

hinterlassen hätte. Der Phosphorgehalt in einigen Nägeln weist auf Erze verschiedener Herkunft hin. Sie wurden in Rennfeuern bei verschiedenen Prozeßbedingungen verarbeitet, was zu Luppen unterschiedlichen und inhomogen verteilten Kohlenstoffgehaltes führte. Die weitere Verarbeitung erfolgte dann in Schmiedefeuern, welche zum Erreichen der erforderlichen Temperaturen mit einer Luftzufuhr (Blasebälge) versehen waren.

Obwohl die Nägel der Römerschiffe von Mainz sehr unterschiedlich in ihren äußeren Formen und ihrem werkstoffkundlichen Aufbau sind, ist ihre Qualität aufgrund der erzielten Festigkeiten sehr hoch und übertrifft die für ihre Verwendung erforderlichen Werte.

EMMANUEL ABETEL · VINCENT SERNEELS

RECHERCHES SUR LA METALLURGIE DU FER
DANS LE CANTON DE VAUD, SUISSE
ANALYSE MULTIVARIEE DES SCORIES

Le site de Montcherand

Découvert lors des sondages de contrôle sur le tracé de l'autoroute Lausanne-Dijon, le site archéologique de Montcherand (Fig. 1) a été fouillé en été-automne 1983 par la Section Monuments Historiques et Archéologie du Département des Travaux Publics du Canton de Vaud (D. Weidmann 1984). Un groupe de neuf fours destinés à la réduction du minerai de fer, répartis sur une surface de 300 m² environ, a été mis au jour sur la bordure orientale d'une terrasse fluvio-glaciaire culminant à 580 m, dans une région fortement boisée: à quelques centaines de mètres, se trouve un gisement de minerai de fer sidérolithique relativement important (D. Aubert 1963). L'essentiel des niveaux archéologiques était constitué de scories mêlées de débris de fours. Ces structures forment un ensemble relativement modeste par rapport à celles découvertes à une dizaine de kilomètres dans la région du village de Ferreyres (P.-L. Pelet 1973), mais leur étude, entreprise en recourant à diverses techniques auxiliaires, peut être présentée comme un exemple de recherche pluridisciplinaire¹.

Le site a d'abord été reconnu par prospection magnétique. En raison du peu de matériel archