) situait dans l'Etat du Mysore – utilisaient un système de ventilation adapté à un foyer, creusé en terre, de 15 cm de diamètre qui reposait sur le même principe (fig. 25): comme dans nos contrées, les migrations de ces peuplades étaient dictées par les disponibilités en minerai ou en bois de charbonnage; ce type de bas-fourneau subsistera jusqu'au 19e s. chez les nomades des steppes tels les Tatars Kouznetski, Tartares forgerons précisément... (L. BECK 1891², pp. 285-286).

A l'époque romaine, comme sur la stèle d'Aquilée représentant un atelier de forgeron (Museo Archeologico di Aquileia, inv. 156), feront leur apparition les soufflets à volant, au pourtour en forme de coeur et avec les côtés en cuir (P.-L. PELET, 1983, p. 332) dont le principe de fonctionnement est celui connu de nos jours.

Une fois la ventilation artificielle adoptée, d'autres progrès techniques seront encore possibles; nous songeons par exemple à la modification de l'angulation des tuyères[18]: l'inclinaison donnée à la buse durant la construction du bas-fourneau fixera le point de la cuve où l'apport accru d'oxygène produira la température la plus élevée[19].

Améliorations de détails techniques réalisées dès l'Antiquité ou innovations majeures dont la mise au point et l'application à la soufflerie seront plus longues à trouver: connue dans nos régions dès le 5e s. de notre ère (Vie des pères du Jura 57, 6), la roue à eau sera utilisée en métallurgie dès le 8e s. pour actionner les meules à aiguiser (P.-L. PELET, 1978, p. 54). A Pise, on la mentionne en 1185 (ibid. p. 49) pour entraîner le martinet servant à façonner les éponges. La soufflerie hydraulique, attestée dès 1226 en Valteline, tardera à s'imposer, essentiellement en raison des difficultés à contrôler la puissance de soufflets qui, en prise directe avec le cours d'eau voisin, risquaient de produire de la fonte, un alliage que l'on ne parvenait pas à forger.

Une structure découverte par M. JOOS[20] sur les hauts de Lajoux JU et datée par la céramique indique toutefois qu'encore vers 1400 des bas-fourneaux auraient fonctionné sans tuyère grâce, il est vrai, à un aménagement particulier de leur cuve.

*2.2. Les bas-fourneaux de Montcherand*

L'absence complète de pierres à l'extérieur des foyers (fig. 26) s'explique par une récupération ou une élimination systématique: pour les agriculteurs il est important de dégager les champs de tout obstacle susceptible d'être

[17] In Illiade 18, v. 470, la forge utilisée par Héphaïstos pour confectionner les armes d'Achille aurait disposé de vingt soufflets.

[18] P.-L. PELET (1973, p. 30) signale ainsi des tuyères formant un angle de 45° avec la paroi de la cuve.

[19] Concernant l'angle de ventilation, nous renvoyons le lecteur aux propositions de P.-L. PELET (à paraître).

[20] M. STEINER, (1979, p. 181).

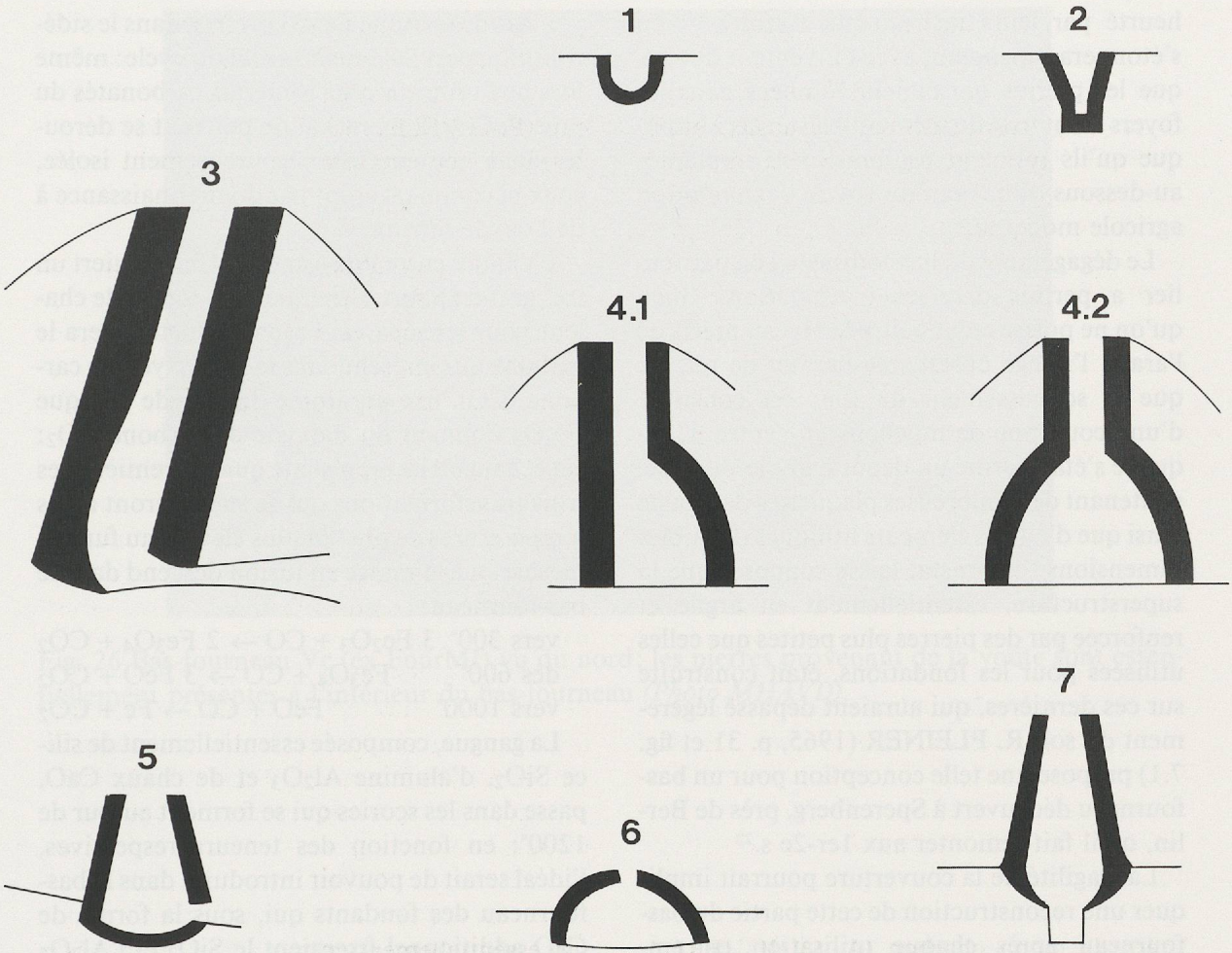



Fig. 23 Formes de cuves selon la typologie de P.-L. PELET (1982b, p.211, fig. 4).

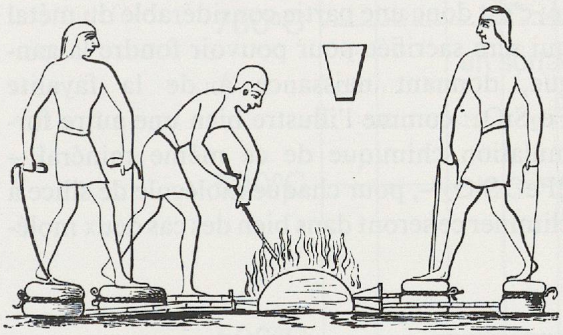


Fig. 24 Artisans activant des soufflets en peau montés sur une coquille. Stèle funéraire - Egypte. Tiré de L. BECK (1891², p.75, fig. 13).

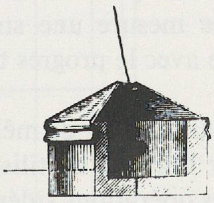


Fig. 9. Vertical section of one of the bellows

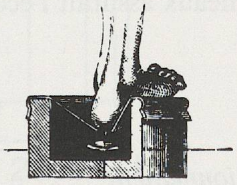


Fig. 10. Section of one of the bellows, showing the action of the heel in depressing the skin and closing the opening in its centre.

Fig. 25 Soufflets en peau montés sur une coquille. Principe de fonctionnement - Bengale. Tiré de J. PERCY (1864, p. 263, fig. 9 et 10).

heurté par leurs instruments aratoires[21]; on s'étonnera cependant, avec l'inventeur du site, que les pierres qui étaient tombées dans les foyers aient tout de même subsisté: ceci implique qu'ils restaient profondément implantés au-dessous du niveau du sol de l'exploitation agricole moderne.

Le dégagement du bas-fourneau I en particulier a permis diverses constatations: bien qu'on ne puisse reconnaître le niveau précis de l'arase, l'image observable permet de relever que le soubassement du four est constitué d'une couronne de moellons au centre de laquelle s'était formé un dépôt d'argile rubéfiée, contenant de nombreuses plaquettes de schiste ainsi que d'autres éléments lithiques de faibles dimensions: ce constat laisse supposer que la superstructure, essentiellement en argile et renforcée par des pierres plus petites que celles utilisées pour les fondations, était construite sur ces dernières, qui auraient dépassé légèrement du sol: R. PLEINER (1965, p. 31 et fig. 7.1) propose une telle conception pour un bas-fourneau découvert à Sperenberg, près de Berlin, qu'il fait remonter aux 1er-2e s.[22]

La fragilité de la couverture pourrait impliquer une reconstruction de cette partie du bas-fourneau après chaque utilisation en employant les mêmes pierres qui, en quelque sorte, avaient fait leurs preuves: ceci contribuerait aussi à expliquer leur nombre relativement réduit, mais suffisant au vu des volumes reconstitués par M. KLAUSENER (tabl. 1): si l'on songe que le four I est le plus évolué de l'ensemble, on peut toutefois se demander dans quelle mesure une structure légère est compatible avec le progrès technique qu'il représente.

La permanence sur de mêmes fondations se justifie par l'intérêt d'utiliser un sol que les précédentes opérations sidérurgiques auraient ainsi stabilisé et asséché[23], la forte densité de scories de la terrasse sur laquelle étaient les bas-fourneaux assurait l'écoulement des eaux de pluie.

### *3. Fonctionnement*

Avant de décrire le processus sidérurgique antique, nous essayerons de présenter très succinctement le chimisme de l'opération métallurgique.

L'oxyde ferrique $Fe_2O_3$ présent dans le sidérolithique est l'élément initial du cycle: même lors de l'utilisation de minerais carbonatés du type $FeCO_3$, l'opération ne pouvant se dérouler dans une enceinte rigoureusement isolée, ceux-ci commenceront par donner naissance à de l'oxyde ferrique[24].

L'affinité entre l'oxygène et le fer requiert un très grand apport d'énergie sous forme de chaleur pour les séparer: l'agent réducteur sera le carbone qui, présent dans le monoxyde de carbone (CO), fixe un atome de l'oxyde ferrique $Fe_2O_3$ donnant du dioxyde de carbone $CO_2$: cet échange[25] ne représente que la première des trois transformations qui se succéderont à des températures de plus en plus élevées au fur et à mesure que la masse en fusion descend dans le bas-fourneau:

vers 300° $3\ Fe_2O_3 + CO \rightarrow 2\ Fe_3O_4 + CO_2$

dès 600° $Fe_3O_4 + CO \rightarrow 3\ FeO + CO_2$

vers 1000° $FeO + CO \rightarrow Fe + CO_2$

La gangue, composée essentiellement de silice $SiO_2$, d'alumine $Al_2O_3$ et de chaux CaO, passe dans les scories qui se forment autour de 1200°: en fonction des teneurs respectives, l'idéal serait de pouvoir introduire dans le bas-fourneau des fondants qui, sous la forme de CaO additionnel fixeraient le $SiO_2$ et l'$Al_2O_3$ avant que ceux-ci ne précipitent avec l'oxyde de fer: s'il a été possible de le prouver à Montcherand (voir pp. 40 et 76), le recours à de tels additifs ne peut être généralisé dans l'Antiquité; c'est donc une partie considérable du métal qui sera sacrifiée pour pouvoir fondre la gangue, donnant naissance à de la fayalite $Fe_2SiO_4$: comme l'illustre bien une autre formulation chimique de ce même minéral – $2FeO{\cdot}SiO_2$ –, pour chaque molécule de silice à éliminer ce seront dans bien des cas deux molé-

---

[21] A Montcherand, l'agriculteur qui exploitait la parcelle sur laquelle se trouvaient les bas-fourneaux indiqua précisément que quelques années plus tôt le terrain avait été retourné jusqu'à une profondeur de 40 cm, afin d'éliminer tout obstacle à la charrue.

[22] L'examen de ces restes archéologiques pourrait fort bien faire songer à une couverture bâtie sur un volume central de combustible et de minerai qui aurait précédemment été mis en place en niveaux successifs à l'intérieur de la couronne de moellons; la phase initiale de l'opération de fusion aurait contribué à sécher la superstructure, mais le succès d'une telle démarche paraît bien aléatoire.

[23] P.-L. PELET (1960, p. 61) précisait pour Prins-Bois I: *«Le fond (...) ne doit ni laisser passer l'humidité ni céder sous le poids de la construction...»*

[24] Comme l'ont confirmé les expériences de G. SPERL, le $FeCO_3$ est difficile à réduire: à l'inverse, il pourrait donner plus facilement naissance à de l'acier.

[25] Le monoxyde de carbone devrait être dosé de façon à correspondre très exactement à la quantité d'oxygène qu'il s'agit de fixer à partir de l'oxyde ferrique, malheureusement il aura une affinité encore plus grande avec l'oxygène de l'air.

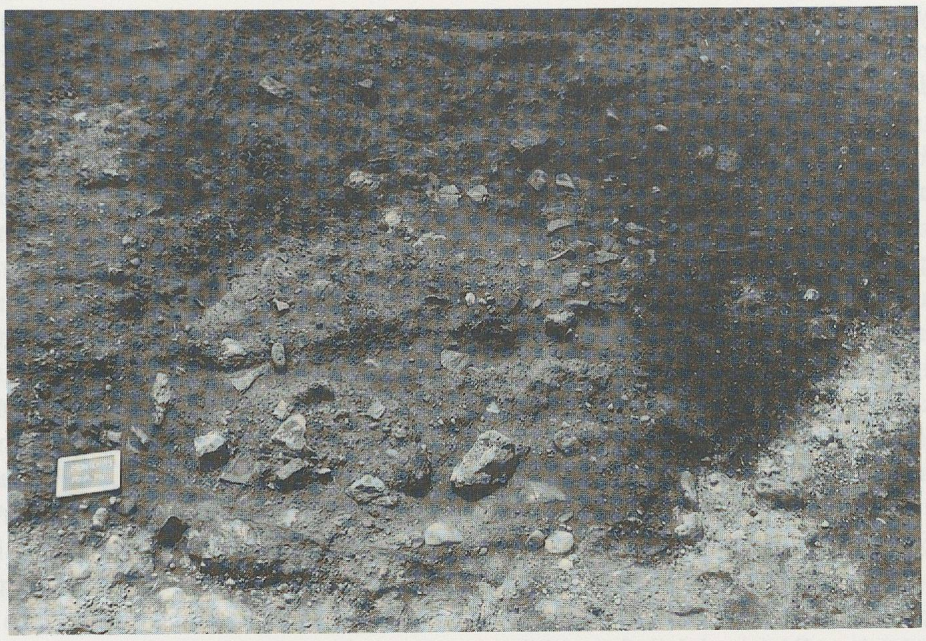


Fig. 26 Bas-fourneau Vc (ex FourMI) vu du nord: les pierres provenant de la voûte sont essentiellement présentes à l'intérieur du bas-fourneau *(Photo MHAVD)*.

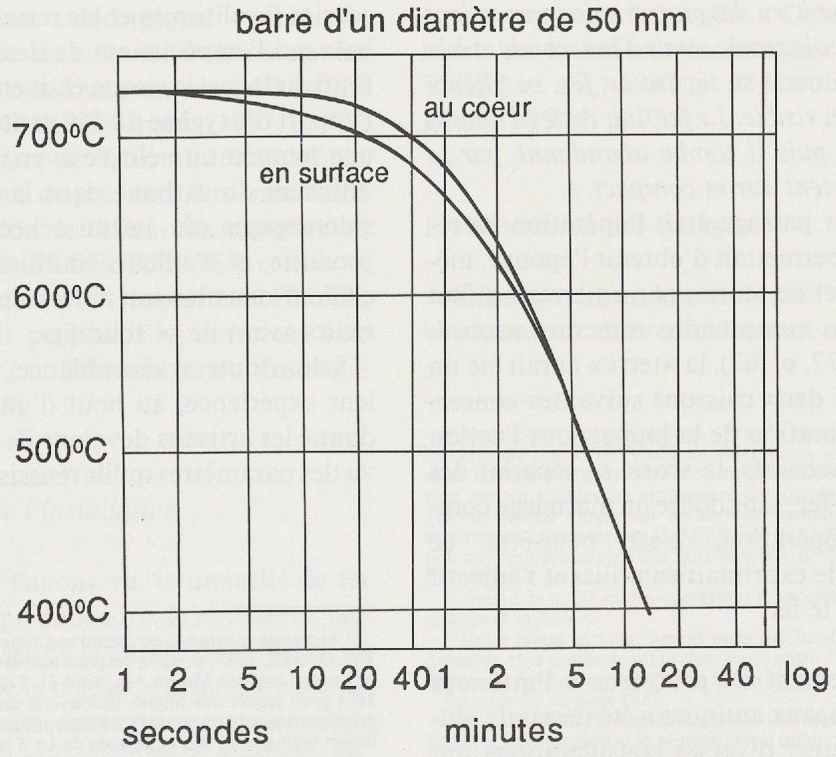



Fig. 27 Courbe de refroidissement pour un Acier 1040 de la norme américaine ASM (0,37-0,44% C, 0,6-0,9% Mn, <0,04% P, <0,05% S). Tiré de *Metals Handbook. Vol. 2: Heat Treating, Cleaning and Finishing*, Metal Park, 1964[8], p.11.

cules d'oxyde de fer qui seront utilisées, car à des températures aussi basses que 1200° c'est à cette condition que la gangue pourra être fixée.

Même s'il avait été possible d'approcher le point de fusion du fer à 1536°, on n'aurait pu obtenir le métal directement, le combustible nécessaire pour atteindre une telle température laissant une quantité trop élevée de carbone dissous dans le métal[26].

A défaut d'une soufflerie suffisante, l'apport de 2% de carbone permettrait certes d'abaisser le point de fusion du fer jusqu'à près de 1147°[27], mais ce matériau – la teneur de 2% est proche de celle de la fonte de première fusion (2,5 à 4,5% de C) produite par les hauts-fourneaux modernes – n'est utilisable que sous certaines conditions, qui n'ont pu être réalisées qu'occasionnellement dans l'Antiquité (infra p. 64).

Etrangement, c'est un auteur antique, apparemment bien éloigné des problèmes de métallurgie, qui nous a laissé la description la plus complète de l'opération de traitement du minerai de fer: parlant des maladies de la vessie, HIPPOCRATE (Maladies 4, 55) décrivait sommairement la manière dont le fer était obtenu: *« C'est ainsi que le fer provient des pierres et de la terre brûlées ensemble. Lors de la première mise à feu, les pierres et la terre collent ensemble avec la scorie, mais à la seconde et à la troisième la scorie se sépare du fer: ce phénomène est bien visible. Le fer, lui, reste (d'abord) dans le feu; puis il tombe abandonné par la scorie, et devient dur et compact. »*

Le premier passage était l'opération de réduction qui permettait d'obtenir l'éponge, mélange de fer et de scorie; par «pierres» il faut bien entendu comprendre minerai; selon J. RAMIN (1977, p. 167), la «terre» aurait été un fondant. Les deux cuissons suivantes concernaient l'élaboration de la loupe: sous l'action de recuits successifs, la scorie se séparait des fragments de fer; sans doute un martelage complétait-il l'opération, c'est peut-être ce qu'Hippocrate exprimait en utilisant l'adjectif πυχνος pour le fer.

Le déroulement du processus à l'intérieur des bas-fourneaux antiques a été décrit de plusieurs manières; diverses considérations ont ainsi été faites par H. CLEERE (1976, pp. 134-135) sur le fonctionnement pratique de ces installations[28].

Le cycle commençait par un préchauffage du bas-fourneau d'au moins une demi-journée afin d'éviter de trop grands écarts de température au début du processus sidérurgique proprement dit[29]. Un fois le bas-fourneau chargé et l'opération lancée, par leur poids propre les morceaux de minerai descendaient dans la cuve, occupant la place libérée au fur et à mesure de la réduction de la masse incandescente, s'approchant ainsi des zones de fortes températures et des courants de gaz à proximité des tuyères. A partir de 700°, des globules de fer commençaient à coalescer, en formant peu à peu une masse visqueuse tandis qu'apparaissaient les premières scories, pauvres en fer; sous l'effet de la chaleur, une partie de l'oxyde de fer, se combinant avec la silice, précipitait en fayalite, descendant jusque sous le niveau des tuyères, dans une zone moins chaude: les scories de ce type, plus lourdes et riches en fer, ne pouvaient pas être traitées une seconde fois avec les moyens de l'époque, les températures réalisables étant trop basses. Les expériences pratiques que nous avons signalées semblent indiquer que les éponges s'obtenaient en rechargeant à plusieurs reprises une première masse incandescente.

Il était important d'extraire au moment opportun l'éponge qui se serait déposée sur les scories fayalitiques et les restes de charbon de bois qui l'empêchaient de descendre jusqu'au fond du foyer; le risque était en effet grand que l'apport d'oxygène dû à la ventilation produise une température élevée avec une plus grande diffusion du carbone dans le fer: l'opération sidérurgique eût été un échec, la fonte ainsi produite, et d'ailleurs inutilisable à l'époque, coulant dans les interstices des niveaux inférieurs avant de se solidifier.

Selon toute vraisemblance, en fonction de leur expérience, au bout d'un laps de temps donné les artisans devaient-ils admettre qu'au vu des paramètres qu'ils réussissaient à contrô-

---

[26] Alors que ce procédé est connu en Chine au 5e s. av. J.-C. (R.F. TYLECOTE, 1987, p. 325), certains auteurs attestent des coulées en Europe avant le Moyen Age: ainsi G. TRONQUART (1987, p. 287) pour lequel des lingots découverts au camp de la Bure ne présentant pas de traces de façonnage prouveraient que le point de fusion était atteint dès la période de La Tène!!!

[27] A peine 60° de plus que la température de fusion du cuivre, réalisée dès la plus haute Antiquité.

[28] L'exemple choisi par H. CLEERE est celui d'une installation dotée d'une ventilation artificielle.

[29] Lors des expériences effectuées par G. SPERL et P. ANDRIEUX cette durée était sensiblement réduite.

ler – durée de l'opération, nature des scories en fonction de la charge, etc –, le processus sidérurgique était terminé.

A ce stade, selon H. CLEERE (1976, p. 136), l'éponge était extraite soit par l'orifice supérieur du bas-fourneau, soit par la porte qu'il aurait fallu enfoncer avec plus ou moins de dégâts à l'installation: mais même dans ce cas des bas-fourneaux purent être réutilisés, ainsi à Holbeanwood certains d'entre eux auraient-ils fonctionné de vingt à trente fois: pour H. FEHLMANN (1932, p. 25) une partie de la paroi était souvent arrachée avec l'éponge au cours de son extraction, situation proche de celle que l'on peut restituer pour l'échantillon Mo4 de Montcherand[30].

C'est par le prélèvement de l'éponge que se termine le cycle connu et attesté de l'opération métallurgique: souvent, les traitements qui suivent ne seront plus que pressentis, exception faite, peut-être, du recuit qu'indique par endroits la présence d'un bas-foyer[31] dans lequel, somme toute, c'est une opération semblable à la précédente qui aurait été répétée.

Bien que le cycle de fonctionnement qui nous est ici proposé paraisse complet, divers éléments restent incertains, qu'il s'agisse des chargements de minerai ou de charbon de bois durant l'opération sidérurgique, ou simplement de la durée de celle-ci: trois ou quatre heures pour des bas-fourneaux de 0,03 à 0,18 $m^3$ selon C. FORRIERES et alii. (1987, p. 98), entre quinze (fours de 0,13 $m^3$ à 0,55 $m^3$) et trente heures (four de près de 0,5 $m^3$ mais sans ventilation) si l'on se réfère aux expériences respectives de G. PLOECKINGER et alii. et J.W. GILLES (supra p. 51); pour P.-L. PELET, les valeurs qu'il proposait[32] pourraient être ramenées entre 2 et 3 heures au vu des expériences récentes[33].

### *4. Rendement de l'installation*

Comme nous l'avons vu, la quantité de fer produite aurait pu dépendre de nombreux facteurs: qu'il s'agisse de la nature du minerai, de la préparation de la charge, qui aurait pu comporter des fondants, des températures atteintes en fonction de la puissance de la soufflerie ou, bien entendu, des dimensions du bas-fourneau; de telles données conduisent aux interprétations les plus larges concernant le rendement de l'installation. Ainsi H. FEHLMANN (1932, p. 25) estimait qu'un bas-fourneau de 0,4 $m^3$ pouvait produire 9 kg de fer, tandis que P.-L. PELET (1976, p. 710) proposait, selon les dimensions, la production d'éponges d'un poids oscillant entre 3,5 et 20 kg dont il aurait fallu encore extraire les particules de fer[34]. L'impossibilité technique de traiter de grandes quantités de minerai au cours d'une même opération sidérurgique explique la présence de plusieurs installations sur un même site.

Le rendement était des plus médiocres, puisque ce n'est souvent que le quart du métal contenu dans le minerai qui était utilisé. H. FEHLMANN (1932, p. 25) signale des scories contenant jusqu'à 43% de fer; c'est ainsi qu'au siècle passé en France, ces déchets qui étaient restés en grandes quantités près des exploitations antiques constituèrent un excellent filon; le ferrier primitif du Domaine des Forges, sur la crête de la Montagne Noire, a été évalué à 3'000'000 tonnes de scories[35] pour une exploitation qui, déjà en cours en 20 av. J.-C. sur le site des Martys, se serait poursuivie jusqu'en 275-280 ap. J.-C.[36]. Dans la Nièvre et le Berry, les ferriers antiques avaient de telles dimensions, que jusqu'en 1968 ces scories étaient transportées en Lorraine où elles contribuaient encore pour une large part à l'approvisionnement de la sidérurgie française (A. BOUTHIER et alii., 1987, p. 254; voir aussi P.-L. PELET, 1974, p. 795).

### *5. Elaboration des éponges*

L'éponge incandescente était extraite du bas-fourneau et éventuellement martelée im-

---

[30] Nous avons signalé (supra p. 18) qu'à Montcherand les fouilleurs ont pu relever des traces de réparations, sous forme de glaisages complémentaires des revêtements intérieurs des cuves, où sont encore visibles les empreintes des doigts des artisans qui avaient modelé l'argile sur les surfaces endommagées. Lors des expériences effectuées par G. SPERL et P. ANDRIEUX l'extraction de l'éponge semble s'être faite sans trop de difficultés (lettre de P.-L. PELET du 12 août 1989).

[31] Ainsi à la p. 50, où les opérations proposées sont toutefois le *grillage* et la *fusion*.

[32] Entre douze et vingt heures pour des bas-fourneaux dont le diamètre et la profondeur auraient varié entre 15 et 50 cm, ce qui donnerait des volumes de 0,01 à 0,4 $m^3$ (1974, p. 793).

[33] Lettre du 12 août 1989.

[34] P.-L. PELET (1974, p. 810) indique un rapport de poids de 1 à 10 entre le fer produit et le minerai, ainsi qu'un volume de 1 $m^3$ de scories par tonne de minerai; l'ensemble de ces valeurs, mais il s'agit ici d'estimations, sera tout naturellement lié à la teneur en fer du matériau traité...

[35] C. DOMERGUE et F. TOLLON, 1975b, p. 101.

[36] C. DOMERGUE, T. MARTIN et P. SILLIERES, 1975a, pp. 138-139.

médiatement au bénéfice de sa viscosité, encore favorable durant un bref laps de temps[37]. Les découvertes faites à Montcherand indiquent toutefois que le martelage des éponges de ce site n'avait lieu que durant une phase successive: le fer spongieux était transformé en une masse compacte qui, au terme du cycle sidérurgique, contenait au moins 98% de métal pur.

Les conditions thermiques jouaient un rôle capital au cours de cette opération dont le but ne se limite pas à éliminer les scories. Le martelage à chaud contribuait à réunir les fragments de fer présents dans l'éponge: la compression des divers éléments produisait une cristallisation commune des mailles immédiatement voisines et dans la situation optimale où leurs bords avaient été chauffés jusqu'au point de fusion, par *soudage* les morceaux de fer se seraient réunis en un tout homogène.

Travaillant à l'aide d'une microsonde I. KEESMANN (1985, p. 356) a réussi à déterminer des différences entre les températures atteintes et en ce qui concerne les traitements mécaniques subis. Si, vu la précarité des installations sidérurgiques antiques les températures ne nous paraissent pas avoir été significatives d'une opération particulière, la confirmation d'un traitement mécanique – obtenue par des analyses répétées sur un grand nombre d'échantillons – est d'un extrême intérêt, car elle confirme l'existence d'une opération de martelage des éponges encore incandescentes[38].

L'explication de cette phase s'avère particulièrement laborieuse; encore dans un passé récent le soudage par forgeage restait un procédé empirique; l'ensemble des données recueillies ne permet qu'une certitude, le recours à des températures élevées...: car au-dessous de 1000° un acier avec 0,25% de carbone n'est plus forgeable – cette température est de 850° pour un acier à 1,5% de carbone –, et ce n'est qu'à partir de 1300° que le fer prend la couleur dite du *blanc soudant*[39].

Dans de telles conditions, le facteur temps prenait aussi une importance considérable[40]: en effet, si aux températures inférieures à 750° les vitesses de refroidissement baissent considérablement, pour les valeurs plus élevées les métallurgistes ont renoncé à les reporter sur des courbes (fig. 27).

*6. La deuxième cuisson des éponges*

A l'encontre des propositions de I. KEESMANN (1985) et de M. BARTUSKA et R. PLEINER (1968), l'existence d'un deuxième traitement thermique de l'éponge à peine libérée de ses scories, exécuté sur le site de l'extraction, reste difficile à prouver, même s'il fait peu de doutes. Comme nous l'avons vu, les fours groupés mis au jour à Bellaires (supra p. 20) permettent de proposer une deuxième opération, mais le fait que l'installation n'ait pu être formellement interprétée rend hasardeuse la description de cette partie du cycle: les éponges pouvaient-elles être recuites dans le même foyer? subissaient-elles un traitement intermédiaire avant de supporter une nouvelle cuisson?

*7. La fabrication des loupes*

En la réchauffant à nouveau dans un *bas-foyer* on pouvait naturellement faire subir à l'éponge plusieurs martelages pour éliminer les scories qui *«suintaient à la surface de la masse ferreuse»*[41]. Ce traitement, qui conduisait à la formation de la loupe, aurait pu se dérouler sur les sites d'utilisation[42].

La mise en forme d'une loupe de bonnes dimensions à partir de l'éponge, puis la fabrication d'un lingot, pouvaient se faire par plusieurs frappeurs travaillant en même temps. R. THOUVENIN (1984, p. 369) propose de don-

---

[37] Pour P. ANDRIEUX (communication orale) l'éponge pouvait être jetée, encore rouge, dans un bain d'eau qui aurait provoqué l'éclatement des inclusions de scories.

[38] *«Dennoch können die chemischen und physikalischen Bedingungen der vorliegenden Schlacke in Verbund mit einer zusätzlichen mechanischen Bearbeitung des eingebrachten Fremdmetalls (...) beigetragen haben. Mechanische Verformung des Metallteiles ist aus der Orientierung der Einschlüsse wahrscheinlich.»*

[39] Ainsi peut-on lire dans un ouvrage du début du siècle: *«... les fers (...) se soudent parfaitement et les deux parties réunies peuvent être considérées comme faisant un tout parfait (...). Le bon fer se chauffe au blanc éclatant appelé blanc soudant et variant de 1300 à 1600°...»* (G. MARIN-DARBEL, 1923, p. 207).

[40] Des sources médiévales pourraient d'ailleurs confirmer l'existence d'une opération de longue durée, ainsi la légende nordique citée par E. SALIN (1957, p. 275, n° 250): *«Wieland se rendit alors à sa forge, se mit au travail et fit en sept jours une épée.»* (Thidreks-saga, 103). Ce texte du milieu du 13e s. aurait ses origines à la fin de l'Antiquité; le récit laisse clairement entendre qu'il s'agit de la fabrication complète de l'arme à partir de petits fragments de fer, mais rien n'exclut, par exemple, un minutieux travail de damasquinerie!

[41] Pour R. THOUVENIN (1984, p. 368), un martelage entrepris à ce stade aurait présenté le risque de repousser ces éléments à l'intérieur du métal et le recours à un maillet en bois aurait donc été préférable.

[42] L'observation méticuleuse des scories – macroscopique, microscopique, minéralogique et chimique – permettra d'en faire la discrimination: c'est sur cette problématique que sont entre autre centrés les travaux de V. SERNEELS.

ner le nom de *cingleurs* aux ouvriers apprêtant les lingots; cette mise en forme aurait été tout aussi complexe que la production de l'éponge: réduit en fragments plats et allongés, dans certains cas le métal était replié plusieurs fois sur lui-même pour être martelé en une masse de fer plus compacte (J.-R. MARECHAL, 1963, p. 141).

Les pièces bi-pyramidales, mais des formes oblongues sont aussi répertoriées, pouvaient alors être livrées prêtes à l'emploi aux forgerons proprement dits: leur forme s'adapterait particulièrement bien aux opérations de corroyage par lesquelles deux éléments métalliques étaient fixés bout à bout par martelage.

Cette forme géométrique était celle qui répondait le mieux aux opérations successives qu'allait subir le morceau de métal: ainsi, lorsqu'on saisissait l'extrémité mince d'un tel lingot avec une pince, sa masse restait libre et pouvait être placée dans le foyer du forgeron: à l'inverse, un lingot de forme compacte aurait été impossible à saisir.

R. THOUVENIN (1984, p. 368) attribuait à ces opérations de forgeage, bien plus qu'aux facilités de transport[43], cette forme particulière des lingots qui, lorsqu'ils furent découverts, présentaient de grandes différences de facture et de poids.

Selon divers chercheurs, plusieurs autres traitements pouvaient intervenir: A. MUTZ (1981, p. 128) propose une opération de débitage en deux parties des loupes qui auraient eu une forme de calotte, les morceaux ainsi obtenus servant à la confection de deux saumons distincts en forme de double-pyramide; H. CLEERE (1976, p. 137) n'exclut pas que les métallurgistes romains aient pu prélever le dessus des loupes pour la fabrication d'outils tranchants, encore que lui aussi ne donne pas de précisions sur la technique à laquelle ils auraient eu recours.

### *8. Le forgeage*

Par forgeage nous entendons la réalisation de l'objet fini, dernière étape du cycle de production: dans l'Antiquité déjà elle pouvait se compléter par la trempe de la pièce ainsi façonnée (infra p. 65).

Le forgeage consiste à donner une forme au morceau de fer par martelage, ce qui en modifie la macrostructure, conditionne la redistribution des fibres et le changement de dimensions des grains. La pièce sera chauffée pour faciliter cette opération, mais devra toutefois rester à une température entre 800 et 1150°, au-dessus de laquelle le produit obtenu entrera dans une phase liquide selon sa teneur en carbone: PLINE L'ANCIEN (34, 149) déjà précisait la couleur que devait avoir le fer chauffé lors du forgeage[44].

Certes, si cette température correspond à celle où le fer – placé dans une atmosphère particulièrement favorable – absorberait le carbone (0,8 à 2%) nécessaire à la formation de la cémentite ($Fe_3C$)[45], il conviendra d'insister sur le fait que l'opération de forgeage reste avant tout physique, et que ce n'est qu'accessoirement qu'elle peut avoir modifié la composition chimique de l'objet façonné.

Les archéologues parlent souvent de scories de forge, mais ce n'est pas seulement l'identification qui en est difficile: la nature même de l'opération qui serait à leur origine reste des plus hypothétiques; nous devrions en effet imaginer qu'avant de façonner l'objet qu'il fabriquait, le forgeron aurait purifié une ultime fois son lingot en le martelant, produisant ainsi des battitures: ces scories réduites en menus morceaux se distingueraient du produit du bas-fourneau mais personne n'a vraiment pu en relater la découverte[46].

Lors d'une de nos visites au *Musée du fer* à Vallorbe nous avons examiné les diverses chutes et scories résultant de l'action d'un forgeron travaillant un morceau de fer brut:

- dans le foyer, des restes de houille dont l'aspect est le même qu'ils n'aient pas été au contact avec le morceau de fer – préchauffage de l'installation – ou que celui-ci ait été plongé dans le feu;
- dans le foyer toujours, des restes de *mâchefer* extrêmement légers, consécutifs à la fusion

---

[43] En recourant à des essais pratiques apparemment concluants, A. MUTZ (1981) a démontré que les saumons de cette forme pouvaient aisément être paquetés pour le transport.

[44] *« Quand il est rouge il ne se prête pas à être forgé; il faut attendre qu'il commence à passer au blanc. »*

[45] C'est ce composant qui permettra la trempe de l'acier pour en améliorer les caractéristiques mécaniques.

[46] Cette opération nous semble d'ailleurs bien peu plausible, et ce n'est qu'eu égard aux nombreuses allusions qui y sont faites que nous l'évoquons ici.

Fig. 28 Croûte de mâchefer de forme concave provenant d'un foyer de forge moderne - Musée du Fer de Vallorbe *(Photo IAHA)*.

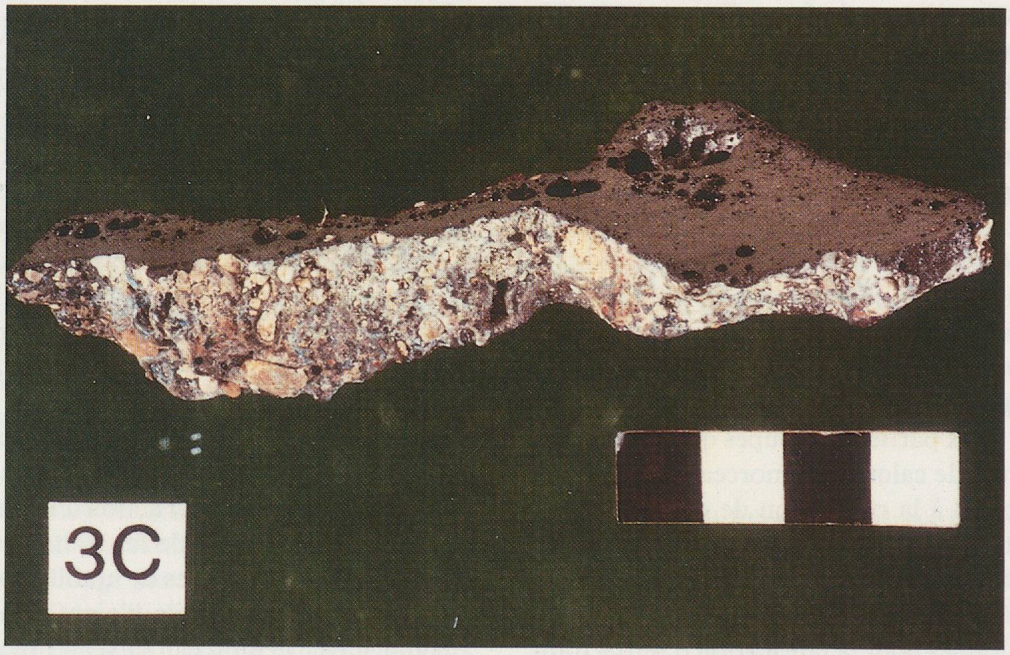



Fig. 29 Scorie concave provenant du bas-fourneau IIb - échantillon n° 3c *(Photo IAHA)*.

et aux réactions chimiques qui se sont produites à la surface du fer;

- *autour* de la tuyère, une croûte concave de mâchefer (fig. 28) plus lourd que le précédent, mais sans rapport avec les scories antiques de forme approchante il est vrai;
- lors du martelage sur l'enclume se forment de fines lames d'oxyde de fer, appelé *calamine*, épaisses de 1 à 5 dixièmes de millimètre.

Aucun de ces produits ne prête à confusion avec ceux résultant de l'opération sidérurgique; les scories antiques découvertes à l'endroit des ferrières et sur les sites de raffinage ont un aspect tout autre et ne peuvent être attribuées au forgeage même si les installations de traitement du minerai de fer, des éponges ou des loupes font totalement défaut là où elles ont été découvertes: de telles traces étaient bel et bien le résultat d'un deuxième traitement

thermique des éponges à peine ébauchées[47], et ne correspondaient pas au martelage des lingots pour la confection d'un objet fini. Ces constatations recoupent d'ailleurs les propositions de H. CLEERE (1976, p. 127): *«... were major industries producing semi-finished forged iron blooms that there exported for further working.»*

Il nous paraît important d'insister sur cet abus de langage: le terme de forgeage ne peut être utilisé pour aucune des opérations d'élaboration de l'éponge ou de la loupe, auraient-elles atteint leur phase ultime.[48]

### *9. Présence d'acier*

Tandis que par examen microscopique du grain du métal à partir de sections polies, E. PLOECKINGER et alii. (1964, pp. 38-40) ont démontré la présence d'acier dans des scories, cette même démarche, combinée à des mesures de dureté, permit (O. SCHAABER, 1963) d'en confirmer l'existence dans des outils d'époque romaine: ainsi la pointe d'un ciseau présentait-elle une microdureté de 800 unités Knoop – 1000 unités Vickers – correspondant à un acier contenant 0,45% de carbone.

L'amélioration des propriétés mécaniques très médiocres du fer est étroitement dépendante du dosage du carbone qui permettra l'obtention d'acier. De nos jours, le fer chimiquement pur, qui n'est produit qu'en laboratoire, est un des éléments constitutifs de l'acier: dans cet alliage, qui à l'origine ne comportait que du fer et du carbone, il joue un rôle de support, les caractéristiques mécaniques des *aciers alliés* étant surtout influencées par des éléments quantitativement mineurs, comme par exemple le nickel et le chrome.

Dans la sidérurgie moderne, l'acier s'obtient par la *décarburation de la fonte*. Le passage du fer en fusion à travers le coke dans la partie inférieure du haut-fourneau, introduit une étape supplémentaire au cycle de production décrit plus haut (supra p. 56), le fer se carburant progressivement par diffusion du carbone selon l'équation

$$3\ Fe + 2\ CO \rightarrow Fe_3C + CO_2$$

jusqu'à devenir de la fonte dite de première fusion: selon les auteurs consultés, ses teneurs en carbone se situent entre 2,5 et 4,5%. Cette démarche est imposée par la difficulté d'obtenir des températures suffisamment élevées et la fonte ainsi produite devra ensuite être affinée par élimination d'une partie du carbone, cet élément étant ramené entre 0,05 et 1,5%, teneurs caractéristiques de l'acier[49].

### *9.1. Propositions concernant la production d'acier dans l'Antiquité*

Malgré les nombreuses voies suggérées, la description du processus au cours duquel dans l'Antiquité l'interaction entre le fer et le carbone aurait pu donner naissance à de l'acier reste

---

[47] Ainsi les analyses effectuées dans le cadre de nos recherches sur la métallurgie dans le canton de Vaud nous ont permis de démontrer que les scories trouvées sur le site de Lousonna provenaient surtout d'un minerai de la région de Ferreyres (E. ABETEL et V. SERNEELS, 1987, p. 222).

[48] La présentation des techniques millénaires toujours pratiquées par les artisans japonais – Nancy, juin 1989 – essentiellement pour la fabrication des sabres de samouraïs, a été d'un apport fondamental dans la reconstitution des séquences généralement proposées pour la production des objets en fer antiques.

Ces forgerons travaillent dans un bas-fourneau droit, haut de 1m20, d'un diamètre intérieur de 30 cm pour un volume inférieur à 0,1 $m^3$, ventilé par 2 tuyères fonctionnant alternativement et situées au niveau du fond du foyer.

**1.** Le minerai est finement brisé et chargé par couches alternées avec le charbon de bois, des charges additionnelles intervenant au fur et à mesure que le niveau baisse dans le bas-fourneau. Selon l'avancement de cette opération le charbon de bois utilisé aura été plus ou moins carbonisé lors de sa préparation.

**Résultat**: une éponge peu homogène comportant encore de nombreuses bulles et inclusions. Tous les fragments de fer présents dans les scories obtenues lors du défournement sont récupérés par concassage: l'artisan leur portera un intérêt constant, car ils présentent une plus grande pureté.

**2.** L'éponge ainsi obtenue est brisée et, tandis que les fragments de fortes dimensions seront traités au cours de l'opération suivante (**3.**), les petits morceaux sont placés sur du charbon de bois dans le foyer de la forge, ventilé par un soufflet manuel actionnant une tuyère unique, mélangés à ceux provenant des scories; ils seront portés à la température du blanc soudant et réunis en un seul bloc: le marteau n'est pas utilisé pour cette opération de raffinage.

**Résultat**: une loupe plus homogène que l'éponge.

**3.** Le divers produits de l'opération sidérurgique, qu'il s'agisse de morceaux de grosses dimensions extraits de l'éponge (**1.**), ou de la réunion des petits fragments par leur passage dans le foyer de forge (**2.**), sont rassemblés de façon à ce qu'ils s'imbriquent à la manière d'un puzzle en trois dimensions, formant une masse dont les interstices entre les gros morceaux seraient comblés par des petits fragments aux formes mieux appropriées.

L'ensemble, enduit d'un mélange humide d'argile et de paille brûlée et entouré par une bande de gaze, est déposé délicatement sur une spatule – produit d'un cycle métallurgique antérieur identique à celui-ci –; il est porté jusqu'à la couleur du blanc soudant et martelé en une masse homogène dont la spatule fera partie intégrante.

**Résultat**: une bande de fer d'un poids d'environ 500 g.

**4.** Le «saumon» ainsi obtenu est débité en fines lames de 2 cm par 5 cm qui seront ensuite placées sur la partie restante de la spatule par couches successives, chaque niveau formant un angle de près de 90° avec le précédent: cette alternance donnera une plus grande homogénéité au métal, formant en outre un empilement stable. Le tout, enduit comme précédemment du mélange d'argile et de paille, est chauffé puis soudé par martelage au blanc. Maintenue au blanc soudant, la bande de fer sera repliée sur elle même et martelée de façon à en accroître encore l'homogénéité.

**Résultat**: un «saumon» prêt à être transformé en outil.

Nous remercions Monsieur Dominique BONNEAU, forgeron au *Musée du fer* de Vallorbe, de nous avoir commenté l'expérimentation à laquelle il avait participé à Nancy, ainsi que de la relecture qu'il a bien voulu faire de ce passage.

[49] Formellement, ce n'est donc que lorsque le produit fini contient moins de 0,05% de carbone que l'on parle de *fer*.

encore des plus aléatoires; si, pour H. CLEERE (1976, p. 137), le fer courait le risque d'être excessivement carburé au contact du charbon de bois, l'excédent de carbone pouvait encore être brûlé au cours de sa lente descente dans le bas-fourneau par l'oxygène insufflé dans les tuyères: à l'inverse, dans certaines situations ce même combustible aurait contribué à protéger le fer d'une oxydation excessive en conservant une valeur acceptable à la carburation superficielle.

L'évolution de ce phénomène dépendra de la durée de la chauffe et de sa température, ainsi que du type de minerai et des conditions de ventilation: une ventilation excessive aurait pu oxyder le carbone avant son absorption par le fer, ce qu'éviterait un soufflage ne pénétrant pas jusqu'au coeur du bas-fourneau; si l'acier ainsi créé s'était enfin refroidi en atmosphère oxydante, le carbone se serait échappé, ne laissant plus que du fer.

Dans l'Antiquité, l'obtention d'acier par *méthode directe*[50], occasionnellement au moins, ne devrait pas nous surprendre: les teneurs entre 0,05 et 1,5% de carbone qui le caractérisent seraient le fruit de dosages somme toute empiriques des matériaux en présence[51], la seule condition étant le maintien d'une atmosphère réductrice à une température assez élevée durant un laps de temps suffisant pour que le carbone gazeux diffuse dans le fer.

Un autre procédé connu dans l'Antiquité serait comparable à la technique moderne de la *cémentation*[52]: le fer, était chauffé en présence de carbone – du charbon de bois principalement, J. RAMIN (1977, p. 164) mentionne aussi la corne et l'os... – qu'il absorbait devenant progressivement de l'acier.

Le dosage du carbone dans le fer pourrait aussi avoir été obtenu par l'*action successive du chauffage et du martelage;* pour que le carbone agisse en profondeur, cette opération devait être renouvelée plusieurs fois, mais ne donnerait toutefois de l'acier que dans des conditions d'élaboration tout à fait particulières[53].

Selon A. HAUPTMANN (1986, pp. 10-11), des expériences récentes auraient montré que des températures de 1500° pouvaient être atteintes sans difficultés dans des foyers de type antique: le fait serait confirmé par des mesures faites en Tanzanie dans les bas-fourneaux activés par des souffleries manuelles des peuplades Haya[54].

Contrairement à l'opinion généralement répandue, un soin particulier apporté aux divers facteurs régissant l'opération métallurgique aurait-il donc permis une véritable coulée? Divers éléments peuvent tout au moins être mentionnés, qui auraient amélioré les conditions de déroulement de la fusion: qu'il s'agisse du choix du minerai, de sa préparation, de la présence de buses qui auraient, qui sait, permis d'insuffler de l'air à un endroit précis du foyer, du régime de fonctionnement du bas-fourneau, de la durée de l'opération et de la température atteinte, E. PLOECKINGER et alii. (1964, p. 36) insistant enfin sur le choix précis du moment où l'artisan, fort de son expérience, aurait sorti l'éponge du foyer.

Pour H. STRAUBE (1986, p. 21), l'exploitation optimale de ces divers éléments a été trop souvent négligée, les chercheurs expliquant l'obtention d'acier dans l'Antiquité, principalement par carburation au cours de la descente du fer dans la cuve, puis lors du martelage successif. Or, par la possibilité de produire des fusions répétées jusqu'à l'obtention d'une teneur en carbone convenable, l'acier aurait été directement produit dans les bas-fourneaux[55]; l'examen microscopique (ibid. p. 25) qui a permis de déceler la présence de lédéburite (4,3% C), confirme que la phase liquide aurait été atteinte lors de l'opération sidérurgique (ibid. p. 24 et fig. 5). H. VETTERS (1967, p. 182) proposait d'y voir une allusion déjà dans les

---

[50] P.-L. PELET (à paraître) décrit fort bien les possibilités d'obtenir de l'acier directement dans le bas-fourneau en exploitant sa forme allongée, comme dans le cas de notre structure I.

[51] Ainsi le procédé *Martin* pour la fabrication de l'acier est-il basé sur le mélange de fonte à 3,5% de carbone avec des *riblons*, dont la teneur est d'*environ* 0,1% C, et qui ne sont rien d'autre que des déchets de fer ou d'acier doux, chutes de cisaille ou de poinçonneuse, copeaux de tournage, etc. Dans ce cas, le procédé est loin d'avoir la rigueur d'une équation chimique...

[52] Dans la métallurgie moderne la cémentation n'est qu'un traitement *chimique* d'appoint destiné à la fabrication d'aciers aux caractéristiques spéciales; les procédés actuels de cémentation consistent à mettre la pièce à traiter dans une caisse contenant essentiellement du charbon de bois, et placée sur la sole d'un four chauffé à la température de 900°. Mais la décarburation de la fonte reste bel et bien la principale manière de produire de l'acier.

[53] R.J. FORBES (1950, p. 398) estimait que ce résultat dut être obtenu bien involontairement: *«This carburizing was probably not achieved intentionally but simply by the repeated heating of the wrought iron bar in charcoal between the hammerings.»*

[54] Encore, pour que la comparaison soit valable avec nos régions, faudrait-il s'assurer de la hauteur de ces structures qui en Afrique peuvent aller jusqu'à 4 et 5 m (entretien avec P.-L. PELET du 31 janvier 1991).

[55] La succession de deux étapes distinctes, la réduction dans le bas-fourneau et le raffinage dans le bas-foyer, est ici ignorée.

Météorologiques d'ARISTOTE (4, 6)[56]. De la même manière, la possibilité de porter le fer à l'état liquide aurait pu être déduite de l'Histoire Naturelle de PLINE L'ANCIEN (34, 146): *«Dans la fusion du minerai le fer devient liquide comme de l'eau, puis* «en se solidifiant» *il se brise en masses spongieuses»*[57].

De l'acier pourrait avoir été produit en Bohême, hors des limites de l'Empire (H. CLEERE, 1976, p. 138): de nombreuses trouvailles provenant du monde romain faites dans cette région confirmeraient d'étroits rapports économiques liés à l'exportation de ce produit.

Exempts de phosphore, d'arsenic et de soufre, les minerais manganifères du Norique peuvent avoir permis eux aussi la fabrication de l'acier, auquel les Romains auraient donné le nom de fer du Norique (H. VETTERS 1967, p. 185).

### *9.2. La trempe*

On dut bien vite s'apercevoir que la trempe des outils et le recuit successif en amélioraient les propriétés mécaniques (Odyssée 9, vers 391)[58]. La trempe consiste à chauffer l'acier[59] jusqu'à une couleur déterminée pour le refroidir ensuite brusquement dans un liquide approprié; non seulement PLINE L'ANCIEN indiquait des eaux convenant plus particulièrement à ce type d'opération[60], mais il connaissait aussi l'existence de la trempe à l'huile (34, 146): *«On a l'habitude d'éteindre dans de l'huile les outils en fer d'assez petite taille, pour éviter que l'action de l'eau ne les rende durs et cassants.»*

Si on se contente de le laisser refroidir lentement, l'acier perd sa couche de cémentite pour laisser la place à une structure fer-graphite, stable à la température normale; mais par trempe dans l'eau ou dans l'huile la cémentite du métal chauffé à blanc sera fixée avant d'avoir atteint le stade de désintégration[61].

Simplement trempé, l'acier, plus dur et qui a perdu sa malléabilité, est toutefois cassant: il s'agit encore de le recuire à une température inférieure à la précédente jusqu'à ce que, sur la surface du métal préalablement polie, apparaisse la couleur correspondant à la température désirée[62]; on le laissera ensuite refroidir lentement, produisant ainsi une réduction du grain métallographique; cette opération conférera à l'acier une certaine souplesse qui le rendra moins brisant.

### *9.3. Les éléments d'alliage*

L'apport d'*éléments d'alliage* est une technique moderne que les métallurgistes antiques auraient difficilement pu maîtriser[63]. Cette démarche n'est pas possible par la simple adjonction d'éléments chimiques à l'état pur dans la cuve contenant le fer en fusion: non seulement des proportions précises doivent être respectées, mais même si le point de liquéfaction de l'alliage à réaliser était inférieur à celui du fer, il en restait très proche[64] et cette température n'était que difficilement atteinte.

Indirectement, les Romains perçurent pourtant l'importance de ces éléments additionnels; ainsi lorsqu'ils donnaient leur préférence au fer du Norique, auquel sa forte teneur en manganèse conférait des caractéristiques mécaniques particulièrement favorables: dans ce cas l'élément d'alliage se trouvait déjà dans le

---

[56] *«... le fer qu'on travaille fond même jusqu'à devenir liquide et se solidifier à nouveau. C'est ainsi que l'on fait l'acier.»*

[57] *«Mirumque, cum excoquatur uena, aquae modo liquari ferrum, postea in spongeas frangi.»*

[58] Dans sa traduction (note p. 45), V. BERARD considérait toutefois ce passage (vv. 391-394) comme un *«embellissement de date récente.»*

[59] La présence du carbone est indispensable pour réaliser la trempe et l'outil devra présenter les teneurs caractéristiques de l'acier: le fer ne se trempe pas dans la mesure où son extrême pureté le différencie précisément de l'acier.

[60] (34, 144):*« Mais la différence capitale provient de l'eau dans laquelle on plonge à plusieurs reprises le fer incandescent. Cette eau, dont la qualité varie suivant les lieux...»*

[61] La vitesse de refroidissement devient alors plus grande que celle de transformation des macles, et interrompt le cours des phénomènes tel qu'il se serait déroulé lors d'un retour lent à la température ambiante.

[62] Le terme consacré pour cette opération est celui de *revenu.*

[63] A titre d'exemple, citons le laiton dans la catégorie des métaux non-ferreux: existant déjà dans l'Antiquité, cet alliage avait même dans certains cas des caractéristiques identiques à celles des laitons industriels modernes (D. PAUNIER et S. AMSTAD, 1984, p.12). Le zinc – un de ses deux composants – était inconnu à l'époque et ne put donc être exploité qu'indirectement: il était en effet présent avec le cuivre dans un mélange naturel ayant les caractéristiques d'un véritable minerai aux yeux des anciens (PLINE L'ANCIEN 34, 29, 1); le laiton pourrait aussi avoir été obtenu en fondant le cuivre en présence d'un oxyde de zinc (J. RAMIN, 1977, pp. 182-185).

[64] La température de fusion de l'alliage n'est fortement abaissée que lorsque l'élément additionnel augmente de façon notable: ainsi, le point de fusion le plus bas, *point eutectique*, de l'alliage fer-carbure ($Fe_3C$) descend certes à *1143°*, mais dans ce cas la solution présente 4,3% de C, nous sommes en présence d'une *fonte blanche.*

fer indépendamment de tout traitement métallurgique[65].

J.-R. MARECHAL (1963, p. 137) pense même qu'en utilisant de la tourbe comme combustible, celle-ci contenant de l'azote, les artisans de la fin de l'Antiquité auraient procédé à une forme de nitruration, destinant les fers ainsi obtenus et aux caractéristiques mécaniques plus favorables, à la fabrication de socs de charrues, de forces, de têtes de marteaux et d'épées (ibid. p. 142); de nos jours, les aciers sont traités selon ce même principe, mais en les plaçant sous une atmosphère gazeuse.

*10. Existence de traitements différenciés*

Selon J. RAMIN (1977, p. 164), malgré l'incertitude de tels procédés, dans certains cas les artisans antiques auraient réussi à produire non seulement des aciers *durs* ou *doux*, mais même un métal dont l'«âme» n'était pas cassante et le tranchant dur, pour que l'arme ou l'outil soit efficace: ces objets auraient été réalisés en acier doux, la partie à durcir étant ensuite carbonatée.

Par examen métallographique et mesure consécutive des duretés d'objets remontant au 1er s. de notre ère trouvés sur le site du Magdalensberg, O. SCHAABER (1963) a repéré plusieurs cas de traitements métallurgiques différenciés, ainsi pour des tranchants de couteaux: une opération de trempe ou de cémentation pouvait en effet susciter des variations technologiques de cet ordre (ibid. p. 199).

Dans d'autres cas (ibid. p. 196), c'est une différence dans la concentration des inclusions présentes dans le métal qui distinguait le tranchant du corps de la lame; citant ce même auteur, H. VETTERS (1967, p. 174) donnait ainsi pour acquise l'existence d'outils dont la pointe ou le tranchant étaient soudés dans le corps fait d'un fer plus tendre. Avec prudence O. SCHAABER (1963, p. 201) laissait cependant la réponse définitive en suspens: *«Wie bereits hingewiesen, kann heute noch nicht mit Sicherheit entschieden werden, ob die Schneiden durch partielle Aufkohlung oder durch Anstählen hergestellt worden sind»*[66].

[65] Encore de nos jours le manganèse compte parmi les éléments d'alliage utilisés pour la fabrication des aciers spéciaux: d'après la norme DIN 17200, allié au silicium et au carbone, il intervient dans des proportions de 0,8 à 1,4% dans la fabrication des aciers améliorés; l'acier au manganèse, souvent dit «indéformable», en contient de 1,5 à 2%. Il est utilisé pour les aciers à outils (1% C et 1,5 à 2% Mn) et pour les aciers devant résister à l'usure et aux chocs (1 à 1,5% C et 12 à 14% Mn).

[66] E. SALIN (1957, p. 27) fournit plusieurs exemples de francisques remontant au 5e s. dans lesquelles le tranchant était rapporté selon le procédé dit de la «gueule de loup».

# CHAPITRE IV

# ÉTUDE DES SCORIES[1]

A tous les stades notre recherche devra correspondre le plus étroitement possible à la nature de l'objet traité: exactement comme la fouille de l'établissement sidérurgique demande une procédure spécifique, l'étude consécutive des scories respectera des critères bien définis.

Malgré les difficultés qu'une telle démarche peut présenter pour des archéologues, dont la formation reste essentiellement littéraire, avant toute série d'analyses il sera indispensable d'en fixer les objectifs, autant quant à d'éventuels nouveaux résultats escomptés, que par rapport aux éléments déjà mis en évidence lors de précédentes études, avec lesquelles une comparaison devra être possible à tout instant[2]. Le tableau 9 présente à cet effet les résultats des analyses de scories provenant de divers sites antiques de Gaule, de Germanie et du Norique: des données indicatives, il est vrai, si l'on songe à la différence des minerais d'origine.

Il ne peut plus être question d'effectuer les analyses pour elles-mêmes en produisant des résultats bruts: des objectifs précis doivent être fixés (R. SABLAYROLLES, 1982, p. 187), qu'il s'agisse par exemple d'établir la nature du métal obtenu ou, lors de travaux futurs, l'utilisation de fondants durant l'opération sidérurgique ou les températures atteintes au cours de celle-ci.

Dans le cas de Montcherand, le but des analyses était double: d'une part il se serait agi d'étudier les rapports existant entre le minerai et les scories – accessoirement les objets qui y auraient été fabriqués[3] –: transformations subies par le matériau d'origine, modalités de son traitement et influence des divers éléments chimiques présents. D'autre part, par l'élaboration des valeurs obtenues, ce site aurait pu être introduit dans une étude régionale établissant les rapports qu'il aurait entretenus avec les centres de peuplement voisins, ou avec les exploitations déjà étudiées par P.-L. PELET (1973).

Autant par définition la notion d'analyse peut faire penser à une démarche des plus précises, autant les éléments soumis à celle-ci sont dépendants de multiples facteurs qui obligent le chercheur à une extrême prudence au moment d'interpréter et de commenter les résultats obtenus.

---

[1] Pour un exemple d'examen métallographique d'objets antiques en fer, le lecteur consultera avantageusement O. SCHAABER (1963).

[2] On n'insistera jamais assez sur les connaissances de base indispensables aux chercheurs étudiant une telle matière; malgré cela, l'idée même d'une comparaison sera souvent une gageure: les conditions de fabrication sont-elles vraiment comparables, quand on voit les difficultés à recréer des essais en laboratoire identiques à ceux mentionnés par la littérature et auxquels on voudrait se référer?...

[3] A l'exception de trois clous (inv. 2719, 2761 et 2762), aucun objet métallique n'a été découvert lors des fouilles de ce site; le manque de moyens appropriés n'a pas permis de déterminer la provenance du matériau d'origine (infra p. 81): à Bliesbruck, C. FORRIERES et alii. (1987, p. 73) auraient réussi à distinguer par spectrométrie d'émission les objets forgés à partir du métal travaillé sur le site même. A Bellaires I, si P.-L. PELET (1973, p. 193) put mettre au jour un bec de pioche, il indiquait que la provenance pouvait en être tout autre.

| | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | CaO | $Fe_2O_3$ | FeO | $TiO_2$ | MnO | MgO | $P_2O_5$ | Source |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Coire Markthallen | 33,00 | 7,20 | 4,40 | – | 55,00 | 0,30 | 0,20 | 0,50 | – | W.U. GUYAN, 1977, p. 125 |
| Coire Markthallen | 27,00 | 5,50 | 15,00 | – | 51,00 | 0,20 | 0,20 | 0,80 | – | |
| Riom (fouilles 1974) | 32,50 | 13,00 | 5,30 | – | 44,00 | 0,45 | 0,20 | 3,20 | – | |
| Bellaires VII | 41,00 | 16,69 | 2,24 | 7,63 | 31,93 | – | 0,32 | 0,20 | – | P.-L. PELET, 1973, p. 174 |
| Bellaires XV | 31,16 | 13,02 | 3,93 | 9,82 | 39,10 | – | 0,32 | 1,21 | – | |
| Prins-Bois XIX | 41,24 | 5,30 | 0,70 | 24,86 | 6,18 | 0,55 | 0,78 | 0,19 | – | P.-L. PELET, 1973, p. 175 |
| Bossena XXII | 43,37 | 17,30 | 3,15 | 8,86 | 22,56 | 0,67 | 0,45 | 0,70 | – | |
| Dudelange | 25,96 | 12,39 | 9,92 | 19,13 | 35,67 | – | 0,74 | 2,05 | 3,44 | J.-R. MARECHAL, 1987, |
| Dudelange | 19,38 | 10,69 | 9,93 | 8,00 | 47,74 | – | 0,50 | 1,98 | 3,60 | p. 283 |
| Erzberg | 23,44 | 4,70 | 7,12 | 6,03 | 46,00 | 0,33 | 9,28 | 1,78 | – | W. SCHMID, 1932, |
| Windischgräz | 20,72 | 1,96 | 3,85 | 10,33 | 55,72 | 0,27 | 3,38 | 1,85 | – | p. 45(211) |
| Hüttenberg | 21,48 | 2,54 | 1,99 | 12,62 | 55,39 | – | 2,46 | 1,33 | – | W. SCHMID, 1932, p. 8(174) |
| Mühlthal 129a | 9,28 | 1,65 | 1,80 | 22,37 | 53,40 | – | 0,36 | 0,32 | 0,47 | M. BARTUSKA et |
| Mühlthal 129b | 8,18 | 1,20 | 0,79 | 37,35 | 43,55 | – | 0,20 | 0,08 | 0,41 | R. PLEINER, 1968, p. 101 |
| Valeurs obtenues à l'occasion d'opérations sidérurgiques reconstituées | 36,80 | 7,10 | 0,60 | 18,60 | 32,30 | – | 2,80 | 0,30 | 0,55 | J.W. GILLES, 1958, p. 1691 |
| | 68,70 | 13,80 | 2,00 | 6,30 | 4,70 | – | 0,50 | 1,00 | 0,35 | (la tabelle 2 portant deux |
| | 13,70 | 4,10 | 0,80 | 7,30 | 38,50 | – | 1,50 | 0,30 | 0,44 | fois le CuO (n° 18 et 20), |
| | 20,40 | 7,40 | 0,90 | 5,80 | 49,00 | – | 1,90 | 0,40 | 0,30 | le n° 18 se lira CaO) |
| | 30,40 | 8,45 | 7,60 | 9,90 | 29,70 | – | 1,89 | 2,20 | 0,25 | E. PLOECKINGER et alii., |
| | 27,90 | 3,33 | 7,90 | 8,70 | 36,10 | – | 4,70 | 1,40 | 0,19 | 1964, pp. 26, 27 et 29 |
| | 26,60 | 9,67 | 7,00 | 10,90 | 35,90 | – | 1,55 | 2,00 | 0,18 | |
| | 43,00 | 14,20 | 20,80 | 6,10 | 1,10 | – | 0,00 | 3,00 | 0,63 | |
| | 32,00 | 16,00 | 17,00 | – | 18,00 | – | 0,80 | 2,80 | 4,40 | R.F. TYLECOTE et alii., |
| | 30,00 | 14,00 | 16,00 | – | 23,20 | – | 0,80 | 2,60 | 4,10 | 1973, p. 43, tabl. 5 |
| | 19,00 | 9,50 | 10,50 | – | 50,00 | – | 0,50 | 1,70 | 2,70 | |
| | 16,90 | 8,23 | 9,20 | – | 56,30 | – | 0,45 | 1,49 | 2,45 | |

Tabl. 9 Analyses chimiques de scories de diverses origines, exprimées en %

**Commentaire**: la condition à toute comparaison de ce type est naturellement que les analyses soient les mêmes pour tous les échantillons, principalement en ce qui concerne les éléments chimiques choisis: ainsi peut-on relever l'absence de certains des oxydes dans quelques analyses, tandis que, comme dans le cas des échantillons provenant de Coire, les chercheurs ont renoncé à la distinction entre le FeO et le $Fe_2O_3$ au détriment des indications qu'ils auraient pu recueillir sur le succès de l'opération de réduction.

Les scories provenant des sites autrichiens du Hüttenberg et de Windischgräz remontent à l'époque de La Tène; les échantillons de Mühlthal (Bavière), qui sont antérieurs au 8e s., pourraient être le résultat d'opérations différentes: tandis que 129b est une scorie de forge, 129a correspondrait à l'activité d'un bas-fourneau: la discrimination, impossible à partir de l'analyse chimique (M. BARTUSKA et R. PLEINER, 1968, p. 100), a été effectuée par l'examen microscopique qui a révélé un forte présence de magnétite (ibid. p. 99), cette problématique d'une extrême importance échappant toutefois à notre propos[4].

Ces valeurs – étroitement dépendantes de la composition du minerai d'origine – représentent un ensemble cohérent, et avant même qu'il soit question d'expliquer les quelques écarts notables, il s'agirait de les confirmer par des analyses répétées du matériel d'un même site: CaO à Coire Markthallen, $P_2O_5$ à Dudelange (Luxembourg), mais rarement mesuré ailleurs; MnO en Autriche, mais la teneur élevée en manganèse caractérise précisément les minerais de cette région. Les sites du Jura vaudois, qui sont les plus faibles en FeO, sont ceux qui présentent à l'inverse les teneurs les plus élevées en $SiO_2$ et, sauf pour l'un d'entre eux, en $Al_2O_3$.

Les échantillons de Mühlthal aux teneurs en $SiO_2$ les plus basses, ont la quantité la plus élevée en oxydes de fer.

Les valeurs obtenues à Montcherand figurent dans le tableau 12, p. 78 et ne s'écartent pas de l'ensemble proposé.

A des fins de comparaison, nous avons introduit dans notre tableau les résultats d'analyses de scories obtenues expérimentalement. Les données fournies par J.W. GILLES correspondent, dans l'ordre, à des scories produites au début de l'opération, l'une lourde, l'autre légère, puis à deux scories lourdes recueillies avec l'éponge, contenant des inclusions de fer. Les échantillons produits par E. PLOECKINGER et alii. provenaient de la paroi du bas-fourneau face à la tuyère, du dessus de l'éponge vis-à-vis de la tuyère, du fond du bas-fourneau dans l'axe de la tuyère, enfin d'une scorie légère prélevée près de l'orifice inférieur de la structure, par lequel elle s'échappait. La teneur des essais effectués par R.F. TYLECOTE correspond à des rapports successifs de 2:1, 1:1, 1:2 et 1:4 entre les quantités de charbon de bois et de minerai. Pour leurs essais, E. PLOECKINGER et alii. (1964, p. 21) utilisèrent un minerai contenant 54% de fer (essentiellement sous forme de $Fe_2O_3$), 6,8% de CaO, 6,6% de $SiO_2$, 0,48% de $Al_2O_3$, 4,25% de MnO, 0,4% de MgO, 0,026% de $P_2O_5$ et 0,064% de S. J.W. GILLES (1958, p. 1691, tabl. 1) indique pour son minerai des teneurs moyennes de 48,8% de fer, 1,3% de CaO, 11% de $SiO_2$, 4% de $Al_2O_3$, 1,32% de Mn, 0,66% de MgO, 0,25% de P. R.F. TYLECOTE (1973, p. 40, tabl. 1) utilisa un minerai présentant 31,36% de fer (valeur calculée à partir de 37,1% de FeO et 3,6% de $Fe_2O_3$), 4,63% de CaO, 10,5% de $SiO_2$, 7% de $Al_2O_3$, 1,25% de MgO et 0,37% de P.

[4] Le martelage produit une déformation plastique des grains qui peut être décelée en examinant la structure du métal.

Sans parler des caractéristiques techniques du bas-fourneau définies dans sa typologie, nous savons que de nombreux paramètres influenceront le processus sidérurgique, avec en outre quantité d'interférences réciproques: façon de charger l'installation en y plaçant successivement le minerai et le charbon de bois: nature de ceux-ci; températures atteintes au cours de l'opération; type de ventilation, qui sait, présence de fondants...

*1. Le prélèvement des scories*

Le résultat des analyses est étroitement dépendant du choix des matériaux qui y seront soumis, d'où l'importance du soin mis à prélever les échantillons.

Il est pour l'instant difficile de proposer aux fouilleurs des critères d'appréciation: ils seraient pourtant indispensables alors que l'évaluation du matériel destiné aux analyses, fondamentale pour une répartition économique des expériences, reste soumise à des procédés aussi élémentaires que l'examen visuel des scories, l'appréciation de leur poids, éventuellement l'estimation de leurs propriétés magnétiques. Indépendamment des problèmes liés au choix des échantillons, se posent encore ceux de leur description et de leur prélèvement en quantités suffisantes.

Bien que chaque site ait sa problématique propre, les descriptions des trouvailles accompagnées des quantités et du relevé de leur répartition sur le terrain sont fondamentales[5]. Une telle démarche fut tentée à Montcherand, où les fouilleurs procédaient à de nombreux décapages horizontaux, mais il fallut renoncer à la poursuivre en raison du terrain passablement perturbé par les occupations agricoles qui avaient bouleversé la répartition du matériel.

Si chaque témoignage sidérurgique est intéressant, il ne sera que très rarement possible de prélever l'ensemble du matériel: un choix s'imposera, qui souvent sera fait par des chercheurs encore peu sensibilisés aux problèmes d'échantillonnage. Bien plus que d'un spécimen de chaque catégorie morphologique qu'ils auront discriminée – c'est la ligne de conduite que nous nous étions fixée à Montcherand –, ce sont plusieurs échantillons d'un même type qui seront nécessaires – nous en proposons six –, permettant ainsi de fixer une image de chaque catégorie représentée, qui repose sur la moyenne de plusieurs mesures[6].

Relevons que souvent les fouilleurs ne rencontrent que quelques scories éparses dans des niveaux remaniés, et qu'il serait difficile de les commenter longuement[7].

Quelques généralités peuvent être formulées sur l'aspect des scories. Si celles-ci présentant des traces de traitement thermique ou un aspect plus ou moins vitrifié seront significatives des hautes températures atteintes dans les bas-fourneaux, encore conviendra-t-il d'observer que ces matériaux, quoique proches d'aspect, n'ont pas fondu à la même température; il ne sera dès lors pas possible de situer le moment de leur formation par rapport au déroulement de l'opération sidérurgique par leur examen visuel, ni même à partir des quantités respectives.

La présence d'un dispositif de ventilation sera caractérisée par des bulles dans les scories, un grand nombre de bulles étant sans doute lié à une aération abondante: la forme allongée de certaines cavités les ferait toutefois attribuer à un phénomène de «dégazage» des inclusions vers la surface. Selon P.-L. PELET (communication orale), des bulles d'un centimètre de diamètre, parfois plus grosses, prouvent l'emploi de soufflets; elles permettent des hypothèses sur le degré de perfectionnement ou d'efficacité de la ventilation (1973, p. 27).

Les scories présentant une courbure extérieure (fig. 29) ont épousé la forme de la rigole par laquelle elles s'échappaient, ou celle du creux de coulée destiné à les recueillir.

L'analyse des calottes – caractéristiques des bas-foyers de raffinage – a montré que ces résidus de forte densité ont des teneurs en éléments chimiques qui permettent d'exclure

---

[5] A. BOUTHIER (communication orale) préconise à ce sujet un dessin pierre à pierre du secteur fouillé, le report sur le plan des fragments de fer, des scories, ainsi que d'éventuels morceaux de bas-fourneaux.

[6] Un seul échantillon ne pourra en aucun cas être représentatif d'un site: parfois, il ne suffira même pas à déterminer quel était le métal traité, un même minerai ayant pu servir autant à la production du cuivre que du fer... Voir les teneurs en éléments chimiques des scories mentionnées par L.U. SALKIELD (1970, p. 88).

[7] Le volume représenté par le bas-fourneau et les scories qu'il a produites est tel qu'il est difficile d'en envisager une dispersion complète: dans le cas évoqué il s'agirait des restes de l'activité des bas-foyers destinés au raffinage des loupes.

qu'ils se soient formés devant le bas-fourneau lors de l'opération de réduction ou dans le fond de celui-ci rempli par des restes de charbon de bois, des cendres et des scories de nature différente (infra p. 73, tabl. 11).

Les scories les plus lourdes seront susceptibles de contenir encore une part importante de minerai d'origine, mais il faudra alors contrôler la présence éventuelle de fragments de fer déjà formés sous la masse scoriacée, car il pourra s'agir aussi de fragments d'éponge: le recours à un aimant sera dans ce cas d'un grand secours.

### *1.1. Utilisation d'une typologie des scories*

G. SPERL (1980, pp. 14-15 et tabl.1 des pp. 16-17) a réparti les produits de l'opération sidérurgique en quatre groupes: les groupes A, B, C correspondraient aux activités de réduction dans le bas-fourneau[8], le groupe D à celles du raffinage dans le bas-foyer[9].

A. Les «Luppenstücke»

On trouve parfois des *éponges* [Luppen] (A1) à proximité des ferrières: on les reconnaît le plus souvent à leur poids spécifique en raison du fer métallique qu'elles contiennent (>50%). G. SPERL (ibid. p. 14) place avec l'éponge un groupe (A2) formé par les *ratés de cuisson* [Fehlchargen], qui ont des dimensions assez proches de celle-ci – 30 à 60 cm de diamètre – avec une faible teneur en fer métallique (inférieure à 10% $Fe_{tot}$), et les scories qui se sont développées à proximité immédiate de l'éponge: en raison de leur teneur élevée en fer (5-50%) elles seraient susceptibles d'être traitées une seconde fois. Sur les sites de raffinage on trouve souvent des *loupes* (D3) à forte teneur en fer, que G. SPERL (ibid. p. 14) assimile aux produits du bas-fourneau (A3) obtenus par martelage des éponges A1 et de ceux des matériaux A2 qui contenaient suffisamment de fer[10].

B. Les «Ofenschlacken»

*Les scories de four* restent dans la cuve à la fin du processus sidérurgique et contiennent généralement une grosse proportion de charbon de bois (B1). Des formations particulières sont représentées par les produits de la réaction de la scorie avec l'argile ou les pierres réfractaires du revêtement du bas-fourneau (B2). Les scories qui se sont déposées autour des tuyères (B3) sont comptées parmi ces formations particulières.

C. Les «Laufschlacken»

*Les scories coulées* (C1) ont été évacuées une ou plusieurs fois durant le processus et reprennent la forme de la cavité spécialement aménagée devant le bas-fourneau pour les recevoir. En raison de leur rapide refroidissement à l'air libre et de leur grande viscosité, la partie supérieure présente des traces de coulures, la partie inférieure reprend en négatif l'aspect de la surface de contact avec le sol. Des formes particulières de cette variante sont *les scories provenant du curage* [Schlackenkrätze] (C2) de la cuve effectué alors qu'elles étaient encore liquides. Les *scories écoulées par les tuyères* [Schlackenzapfen] (C3) appartiennent aussi à cette catégorie: leur forme, qui reprend celle du conduit de la tuyère, est très caractéristique. Un type particulier de scorie coulée est le [Schlackenklotz] *litt.: bloc de scories* (C4) – souvent de près de 60 cm de diamètre – qui est présent dans les fourneaux protohistoriques et d'époque romaine en Europe centrale.

D. Les «Schlackenkuchen»

Ces *gâteaux de scories* sont caractérisés par leur pourtour rond et leur partie inférieure convexe et désignent deux sortes de scories (G. SPERL, ibid. p. 15): d'une part les [Schlackenkuchen] (D1) proprement dits: formés lors de la solidification des scories coulées dans le fond du bas-fourneau ils sont caractéristiques du type d'installation expérimenté par l'auteur, dont les scories n'étaient pas évacuées vers l'extérieur; d'autre part les *scories en forme de galette* [Schlackenfladen] (D2) au pourtour irrégulier, généralement de couleur claire, vitrifiées, contenant jusqu'à 50% de fer métallique, produites dans le bas-foyer lors de l'opé-

---

[8] *«... findet sich manchmal in der Nähe der Erzeugungsstätten...»* (G. SPERL, 1980, p. 15)

[9] *«Diese stammen wahrscheinlich von Schmiedefeuern...»* (G. SPERL, 1980, p.15).

[10] *«Oft finden sich an Schmiedeplätzen hocheisenhältige Brocken (D3), die hier eigentlich als Ofenprodukte (A3) einzuordnen wären, da sie wahrscheinlich durch Zerschlagen der Luppe (A1/A2) entstanden sind.»*: par A3 G. SPERL (1980, p. 14) ne définit pas un objet précis, mais l'ensemble A1/A2 qui deviendra D3 une fois martelé.

ration de raffinage et qui correspondraient à *nos calottes*[11].

Une telle typologie paraît toutefois trop affinée pour être proposée aux fouilleurs, sous réserve de la limiter aux quatre catégories principales (A, B, C et D)[12]: l'examen visuel ne permettra en effet pas de discriminer certains des éléments, déjà imprécis dans la description qui nous en est faite. Mais c'est surtout à cause des dimensions réduites des scories, trouvées souvent éparses autour du bas-fourneau détruit, qu'il faudra se contenter d'une classification basée sur leur aspect, renonçant dans bien des cas à les situer dans un endroit déterminé du bas-fourneau.

## 2. *L'étude du matériel de Montcherand*

### 2.1. *L'examen macroscopique*

Si au premier abord l'aspect des scories peut sembler uniforme – *«... ces échantillons (...) ont à peu près le même aspect: couleur gris métallique plus ou moins oxydés en surface, texture vacuolaire, aspect boursouflé, arêtes tranchantes et toucher lisse. Certains sont un peu vitrifiés (moirage)...»*[13] –, un examen macroscopique plus attentif permet les discriminations qui apparaissent dans les tableaux 10 et 11.

L'examen visuel des produits de l'opération sidérurgique permettant à lui seul d'intéressantes conclusions quant aux conditions du traitement métallurgique subi[14], il importera de faire de bonnes photographies de ces objets.

### 2.2. *L'examen minéralogique*

Pour certains échantillons, l'examen macroscopique sera complété par une étude minéralogique pratiquée sur des sections polies et à partir de lames minces, ainsi que par la mesure de la diffraction des rayons X; diverses conclusions peuvent en être tirées, qui sont fondamentales au moment de choisir le matériel destiné à l'analyse proprement dite.

Dans les zones non altérées la fayalite ($Fe_2SiO_4$) est le constituant minéral principal[15]; elle peut parfois contenir une quantité notable de manganèse dans sa structure, devenant ainsi du $Mn_2SiO_4$; les cristaux sont de taille très variable, mais montrent toujours une forme dont on peut déduire que leur croissance a été très rapide. La fayalite est accompagnée d'hercynite ($FeAl_2O_4$), minéral dans lequel le manganèse peut aussi remplacer le fer, donnant naissance à de la galaxite ($MnAl_2O_4$), tandis que dans d'autres cas c'est le fer qui remplace l'aluminium, donnant de la magnétite ($Fe_3O_4$). Du quartz a aussi été mis en évidence, mais il n'est pas possible de déterminer s'il s'agit là d'un produit de la recristallisation ou de grains importés en cours d'opération; si la wüstite (FeO) est absente, des grains et des filaments de fer à l'état métallique ont pu être observés. Une phase vitreuse est toujours présente, parfois très abondante (10 à 80%).

---

[11] *«... den (...) Schlackenkuchen (D1) der wahrscheinlich durch Erstarren von normaler Fliessschlacke der Rennherde die Kalottenform erreicht, sowie die (...) oft auch metallisches Eisen enthaltenden Schlackenfladen (D2). Diese stammen wahrscheinlich von Schmiedefeuern...»* (G. SPERL, 1980, p.15).

[12] L'application de ces critères au matériel provenant de Montcherand ne permettrait guère d'attribuer avec certitude des échantillons qu'aux catégories A2 (Mo27), B2 (Mo4) et C1 (Mo3c, Mo6, Mo7, Mo9, Mo9c, Mo35 et Mo90).

[13] Ces lignes sont tirées du rapport établi par V. SERNEELS.

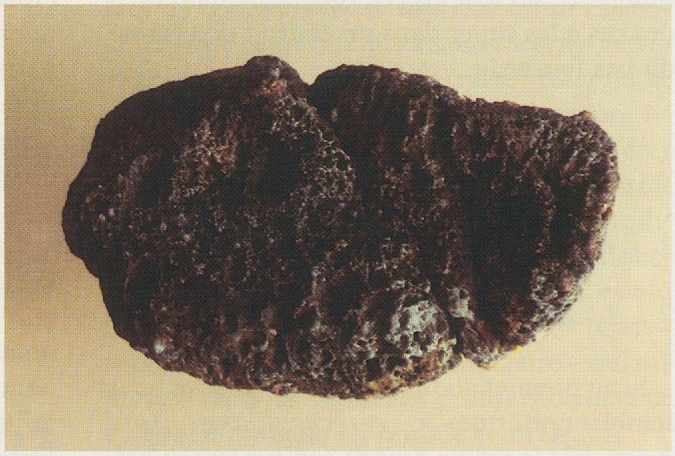
[14] Lettre du Professeur R. PLEINER du 10 juillet 1984: *«... it is rather difficult to make judgements solely according to the chemical. Usually, to see the samples is important, not regarding mineralogy etc...»*

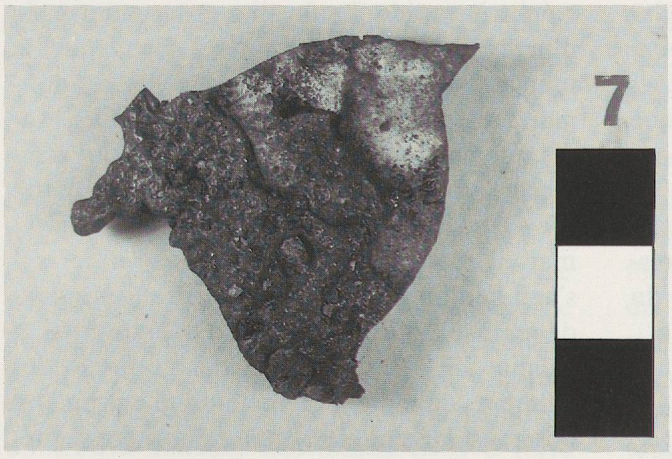
[15] *«Il s'agit d'une texture présentant l'aspect caractéristique d'un recuit, donc pas naturelle, et dont la présence, comme celle de la galaxite, a été confirmée à l'aide d'un diffractomètre à rayons-X. Les autres éléments trouvent place dans des minéraux de la famille des spinels et dans la phase vitreuse. La présence de fayalite et la forte teneur en fer montrent un traitement assez médiocre.»* (voir n. 13).

a) vue de dessous

Fig. 30 Scorie de forme ovoïde ayant coulé accidentellement dans une cavité et provenant du bas-fourneau IIb - échantillon nº 6. Echelle 1 : 1,5 *(Photos MHAVD).*

b) vue de dessus

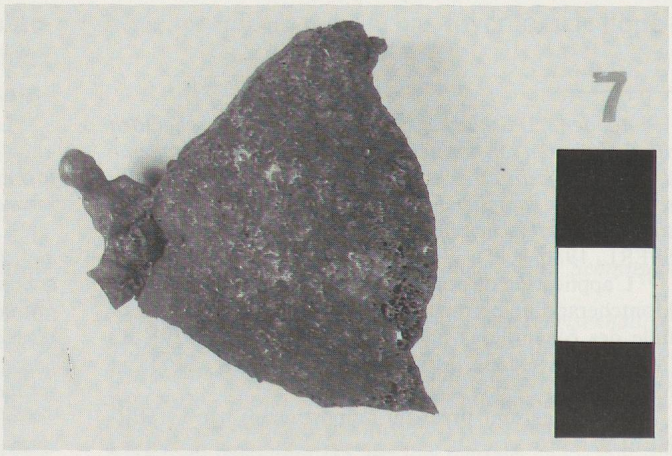





a) vue de dessus

Fig. 31 Scorie ayant coulé sur une surface plane et provenant du bas-fourneau IIb - échantillon nº 7 *(Photos IAHA).*

b) vue de dessous



### 2.2.1. *Scories*

| N° | Description | Provenance Bas-fourneau I | IIb | V | site | Remarques | Section polie | Lame mince | Rayons X |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Scories coulées grises denses** | | | | | | | | | |
| Mo3c | Scorie en forme de plaque, arrondie dans sa partie inférieure | | × | | | Petites pierres incrustées sur le dessous (fig. 29) | | | |
| Mo6 | Scorie de forme ovoïde | | × | | | (fig. 30) | | × | × |
| Mo7 | Scorie en forme de plaque | | × | | | (fig. 31) | | | |
| Mo9 | Scorie en forme de boudin | | | × | | (fig. 32) | | | |
| **Scories coulées jaunes denses** | | | | | | | | | |
| Mo9c | Scorie en forme de plaque, arrondie dans sa partie inférieure | | | × | | | | | |
| **Scories coulées denses à reflets bleus** | | | | | | | | | |
| Mo5 | Scorie vitreuse (fig. 33) | × | | | | La vitrification indique que le point de fusion a été largement dépassé | | | |
| Mo13 | Scorie vitreuse (fig. 34) | | × | | | | | | |
| **Scories coulées noires légères** | | | | | | | | | |
| Mo8 | Scorie légère | | | × | | présence de bulles qui dans ce cas n'est cependant pas indicative de l'existence d'une soufflerie (fig. 35) | | | |

Tabl. 10 Examen visuel des scories prélevées à Montcherand[16]

**Commentaire**: les scories provenaient de l'espace situé devant les bas-fourneaux dans l'axe de l'orifice par lequel était effectuée la vidange; les prélèvements d'échantillons ont été réalisés aux emplacements où ils pouvaient être rattachés sans difficultés à une installation. Malgré sa forme ovoïde particulière, Mo6 ne provient pas du fond du bas-fourneau: coulée à l'extérieur de l'installation, cette scorie se serait plutôt solidifiée dans une cavité difficilement interprétable dont elle avait repris la forme.

Pour Mo5 et Mo13, les résultats d'analyses reportés dans le tableau 12 confirment en outre la présence d'une quantité élevée de CaO.

L'endroit où s'étaient formées ces scories peut être suggéré par la figure 36.

### 2.2.2. *Résidus de diverses natures*

| N° | Description | Provenance Bas-fourneau I | IIb | V | site | Remarques | Section polie | Lame mince |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Mo3 | Agrégat vacuolaire composé de grains de roches ayant subi un début de fusion. La teinte est brun foncé, la densité faible | | | | × | Nous serions en présence d'une scorie qui se serait formée dans le fond du bas-fourneau, sous l'éponge (fig. 37). La cimentation par la rouille pourrait être un phénomène postérieur | | |
| Mo4 | Scorie coulée, grise et dense avec reste de paroi de bas-fourneau | | × | | | Le reste de paroi présente une consistance argilo-sableuse (fig. 38a) | × | × (fig. 38b) |

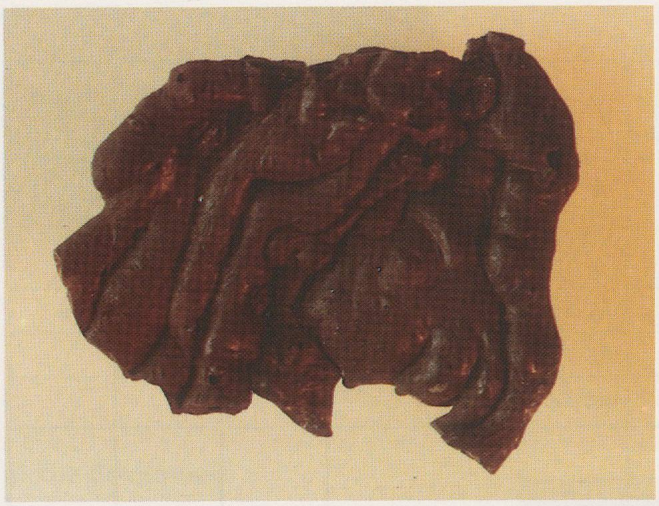
Tabl. 11 Examen visuel des résidus de diverses natures prélevés à Montcherand

**Commentaire**: Mo3 est formé d'un agrégat de grains de roches silicatée, calcaire et argileuse (5% du volume total), de gouttes de scorie fayalitique (20%) et de petits morceaux de charbon de bois (10%). De la rouille joue le rôle de liant entre ces éléments (25%). La porosité est en grande partie due à la dégradation des charbons (40%). L'aspect de la surface est très irrégulier, anguleux, voire déchiqueté. A notre connaissance, ce type de scorie ne présente pas de parallèle en Suisse[17].

---

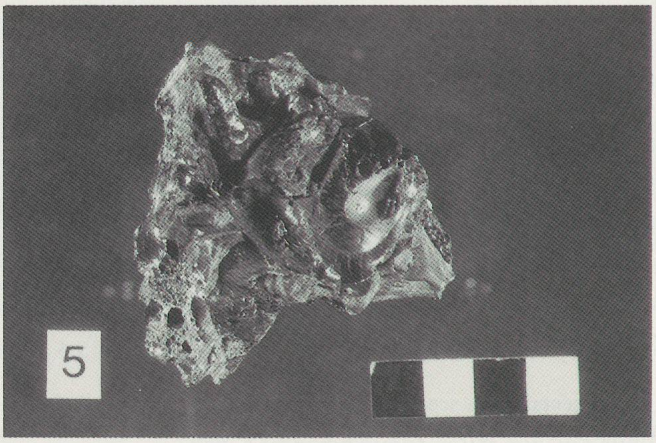
[16] Nous remercions V. SERNEELS d'avoir procédé pour nous à cette détermination.

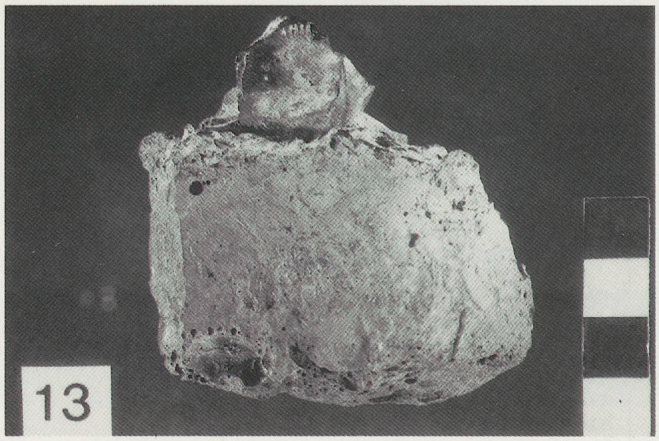
[17] Une description assez proche serait fournie par J.H. MONEY (1971, p. 105).



◀ Fig. 32 Scorie coulée provenant du bas-fourneau V - échantillon n° 9. Echelle 1:1,5 *(Photo MHAVD).*

Fig. 33 Scorie vitreuse provenant du ▶ bas-fourneau I - échantillon n° 5 *(Photo IAHA).*




◀ Fig. 34 Scorie vitreuse provenant du bas-fourneau IIb - échantillon n° 13 *(Photo IAHA).*

Fig. 35 Scorie légère provenant du ▶ bas-fourneau V - échantillon n° 8 *(Photo IAHA).*

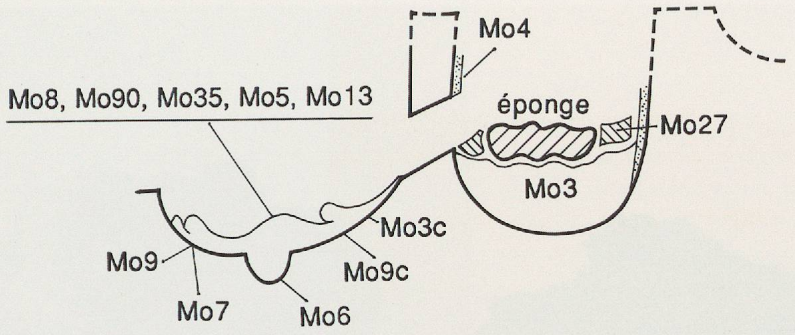



Fig. 36 Répartition schématique des scories par rapport aux bas-fourneaux *(Dessin IAHA).*

A ce stade de la recherche déjà, quelques précisions supplémentaires peuvent être fournies; l'échantillon Mo4 nous propose à la fois la scorie et une partie du bas-fourneau qui s'est arrachée lors de l'extraction de l'éponge (fig. 38a); reprenons ici la description qu'en donnait V. SERNEELS: *«... cet objet se présente sous la forme d'une scorie encore accolée à la paroi du four. Une lame mince a été taillée pour examiner ce contact. On distingue nettement plusieurs couches avec des interfaces bien marquées. On est tenté d'interpréter cette situation en termes de coulées successives. Cela reste délicat.»*[18]

*3. Les analyses chimiques*

Quinze échantillons de scories et de minerais provenant des fouilles du site de Montcherand ont fait l'objet d'analyses chimiques.

Ces travaux ont été effectués par V. SERNEELS au *Centre d'Analyse Minérale de la Faculté des Sciences de l'Université de Lausanne* par la méthode de fluorescence X à l'aide d'un spectromètre Philips PW 1400. Cette méthode permet de doser rapidement les principaux éléments majeurs (Si, Fe, Mg, Mn, Al, Ti, Ca, Na, K, et P) ainsi que de nombreux éléments traces (Zr, Y, Sr, Rb, Ba, V, Sn, Sb, Ag, As, Pb, Zn, Cu, Ni, Cr, Co). Pour l'ensemble de ces échantillons le $CO_2$ est dosé séparément par coulométrie, $H_2O$ a été déterminée par la perte au feu, le degré d'oxydation du fer $FeO/Fe_2O_3$ était mesuré par colorimétrie; le Fe est calculé sur la base de la perte au feu, du dosage du $Fe_{total}$ et du dosage du FeO: la présence de Mn à divers degrés d'oxydation peut fausser ce dernier calcul.

Trois échantillons qui, contenant des nodules de fer, n'avaient pu être broyés afin d'être étudiés à l'aide du spectromètre, ont été analysés par G. BURRI de l'*Institut de Physique Expérimentale de la Faculté des Sciences de l'Université de Lausanne,* à l'aide d'une microsonde ARL, type SEMQ: si, en raison d'une sensibilité de mesure plus faible, les teneurs obtenues de cette manière n'ont pas pu être comparées aux résultats précédents, l'examen des surfaces polies a permis de mettre en évidence les composants principaux de ces scories, tels que la fayalite, la matrice vitreuse l'entourant, et les faibles traces d'un composant à forte teneur en fer[19].

Jusqu'alors, ce n'est qu'à des fins d'identification que les scories produites par des installations sidérurgiques pouvaient être analysées: en effet, il était de toute manière impossible de donner des appréciations sur la datation des installations à partir des analyses chimiques pratiquées sur ce matériel, tandis que les produits de deux fusions obtenues par des moyens différents auraient difficilement pu être discriminés et ceci même quand une évolution technique fondamentale aurait distingué les deux procédés utilisés. Enfin, les scories de plusieurs sites ne se différenciant pas forcément entre elles, l'examen des teneurs en éléments chimiques ne permettait que des considérations quant au rendement de l'opération métallurgique et à la présence caractéristique de certains éléments chimiques. Or à Montcherand les prélèvements attribués aux bas-fourneaux les plus récents permettent une interprétation allant dans le sens d'une évolution des techniques utilisées; en outre, une approche inédite

[18] L'examen de la surface polie révèle la présence de fer métallique.

[19] L'examen de l'échantillon Mo27 a décelé la présence d'un grain de quartz d'environ 1/10 mm de diamètre.

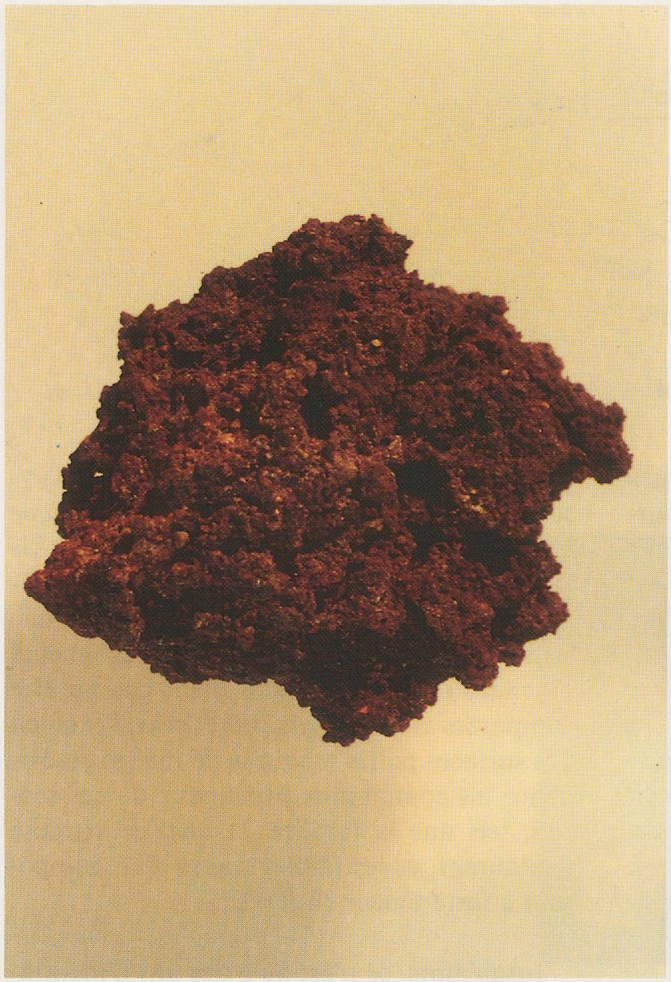


Fig. 37 Scorie formée à proximité de l'éponge - échantillon n° 3. Echelle 1:1,5 *(Photo MHAVD).*

et sur laquelle nous reviendrons, a été réalisée par V. SERNEELS (E. ABETEL et V. SERNEELS, 1991, pp. 591-597).

*3.1. Analyse des scories*

Les analyses confirment que l'échantillon Mo3, pour lequel l'examen macroscopique a mis en évidence des différences notables, se distingue très nettement des autres. Le fer y est essentiellement présent sous forme de $Fe_2O_3$, il contient de l'eau ($H_2O$) et du charbon ($CO_2$).

Mo4 doit également être exclu de notre réflexion en raison de la nature composite de la partie analysée, même si les différences sont moins évidentes: un fragment de paroi du bas-fourneau intervenait en effet dans la préparation de l'échantillon.

Parmi les autres analyses on distingue deux groupes confirmés par l'observation macroscopique. Les échantillons Mo3c, Mo6, Mo7, Mo8, Mo9 et Mo9c sont assez proches les uns des autres, alors que Mo5 et Mo13, «scories coulées denses à reflets bleus», sont riches en CaO, en contenant près de 10% de plus que les autres: il s'agit là d'un élément significatif, ces teneurs étant beaucoup plus élevées que celles du minerai sidérolithique de Montcherand.

Il convient de rappeler la découverte de fragments de calcaire ferrugineux – Mo55 (supra p. 41, tabl. 4) – utilisés comme minerai, mais plus vraisemblablement comme complément à une charge de minerai sidérolithique: une telle adjonction aurait pour effet d'abaisser le point de fusion du mélange et de donner une scorie plus rapidement fluide, en jouant ainsi le rôle d'un fondant: l'aspect massif et compact des scories Mo5 et Mo13 confirmerait qu'elles se sont écoulées aisément hors du bas-fourneau, elles correspondraient à la surface de la coulée. Le Ca permettra également de diminuer la quantité de fer passant dans les scories, en prenant sa place dans les silicates: les analyses de Mo5 et Mo13 montrent une perte importante en fer, mais précisément inférieure à celle des scories

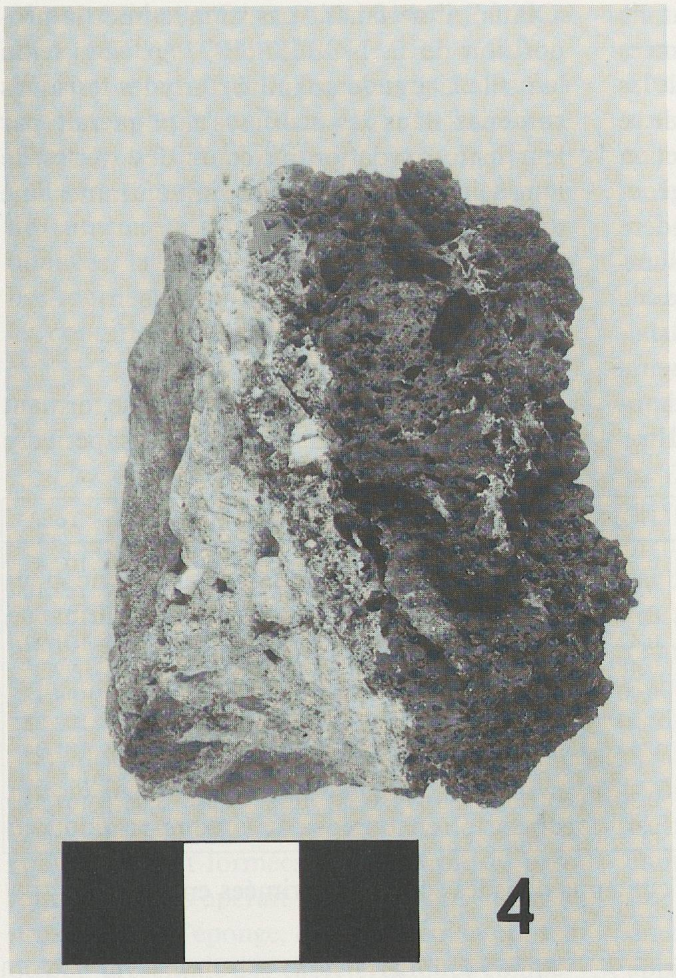
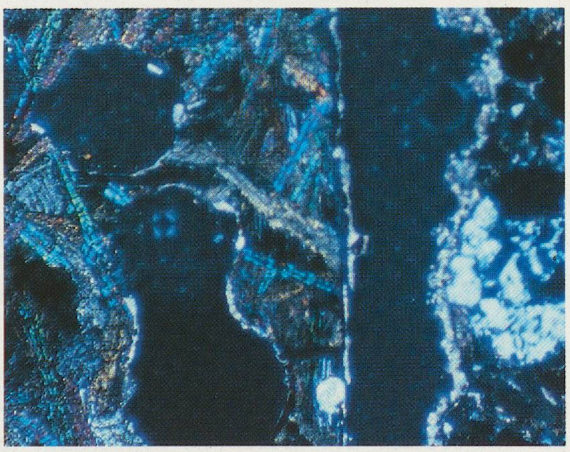



Fig. 38a Paroi de bas-fourneau et scorie attenante provenant de IIb - échantillon n° 4 *(Photo IAHA).*

Fig. 38b Coupe de l'échantillon n° 4 - agrandissement 25x *(Centre d'Analyse Minérale).*



non calciques. Ces calcaires ferrugineux étant moins riches en fer que le sidérolithique, un ajout de ce type fait baisser la teneur en fer du mélange. Celle-ci étant restée supérieure à celle correspondant à l'emploi exclusif de minerai calcique, nous avons la confirmation de l'utilisation contemporaine de deux minerais.

Du point de vue de la quantité de métal produite, avantages et inconvénients devaient s'équilibrer, et c'est sans doute une meilleure séparation entre les produits de la fusion à l'intérieur du bas-fourneau qui a pu motiver les anciens sidérurgistes à agir de cette façon.

Enfin, il faut mentionner la très forte teneur en Mn de l'échantillon Mo7 et rappeler l'hétérogénéité du minerai à ce point de vue. Il est hasardeux d'envisager que les artisans de Montcherand aient cherché à tirer parti de la présence de cet élément, bien connu de nos jours pour son influence sur les qualités physiques du fer[20]: contrairement à leurs collègues de Bellaires I[21], ils n'ont en tout cas pas tenté d'en éviter l'emploi.

[20] Supra p. 66, n. 65. Si les scories de Montcherand, avec des teneurs en MnO supérieures à 1,16%, devraient correspondre à un minerai susceptible de fournir plus facilement ce genre de résultats que ceux utilisés à Bellaires (P.-L. PELET, 1973, pp. 174-175, tabl. XVI), où la teneur moyenne est de 0,22%, ou à Lousonna-Vidy (E. ABETEL et V. SERNEELS, article en cours de préparation) où elle n'est que de 0,1%, il convient de signaler que dans notre cas cet oxyde passe en grande partie dans les scories au cours de l'opération sidérurgique.

[21] Des morceaux de minerai présentant 20% de Mn avaient été retrouvés isolés dans la masse des scories (P.-L. PELET, 1973, p. 166).

Si les analyses des scories permettent de montrer qu'elles n'ont pas toutes été formées dans les mêmes conditions, dans l'ensemble les compositions chimiques des échantillons de ce site sont assez proches les unes des autres et on peut parler de groupe analytique homogène: ceci est d'autant plus vrai lorsqu'on considère les scories seules à partir de leurs éléments traces. Comme nous l'espérions, il a été possible de relever une différence entre certaines installations de Montcherand, puisque des teneurs élevées en CaO ont été mesurées sur des échantillons provenant des bas-fourneaux I et IIb.

Enfin, il ne faudra pas sous-estimer la proposition de E. NOSEK (1977, p. 73), selon laquelle la grande quantité d'oxydes ferriques contenus dans les scories s'expliquerait par leur lente oxydation au cours des siècles, le long séjour dans le sol pouvant entraîner une teneur accrue en soufre[22].

### *3.1.1. Températures atteintes*

En plus de la présence de fayalite se formant à une température immédiatement supérieure

| | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | CaO | $Fe_2O_3$ | FeO | Fe | $TiO_2$ | MnO | MgO | $Na_2O$ | $K_2O$ | $P_2O_5$ | $H_2O+$ | $CO_2$ | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Mo3c | 27,71 | 7,68 | 3,81 | 5,66 | 52,58 | 0,00 | 0,39 | 1,26 | 0,77 | 0,11 | 0,51 | 1,25 | 0,00 | 0,68 | 102,42 |
| Mo5 | 37,01 | 7,64 | 14,31 | 1,62 | 36,56 | 0,00 | 0,43 | 1,50 | 0,96 | 0,04 | 0,50 | 0,92 | 0,36 | 0,23 | 102,10 |
| Mo6 | 28,57 | 8,28 | 5,37 | 3,42 | 50,88 | 0,00 | 0,41 | 1,16 | 0,79 | 0,06 | 0,43 | 1,07 | 0,51 | 0,93 | 101,90 |
| Mo7 | 27,81 | 8,78 | 5,32 | 0,19 | 48,34 | 0,30 | 0,42 | 6,77 | 1,08 | 0,06 | 0,54 | 1,37 | 0,00 | 0,21 | 101,22 |
| Mo8 | 46,36 | 8,91 | 5,56 | 1,35 | 31,34 | 0,00 | 0,48 | 1,47 | 0,89 | 0,19 | 0,99 | 0,62 | 0,64 | 0,64 | 99,36 |
| Mo9 | 27,24 | 6,05 | 4,90 | 6,73 | 49,85 | 0,00 | 0,30 | 1,16 | 0,68 | 0,22 | 0,72 | 0,85 | 0,55 | 0,17 | 99,43 |
| Mo9c | 37,36 | 8,03 | 4,49 | 5,16 | 43,18 | 0,00 | 0,42 | 1,27 | 0,77 | 0,11 | 0,41 | 0,80 | 0,06 | 0,70 | 102,78 |
| Mo13 | 36,86 | 7,68 | 13,91 | 3,22 | 34,83 | 0,00 | 0,42 | 1,43 | 0,94 | 0,05 | 0,49 | 0,93 | 0,33 | 0,23 | 101,34 |
| Mo3 | 23,21 | 6,03 | 3,17 | 46,64 | 10,58 | 0,00 | 0,30 | 1,63 | 0,50 | 0,09 | 0,38 | 0,98 | 4,64 | 3,06 | 101,23 |
| Mo4 | 32,37 | 9,78 | 5,21 | 15,62 | 26,65 | 4,78 | 0,47 | 3,33 | 1,02 | 0,02 | 0,65 | 1,21 | 0,00 | 0,50 | 101,64 |

Tabl. 12 Teneurs des éléments majeurs contenus dans les scories, exprimées en %[23]

| | Mo | Pb | Zn | W | Cu | Ni | Cr | Co | Ag | Th | Bi | U | As | S | Sb | Ba |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Mo3c | 2 | 67 | 207 | 209 | 108 | 0 | 532 | 357 | 61 | 9 | 17 | 9 | 95 | 0 | 5 | 275 |
| Mo5 | 1 | 34 | 127 | 258 | 58 | 0 | 444 | 189 | 45 | 13 | 17 | 6 | 77 | 24 | 0 | 156 |
| Mo6 | 5 | 60 | 197 | 118 | 110 | 42 | 567 | 361 | 60 | 16 | 15 | 3 | 113 | 0 | 1 | 225 |
| Mo7 | 1 | 45 | 92 | 96 | 71 | 0 | 743 | 242 | 56 | 15 | 0 | 11 | 99 | 5 | 1 | 223 |
| Mo8 | 0 | 37 | 87 | 126 | 53 | 53 | 368 | 176 | 33 | 17 | 12 | 7 | 84 | 0 | 0 | 224 |
| Mo9 | 9 | 63 | 53 | 106 | 101 | 0 | 516 | 339 | 65 | 9 | 0 | 5 | 97 | 0 | 1 | 147 |
| Mo9c | 6 | 51 | 119 | 92 | 74 | 23 | 629 | 276 | 49 | 12 | 1 | 3 | 101 | 0 | 2 | 98 |
| Mo13 | 1 | 24 | 136 | 157 | 56 | 0 | 403 | 183 | 44 | 11 | 9 | 9 | 57 | 25 | 0 | 106 |
| Mo3 | 9 | 52 | 1162 | 69 | 106 | 228 | 615 | 472 | 49 | 15 | 0 | 8 | 251 | 85 | 5 | 184 |
| Mo4 | 0 | 59 | 205 | 234 | 48 | 0 | 738 | 235 | 49 | 16 | 7 | 9 | 72 | 0 | 6 | 178 |

Tabl. 13 Teneurs des éléments traces contenus dans les scories, exprimées en ppm

Dans l'état actuel de nos connaissances, les teneurs en éléments chimiques peuvent difficilement fournir des précisions concernant le déroulement de l'opération de fusion dans le bas-fourneau: il est important de rappeler que dans les scories ces valeurs sont dépendantes de facteurs autres que leur simple présence dans le minerai d'origine: ainsi le contact avec le charbon de bois pourrait-il modifier les teneurs de certains des éléments chimiques tels l'$Al_2O_3$, le CaO, le $K_2O$ et le MgO (H. SCHMID, 1977, p. 22), tandis que dans certains cas on attribue l'augmentation de la teneur en $SiO_2$ à la constitution de la cuve.

à 1200°, seul l'examen métallographique des morceaux de fer produits durant l'opération sidérurgique permettrait de préciser les conditions de fonctionnement de l'installation, certains des dérivés de l'alliage fer-carbone éventuellement identifiables se formant à des tem-

[22] Le soufre et l'arsenic, éléments nocifs, auraient dû être éliminés au cours d'un grillage préalable.

[23] Le total des éléments ne sera jamais égal à 100%, ceci s'explique par divers facteurs: certains éléments, quoique présents, ne sont pas analysés, en outre, les erreurs sur les diverses mesures s'ajouteront, sans forcément se compenser. Des variations seront enfin dues au calibrage de l'installation.

pératures bien précises. Ainsi, lors de l'analyse d'un lingot, A. DELAMARE et alii. (1982, p. 103) ont montré que le façonnage s'était fait à une température se situant dans une fourchette allant de 1370 à 1450°[24].

Il sera toutefois important de tenir compte du caractère essentiellement indicatif de ces données, la pression régnant à l'intérieur du bas-fourneau ayant pu modifier sensiblement les conditions de formation des échantillons.

### 3.2. *Analyse des scories contenant du fer métallique*

Dans trois cas – Mo27, Mo35 et Mo90 –, lors du débitage des scories pour la préparation des échantillons destinés aux analyses, des nodules de fer ont été mis au jour; ils ont des dimensions de 3 à 5 cm, et sont le résultat de l'opération sidérurgique (fig. 39a à c).

A Montcherand, où aucune éponge n'a été retrouvée, ces particules métalliques relativement importantes et présentes dans des scories coulées se sont formées à un endroit du bas-fourneau où s'opérait la réduction: donc à proximité de l'éponge, dont on peut supposer qu'elle présentait des caractéristiques comparables.

Ne pourrions-nous pas envisager l'exploitation de scories ou de parties d'éponges comportant des morceaux de fer, pour la fabrication d'objets de petites dimensions, aux caractéristiques mécaniques particulières? Il est difficile de concevoir une récupération systématique de ces nodules qui, portés au blanc soudant, auraient été ensuite martelés en lingots ou en barreaux pour des usages spéciaux: le compte-rendu des expérimentations effectuées à Nancy (supra p. 63, n. 48) irait certes dans ce sens, mais la présence de ces nodules parmi les scories est surtout à interpréter comme la preuve qu'ils n'ont pas été utilisés.

Les divers éléments présents (fig. 40) ont été analysés par microsonde après polissage de la surface à la pâte diamantée[25]: des séries de quatre mesures, dont a été interprétée la valeur moyenne, ont été effectuées sur les divers constituants: matrice vitreuse et fayalite, ainsi que sur les nodules de fer présents. Dans tous les cas la teneur en fer dépassait 99%, la teneur élevée en MnO, déjà décelée par spectroscopie et caractéristique du matériau de Montcherand, est ici confirmée. A l'inverse, il sera intéressant de relever que si le manganèse est encore présent dans la fayalite et la matrice vitreuse (tabl. 15), il a presque totalement disparu des nodules de fer (tabl. 16).

Bien que l'appareillage ait été calibré pour mettre en évidence les traces d'autres éléments chimiques – il faut encore mentionner V, Cu, Zn, Si, Mo, S, Al et Ti – seuls ceux figurant dans le tableau 16 ont été relevés en quantités appréciables, ces données chiffrées confirmant que les impuretés manquantes ont passé dans la phase vitreuse.

---

[24] Après l'opération de forgeage, un maintien durant 45 minutes à une température supérieure à 1300° est même attesté (ibid. p. 101).

[25] Protocole d'analyse n° 634 du 8 juillet 1988 du *Centre de microanalyse par sonde électronique de l'Institut de Physique Expérimentale.*

| N° | Description | Provenance Bas-fourneau IIb | V | site | Remarques | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 27 | Composé gris | | × | | se serait formé à l'intérieur du bas-fourneau | des nodules ou de fortes inclusions de fer apparaissent lors du débitage (fig. 39a à c) |
| 35 | Coulure en boudins homogène et grise | | × | | a coulé à l'extérieur | |
| 90 | Coulure en boudins hétérogène | | × | | a coulé à l'extérieur | |

Tabl. 14 Examen visuel des fragments formés à proximité des éponges et prélevés à Montcherand

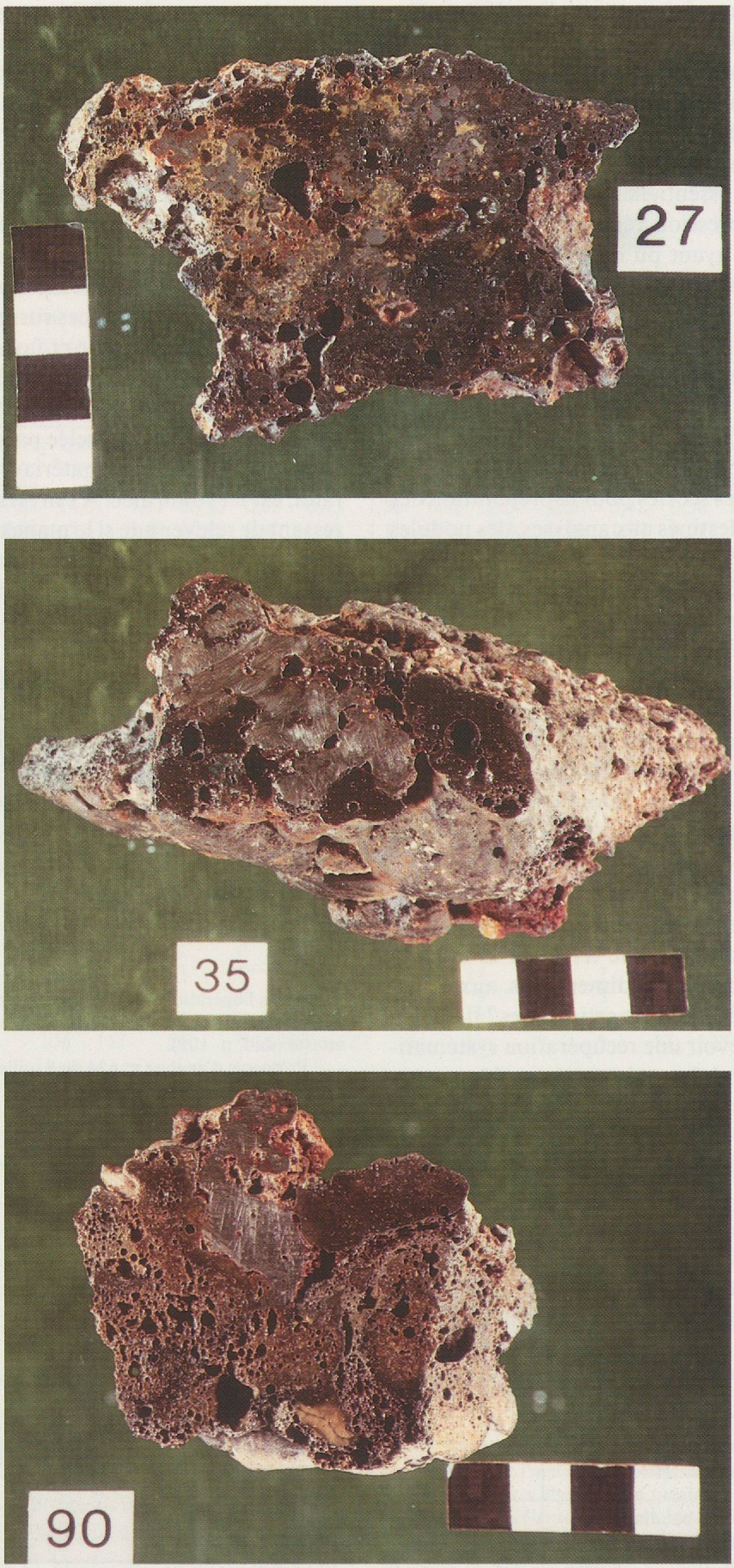



Fig. 39a à c Nodules de fer formés à proximité des éponges et provenant des bas-fourneaux V - échantillons nº 27, 35 et 90 *(Photos IAHA)*.

| | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | CaO | $Fe_2O_{3tot}$ | $TiO_2$ | MnO | MgO | $Na_2O$ | $K_2O$ | $Cr_2O_3$ | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Mo27 fayalite | 30,58 | 2,05 | 0,68 | 63,05 | 0,28 | 1,52 | 1,81 | 0,02 | 0,00 | 0,02 | 100,01 |
| matrice vitreuse | 53,71 | 17,51 | 6,16 | 19,21 | 1,35 | 0,65 | 0,29 | 0,11 | 1,01 | 0,02 | 100,02 |
| Mo35 fayalite | 28,77 | 0,37 | 1,29 | 66,48 | 0,08 | 1,68 | 1,30 | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 99,99 |
| matrice vitreuse | 39,48 | 15,42 | 18,34 | 21,68 | 0,50 | 0,39 | 0,03 | 1,42 | 2,75 | 0,00 | 100,01 |
| wüstite | 0,40 | 2,11 | 0,00 | 98,56 | 0,61 | 0,32 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 102,00 |
| Mo90 fayalite | 28,70 | 0,35 | 0,14 | 67,21 | 0,15 | 2,07 | 1,38 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 100,01 |
| matrice vitreuse | 50,17 | 15,81 | 8,99 | 22,12 | 1,19 | 1,00 | 0,14 | 0,05 | 0,52 | 0,03 | 100,02 |

Tabl. 15 Teneurs en majeurs des éléments, mises en évidence par microsonde, exprimées en %

| | Cr | Mn | Co | Ni | Fe | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Mo27 | 0,03 | 0,00 | 0,16 | 0,10 | 99,59 | 99,88 |
| Mo35 | 0,03 | 0,00 | 0,25 | 0,26 | 99,32 | 99,86 |
| Mo90 | 0,04 | 0,01 | 0,27 | 0,28 | 99,30 | 99,90 |

Tabl. 16 Teneurs des nodules, en fer et en éléments traces, mises en évidence par microsonde et exprimées en %

*3.3. Analyse des clous*

Il aurait été intéressant de déterminer l'exacte provenance des clous trouvés sur le site de Montcherand; pour ce faire, le seul espoir était de mettre en évidence en nombre suffisant les éléments traces dans d'éventuelles inclusions de scories présentes dans les objets examinés, afin d'introduire les valeurs obtenues dans un dendrogramme (infra p. 84): le degré de précision du type d'analyse pratiqué, inférieur à celui de la mesure par fluorescence X, laissait toutefois peu d'espoir d'obtenir des valeurs comparables (tabl. 17).

Débités à cet effet, les trois clous découverts lors de la fouille ne présentèrent finalement aucune impureté susceptible d'être analysée à l'aide de la microsonde; il a cependant été possible de constater que la teneur en fer ne dépassait pas celle des grains de métal présents dans les échantillons Mo27, Mo35 et Mo90, l'absence probable d'une nouvelle opération de raffinage sur le site même faisant songer à nouveau à leur emploi pour la production de menus objets.

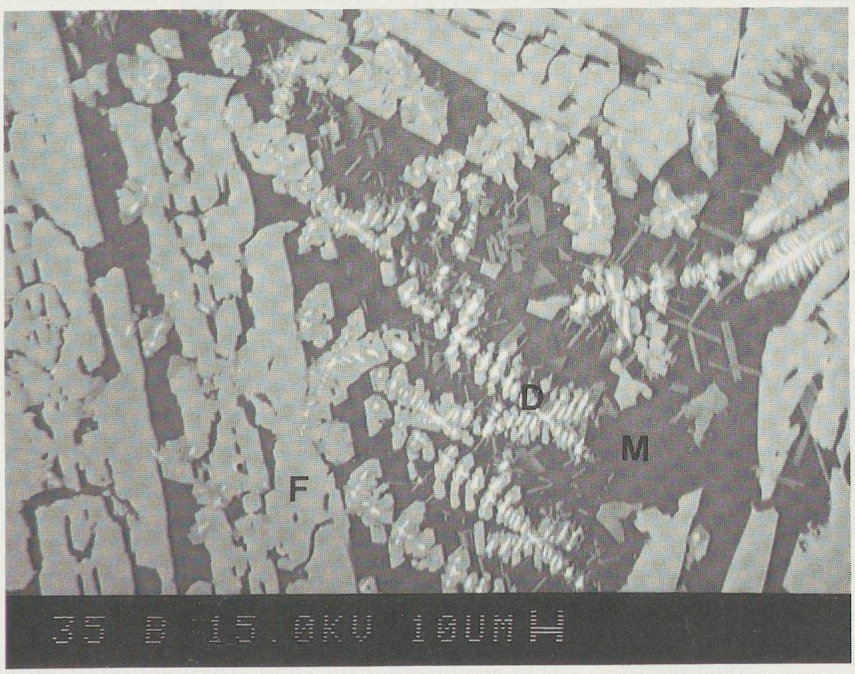



Fig. 40 Image obtenue par observation de l'échantillon n° 35 au microscope électronique.
F = fayalite M = matrice vitreuse D = dendrites à forte teneur de fer avec des inclusions de Mn et de V - agrandissement 500x. *(Institut de Physique Expérimentale).*

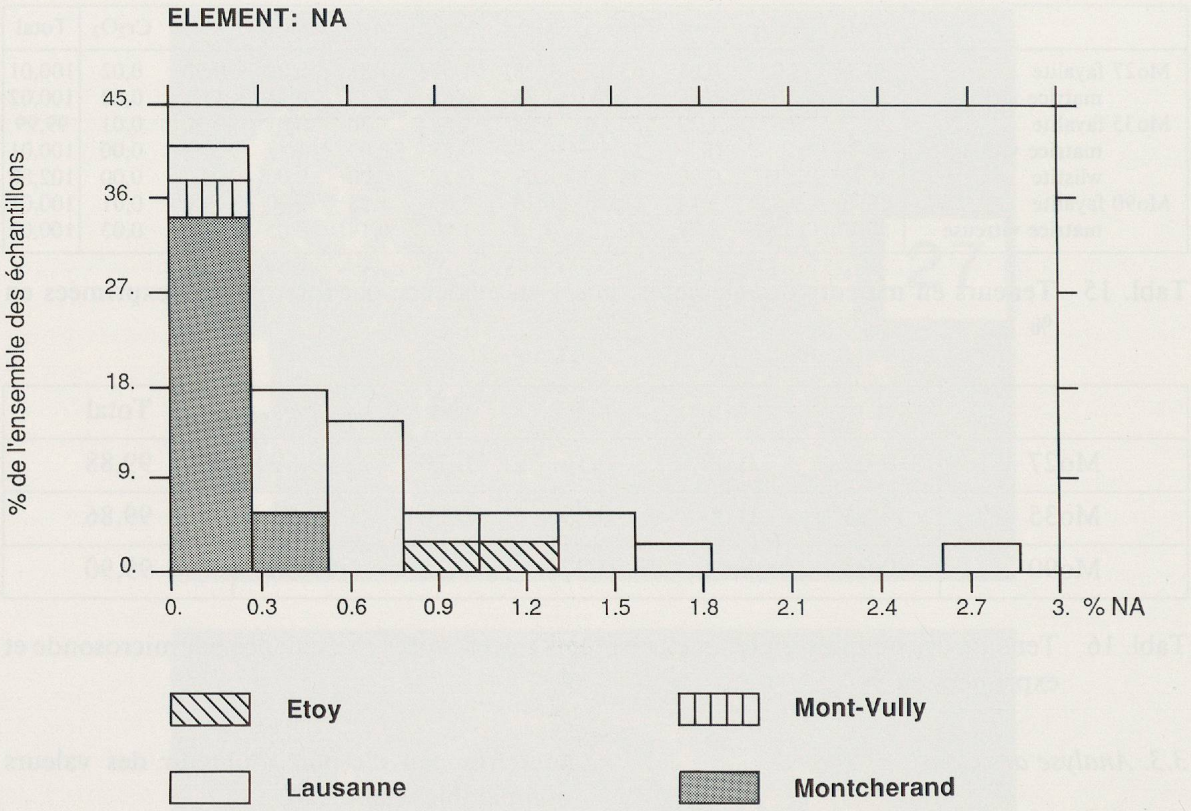



Fig. 41a Histogramme de l'élément sodium *(Centre d'Analyse Minérale)*.

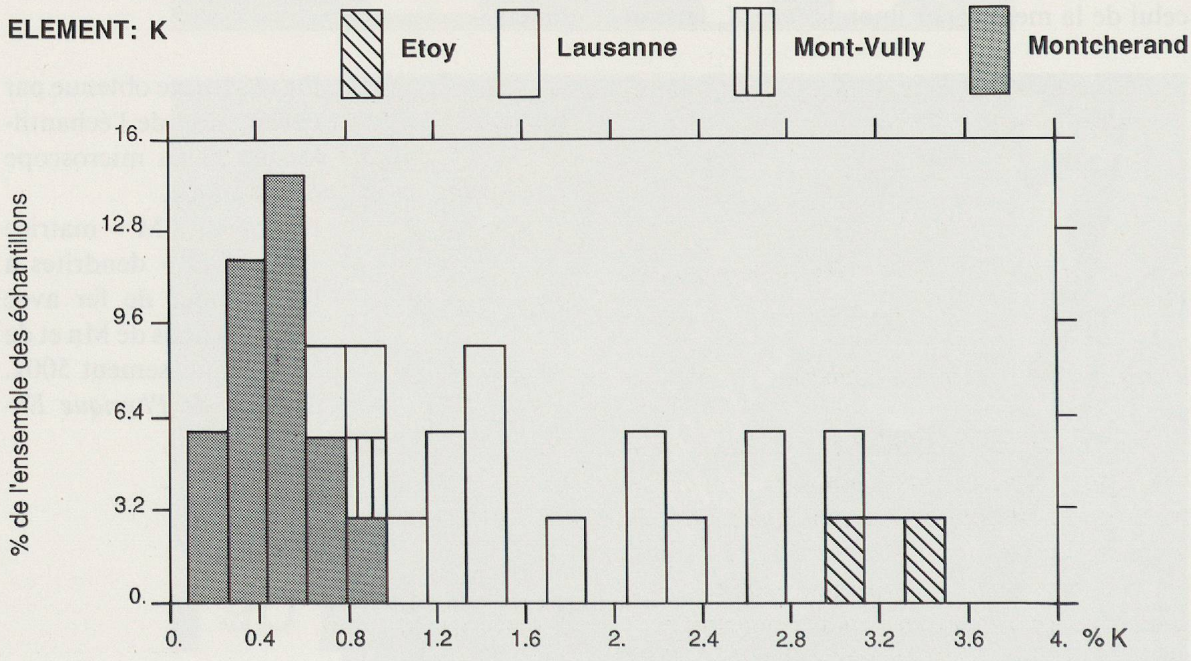



Fig. 41b Histogramme de l'élément potassium *(Centre d'Analyse Minérale)*.

| | Cr | Mn | Co | Ni | Fe | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 2758 | 0,03 | 0,01 | 0,11 | 0,02 | 99,76 | 99,93 |
| 2761 | 0,06 | 0,01 | 0,12 | 0,34 | 99,13 | 99,66 |
| 2762 | 0,10 | 0,00 | 0,17 | 0,03 | 99,62 | 99,92 |

Tabl. 17 Teneurs des clous, en fer et en éléments traces, mises en évidence par microsonde et exprimées en %

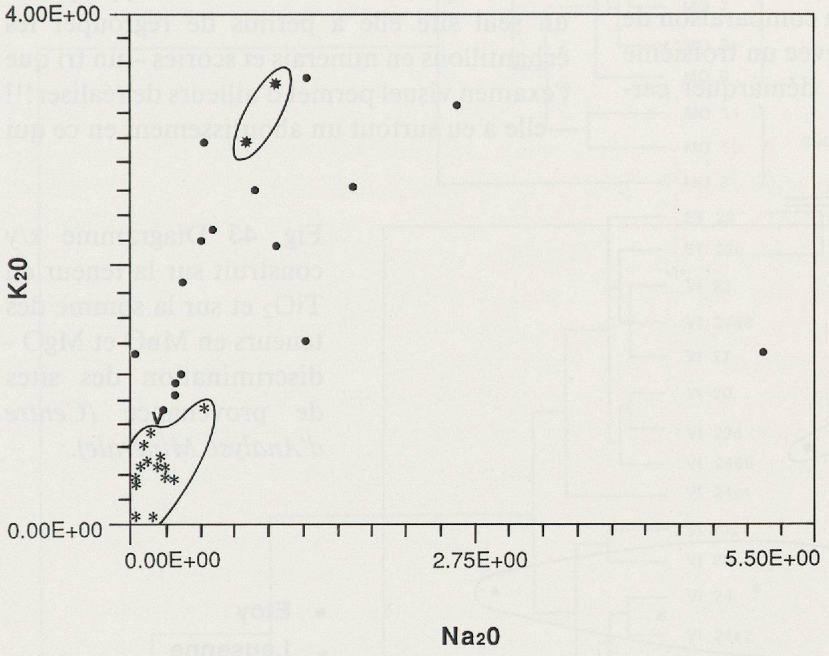



Fig. 42 Diagramme x/y construit sur les teneurs en oxydes de sodium et de potassium - visualisation de l'homogénéité du groupe Montcherand *(Centre d'Analyse Minérale).*

Ces résultats cadrent parfaitement avec ceux fournis par d'autres chercheurs; ainsi, A. FRANCE-LANORD (1963, p. 176) obtint des teneurs comparables pour un lingot provenant de la station de La Tène[26].

*4. Possibilités de regroupement à une échelle régionale*

*4.1. Méthodes conventionnelles*

Deux méthodes statistiques classiques peuvent être exploitées afin de mettre en évidence les origines différentes des échantillons par la visualisation du résultat des analyses chimiques. D'une part l'établissement d'un histogramme à partir des valeurs numériques correspondant à un seul élément chimique; d'autre part l'introduction de ces mêmes données pour deux éléments dans un diagramme x/y.

*4.1.1. L'histogramme* (fig. 41a et b)

L'axe horizontal, gradué en % de l'élément chimique pris en considération, est divisé en secteurs égaux; les échantillons, représentés par des rectangles de dimensions identiques seront empilés en regard du secteur correspondant à leur teneur.

L'axe vertical sera gradué en %, 100% correspondant à la hauteur représentée par l'empilement de tous les échantillons en une seule colonne[27].

Les spécimens aux teneurs proches se regrouperont sur un même secteur de l'axe horizontal.

[26] Des analyses au quantomètre donnaient les teneurs suivantes en impuretés: carbone 0,026-0,027%; manganèse 0,00%; phosphore 0,048-0,054%; silice 0,00-0,06%; soufre 0,008%.

[27] Cette situation serait réalisée si tous les échantillons avaient une même teneur de l'élément chimique pris en considération.

*4.1.2. Le diagramme x/y* (fig. 42)

Le regroupement des échantillons par catégories – sites de provenance ou nature des spécimens – se fera aisément en représentant dans un système de coordonnées x/y les valeurs obtenues pour deux éléments chimiques du même spécimen, choisis de façon à fournir la meilleure visualisation possible, les points correspondant aux échantillons de chaque famille devant apparaître dans des secteurs distincts du graphique; relevons que la comparaison de la somme de deux éléments avec un troisième contribuera parfois à mieux démarquer certains sites (fig. 43).

L'application des méthodes statistiques par V. SERNEELS a permis de regrouper les échantillons par lieux de provenance, à partir des éléments traces présents[28]; l'introduction de leurs teneurs dans un ordinateur établit un dendrogramme tenant compte de leurs influences réciproques: il détermine ainsi un faciès de l'ensemble, illustrant comment chaque spécimen s'en écarte.

Si lorsque cette démarche était appliquée à un seul site elle a permis de regrouper les échantillons en minerais et scories – un tri que l'examen visuel permet d'ailleurs de réaliser!!! – elle a eu surtout un aboutissement en ce qui

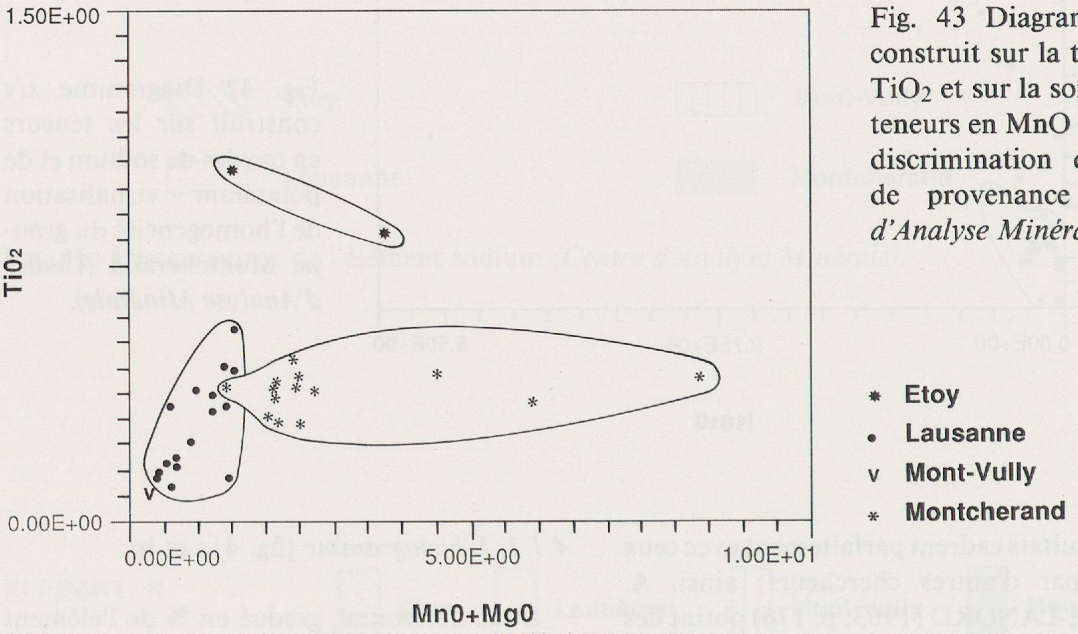



Fig. 43 Diagramme x/y construit sur la teneur en $TiO_2$ et sur la somme des teneurs en MnO et MgO - discrimination des sites de provenance *(Centre d'Analyse Minérale).*

*4.2. Le dendrogramme* (fig. 44)

Si les teneurs en éléments chimiques permettent de donner une représentation en quelque sorte chiffrée d'un site, il est apparu que toute comparaison avec d'autres exploitations, par simple lecture des tableaux récapitulatifs dans lesquels les mêmes éléments auraient été pris en considération, restait souvent sans résultat, tant étaient nombreux les facteurs qui ont influencé la formation des scories: par l'analyse multivariée, qui détermine les coefficients de corrélation entre les échantillons en tenant compte simultanément de plusieurs paramètres, une telle opération est maintenant possible et ses résultats peuvent être mis en évidence par traitement automatique des données.

concerne l'approche du marché antique du fer à une échelle régionale. Les échantillons sont regroupés selon leur provenance lors de l'étude du matériel de plusieurs sites tandis que les scories correspondant à l'élaboration d'autres métaux, cuivre ou plomb, sont rejetées à l'extérieur du dendrogramme.

La mise en dendrogramme[29] effectuée par E. ABETEL et V. SERNEELS (1991, pp. 591-

[28] Un dendrogramme établi à partir des éléments majeurs ne fera que de séparer les minerais des scories.

[29] Le dendrogramme réalisé pour le canton de Vaud est pour l'instant construit sur la base des analyses de fluorescence X de 126 échantillons dont tous les éléments traces dosés ont été pris en compte; il exprime le degré de parenté chimique entre les différents échantillons et permet de mettre en évidence des regroupements (J.C. DAVIS, 1973).

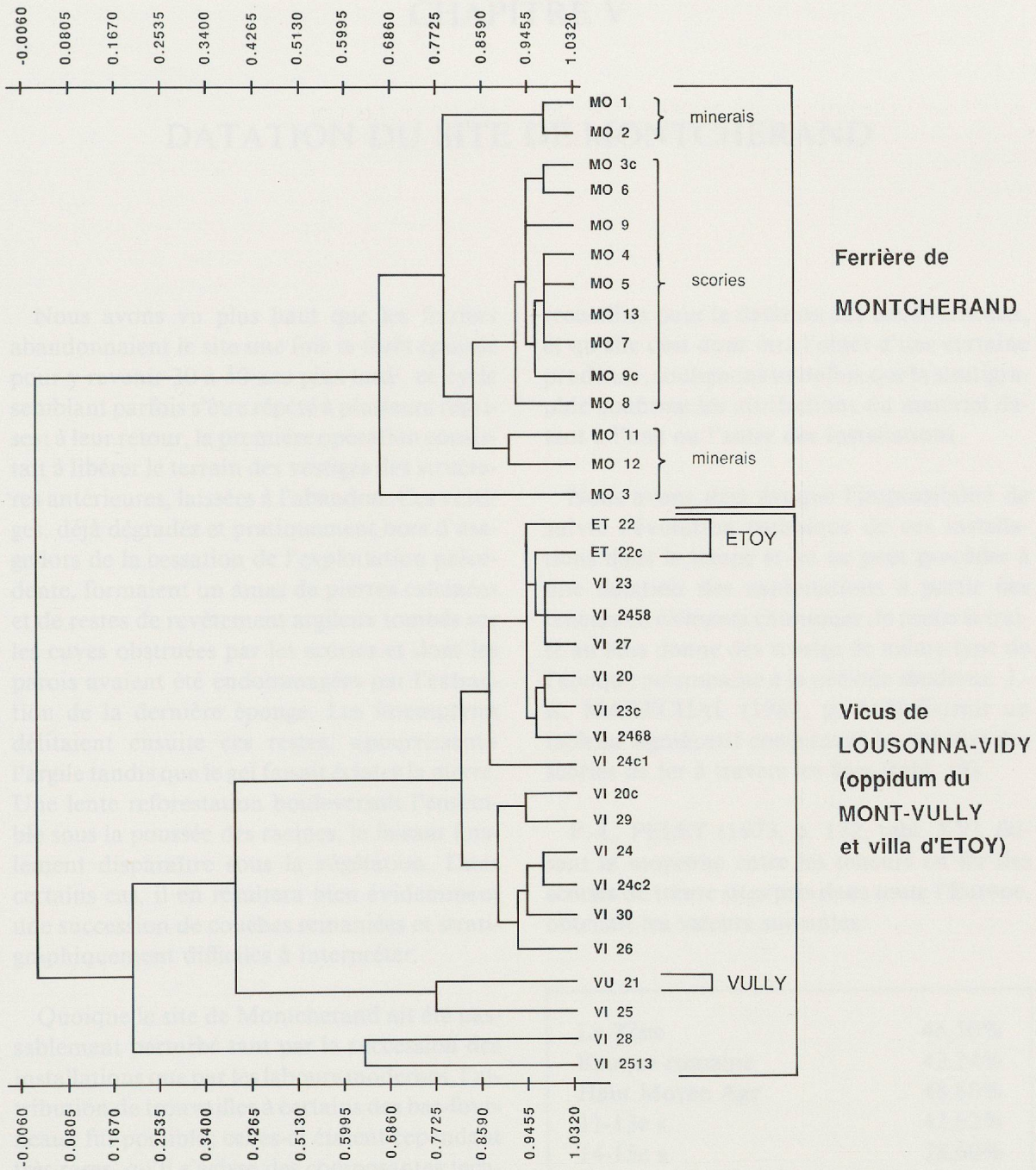



Fig. 44 Dendrogramme établi à partir des éléments traces dans les scories de Montcherand et de Lousonna-Vidy. Deux échantillons provenant d'Etoy et un du Mont-Vully sont aussi présents *(Centre d'Analyse Minérale).*

593) n'a malheureusement apporté aucune information sur d'éventuelles exportations des éponges de Montcherand, plaçant ce site dans un groupe qui comportait aussi la majorité des échantillons provenant de la région de Ferreyres par rapport auxquels il se distinguait par ses teneurs en MnO plus élevées.

Quatre autres groupes ont pu être formés avec le matériel provenant du territoire vaudois: un groupe comprenant le restant des scories trouvées dans le secteur de Ferreyres et d'autres de Cossonay: les ferrières correspondantes auraient approvisionné les vici d'Avenches et de Lausanne. Un deuxième groupe localisé uniquement sur le site d'utilisation de Lausanne. Un troisième groupe, dit du Lac de Neuchâtel, car représenté à Yverdon, Provence, Avenches (pour ce site, le 30% des échantillons analysés), au Mont-Vully (85%), mais aussi à Lausanne. Enfin un dernier groupe à Cuarnens, localité qui se serait trouvée à proximité d'un gisement.

# CHAPITRE V

# DATATION DU SITE DE MONTCHERAND

Nous avons vu plus haut que les ferriers abandonnaient le site une fois la forêt épuisée pour y revenir 30 à 50 ans plus tard[1], ce cycle semblant parfois s'être répété à plusieurs reprises; à leur retour, la première opération consistait à libérer le terrain des vestiges des structures antérieures, laissées à l'abandon. Ces vestiges, déjà dégradés et pratiquement hors d'usage lors de la cessation de l'exploitation précédente, formaient un amas de pierres calcinées et de restes de revêtement argileux tombés sur les cuves obstruées par les scories et dont les parois avaient été endommagées par l'extraction de la dernière éponge. Les intempéries délitaient ensuite ces restes, «pourrissant» l'argile tandis que le gel faisait éclater la pierre. Une lente reforestation bouleversait l'ensemble sous la poussée des racines, le faisant finalement disparaître sous la végétation. Dans certains cas, il en résultera bien évidemment une succession de couches remaniées et stratigraphiquement difficiles à interpréter.

Quoique le site de Montcherand ait été passablement perturbé tant par la succession des installations que par les labours modernes, l'attribution de trouvailles à certains des bas-fourneaux fut possible; celles-ci étaient cependant très rares, qu'il s'agisse des composantes techniques des installations ou des objets stricto sensu: fragments de tuyères ou de tuiles, trois tessons de céramique, quelques clous...[2] Il est dès lors évident que ce ne sont que des informations très fragmentaires qui pourraient être recueillies pour la datation des bas-fourneaux, et qu'elle doit donc être l'objet d'une certaine prudence; soulignons toutefois que la stratigraphie confirme les attributions du matériel datant à l'une ou l'autre des installations.

Nous avons déjà évoqué l'impossibilité de suivre l'évolution technique de ces installations dans le temps et on ne peut procéder à une datation des exploitations à partir des teneurs en éléments chimiques; le minerai traité au bois donne des scories de même type de l'époque préromaine à la période moderne. J.-R. MARECHAL (1982, p. 313) fournit un tableau significatif concernant les teneurs des scories de fer à travers les âges (tabl. 18).

P.-L. PELET (1973, p. 172, tabl. XV), faisant la moyenne entre les teneurs en fer des scories de trente sites pris dans toute l'Europe, obtenait les valeurs suivantes:

| | |
|---|---|
| La Tène | 46,50% |
| Epoque romaine | 42,24% |
| Haut Moyen Age | 48,60% |
| 11-13e s. | 42,62% |
| 14-15e s. | 28,60% |

| Scories | % Fe | % $SiO_2$ | % P |
|---|---|---|---|
| gallo-romaines | 39 à 50 | 16 à 28 | 0,29 à 0,83 |
| mérovingiennes | 49 à 52 | 17 à 21 | 0,63 à 0,85 |
| de 1000 à 1500 | 47 à 52 | 16 à 20 | 0,49 à 0,80 |

Tabl. 18 Teneurs chimiques des scories de diverses époques

[1] P.-L. PELET (lettre du 12 août 1989).

[2] Relevons le réemploi dans les parois d'une des cuves de gros blocs de serpentine, inattendus dans cette région, et qui semblaient avoir été dégrossis en préparation d'une opération de tournage.

Certes, en fonction de l'amélioration des procédés utilisés, le fer contenu dans les scories devrait diminuer; mais s'agissant là d'un progrès séculaire, il aurait difficilement pu trouver une confirmation dans les résultats des analyses de Montcherand qui ne présentent pas de différences marquées d'une structure à l'autre: l'évolution de la forme des bas-fourneaux de IV à I, l'apparition de tuyères pour III' et I ou le recours à des fondants pour les bas-fourneaux IIb et I, qui sont les plus récents, ne se reflètent pas dans les teneurs en fer, les échantillons ne provenant par ailleurs pas de tous les bas-fourneaux.

L'analyse des scories étant apparue impossible à exploiter à des fins de datation, ce sont des méthodes conventionnelles qui durent être employées: mais en raison de la nature même des sites sidérurgiques, les procédés traditionnels de datation, basés essentiellement sur l'examen de la céramique ou sur le recours à une typologie d'un autre ordre – celle des bas-fourneaux dans le cas présent – n'offraient que peu de possibilités.

Les trouvailles se limitaient à quelques tessons (fig. 45) appartenant à un récipient d'époque préhistorique (inv. 2735) à la pâte grossière, contenant de nombreux grains de dégraissant avec un cordon décoré d'une imperceptible ondulation imprimée au doigt, et à un vase en céramique décoré à la molette[3] apparement de facture burgonde (P. BOUFFARD, 1947, pl. 45.6 et 9, 46.1, et 47.1) qui remonterait à la période entre la fin du 5e et le 7e s.[4].

De la même façon, une chronologie reposant sur la variation de la forme des cuves se serait elle aussi avérée aléatoire: nous en voulons pour preuve les différences de résultats obtenues en comparant les datations par dendrochronologie des morceaux de charbon de bois, à celles du même bas-fourneau établies à partir de la typologie[5].

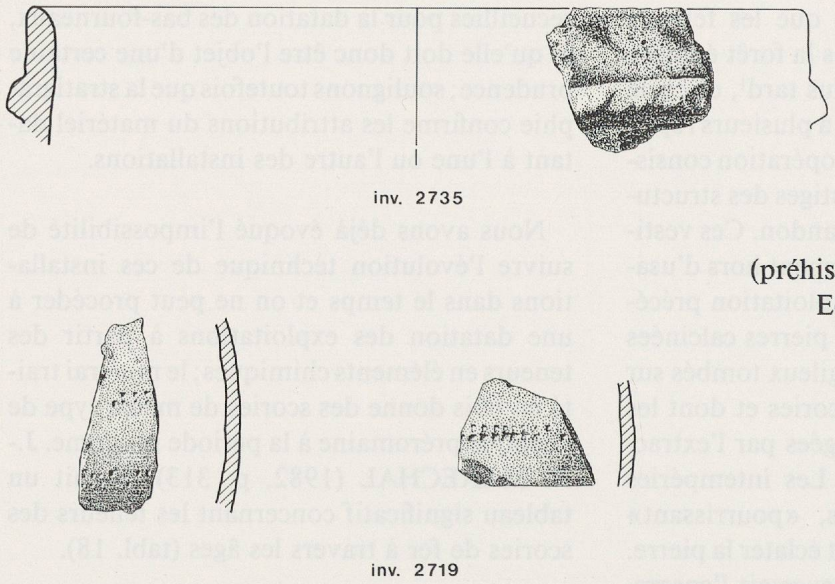



Fig. 45 Tessons n° 2735 (préhistorique) et 2719 (burgonde). Echelle 1:2 *(Dessin MHAVD).*

[3] Inv. 2719: trois fragments de panse d'un pot de forme haute, dont deux présentent un décor à la molette formant deux bandes de petits carrés superposés; les traces de tournage sont visibles. La pâte est fine et de couleur ocre-rose, le dégraissant en très faible quantité.

[4] Les parallèles proposés proviennent de Sévery et Saint-Sulpice (pl. 47.1); seul ce dernier site a été daté (A. DE MOLIN et J. GRUAZ, 1912, p. 25); H. SCHWAB (1987, p. 173) qui a repris l'étude des offrandes de cette nécropole, la situerait au plus tard à la fin du 6e s.

[5] Prenons par exemple le four XXII de Bossena I: alors que P.-L. PELET (1973, p. 208, tabl. XXVII) le faisait remonter aux années 400-450 à partir de considérations technologiques, l'analyse dendrochronologique (infra p. 89 et fig. 46) fixe vers 609/610 l'abattage du bois destiné au fonctionnement de l'installation. Deux fours de Bellaires – XI et XII –, dont le fond est de forme trapézoïdale (ibid. p. 130, fig. 63) donc identique au XXII ci-dessus, sont datés de la fin du 4e s. par le $C^{14}$ ($380 \pm 50$) ou du début du 5e s. par la stratigraphie... Bien entendu, une permanence de cette forme n'est pas à exclure: l'examen de l'ensemble des bas-fourneaux explorés par P.-L. PELET montre que c'est seulement à partir du 6e s. que l'on renonce peu à peu aux angles et aux côtés rectilignes dans le fond des cuves pour adopter des formes arrondies.

*1. La datation par le $C^{14}$*

Bien évidemment, même une datation par dosage du $C^{14}$ aurait présenté de grandes incertitudes du moment que le site avait été exploité à cheval sur deux époques – le Bas-Empire et le Haut Moyen Age – entre lesquelles il était important pour nous de procéder à une discrimination: dans certains cas une analyse de ce type s'est toutefois avérée être la seule possibilité.

Elle a ainsi été tentée sur deux échantillons provenant des bas-fourneaux II et IV par le *Centre de recherches géodynamiques de Thonon-les-Bains*[6]. Après les divers calibrages, les fourchettes obtenues étaient de 255 à 495 pour le bas-fourneau IV et de 570 à 760 pour le II, ce qui représenterait des dates moyennes de 375 et 665.

A des fins de comparaison, et malgré les réserves émises ici même sur les critères typologiques, nous avons utilisé les résultats obtenus par $C^{14}$ sur des bas-fourneaux de Bellaires qui auraient eu la même forme ou une disposition semblable.

Alors qu'à Montcherand le bas-fourneau I coudé ressemble au four II du groupe I-II de Bellaires I, les bas-fourneaux doubles II et V peuvent être assimilés aux fours doubles I-II et III-IV de ce dernier site, datés autour de 510 par le $C^{14}$ (P.-L. PELET, 1973, p. 208).

*2. L'examen dendrochronologique* (fig. 46)

Du charbon de bois a été prélevé aux abords immédiats des bas-fourneaux III', IV et V. Examinés au *Laboratoire romand de dendrochronologie à Moudon*[7], vingt-trois échantillons de chêne purent être rattachés à des courbes de référence d'Allemagne du sud: une datation fut possible pour les échantillons provenant des bas-fourneaux III' et V.

Une séquence d'une durée de 45 ans a pu être obtenue à partir de six échantillons. L'échantillon 11, qui provient du bas-fourneau V, permet de fixer un terminus postérieur à 603, les échantillons 5 et 3, trouvés à proximité du bas-fourneau III', qui comportent encore l'écorce, proviennent d'arbres abattus en automne/hiver 608/609 et 609/610: des réserves de bois pourraient avoir été entreposées d'une année à l'autre.

Des datations identiques furent obtenues sur des échantillons prélevés en 1967 par P.-L. PELET sur le site voisin de Bossena I: du bois destiné à son approvisionnement aurait été coupé autour de 609/610. Rien ne permet d'affirmer la préparation de grandes quantités de bois au cours d'une campagne d'abattage commune aux deux sites; ceux-ci ont très bien pu travailler en même temps, ou se succéder dans un très bref laps de temps.

Si l'âge des échantillons, au moins 26 ans à Montcherand, au moins 50 ans à Bossena, ne peut être mentionné qu'à titre documentaire, la présence de l'échantillon 2, vieux de plus de 80 ans, à proximité du bas-fourneau III', est intéressante quant à la gestion de la forêt voisine: les artisans auraient attendu durant de longues années qu'elle s'épaississe avant de procéder à l'abattage de bois qui, individuellement, avaient pourtant atteint depuis longtemps leur dimension optimale.

*3. L'étude archéomagnétique des bas-fourneaux*

Les propriétés ferromagnétiques des oxydes de fer présents dans les argiles d'un four contribuent à fixer les caractéristiques du champ magnétique terrestre au moment du traitement thermique; les variations ultérieures du champ magnétique restent pour la plupart sans conséquences. Dans la mesure où la structure est *in situ* lors de sa découverte, ce champ magnétique, caractérisé par sa déclinaison, son inclinaison et son intensité[8], pourra être comparé aux valeurs du champ terrestre actuel.

Ces grandeurs dépendront fortement de la latitude du site, l'intensité près des pôles a approximativement une valeur double de celle à proximité de l'équateur, tandis que le champ magnétique non-dipolaire, principalement dû aux hétérogénéités de la croûte terrestre et à des courants se produisant dans les parties liquides au coeur du globe terrestre, provoquera des variations pouvant aller jusqu'à 20%.

---

[6] Analyses n° 491 et 492.

[7] Rapport LRD 3/R 1228 du 19 décembre 1983.

[8] La déclinaison représente la différence entre les directions du nord magnétique et du nord géographique, l'inclinaison correspond à l'angle entre le plan horizontal et le champ magnétique; l'intensité se mesurera en Oersted ou en Ampères/mètre.

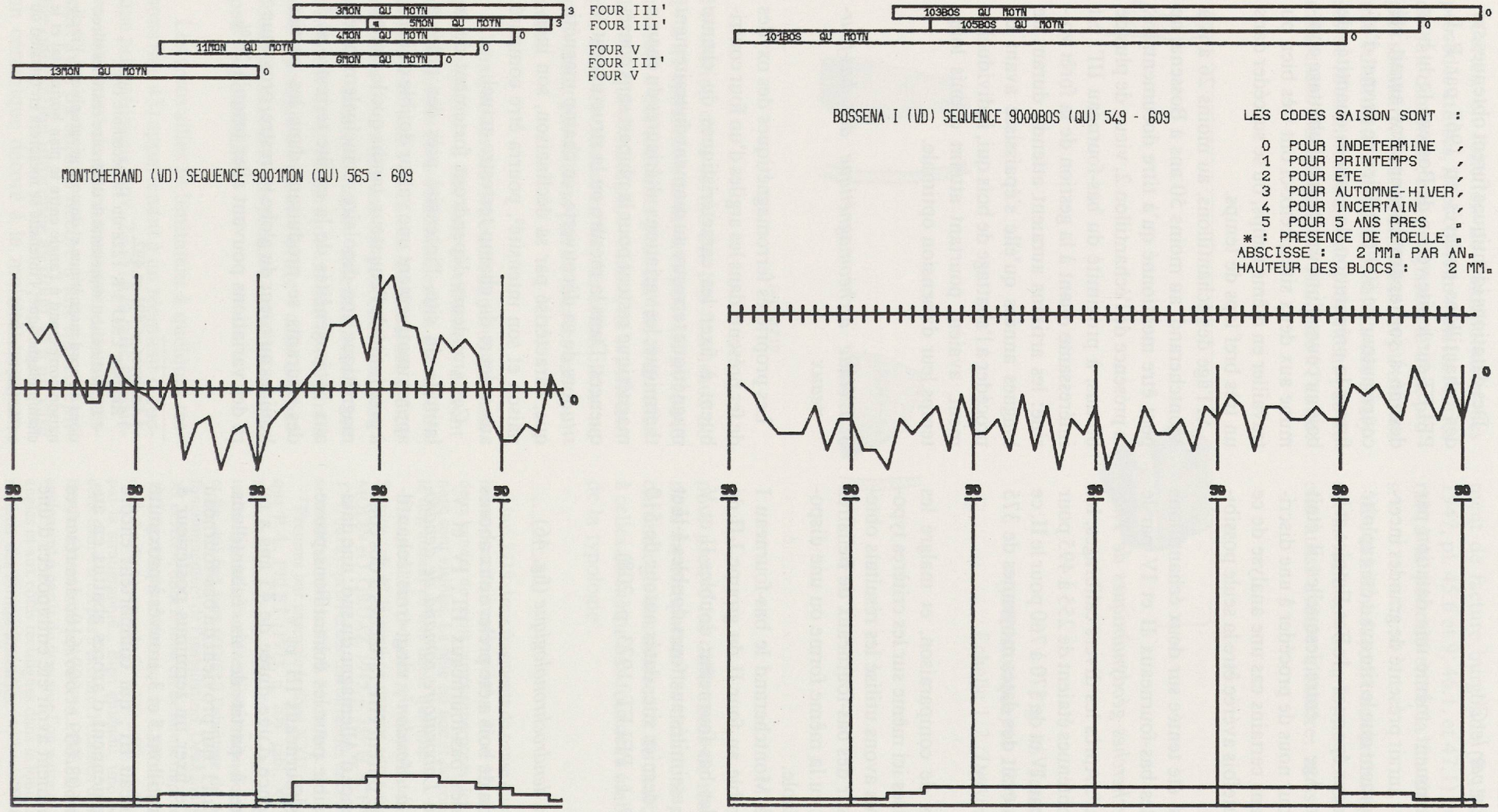



Fig. 46 Séquences dendrochronologiques de Bossena et Montcherand *(Laboratoire Romand de Dendrochronologie)*.
Les courbes reproduites ici, quoiqu'obtenues à partir d'objets de même datation, ne peuvent guère être comparées l'une à l'autre: c'est par rapport à l'ensemble de la courbe de référence qu'apparaîtra leur correspondance commune à une période déterminée.

Un telle mesure s'effectue par comparaison avec la courbe de variation de l'inclinaison magnétique établie par E. THELLIER (1981) valable pour Paris, et qui requiert une correction pour chaque degré de latitude de différence par rapport à la capitale française: cette courbe d'étalonnage ne pourra convenir que pour des sites qui en sont distants de moins de 700 kilomètres[9]: la composante dipolaire possédant un caractère régional est largement responsable de la variation séculaire.

Des prélèvements effectués dans le fond du bas-fourneau IV par Ian G. HEDLEY du *Laboratoire de Pétrophysique du Département de Minéralogie de l'Université de Genève* ont permis de procéder à des datations par mesure de la rémanence magnétique[10]. La date de 540 a été obtenue par comparaison avec la courbe étalon (fig. 47), dans le secteur il est vrai encore imparfaitement établi de celle-ci, entre les dates de 410 et 640.

A ce sujet, il convient toutefois de préciser que dans l'état actuel de la recherche, bien plus que de dater les structures, pour l'Antiquité l'objectif principal des recherches archéomagnétiques dans notre région est de compléter la courbe de référence existante: ceci se fait précisément à partir des structures in situ qui auraient été datées par d'autres procédés, les fonds de cuves de Montcherand représentant un élément de choix à cet effet.

## 4. *Succession des bas-fourneaux* (fig. 48)

La stratigraphie du site permet de proposer la succession suivante pour les diverses installations; le bas-fourneau IV est recouvert en partie par la destruction du III, elle-même placée sous les bas-fourneaux V: ce dernier ensemble, formé de trois structures, aurait connu une phase initiale d'utilisation des bas-fourneaux jumelés Vb-Vc (supra pp. 27-29), puis un démantèlement de ceux-ci en correspondance avec l'activation de Va qui chevauche Vb. Des niveaux charbonneux correspondant à une seconde phase d'utilisation de III sont pris dans l'argile du bas-fourneau IIb contemporain de IIa, son jumeau: aucune donnée stratigraphique ne permet par contre de situer les ensembles V et II l'un par rapport à l'autre. Placé au haut du talus, le bas-fourneau I semble bien être le dernier de cette série.

### 4.1. *Chronologie des bas-fourneaux de Montcherand*

Le bas-fourneau IV succède à des structures qu'attestent les niveaux cendreux formant les couches de fond du site ainsi que l'utilisation de scories pour sa construction; la datation par le $C^{14}$ indique qu'il pourrait avoir fonctionné déjà au cours du 5e s., l'épaisseur des couches de remblais le recouvrant est pourtant assez proche de celles entre les installations qui se sont ensuite succédées à une cadence très rapprochée les unes des autres et la datation par mesure de l'archéomagnétisme le placerait en 540...

| Bas-fourneau | IV | III' | V | II | I |
|---|---|---|---|---|---|
| Stratigraphie | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Dendrochronologie | | 609 | 609 | | |
| Datation $C^{14}$ | 255 – 495 | | | 570 – 760 | |
| Céramique | | | | | 450 – 700 |
| Archéomagnétisme | 410 – 640 | | | | |
| Typologie[1] | | | 410 – 610 | 410 – 610 | 410 – 610 |

Tabl. 19 Datations du site de Montcherand

[1] Datation obtenue par le $C^{14}$ sur des bas-fourneaux de Bellaires de forme semblable (supra p. 89).

**Commentaire**: l'examen de ce tableau ne révèle aucune contradiction: les dates obtenues respectent la chronologie établie à partir de la stratigraphie, tandis que le degré de précision des techniques utilisées donne lieu bien sûr à des chevauchements. Alors qu'elles ne peuvent être mises en rapport avec le trésor monétaire de plus de 1200 pièces signalé à Montcherand en 1855 (G. DE BONSTETTEN, 1874, p. 29)[11], de telles dates situent cette exploitation vers la fin de la domination burgonde.

[9] Un exemple complet de l'application de cette démarche est donné par I.G. HEDLEY et alii. (1983).

[10] Des prélèvements avaient aussi été effectués sur deux autres bas-fourneaux: mais, alors que deux échantillons étaient insuffisants pour le bas-fourneau II, ceux de III-III' ont produit des directions du champ magnétique divergentes qu'il n'a pas été possible d'exploiter.

[11] Ces monnaies, placées dans un récipient de bronze, auraient été découvertes dans le bois de Châtillon, elles allaient du règne d'Alexandre Sévère (222 à 235) à celui de l'empereur Aurélien (270 à 275).

Après plusieurs décennies d'inactivité le site est réoccupé au début du 7e s., lorsque le bas-fourneau III est construit presqu'au même endroit: pour des raisons inconnues – usure normale ou mauvaise facture – une première cuve sera remplacée par le bas-fourneau III', qui semble par contre avoir durablement fonctionné vers 610; les mêmes artisans – le bois de la même coupe continue d'être utilisé – auraient alors remplacé III' par le groupe Vb-Vc: la présence de cette structure double laisse conclure à une opération plus élaborée qui fait intervenir deux foyers placés côte à côte; le progrès technique est corroboré par les fragments de tuyères découverts à proximité de III'; l'installation Vb-Vc – la faible scorification de Vc laisserait entendre un fonctionnement optimal –, sera remplacée par Va qui a été démantelé après avoir produit de fortes scories, ce qui pourrait indiquer un mauvais fonctionnement.

Présentant la même structure double que Vb-Vc, les bas-fourneaux IIa-IIb, eux aussi postérieurs à III' et que le datation par le $C^{14}$ situe autour de 675, pourraient leur avoir succédé, sans que nous excluions une utilisation contemporaine des deux ensembles jumelés.

Le bas-fourneau I est le plus récent de l'ensemble: comme pour IIb, des fondants ont servi à améliorer son fonctionnement, on y a retrouvé les tessons haut-médiévaux ainsi qu'un fragment de tuyère; il présente les plus fortes dimensions, sa porte est munie de montants; limitant l'ensemble sidérurgique vers l'ouest – direction dans laquelle se sont progressivement déplacées les structures – il est implanté dans la vidange des installations antérieures, ce qui confirme son appartenance à la dernière phase d'utilisation du site.

Une exploitation sans solution de continuité allant du bas-fourneau III au groupe IIa-IIb peut être suggérée pour le 1er quart du 7e s. Cette proposition s'appuie sur des considérations stratigraphiques (du bas-fourneau III au groupe Vb-Vc) et typologiques (bas-fourneaux Vb-Vc et IIa-IIb), elle est confirmée par l'absence de remblais de forte épaisseur entre les diverses structures[12].

Lorsqu'on les compare aux structures du Jura vaudois publiées par P.-L. PELET (1973), les bas-fourneaux mis au jour à Montcherand permettent quelques considérations sur leur évolution (fig. 49). La forme du bas-fourneau IV de Montcherand, daté de la fin du 4e s. par le $C^{14}$, est très proche de celle du four XII de Bellaires, placé au début du 5e s. (P.-L. PELET, 1973, p. 208); le four III' de Montcherand, qui remonte à 609, s'apparenterait au four XXII de Bossena (ibid. p. 105, fig. 53) attribué à la première moitié du 5e s. (ibid. p. 208); l'étape suivante est représentée par le bas-fourneau I, dernier du site, daté par la céramique burgonde: sa forme est proche de celle du four II de Bellaires I (ibid. p. 91, fig. 43) attribué au début du 6e s. L'évolution technologique se fait donc de la même manière à Montcherand que dans la région de Ferreyres, mais semble avoir quelques décennies de retard: celui-ci pourrait s'expliquer par le maintien d'une technique archaïque, mais on peut aussi suggérer l'évolution des méthodes de datation, si l'on songe que la date de 609 obtenue par dendrochronologie est aussi valable pour Bossena...

La présence de formes burgondes dans la région, comme en témoigne le four XIV de Bellaires, petit et rond (ibid. p. 56, fig. 19b), est bel et bien exceptionnelle: les ferriers sont d'ailleurs revenus aux formes gallo-romaines qu'ils avaient développées siècle après siècle; ce maintien des techniques locales ne doit pas surprendre si l'on songe que les travaux récents tendent à démontrer que l'importance des implantations burgondes fut bien plus faible que ne le laisse entendre la tradition[13].

### *5. Historique*

Un dernier point nous tenait à coeur, rattacher les éléments que nous avions décrits à une période précise de l'histoire de notre région: tandis que les installations mises au jour par P.-L. PELET dans les environs immédiats se succèdent de la période de La Tène au Haut Moyen Age, à Montcherand, à l'exception du trésor monétaire remontant à l'époque romaine et de quelques trouvailles de pièces isolées, aucun témoignage archéologique n'atteste une présence antérieure au Moyen Age[14]: si l'on

[12] Les bas-fourneaux étant implantés dans des niveaux sablo-graveleux, les couches séparant les diverses structures seront il est vrai moins épaisses que dans le cas d'exploitation dans une zone de forte végétation.

[13] W. DRACK et R. FELLMANN (1988, p. 298).

[14] M. KLAUSENER nous a signalé la découverte de tessons préhistoriques dans la gravière des *Planches Neuves* immédiatement à l'ouest de la localité.

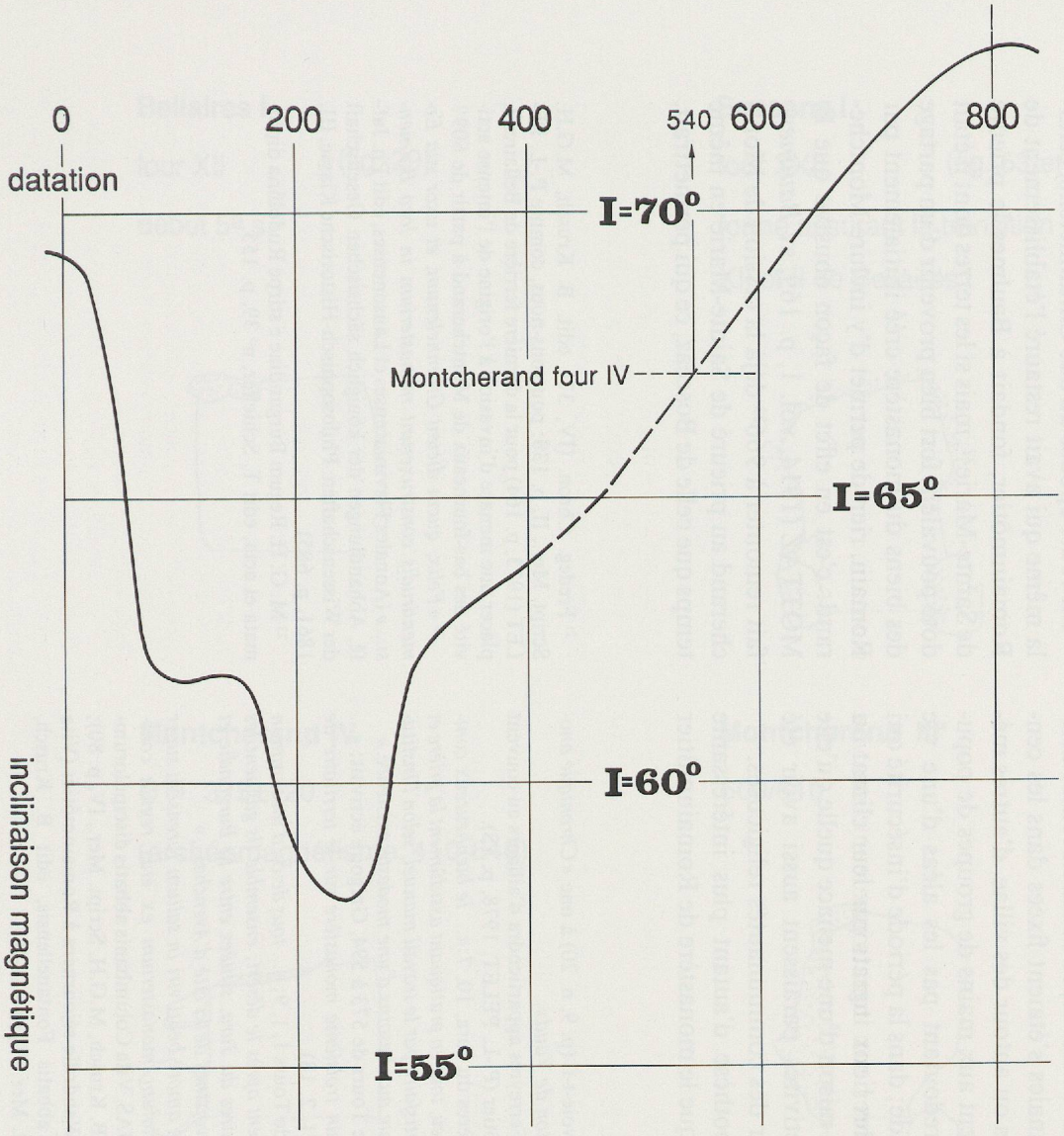



Fig. 47 Extrait de la courbe de Thellier I=f(t) pour les années 0 à 800. Tiré de E. THELLIER (1981, fig. 8, p.111).

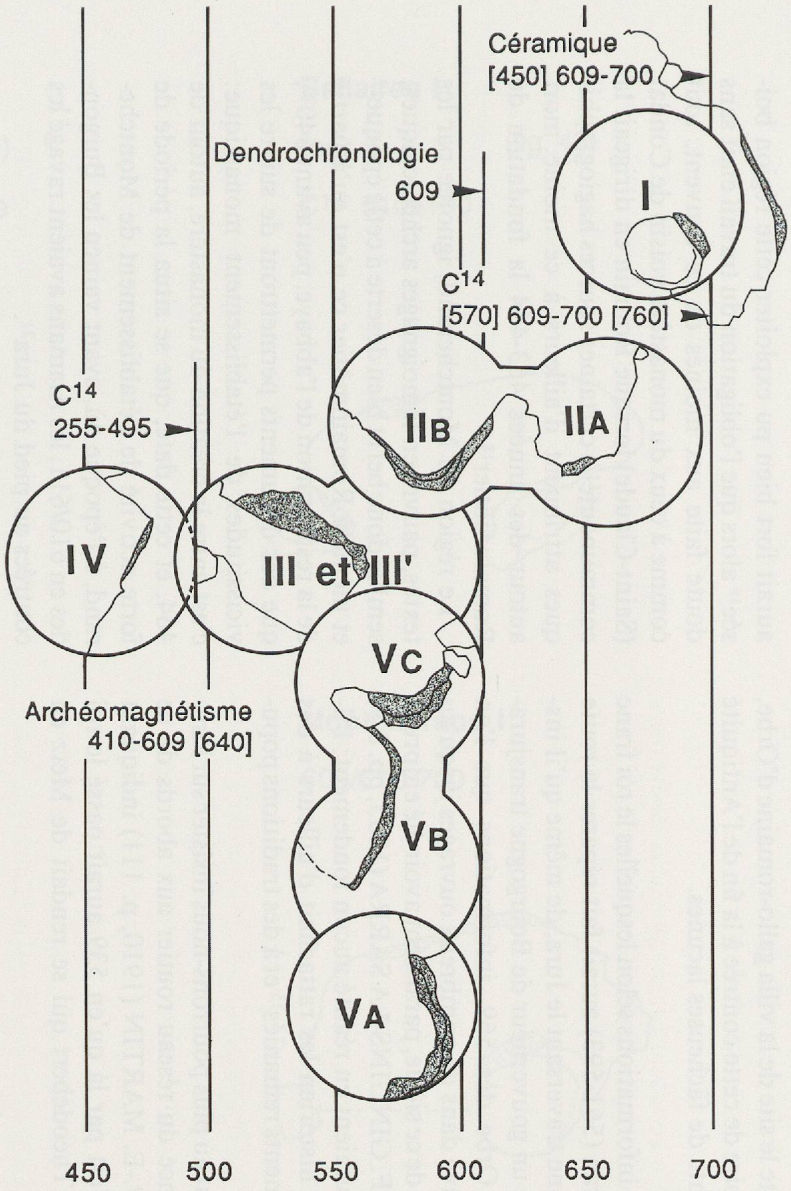



Fig. 48 Représentation schématique de la succession chronologique des bas-fourneaux *(Dessin IAHA)*.

excepte le site de la villa gallo-romaine d'Orbe, l'histoire de cette contrée à la fin de l'Antiquité présente de fâcheuses lacunes.

Les informations selon lesquelles le roi franc Gontran (561-593) aurait fait réparer la route romaine traversant le Jura, de même qu'il installait un gouverneur de Bourgogne transjurane à Orbe dès 569, informations que l'on retrouve dans de nombreux ouvrages jusqu'au début de ce siècle, paraissent avoir été empruntées à F. GINGINS-LA SARRA (1855, pp. 8-9) et n'auraient en réalité aucun fondement: l'illustre historien les rattachait d'ailleurs à des documents remaniés[15] et à des traditions populaires.

Tout au plus pourrons-nous insister sur l'importance du réseau routier aux abords de ce site, P.-E. MARTIN (1910, p. 111) indiquant que c'est par là qu'en 539 aurait passé le roi franc Théodebert qui se rendait de Metz en Italie.

A l'époque romaine, si de nombreuses activités artisanales s'étaient fixées dans les centres urbains ou autour des villae, d'autres métiers restèrent aux mains de groupes de population ne redoutant pas les aléas d'une vie semi-nomade; dans la période d'insécurité qui suivit, en des lieux ingrats par leur climat ou désertés en raison d'une menace quelle qu'elle fût, ces activités paraissent aussi avoir été reprises par des communautés religieuses.

Une hypothèse d'autant plus intéressante pour nous que le monastère de Romainmôtier aurait fort bien pu exploiter cette région boisée[16] alors que l'obligation du travail était sans doute faite aux moines de ce couvent, tout comme à ceux du monastère voisin de Condat (Saint-Claude) lorsque Romain en dirigeait la communauté[17]; certaines sources hagiographiques attribuent d'ailleurs à ce moine mort autour des années 463-464 la fondation de Romainmôtier[18].

Le région de Montcherand, ignorée par les textes, pauvre en témoignages archéologiques, semble donc bel et bien déserte à cette époque[19] et même à Romainmôtier ce n'est qu'à partir de la restauration de l'abbaye, peu avant 640[20], que des documents permettront de suivre les vicissitudes de l'établissement monastique: c'est entre la création du monastère, autour de 464, et cette date, que se situa la période de forte activité de l'établissement de Montcherand, à l'époque où, ayant vaincu les Burgondes en 610/611, les Alamans avaient ravagé les contrées au pied du Jura[21].

En 652, l'épouse du duc Chramnelène, celui-là même qui avait restauré l'établissement de Romainmôtier, fondait à Baulmes le prieuré de Sainte-Marie[22], mais si les terres dont il était doté pouvaient fort bien provenir d'un partage des biens du monastère créé initialement par Romain, rien de permet d'y inclure Montcherand: c'est en effet de façon abusive que E. MOTTAZ (1914, vol. 1, p. 169, sv *Baulmes*), fait remonter à 966[23] déjà la cession de Montcherand au prieuré de Sainte-Marie en même temps que celle de Boscéaz, ce qui permettrait,

---

[15] Ainsi renvoie-t-il (p. 9, n. 20) à une *«Chronique anonyme du Canton de Vaud»*.

[16] En 1049 Ferreyres appartiendra d'ailleurs au couvent de Romainmôtier (P.-L. PELET, 1978, p. 18).

[17] Vie des pères du Jura, 10, 7:*«... le bienheureux commença en ce lieu, tout en pratiquant assidûment la prière et la lecture, à satisfaire par le travail manuel, selon l'institution monastique aux besoins d'une modeste existence.»*

[18] Evêque de Tours de 573 à 594, Grégoire écrivait: *«... ils établirent un troisième monastère sur le territoire de l'Alémanie.»* (1, 2, 18).

[19] Grégoire de Tours 1, 1, 9: *«... tous deux, d'un commun accord, soupirent après le désert; ensemble ils gagnent les retraites solitaires du Jura, situées entre la Burgondie et l'Alémanie et voisines de la cité d'Avenches...»*

[20] *«... ipse in amore beati viri in saltum Iorensem super Novisona fluviolum monasterium ex eius regula construxit...»* (IONAS, Vita Columbanis abbatis discipulorumque eius, edit B. Krusch, M.G.H. Script. Mer., IV, p. 80); en 636, saint Wandrille séjournera à Romainmôtier (Vita Wandregiseli abbatis Fontanellensis, edit B. Krusch, M.G.H. Script. Mer., V, pp. 14-18).

[21] Fredeg. Chron. (IV, 37), edit. B. Krusch, M.G.H. Script. Mer., II, p. 138: pourrons-nous, comme P.-L. PELET (1973, p. 164) pour la dernière ferrière de Bellaires I, placer une menace d'invasion à l'origine de l'intense activité des bas-fourneaux de Montcherand à partir de 609?

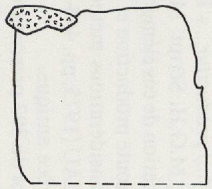
[22] *«Felix, quem dicunt Gramnelenum, et uxor sua Ermendrudis construxerunt monasterium in loco Balmensi...»* (Annales Flaviniacenses et Lausonenses, edit Ph. Jaffé, Abhandlungen der königlich sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften. Philosophisch-Historische Klasse, III, 1861, p. 685).

[23] M. G. H. Regum Burgundiae e stirpe Rudolfina diplomata et acta, edit T. Schieffer, nº 39, p. 155.

**Bellaires I**

four XII (fig. 29)

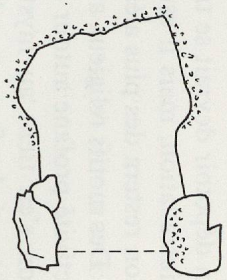
début 5e s.



**Bossena I**

four XXII (fig. 53 et 55b)

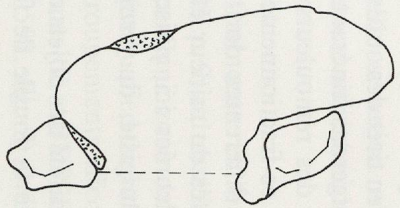
forme assurant la transition entre XII et II de Bellaires I



**Bellaires I**

four II (fig. 43)

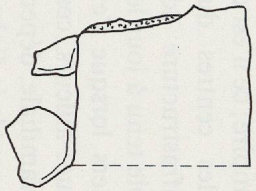
$C^{14}$ 510±100

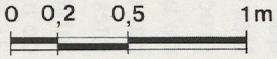


**Montcherand IV**

$C^{14}$ 375±120

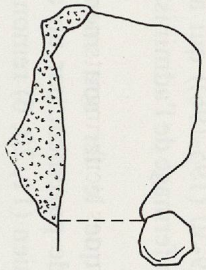
(archéomagnétisme 410-640)






**Montcherand III'**

609/610



**Montcherand I**

609/610-700

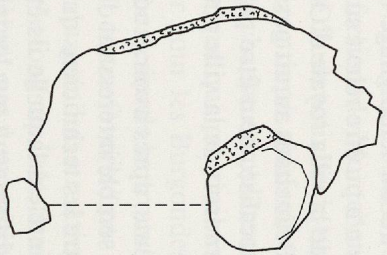


Fig. 49 Evolution de la forme des bas-fourneaux au pied du Jura vaudois, région de Ferreyres (P.-L. PELET, 1973) et Montcherand *(Dessin IAHA)*.

qui sait, de mettre l'établissement sidérurgique en rapport avec la villa gallo-romaine. Il est important d'insister sur le fait qu'après 259/260 aucun témoignage d'une occupation continue n'a pu être relevé sur ce site: l'emplacement de la villa royale d'Orbe[24] par laquelle la reine Brunehaut aurait passé en 613/614 n'a pas été localisé, peut-être parce qu'il se trouvait à l'endroit de la ville actuelle.

De même, après avoir étudié les matériaux, il nous a semblé intéressant de préciser les rapports entre les techniciens qui les ont produits et la clientèle à laquelle ils étaient destinés[25].

La tradition veut que les industries minières aient été exploitées par des artisans seminomades évoluant dans un territoire défini par la vitesse de reboisement des forêts; par leur taille artisanale, les exploitations du Jura vaudois ont sans doute échappé au contrôle étatique, limité aux grandes exploitations qui rassemblaient un vaste personnel autour des nombreux bas-fourneaux indispensables à un gisement de grandes dimensions; dans ce cas il se serait agi d'entreprises (A. GRENIER, 1934, p. 992 et W. SCHMID, 1932, pp. 25-27 (191-193) et pp. 29-30 (195-196)) qui avaient reçu ces mines en fermage de l'administration impériale.

Bien que le fer soit mentionné comme moyen de payement par un article du Code Théodosien (11, 20, 6) remontant à 430, rien ne permet de juger de l'importance des ferrières par rapport aux sites voués à l'extraction d'autres minéraux, comme les carrières: l'exploitation de celles-ci aurait été entièrement libre au début de l'Empire (R. BEDON, 1984, p. 175), l'accord préalable du propriétaire de la parcelle n'étant attesté qu'à partir du règne de Sévère Alexandre (DIG. 8, 4, 13)[26].

Peu de données nous permettent de restituer le statut juridique de ces établissements ainsi que leur fiscalité, surtout dans les régions isolées de l'Empire; ce n'est que dans les endroits proches des centres du pouvoir impérial qu'une infrastructure administrative aurait par exemple tenu à jour le recensement de ces sites miniers lorsque l'exploitation en était interrompue: ailleurs, ces activités, peut-être de nature familiale, dépendaient des villae ou de communautés indigènes.

Le traitement thermique initial, effectué à proximité du lieu d'extraction, aurait été le fait de mineurs et de ferriers produisant de grandes quantités d'éponges de première fusion; elles auraient ensuite été vendues à des forgerons dont la dextérité, devenue légendaire, permettait d'en tirer des outils et des armes, peut-être des forgerons itinérants qui se déplaçaient à la façon des rémouleurs actuels et autres vanniers; ce fractionnement du travail en opérations différentes doit nous rappeler que les activités du mineur et du forgeron n'ont été qu'effleurées ici, puisque c'est du travail du métallurgiste, du *ferrier,* dont il a été question.

La rareté des objets domestiques découverts lors de la fouille de ferrières rend d'ailleurs cette appréciation plus complexe. J.-M. COUDERC et P. AUDIN (1987, p. 243) ont constaté à plusieurs reprises que les fours sont à l'écart de l'enceinte dans laquelle les familles des artisans plaçaient leur bétail et leurs enfants pour les protéger des bêtes féroces; il est aussi envisageable que les ferriers n'aient exercé leur activité que durant quelques mois, vivant le reste de l'année dans un établissement des environs: dans une telle éventualité, à défaut des traces d'une construction légère, un dépotoir devrait se trouver à proximité de l'installation, mais il est vrai que sa localisation restera des plus aléatoires.

Des motifs religieux auraient-ils exclu toute activité profane autour du four lui-même? Si l'on s'en tient au mystère dont se seraient entourés les forgerons d'après de nombreuses légendes médiévales, l'absence d'une infrastructure durablement implantée n'aurait dans ce cas rien d'étonnant: le fait que la sidérurgie ait pu être assimilée à une pratique magique[27] ne devrait pas nous surprendre non plus, et ceci

---

[24] *«Factionem Warnachariae maioris domus cum reliquis maxime tutis procerebus de regnum Burgundiae Brunechildis ab Erpone comestaboli de pago Ultraiorano ex villa Orba (...) producitur...»* Fredeg. Chron. (IV, 42), edit B. Krusch, M.G.H. Script. Mer., II, p. 141.

[25] L'évocation de ces éléments est un passage obligé pour l'étude de toute production et leur approche donnera lieu à diverses considérations méthodologiques. Voir à ce sujet P. BRUNEAU (1975, pp. 444-456) qui aborde ce problème pour la Grèce antique.

[26] Une loi de 393 prescrit que, moyennant dédommagement, des veines de marbre de très bonne qualité pourront être exploitées au péril des constructions voisines (COD. Theod. 10, 19, 14).

[27] *«... ces forges mystérieuses de l'antiquité, lorsque les druides cachaient leur art sidérurgique dont les produits étaient primitivement précieux?»* (A. QUIQUEREZ, 1866, p. 19).

même au début du Christianisme; difficile à comprendre à notre époque, où ces techniques ne paraissent accessibles que par le recours à des procédés régis par de complexes équations mathématiques, une telle situation n'aurait rien eu d'étonnant dans une société où la divinité était omniprésente.

Les nombreux bas-fourneaux et ferrières dont P.-L. PELET (1973, p. 9) a dressé la carte démontrent la présence d'une zone de haute production métallurgique au pied du Jura vaudois tandis que les regroupements effectués à l'aide des dendrogrammes (E. ABETEL et V. SERNEELS, 1991, p. 592, fig. 3) indiquent qu'à l'époque romaine ces centres de production semblent avoir répondu aux besoins des localités situées dans un rayon relativement étendu autour d'eux: malgré cela, il est impossible de placer la ferrière de Montcherand dans le cadre plus large d'une activité de type industriel qui aurait regroupé plusieurs exploitations: ainsi nous échappe complètement l'importance économique que pourrait avoir eu le commerce du fer pour les Burgondes dans la sphère d'influence desquels se trouvait le site de Montcherand, certes favorisé par la proximité immédiate du grand axe routier remontant vers le nord le long du Jura, mais que les Alamans ne tardèrent pas à menacer.

# CONCLUSIONS

Peut-être à la lecture de ces lignes l'archéologue aura-t-il eu l'impression que la matière lui échappait peu à peu: est-ce à dire que nous avons voulu remettre en cause l'acquis de nos prédécesseurs? L'objectif que nous nous étions fixé était de n'être affirmatif que sur des réalités archéologiques tangibles ou des éléments dûment vérifiés par l'expérimentation, reléguant le reste au rôle d'hypothèses de travail: trop d'interprétations avaient été données jusqu'ici à partir de fort peu d'informations; seule aurait dû être utilisée la documentation de base représentée par les témoignages archéologiques confirmés, en renonçant à toute proposition n'offrant pas les garanties matérielles les plus solides.

Or, encore trop de points restent obscurs dans le lent processus de la préparation du fer; non tant parce que les témoignages littéraires nous manquent, mais surtout parce que cette technique, dont la mise en oeuvre empirique donnait des résultats fort variables[1], était autodestructrice: non seulement les métallurgistes auraient travaillé en secret[2], mais souvent ils devaient détruire leurs installations pour en extraire le produit[3].

Un produit dont les témoignages font d'ailleurs cruellement défaut: comme toute matière première les lingots ont été transformés en outils et jusqu'à un passé récent les éponges et les loupes qui n'auraient pas été utilisées ont été négligées par des archéologues encore peu sensibles aux études technologiques.

Ces démarches étaient intimement liées à l'habileté du ferrier qui, s'il savait estimer les températures à la couleur du métal traité, n'avait par contre que peu de possibilités de contrôle de sa composition: ainsi de nombreuses impuretés pouvaient modifier considérablement ce processus; dans la mesure où des fondants étaient utilisés, leur emploi dépendait de l'aptitude de l'artisan à doser ces additifs en fonction de la nature du minerai[4].

Comme le confirme la présence de nombreux tableaux de valeurs numériques dans ce travail, la science de laboratoire s'avère être l'instrument indispensable à l'étude du matériel archéologique, même si elle n'exclut pas le recours aux méthodes classiques, telles l'approche céramologique qui par un simple tesson nous donnait une fourchette à l'intérieur de laquelle se trouvent bel et bien les dates proposées à partir des résultats obtenus en laboratoire. Mais si la collaboration interdisciplinaire est chose acquise à l'époque où les archéologues maîtrisent peu à peu les procédés techniques les plus sophistiqués, paradoxalement il importe de relever que la compréhension des techniques appliquées dans l'Antiquité reste encore le souci d'une minorité: parce que les difficultés sont nombreuses, et qu'en conséquence on renonce à les affronter[5], ou parce que les résultats sont loin d'être spectaculaires.

Que reste-t-il dès lors que nous puissions proposer à l'avenir? Deux directions de recherche seront avantageusement exploitées: tout d'abord par la poursuite de l'analyse systématique des produits antiques de l'opération métallurgique, ensuite par leur comparaison avec ceux obtenus au cours d'opérations sidérurgi-

---

[1] *«L'examen de l'ancienne sidérurgie du Jura prouve d'une manière irrécusable la disparité des produits des fourneaux d'alors. Le même établissement, ou ceux semblables, fournissait du fer offrant les divers degrés qu'on ne produit actuellement que par des procédés différents et par la division du travail (...). Tantôt c'est de la fonte de fer fort dure, tantôt du fer aciéré, mais celui-ci n'est pas de qualité égale; il est mou et malléable dans certains cas, et d'autre fois aciéreux et cassant.»* (A. QUIQUEREZ, 1866, p. 46)

[2] A. GRENIER (1934, p. 992) ne reprenait-il pas à son tour l'allusion de A. QUIQUEREZ (1866, p. 19) à une corporation fermée, d'origine druidique et aux arts magiques?

[3] La mise en place successive de lourds montants de part et d'autre de la porte est sans doute destinée à assurer une plus grande longévité à l'ensemble: mais une fois abandonnée, l'installation se dégradera bien vite en raison des intempéries.

[4] En raison du degré d'imprécision de ces divers facteurs, que devaient sensiblement augmenter leurs interférences réciproques, même les programmes d'analyses les plus performants détermineront difficilement les constantes pouvant caractériser les résultats obtenus: seule l'analyse répétée de nombreux échantillons permettra de se faire une idée d'une production donnée.

[5] Mais pouvions-nous en tenir grief à nos prédécesseurs qui, plus que des archéologues de formation, à l'origine étaient bien souvent des philologues? P.-L. PELET (1981, p. 36) parle à juste titre du passage *«De l'antiquaire à l'archéologue»*.

ques expérimentales, réalisées dans les conditions les plus proches possibles de celles de l'Antiquité.

Les études que V. SERNEELS entreprend sur le marché du fer dans notre région grâce à l'appui du Fonds National Suisse de la Recherche Scientifique seront d'un apport essentiel pour l'histoire du fer dans l'Antiquité: l'homogénéité qui caractérisait les scories de Montcherand mise en évidence par le procédé de l'analyse multivariée ayant pu être relevée pour divers ensembles, ceci permettra d'étendre cette démarche au matériel trouvé sur d'autres sites: le but d'une telle étude sera de rattacher aux lieux d'extraction les diverses localités, en comparant les compositions chimiques des scories qui y ont été trouvées à celles résultant du premier traitement du fer; tandis que des sites sidérurgiques qui offraient un meilleur état de conservation et un matériel plus nombreux avaient déjà fait l'objet de publications complètes, à Montcherand s'est présenté l'opportunité de proposer une démarche plus générale sur la métallurgie du fer dans le canton de Vaud et les régions immédiatement voisines, qui sera axée sur une analyse comparative des produits des diverses exploitations.

En prolongeant les travaux de J.W. GILLES (1958) en Allemagne, et en parallèle avec les recherches de G. SPERL (1986) en Autriche, P. ANDRIEUX (1990) a procédé à la répétition systématiques de l'opération de traitement du minerai de fer à partir de bas-fourneaux reconstitués; il a rassemblé un important matériel - scories, mais aussi valeurs numériques de différentes natures - qui permettra des comparaisons fondamentales avec le matériau provenant des exploitations antiques, mais aussi avec les reconstitutions semblables réalisées en Suisse sur la base de ses expériences: après les démonstrations faites à Schaffhouse en 1985 par la *Corporation Saint-Eloi*[6], des essais de ce type sont en effet en cours actuellement sous l'égide du *Musée du Fer* de Vallorbe.

Nous espérons avoir montré aux archéologues combien est variée l'étude des techniques: l'évolution de leur sensibilité ne peut que s'y prêter puisque depuis plusieurs décennies, en renonçant à une conception esthétique de l'archéologie qui privilégiait les monuments ou les objets d'art, ils ont appris à prélever les vestiges les plus divers mais aussi les plus humbles, comme par exemple les scories... L'étude des établissements sidérurgiques n'en sera que plus passionnante, puisque seules des reconstitutions, mais cette fois-ci en grandeur nature et non plus sous forme de dessins ou de maquettes, leur permettront vraiment d'appréhender les techniques antiques.

Notre travail, faisant suite aux articles écrits en collaboration avec V. SERNEELS, représente la reprise d'une longue tradition romande dans l'histoire de la métallurgie antique. Il se place à la charnière entre le célèbre *Fer, charbon, acier dans le pays de Vaud. Les sources archéologiques* de P.-L. PELET, et l'application, aux découvertes de ce chercheur, d'études en laboratoire encore mal assurées au moment où paraissait sa fondamentale monographie.

Mais il est vrai que notre étude aura aussi été à l'origine de quelques découvertes, ou parfois simplement de mises au point, qui permettront d'exploiter de nouvelles directions de recherche: qu'il s'agisse

- de la publication d'une campagne de fouilles qui coordonnait l'intervention de chercheurs aux spécialisations les plus diverses,
- de la description de bas-fourneaux placés dans un ordre chronologique et qu'il a été possible de comparer à des structures déjà existantes,
- de la confirmation de l'évolution des techniques sidérurgiques antiques déjà constatée pour le Jura vaudois,
- de la découverte du recours à des fondants au cours de l'opération sidérurgique,
- de l'établissement d'un programme d'analyses minéralogiques qui conduira à une étude des marchés antiques du fer,
- enfin, de la mise en rapport la plus précise possible de ces données avec une période encore obscure de l'histoire de notre canton.

Eu égard à ces quelques éléments, nous avons bon espoir d'avoir contribué à une meilleure connaissance des sources de la sidérurgie vaudoise.

[6] H.-P. BRITT (1986, p. 35) précise bien que ces essais n'avaient aucune finalité scientifique, le recours à une ventilation mécanisée et l'emploi de briques réfractaires pour la construction des cuves modifiant sensiblement les conditions de travail d'origine. Il est intéressant de signaler la production de fer forgeable.

# BIBLIOGRAPHIE

*Abréviations*

Sauf indication, les abréviations utilisées sont celles figurant dans la dernière édition des *Résumés d'archéologie suisse. Epoque romaine,* 1982 sqq.

**Archäologische Eisenforschung** *Archäologische Eisenforschung in Europa,* Eisenstadt, 1977 (Wissenschaftliche Arbeiten aus dem Burgenland).
**Archäometallurgie** Symposion Archäometallurgie von Kupfer und Eisen in Westeuropa, Mainz, 12.-15. September 1986, in *JRGZ* 35, 1988 (1991), pp. 481-704.
**Archéologie minière** *Archéologie minière - Forez et Massif central,* Actes du 98e Congrès National des Sociétés Savantes, Saint-Etienne, 1973, Section d'archéologie et d'histoire de l'art, Paris, 1975.
**Arch. Sc. Genève** *Archives des Sciences,* Genève.
**Ferrum 57** Archäometrie, Rekonstruktion und Experimente als Methode der technikgeschichtlichen Forschung. - Das Beispiel der frühen Eisenerzeugung, 8. Technikgeschichtliche Arbeitstagung der Eisen-Bibliothek vom 6./7. September 1985, in *Ferrum 57,* Mai 1986.
**Mines et fonderies** *Mines et fonderies antiques de la Gaule,* Table ronde du CNRS, Université de Toulouse-le-Mirail, 21-22 novembre 1980, Paris, Editions du CNRS, 1982.
**Mines et métallurgie** *Les mines et la métallurgie en Gaule et dans les provinces voisines,* Actes du colloque de Paris, 26-27 avril 1986, Université de Tours, Paris, 1987 (Caesarodunum 22).
**M. H. V.** Monumenta Germaniae Historica.
**Versuchsschmelzen und ihre Bedeutung** *Die Versuchsschmelzen und ihre Bedeutung für die Metallurgie des Eisens und dessen Geschichte,* Schaffhausen 9. - 12. November 1970, Museum zu Allerheiligen, Schaffhausen, und Archäologisches Institut der Akademie der Wissenschaften, Prag, 1973.


ABETEL, E. et SERNEELS, V. 1987. La métallurgie antique en Suisse: recherches récentes, in *Mines et Métallurgie,* pp. 211-225.
ABETEL, E. et SERNEELS, V. 1991. Recherches sur la métallurgie du fer dans le canton de Vaud. Analyse multivariée des scories, in *Archäometallurgie,* pp. 585-597.
ANDRIEUX, P. 1990. *Prolégomènes à une étude tracéologique sur les structures d'élaboration thermique et les parois argilo-sableuses. Application à la paléométallurgie du fer,* Besançon (Université de Franche-Comté, thèse dactylographiée de 3e cycle).
ANDRIEUX, P. 1991. Problèmes et dynamique des structures de production métallurgique: Le fer, in *Archäometallurgie,* pp. 486-495.
ARISTOTE, *Météorologiques,* livres 3 et 4, traduction de P. Louis, Paris, 1982 (Collection des Universités de France).
AUBERT, D. 1963. *Feuille Orbe 1202,* Berne (Atlas géologique de la Suisse).
BECK, L. 1891². *Die Geschichte des Eisens in technischer und kulturgeschichtlicher Beziehung,* Braunschweig.
BEDON, R. 1984. *Les carrières et les carriers de la Gaule romaine,* Paris.
BIELENIN, K. 1974. *Starożytne górnictwo i hutnictwo żelaza w Górach Świętokrzyskich,* Warszawa (avec un résumé en anglais).
BOUFFARD, P. 1947. La céramique burgonde du Musée de Lausanne, in *RSAA* 9, pp. 141-146.
BOUTHIER, A., DUPERON, J. et VELDE, B. 1987. La métallurgie du fer à l'époque gallo-romaine dans le nord-ouest de la Nièvre et le nord du Berry, in *Mines et Métallurgie,* pp. 252-270.
BOUTHIER, A. 1973. L'exploitation et l'utilisation de la houille en Gaule romaine, in *Archéologie minière,* pp. 143-156.
BRITT, H.-P. 1986. Einführung zum Rennfeuerversuch «ELIGIUS», in *Ferrum* 57, pp. 35-39.
BRUNEAU, P. 1975. Situation méthodologique de l'histoire de l'art antique, in *Antiquité classique* 44, pp. 425-487.
BUBENICEK, L. 1968. Minerais de fer, in *Encyclopaedia Universalis,* vol. 6, Paris, pp. 1023-1027.
CLEERE, H. 1972. The Classification of Early Iron-smelting Furnaces, in *The Antiquaries Journal* 52, pp. 8-23.

CLEERE, H. 1976. Iron Making, in *Roman Crafts,* London, pp. 127-141.
COUDERC, J.-M. et AUDIN, P. 1987. Bilan de la métallurgie antique en Touraine, in *Mines et Métallurgie,* pp. 237-251.
DAREMBERG, C. et SAGLIO, E. 1896. *Dictionnaire des antiquités grecques et romaines,* tome 2, deuxième partie, Paris.
DAVIS, J.C. 1973. *Statistics and Data Analysis in Geology,* New-York.
DE BONSTETTEN, G. 1874. *Carte archéologique du canton de Vaud,* Toulon.
DELAMARE, F., NICOLAS, G. et MENCARELLI, E. 1982. Etude du forgeage d'un lingot de fer protohistorique, in *Revue de métallurgie. Mémoires et études scientifiques,* 79, 2, pp. 97-104.
DE MOLIN, A. et GRUAZ, J. 1912. *Le cimetière mérovingien de Saint-Sulpice,* Lausanne.
*Digesta Iustiniani Augusti,* vol. 1, ediderunt P. Krueger et Th. Mommsen, Berolini, 1870.
DIODORUS of SICILY, *The Library of History,* book 5, vol. 3, translated by C.H. Oldfather, Cambridge and London, 1970 (The Loeb Classical Library).
DOMERGUE, C., MARTIN, T. et SILLIERES P. 1975a. L'activité de la fonderie gallo-romaine des Martys (Aude), in *Archéologie minière,* pp. 115-142.
DOMERGUE, C. et TOLLON, F. 1975b. Minerais et scories de la fonderie gallo-romaine du Domaine des Forges, Les Martys (Aude), in *Archéologie minière,* pp. 101-114.
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, in *Mines et fonderies,* pp. 215-236.
DRACK, W. et FELLMANN, R. 1988. *Die Römer in der Schweiz,* Stuttgart-Jona.
FEHLMANN, H. 1932. *Die Schweizerische Eisenerzeugung, ihre Geschichte und wirtschaftliche Bedeutung,* Bern (Beiträge zur Geologie der Schweiz. Geotechnische Serie XIII. 3).
FORBES, R.J. 1950. *Metallurgy in Antiquity,* Leiden.
FORRIERES, C., PETIT, J.-P. et SCHAUB, J. 1987. *Etude de la métallurgie du fer du vicus gallo-romain de Bliesbruck (Moselle),* Paris (Notes et monographies techniques 22).
FRANCE-LANORD, A. 1963. Les lingots de fer protohistoriques, in *Revue d'Histoire de la sidérurgie* 4, pp. 167-178.
GARILLOT, S. 1967. Le grillage des minerais de fer, in *Revue d'Histoire de la sidérurgie* 8, 2, pp. 95-111.
GILLES, J.W. 1958. Versuchsschmelze in einem vorgeschichtlichen Rennofen, in *Stahl und Eisen* 78, pp. 1690-1695.
GINGINS-LA SARRA, F. 1855. *Histoire de la ville d'Orbe et de son château,* Lausanne.
GREGOIRE de TOURS, Vie des pères I, in *Vie des pères du Jura,* traduction de F. Martine, Paris, 1968 (Sources chrétiennes 142).
GRENIER, A. 1934. *Manuel d'archéologie gallo-romaine. L'archéologie du sol, 2.2, Navigation-Occupation du sol,* Paris.
GUYAN, W.U. 1977. Neue archäologische Untersuchungen zur Eisenverhüttung in der Schweiz, in *Archäologische Eisenforschung,* pp. 119-126.
HAUPTMANN, A. 1986. Aufgaben und Zielsetzung archäometallurgischer Untersuchungen: Rekonstruktion frühester Hüttenprozesse in der Eisenmetallurgie, in *Ferrum* 57, pp. 8-12.
HEDLEY, I.G., SENNHAUSER, H.-R. et WAGNER, J.-J. 1983. Etude archéomagnétique d'un moule de cloche de l'église de Sainte-Marie, Disentis (Grisons), in *Arch. Sc. Genève,* 36, 2, pp. 351-360.
HIPPOCRATE, Des Maladies IV, in *Oeuvres,* tome 11, traduction de R. Joly, Paris, 1970 (Collection des Universités de France).
HOMERE, *Illiade,* tome 3, chants 13-18, traduction de P. Mazon, P. Chantraine et P. Collart, Paris, 1938 (Collection des Universités de France).
KEESMANN, I. 1985. Chemische und mineralogische Untersuchung von Eisenschlacken aus der hallstattzeitlichen Siedlung von Niedererlbach, in *AKB* 3, 15, pp. 351-357.
MARECHAL, J.-R. 1963. La présence d'azote dans les anciens objets en fer, in *Revue de métallurgie. Mémoires et études scientifiques* 60, 2, pp. 135-142.
MARECHAL, J.-R. 1982. Thermodynamique des scories gallo-romaines, in *Mines et fonderies,* pp. 305-318.
MARECHAL, J.-R. 1987. Evolution de la métallurgie du fer en Gaule-Belgique, in *Mines et Métallurgie,* pp. 281-286.
MARIN-DARBEL, G. 1923. *Nouveau manuel complet du charron- forgeron,* Paris.
MARTIN, P.-E. 1910. *Etudes critiques sur la Suisse à l'époque mérovingienne,* Genève-Paris.

MOESTA, H. 1986. *Erze und Metalle - ihre Kulturgeschichte im Experiment,* New York-Heidelberg-Berlin.

MONEY, J.H. 1971. Medieval Iron-Workings in Minepit Wood, Rotherfield, Sussex, in *Medieval Archaeology* 15, pp. 86-111.

MOTTAZ, E. 1914. *Dictionnaire historique, géographique et statistique du Canton de Vaud,* Lausanne, 1914-1921.

MUTZ, A. 1981. Einige Bemerkungen zum Depotfund von 16 Eisenbarren in Schwadernau BE, in *AS* 4, 3, pp. 128-129.

NOSEK, E. 1977. The Investigation of the Iron-sponge Fragments from Burgenland, in *Archäologische Eisenforschung,* pp. 71-82.

*L'Odyssée «Poésie homérique»,* tome 2, chants 8-15, traduction de V. Bérard, Paris, 1924 (Collection des Universités de France).

PAUNIER, D. et AMSTAD, S. 1984. *L'établissement gallo-romain de Bavois (VD). Sondages 1973,* Lausanne (CAR 39).

PELET, P.-L. 1960. Une industrie du fer primitive au pied du Jura vaudois: la ferrière de Prins-Bois et ses voisines, in *RHV* 68, pp. 49-110.

PELET, P.-L. 1970. Sidérurgie antique au pied du Jura vaudois, in *HA* 1, 4, pp. 86-95.

PELET, P.-L. 1973. *Une industrie méconnue. Fer, charbon, acier dans le pays de Vaud,* Lausanne (BHV 49).

PELET, P.-L. 1974. Une industrie bimillénaire: la sidérurgie du Jura vaudois, in *Annales ESC* 4, pp. 789-812.

PELET, P.-L. 1976. Versuch einer Klassifizierung frühgeschichtlicher Eisenschmelzöfen, in *Archiv für das Eisenhüttenwesen,* 47, 12, pp. 709-712.

PELET, P.-L. 1977. L'architecture des fourneaux à fer primitifs. Evolutions autonomes et tendances générales, in *Archäologische Eisenforschung,* pp. 173-180.

PELET, P.-L. 1978. *Fer, charbon, acier dans le pays de Vaud. La lente victoire du haut fourneau,* Lausanne (BHV 59).

PELET, P.-L. 1981. L'«Archéologie industrielle», science ou fiction?, in *RSH* 31, pp. 32-42.

PELET, P.-L. 1982a. L'histoire des techniques avant la révolution industrielle, in *RSH* 32, pp. 324-337.

PELET, P.-L. 1982b. Recherches sur la métallurgie du fer dans le Jura vaudois, in *Mines et fonderies,* pp. 205-214.

PELET, P.-L. 1983. *Fer, charbon, acier dans le pays de Vaud. Du mineur à l'horloger,* Lausanne (BHV 74).

PELET, P.-L. 1988. Ruiner la végétation ou sauvegarder la nature: la ferrière de Champex au 14e siècle, in *RSH* 38, 1, pp. 30-44.

PELET, P.-L. à paraître. L'emploi des fourneaux à fer asymétriques du pied du Jura vaudois. Deux hypothèses à vérifier, in *Actes du 15ème Colloque International pour l'étude de l'Age du Fer,* 9-12 mai 1991, Yverdon-Pontarlier-La Tène.

PERCY, J. 1864. *Metallurgy: the Art of extracting Metals from their Ores, and adapting them to Various Purposes of Manufacture. Iron and Steel,* London.

PLEINER, R. 1965. Die Eisenverhüttung in der «Germania Magna» zur römischen Kaiserzeit, in *45. BRGZ 1964,* pp. 11-86.

PLEINER, R. 1977. Neue Grabungen frühgeschichtlicher Eisenhüttenplätze in der Tschecoslowakei und die Bedeuteung des Schachtofens für die Entwicklung des Schmelzvorganges, in *Archäologische Eisenforschung,* pp. 107-117.

PLEINER, R. et BARTUSKA, M. 1968. Untersuchung der Schlackenproben von Mühlthal, in *Epolding-Mühlthal. Siedlung, Kirchöfe und Kirche des frühen Mittelalters,* München, pp. 97-101 (Münchner Beiträge zur Vor- und Frühgeschichte 13).

PLINE L'ANCIEN, *Histoire naturelle,* livre 16, traduction de J. André, Paris, 1962 (Collection des Universités de France).

PLINE L'ANCIEN, *Histoire naturelle,* livre 33, traduction de H. Zehnacker, Paris, 1983 (Collection des Universités de France).

PLINE L'ANCIEN, *Histoire naturelle,* livre 34, traduction de H. Le Bonniec, Paris, 1953 (Collection des Universités de France).

PLOECKINGER, E., STRAUBE, H. et TARMANN, B. 1964. *Erzreduktionsversuche in Rennöfen norischer Bauart,* Klagenfurt (Kärntner Museumsschriften 35).

PRIMAULT, B., 1972. *Etude méso-climatique du Canton de Vaud,* Lausanne (Cahiers de l'aménagement régional 14).

QUIQUEREZ, A. 1855. *Notice historique sur les mines, les forêts et les forges de l'Ancien Evêché de Bâle,* Porrentruy.

QUIQUEREZ, A. 1866. *De l'âge du fer. Recherches sur les anciennes forges du Jura bernois,* Porrentruy.

QUIQUEREZ, A. 1871. Notice sur les forges primitives dans le Jura, in *MAGZ* 17, 4, pp. 71-88.

RAMIN, J. 1977. *La technique minière et métallurgique des Anciens,* Bruxelles (Latomus 153).

SABLAYROLLES, R. 1982. Intérêt et problèmes de l'étude des ferriers antiques: l'exemple de la Montagne Noire, in *Mines et fonderies,* pp. 183-190.

SADZOT, J. 1956. Les débuts de la fabrication du fer, in *Industrie* 9, 10, pp.564-571.

SALIN, E. 1957. *La civilisation mérovingienne d'après les sépultures, les textes et le laboratoire 3. Les techniques,* Paris.

SALKIELD, L.U. 1970. Ancient Slags in the South West of the Iberian Peninsula, in *La Minaria Hispana e Ibero-Americana,* vol. 1, Leon, pp. 85-98.

SCHAABER, O. 1963. Beiträge zur Frage des norischen Eisens. Metallkundliche Grundlagen und Untersuchungen an Funden von Magdalensberg, in *Die Ausgrabungen auf dem Magdalensberg 1960 und 1961,* Klagenfurt, pp. 129-279.

SCHMID, H. 1977. Die Montangeologischen Voraussetzungen des Ur- und Frühgeschichtlichen Eisenhüttenwesens im Gebiet des mittleren Burgenlandes, in *Archäologische Eisenforschungen,* pp. 11-23.

SCHMID, W. 1932. *Norisches Eisen,* Wien-Berlin-Düsseldorf (tiré à part pp. 169-226) (Beiträge zur Geschichte des Oesterreichischen Eisenwesens Abt. 1, Heft 2).

SCHMIDT, C. 1920. *Texte explicatif de la carte des gisements des matières premières minérales en Suisse,* Bâle (Matériaux pour la géologie de la Suisse).

SCHWAB, H. 1987. Zur Chronologie des frühmittelalterlichen Gräberfeldes Saint-Sulpice (VD), in *Archäologischer Fundbericht 1984,* pp. 161-174 (Freibürger Archäologie).

SPERL, G. 1980. *Über die Typologie urzeitlicher, frügeschichtlicher und mittelalterlicher Eisenhüttenschlacken,* Wien (Studien zur Industrie-Archäologie 7).

SPERL, G. 1986. Aufgaben, Durchführung und Ergebnisse von Schmelzversuchen, in *Ferrum* 57, pp. 31-35.

STEINER, M. 1979, Découverte d'une industrie sidérurgique de type archaïque à Lajoux (Suisse, canton du Jura) in *Colloque d'archéologie industrielle,* Comptes rendus du 104e Congrès National des Sociétés Savantes, Bordeaux, Section des sciences, Paris, fascicule 5, pp. 179-186.

STRAUBE, H. 1986. Kritische Gegenüberstellung der Theorien über die Metallurgie des Rennfeuers, in *Ferrum* 57, pp. 20-28.

THELLIER, E. 1981. Sur la direction du champ magnétique terrestre, en France, durant les deux derniers millénaires, in *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 24, pp. 89-132.

*The Theodosian Code,* translated by C. Pharr, Princeton, 1952 (Princeton University Press).

THEOPHRASTE, *Enquiry to Plants,* vol. 1, translated by A. Hort, Cambridge and London, 1968 (The Loeb Classical Library).

THOUVENIN, A. 1984. Lingots de fer gaulois et techniques de forge, in *RAE* 1-2, 35, pp. 368-372.

TRONQUART, G. 1987. La sidérurgie au «camp celtique» de la Bure, du 1er siècle avant au 4e siècle après J. C., in *Mines et Métallurgie,* pp. 287-290.

TYLECOTE, R.F., 1987. *The Early History of Metallurgy in Europe,* London and New York.

TYLECOTE, R.F., AUSTIN, J.N. et WRAITH A.E. 1973. Iron Smelting Experiments with a Shaft Furnace of the Roman Period, in *Versuchsschmelzen und ihre Bedeutung,* pp. 25-49.

VETTERS, H. 1967. Ferrum Noricum, in *Anzeiger der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Philosophisch-Historische Klasse* 25, 105, 1966, pp. 167-185.

*Vie des pères du Jura,* traduction de F. Martine, Paris, 1968 (Sources chrétiennes 142).

VON KAENEL, H.-M. 1981. Ein Depotfund von 16 doppelpyramidenförmigen Eisenbarren in Schwadernau BE, in *AS* 4, 1, pp. 15-21.

WEIDMANN, D. 1984. Chronique archéologique sv Montcherand, in *RHV* 92, pp. 242-244.

WEIERSHAUSEN, P. 1939. *Vorgeschichtliche Eisenhütten Deutschlands,* Leipzig (Mannus Bücherei 65).

WURMBRAND, G. 1877. Beiträge zur Frage über die Gewinnung des Eisens und die Bearbeitung von Bronzen, in *Correspondenz-Blatt der deutschen Gesellschaft für Anthropologie, Ethnologie und Urgeschichte,* Nr 11, November, pp. 150-154.

# INDEX DES NOMS[1]

(Noms de lieux en italique)

Ne sont pas cités dans l'index: Montcherand, canton et pays de Vaud, Jura vaudois. Les localités sans indication de province se trouvent dans le canton de Vaud.


Alamans 94, 97
*Alémanie* 94 n. 18 et 19
*Amône (VS)* 39 n. 17
*Aproz (VS)* 39 n. 17
*Aquilée (I)* 54
Aristote 65
*Ashwicken (GB)* 52, 53 tabl. 8
*Avenches* 35, 85, 94 n. 19
*Bâle, Münsterhügel (BS)* 35
*Baulmes* 40 n. 19
*Baulmes, prieuré Sainte-Marie* 94
*Beaune, archéodrome* 5, 49 n. 6
*Bellaires, Les, Romainmôtier* 5, 6, 40 n. 19, 43, 60, 77 n. 20
*Bellaires I* 20, 20 n. 13, 32 n. 2, 67 n. 3, 77, 89, 92, 94 n. 21, fig. 12
*- four VII* 68 tabl. 9
*- four XII* 92
*- four XIV* 92
*- four XV* 68 tabl. 9
*Bellaires III* 20 n. 11 et 13, 34, fig. 12
*Bengale (Indes)* 54, fig. 25
*Berry (F)* 59
*Biberist (SO)* 35
*Bliesbruck (F)* 19, 42, 67 n. 3
*Boécourt (JU)* 6
*Bohême (CSR)* 65
*Bois de Chênes, Agiez et Valeyres* 43
*Boscéaz, Orbe* 5, 6, 96
*Bossena, La, Ferreyres* 40 n. 19, 43, 92
*Bossena I* 32 n. 2, 89, fig. 46
*- four XXII* 68 tabl. 9, 88 n. 5, 92
*Bouhy (F)* 43 n. 32
*Bourgogne (F)* 6
*Bourgogne, royaume de* 9 n. 1, 94
Brunehaut, reine de Bourgogne 6, 96
*Bure, La (F)* 58 n. 26
Burgondes 92, 94, 97
*Bussy (FR)* 35
*Chamblon* 39
*Chamoson (VS)* 39 n. 17
*Chassagne, forêt de* 5, 43
*Châtillon, bois de* 5, 6, 92 n. 11
*Chine* 58 n. 26
Chramnelène, duc 94 n. 22
*Chýně (CSR)* 50 n. 9
*Clées, Les* 40, 43
*Coire Markthallen (GR)* 68 tabl. 9
Colbert, Jean-Baptiste 34 n. 10
*Colombier (NE)* 35
*Concise* 5
*Condat - Saint-Claude (F)* 94
*Cossonay* 85
*Courlevon (FR)* 35
*Cuarnens* 85
*Czestochowa (PL)* 36 n. 16
*Delémont (JU)* 36
*Dikaiarcheia - Puteoli (I)* 35 n. 12
Diodore 35 n. 12
*Dolní Počernice (CSR)* 50 n. 9
*Domaine des Forges (F)* 59
*Dudelange (L)* 68 tabl. 9
Duvillard, François 40 n. 20
*Eclépens* 5
*Elbe, île* 35 n. 12
*Engsbachofen (D)* 53 tabl. 8
Ermendrude, épouse de Chramnelène 94
Erpo, connétable 96 n. 24
*Erzberg (A)* 68 tabl. 9
*Etoy* fig. 44
*Favergeatte, Pleigne (JU)* 53 tabl. 8
*Feisterweise (A)* 53 tabl. 8
*Ferreyres* 5, 34, 63 n. 47, 85, 92, 94 n. 16, fig. 49
*Franche-Comté (F)* 6
*Fricktal, vallée du* 36
*Gaule* 50, 67
*Germanie* 67
Gilchrist, Percy 44 n. 37
Gilchrist Thomas, Sidney 44 n. 37
Gilles, Joseph .W. 34 n. 7
Gingins-La Sarra, Frédéric de 94
Gontran, roi franc 94
*Goumoens-le-Jux* 39
*Grèce* 54, 96 n. 25
Grégoire, évêque de Tours 94 n. 18 et 19
Haya, peuplade 64
*Heiligkreuz (SG)* 35
Hippocrate 58
*Holbeanwood (GB)* 59
*Hüttenberg (A)* 41, 50, 53 tabl. 8, 68 tabl. 9
*Isle, L'* 5
*Joux, vallée de* 36
*Jura, chaîne montagneuse* 36, 43
*Jura, canton du* 35, 39
*Jura bernois* 11, 50
*Křepice (CSR)* 50 n. 9
*Lajoux (JU)* 54
*Lausanne* 35, 63 n. 47, 77 n. 20, 85, fig. 44
*Loděnice (CSR)* 50 n. 9
*Lorraine (F)* 36 n. 16, 59
*Luxembourg (L)* 36 n. 16
*Magdalensberg (A)* 66
Martin, Pierre 44 n. 37
*Martys, Les (F)* 59
*Měděnec (CSR)* 34
*Metz (F)* 94
*Montagne Noire (F)* 53 tabl. 8, 59
*Mont-Chemin (VS)* 39 n. 17
*Mont-de-Baulmes* 36
*Mont-Terri (JU)* 35
*Mont-Vully (FR)* 35, 85, fig. 44
*Morens (FR)* 35
*Mormont* 39
*Motta Vallac (GR)* 35
*Mühlthal (D)* 68 tabl. 9


[1] Les abréviations des divers pays et cantons sont celles des plaques minéralogiques: A = Autriche; CSR = Tchécoslovaquie; D = Allemagne; F = France; GB = Grande-Bretagne; I = Italie; L = Luxembourg; PL = Pologne. BE = Berne; BS = Bâle-Ville; FR = Fribourg; GR = Grisons; JU = Jura; NE = Neuchâtel; SG = Saint-Gall; SH = Schaffhouse; SO = Soleure; TG = Thurgovie; VS = Valais.

*Mysore (Indes)* 54
*Nancy (F)* 63 n. 48, 79
*Netřeba-Cirkvice (CSR)* 50 n. 9
*Nièvre (F)* 59
*Norique* 50, 65, 67
*Nozon, rivière* 94 n. 20
*Nyon* 35
*Orbe* 9 n. 1, 43, 94, 96
*Orbe, rivière* 40, 43
*Paris (F)* 91
*Pise (I)* 54
*Planches Neuves, Montcherand* 92 n. 14
Pline l'Ancien 61, 65, 65 n. 63
*Populonia (I)* 42
*Prague Podbaba (CSR)* 50 n. 9
*Prins-Bois, Juriens* 5, 43
*Prins-Bois I* 34 n. 7, 56 n. 23
- *four XIII* 53 tabl. 8
- *four XIX* 68 tabl. 9
*Prins-Bois II* 52 n. 13
*Provence* 85
*Riom (GR)* 35, 68 tabl. 9
*Romainmôtier, abbaye de* 5, 94
Romain, abbé de Condat 94
*Saint-Sulpice* 88 n. 4
*Schaffhouse (SH)* 100
*Schaffhouse, canton de* 39
*Schwadernau (BE)* 34
Sévère Alexandre, empereur 96
*Sévery* 88 n. 4
*Siegen (D)* 50
*Siegerland (D)* 53 tabl. 8
*Sperenberg (D)* 56
*Tanzanie* 64
Tatars Kouznetski, peuplade 54
*Tène, La (NE)* 83
*Thèbes (Egypte)* 54, fig. 24
Théodebert, roi franc 94
Théophraste 42
*Toos-Waldi (TG)* 35
*Valais, canton du* 39 n. 17
*Vallorbe, Musée du fer* 42 n. 28, 61, 63 n. 48, 100, fig. 28
*Valteline (I)* 54
*Vordernberg (A)* 19
Wandrille, abbé de Fontenelle 94 n. 20
Warnachaire, maire du palais 96 n. 24
*Weald (GB)* 42
Wieland, le forgeron 60 n. 40
*Windischgräz (A)* 68 tabl. 9
*Yverdon* 35, 85, fig. 19

# LISTE DES ILLUSTRATIONS


Fig. 1 Extrait de la carte au 1:25000 de la région d'Orbe
Fig. 2a Relevé géomagnétique par magnétomètre à protons
Fig. 2b Relevé géomagnétique par gradiomètre
Fig. 3 Plan d'ensemble du site
Fig. 4 Aire de préparation à l'arrière du bas-fourneau I
Fig. 5 Coupe C-C' à travers le bas-fourneau I
Fig. 6 Paroi de bas-fourneau avec traces de réfection
Fig. 7 Coupe NO/SE au travers du site
Fig. 8a Empilement de pierres correspondant au bas-fourneau I
Fig. 8b Calcul du volume reconstitué du bas-fourneau I
Fig. 9 Bas-fourneaux Va à Vc encastrés dans la pente
Fig. 10a Coupe de la tuyère trouvée près du bas-fourneau III'
Fig. 10b Fragment de tuyère
Fig. 11 Bas-fourneaux IIa-IIb et Vb-Vc
Fig. 12 Fours III et IV de Bellaires I et fours XIX et XX de Bellaires III
Fig. 13a Bas-fourneau I et traces de labours visibles à l'arrière de l'installation
Fig. 13b Dessin du bas-fourneau I
Fig. 14a Bas-fourneaux IIa et IIb
Fig. 14b Dessin des bas-fourneaux IIa et IIb
Fig. 15a Bas-fourneaux III' et IV
Fig. 15b Dessin du bas-fourneau III'
Fig. 15c Dessin du bas-fourneau IV
Fig. 16 Stratigraphie E-E'
Fig. 17a Bas-fourneaux Va à Vc
Fig. 17b Dessin du bas-fourneau Va
Fig. 17c Dessin des bas-fourneaux Vb et Vc
Fig. 18 Relevé photogrammétrique du site
Fig. 19 Calotte provenant du fond d'un bas-foyer
Fig. 20 Minerai, échantillon n° 1
Fig. 21 Minerai, échantillon n° 2
Fig. 22 Extrait de la carte géologique de la région d'Orbe
Fig. 23 Types de cuves
Fig. 24 Artisans activant des soufflets en peau - Egypte
Fig. 25 Soufflets en peau. Principe de fonctionnement - Bengale
Fig. 26 Bas-fourneau Vc
Fig. 27 Courbe de refroidissement pour un Acier 1040 de la norme américaine ASM
Fig. 28 Croûte de mâchefer de forme concave provenant d'un foyer de forge moderne
Fig. 29 Scorie concave, échantillon n° 3c
Fig. 30 Scorie de forme ovoïde, échantillon n° 6
a) face externe b) face interne
Fig. 31 Scorie présentant des traces de coulée, échantillon n° 7
a) face externe b) face interne
Fig. 32 Scorie présentant des traces de coulée, échantillon n° 9
Fig. 33 Scorie vitreuse, échantillon n° 5
Fig. 34 Scorie vitreuse, échantillon n° 13
Fig. 35 Scorie légère, échantillon n° 8
Fig. 36 Répartition des scories par rapport aux bas-fourneaux

Fig. 37 Scorie formée à l'intérieur du bas-fourneau, échantillon n° 3
Fig. 38a Scorie et paroi du bas-fourneau attenante, échantillon n° 4
Fig. 38b Coupe de la scorie et de la paroi du bas-fourneau
Fig. 39a à c Fragments formés à proximité des éponges et contenant des inclusions de fer, échantillons n° 27, 35 et 90
Fig. 40 Fragment de fer formé près de l'éponge; image obtenue par microscope électronique, échantillon n° 35
Fig. 41a Histogramme de l'élément sodium
Fig. 41b Histogramme de l'élément potassium
Fig. 42 Diagramme x/y construit sur les teneurs en oxydes de sodium et de potassium
Fig. 43 Diagramme x/y construit sur la teneur en $TiO_2$ et sur la somme des teneurs en MnO et MgO
Fig. 44 Dendrogramme établi à partir des matériaux de Montcherand et de Lousonna-Vidy
Fig. 45 Tessons n° 2735 (préhistorique) et 2719 (burgonde)
Fig. 46 Séquences dendrochronologiques de Bossena et Montcherand
Fig. 47 Extrait de la courbe de Thellier pour les années 0 à 800
Fig. 48 Représentation schématique de la succession chronologique des bas-fourneaux
Fig. 49 Evolution de la forme des bas-fourneaux

# LISTE DES TABLEAUX

Tabl. 1 Description des bas-fourneaux 18
Tabl. 2 Cycles de production possibles 31
Tabl. 3 Examen visuel du minerai 39
Tabl. 4 Eléments majeurs contenus dans le minerai 41
Tabl. 5 Eléments traces contenus dans le minerai 41
Tabl. 6 Résultats de l'étude anthracologique 44
Tabl. 7 Facteurs influençant le fonctionnement 48
Tabl. 8 Dimensions des divers types de bas-fourneaux 53
Tabl. 9 Analyses chimiques de scories de diverses origines 68
Tabl. 10 Examen visuel des scories 73
Tabl. 11 Examen visuel des résidus de diverses natures 73
Tabl. 12 Eléments majeurs contenus dans les scories 78
Tabl. 13 Eléments traces contenus dans les scories 78
Tabl. 14 Examen visuel des fragments formés à proximité des éponges 79
Tabl. 15 Eléments majeurs mis en évidence par la microsonde 81
Tabl. 16 Teneurs des nodules en fer et en éléments traces 81
Tabl. 17 Teneurs des clous en fer et en éléments traces 83
Tabl. 18 Teneurs chimiques des scories de diverses époques 87
Tabl. 19 Datations du site de Montcherand 91

# TABLE DES MATIÈRES


Préface . . . . . 5

Remerciements . . . . . 7

Introduction . . . . . 9

I. La démarche archéologique . . . . . 11

1. Localisation du site . . . . . 13
2. Description du site . . . . . 15
3. Catalogue des bas-fourneaux . . . . . 23

II. Le processus sidérurgique . . . . . 31

1. Le travail de la ferrière . . . . . 31
2. Classification des sites sidérurgiques . . . . . 35
3. Les matières premières . . . . . 36
   3.1. Le minerai . . . . . 36
      3.1.1. Le concassage . . . . . 40
      3.1.2. Le grillage . . . . . 41
      3.1.3. Le «vieux fer» . . . . . 41
   3.2. Le charbon de bois . . . . . 42
      3.2.1. Analyse des essences utilisées . . . . . 43
   3.3. Les fondants . . . . . 43

III. Les bas-fourneaux . . . . . 47

1. Propositions de typologies . . . . . 47
2. Développement technique . . . . . 48
   2.1. La ventilation des bas-fourneaux . . . . . 54
   2.2. Les bas-fourneaux de Montcherand . . . . . 54
3. Fonctionnement . . . . . 56
4. Rendement de l'installation . . . . . 59
5. Elaboration des éponges . . . . . 59
6. La deuxième cuisson des éponges . . . . . 60
7. La fabrication des loupes . . . . . 60
8. Le forgeage . . . . . 61
9. Présence d'acier . . . . . 63
   9.1. Propositions concernant la production d'acier dans l'Antiquité . . . . . 63
   9.2. La trempe . . . . . 65
   9.3. Les éléments d'alliage . . . . . 65
10. Existence de traitements différenciés . . . . . 66

IV. Etude des scories . . . . . 67

1. Le prélèvement des scories . . . . . 69
   1.1. Utilisation d'une typologie des scories . . . . . 70
2. L'étude du matériel de Montcherand . . . . . 71
   2.1. L'examen macroscopique . . . . . 71
   2.2. L'examen minéralogique . . . . . 71
      2.2.1. Scories . . . . . 73
      2.2.2. Résidus de diverses natures . . . . . 73

3. Les analyses chimiques . . . . . 75
3.1 Analyse des scories . . . . . 76
3.1.1. Températures atteintes . . . . . 78
3.2. Analyse des scories contenant du fer métallique . . . . . 79
3.3. Analyse des clous . . . . . 81
4. Possibilités de regroupement à une échelle régionale . . . . . 83
4.1. Méthodes conventionnelles . . . . . 83
4.1.1. L'histogramme . . . . . 83
4.1.2. Le diagramme x/y . . . . . 84
4.2. Le dendrogramme . . . . . 84

V. Datation du site de Montcherand . . . . . 87

1. La datation par le $C^{14}$ . . . . . 89
2. L'examen dendrochronologique . . . . . 89
3. L'étude archéomagnétique des bas-fourneaux . . . . . 89
4. Succession des bas-fourneaux . . . . . 91
4.1. Chronologie des bas-fourneaux de Montcherand . . . . . 91
5. Historique . . . . . 92

Conclusions . . . . . 99

Bibliographie . . . . . 101

Index des noms . . . . . 105

Liste des illustrations . . . . . 107

Liste des tableaux . . . . . 108

Achevé d'imprimer
en juin 1992
par les Presses Centrales
Lausanne SA

# CAHIERS D'ARCHÉOLOGIE ROMANDE

N° 1 Gilbert KAENEL: *Aventicum I:* Céramiques gallo-romaines décorées. 1974. ISBN 2-88028-001-X

N° 2 Jean-Pierre JEQUIER: Le Moustérien alpin, révision critique. 1975. ISBN 2-88028-002-8

N° 3 Dominique CHAPELLIER: Géophysique et archéologie. 1975. ISBN 2-88028-003-3

N° 4 Marcel GRANDJEAN, Werner STÖCKLI, Pierre MARGOT, Claude JACCOTTET: Le cloître de la cathédrale Notre-Dame de Lausanne. 1975. ISBN 2-88028-004-4

N° 5 Mélanges d'histoire ancienne et d'archéologie offerts à Paul Collart. 1976. ISBN 2-88028-005-2

N°s 6-7 O.-J. BOCKSBERGER: Le site du Petit-Chasseur (Sion): t. 1 et 2: Le Dolmen M.VI, publié par Alain Gallay. 1976. ISBN 2-88028-006-0 et ISBN 2-88028-007-9

N° 8 Gilbert KAENEL: La fouille du «Garage Martin - 1973». 1976. ISBN 2-88028-008-7

N° 9 Paul BISSEGGER et Claude JACCOTTET: La Chapelle de PUIDOUX. 1977. ISBN 2-88028-009-5

N° 10 Jean-Louis VORUZ: L'industrie lithique de la station littorale d'Yvonand. (Exemple d'étude de typologie analytique). 1977. ISBN 2-88028-010-9

N° 11 Alain BEECHING: Le Boiron de Morges. Une nécropole du Bronze final près de Morges (Vaud-Suisse). 1977. ISBN 2-88028-011-7

N° 12 Monika VERZAR: *Aventicum II:* Un temple du culte impérial. 1977. ISBN 2-88028-012-5

N°s 13-14 0.-J. BOCKSBERGER: Le site du Petit-Chasseur: t. 3 et 4: Horizon supérieur, secteur occidental et tombes Bronze ancien, publié par Alain Gallay. 1978. ISBN 2-88028-013-3 et ISBN 2-88028-014-1

N°s 15-16 Valentin RYCHNER: L'âge du Bronze final à Auvernier (Lac de Neuchâtel Suisse). Typologie et chronologie des anciennes collections conservées en Suisse. *Auvernier 1 et 2.* 1979. ISBN 2-88028-015-X et ISBN 2-88028-016-8

N° 17 Bronzes hellénistiques et romains. 1979. ISBN 2-88028-017-6

N° 18 Gilbert KAENEL, Max KLAUSENER, Sylvain FEHLMANN: Nouvelles recherches sur le vicus gallo-romain de Lousonna (Vidy/Lausanne). *Lousonna 2.* 1980. ISBN 2-88028-018-4

N° 19 Gilbert KAENEL, Sylvain FEHLMANN: Un quartier de Lousonna La fouille de «Chavannes 7» 1974/75 et 1977. *Lousonna 3.* 1980. ISBN 2-88028-019-2

N° 20 André LAUFER: La Péniche - Un atelier de céramique à Lousonna (1er s. ap. J.- C.). *Lousonna 4.* 1980. ISBN 2-88028-020-6

N° 21 Daphné WOYSCH-MEAUTIS: La représentation des animaux et des êtres fabuleux sur les monuments funéraires grecs de l'époque archaïque à la fin du IVe siècle av. J.-C. 1982. ISBN 2-88028-021-4

N° 22 Philippe BRIDEL: *Aventicum III:* Le sanctuaire du Cigognier. 1982. ISBN 2 88028-022-2

N° 23 Jean-Luc BOISAUBERT: Le Néolithique moyen de la Saunerie. (Fouilles 1972-1975). Denis RAMSEIER: L'industrie en bois de cerf du site néolithique des Graviers. *Auvernier 3.* 1982. ISBN 2-88028-023-0

N° 24 François SCHIFFERDECKER: La céramique du Néolithique moyen d'Auvernier dans son cadre régional. *Auvernier 4.* 1982. ISBN 2-88028-024-9

N° 25 André BILLAMBOZ et al.: La station littorale d'Auvernier Port. Cadre et évolution. *Auvernier 5.* 1982. ISBN 2-88028-025-7

N° 26 Michel EGLOFF et Kolja FARJON: Aux origines de Lausanne. Les vestiges préhistoriques et gallo-romains de la Cité. 1983. ISBN 2-88028-026-5

N° 27 Béatrice HEILIGMANN-HUBER: Les catelles à relief du Château de Valangin. 1983. ISBN 2-88028-027-3

N° 28 Joël VITAL et Jean-Louis VORUZ: L'habitat protohistorique de Bavois-en Raillon (Vaud). 1984. ISBN 2-88028-028-1

N° 29 Jean-Louis VORUZ: Outillages osseux et dynamisme industriel dans le Néolithique jurassien. 1984. ISBN 2-88028-029-X

N° 30 Gilbert KAENEL, Philippe CURDY, Hanspeter ZWAHLEN: Saint-Triphon, Le Lessus (Ollon, Vaud) du Néolithique à l'époque romaine. 1984. ISBN 2-88028-030-3

N°s 31-32 Alain GALLAY: Le site du Petit Chasseur (Sion, Valais) t. 5 et 6 - Le Dolmen M IX. 1985. ISBN 2-88028-031-1 et ISBN 2-88028-032-X

N° 33 Le Canal d'Entreroches. 1987. ISBN 2-88028-033-8

N° 34 Ivonne MANFRINI: Bacchus dans les bronzes hellénistiques et romains. 1987. ISBN 2-88028-034-6

N° 35 Le général Dufour et Saint-Maurice. 1987. ISBN 2-88028-035-4

N° 36 Image et Société en Grèce ancienne. L'iconographie comme méthode d'analyse. 1987. ISBN 2-88028-036-2

N° 37 Valentin RYCHNER: Le mobilier métallique au bronze final. 1987. ISBN 2-88028-037-0

N° 38 Daniel PAUNIER et al.: Le vicus gallo-romain de Lousonna-Vidy. Rapport préliminaire sur la campagne de fouilles 1983. *Lousonna 5.* 1984. ISBN 2-88028-038-9

N° 39 Daniel PAUNIER et Silvio AMSTAD: L'établissement gallo-romain de Bavois (VD). Sondages 1973. 1984. ISBN 2-88028-039-7

N° 40 Daniel PAUNIER et al.: Le vicus gallo-romain de Lousonna-Vidy. Rapport préliminaire sur la campagne de fouilles 1984. *Lousonna 6.* 1987. ISBN 2-88028-040-4

N° 41 Daniel CASTELLA: *Aventicum IV:* La nécropole du Port d'Avenches. 1987. ISBN 2-88028-041-9

N° 42 Daniel PAUNIER et al.: Le vicus gallo-romain de Lousonna-Vidy. Rapport préliminaire sur la campagne de fouilles 1985. Le quartier occidental. Le sanctuaire indigène. *Lousonna 7.* 1989. ISBN 2-88028-042-7

N° 43 *Aventicum V:* Pictores per provincias. Actes du 3e colloque international sur la peinture murale romaine. 1987. ISBN 2-88028-043-5

N° 44 Pascale BONNARD: *Noviodunum I:* La ville romaine de Nyon. Répertoire des fouilles et trouvailles. Bibliographie du site. 1988. ISBN 2-88028-044-3

N° 45 Denis RAMSEIER: *Auvernier 7.* La céramique néolithique d'Auvernier - La Saunerie. Fouilles de 1964-1965. 1988. ISBN 2-88028-045-1

N° 46 François SCHIFFERDECKER: Le site littoral néolithique d'Auvernier. *Auvernier 6.* 1989. ISBN 2-88028-046-X

N°s 47-48 Alain GALLAY: Le site du Petit-Chasseur (Sion, Valais), t. 7 et 8: secteur oriental. 1989. ISBN 2-88028-047-8 et 2-88028-048-6

N° 49 Silvio AMSTAD et Jacques MOREL: *Noviodunum II:* Un quartier romain de Nyon: de l'époque augustéenne au IIIe siècle. 1990. 2-88028-049-4

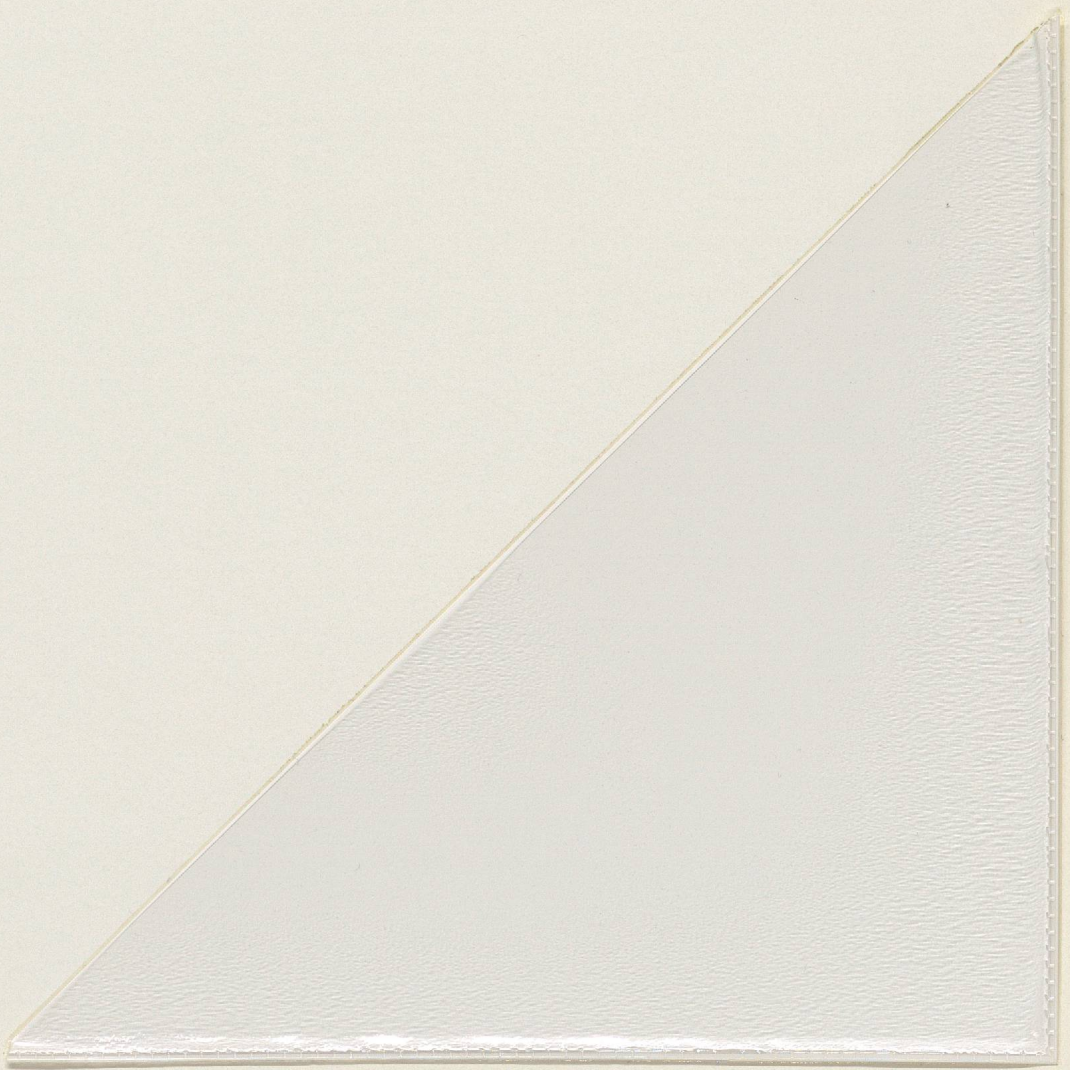
N° 50 Gilbert KAENEL: Recherches sur la période de La Tène en Suisse occidentale. Analyse des sépultures. 1990. ISBN 2-88028-050-8

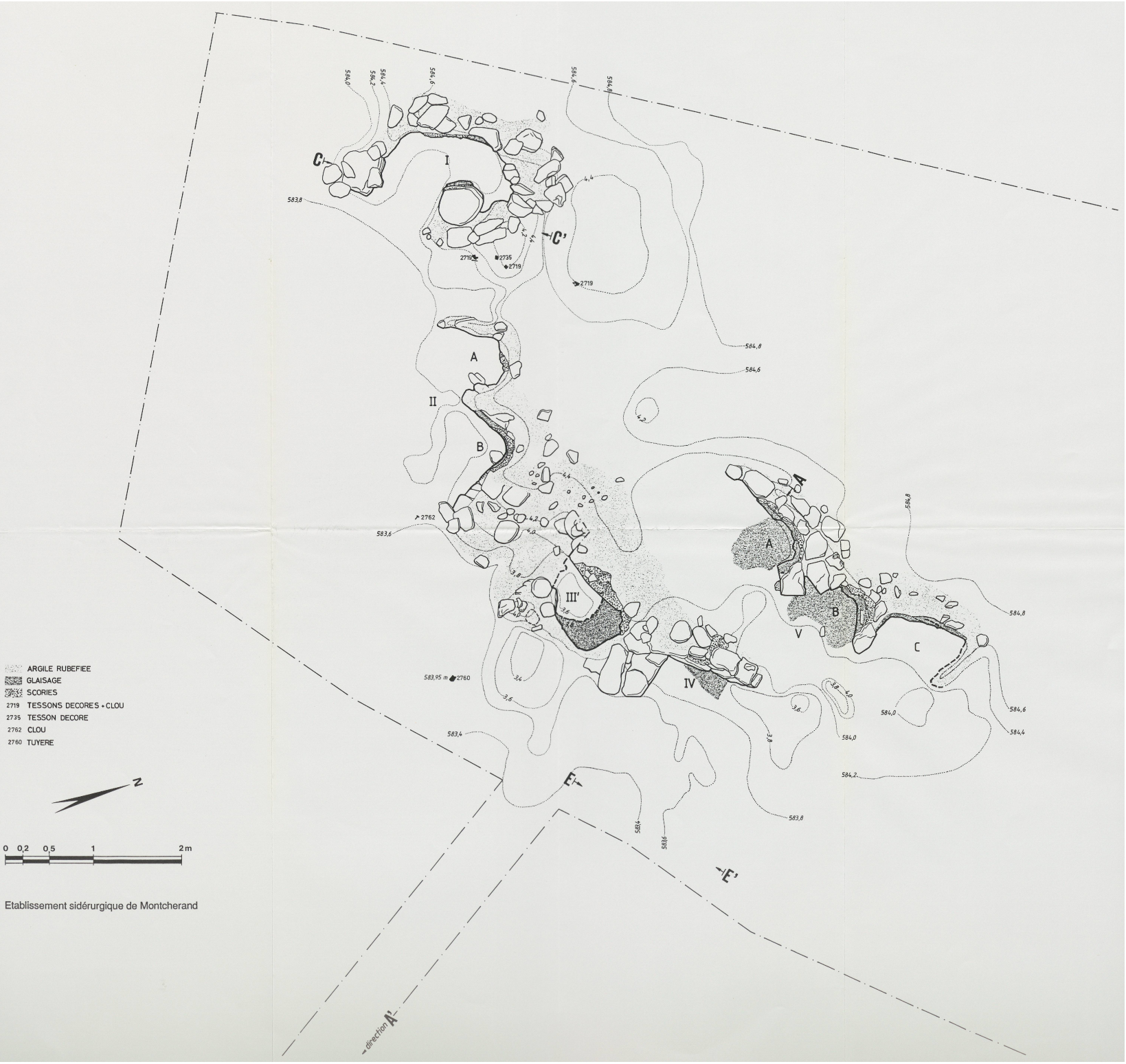
N° 51 Dominique BAUDAIS et Christiane KRAMAR: La nécropole néolithique de Corseaux «en Seyton». 1990. ISBN 2-88028-051-6

N° 52 Reto MARTI: Das frühmittelaterliche Gräberfeld von Saint-Sulpice VD - Le cimetière du Haut Moyen Age de Saint-Sulpice VD. 1990. ISBN 2-88028-052-4

N° 53 Nicole PLUMETTAZ et Dominique ROBERT BLISS: Echandens-La Tornallaz (VD, Suisse) - Habitats protohistoriques et enceinte médiévale. 1992. ISBN 2-88028-053-2

N° 54 Emmanuel ABETEL: L'établissement sidérurgique de Montcherand. 1992. ISBN 2-88028-054-0






Etablissement sidérurgique de Montcherand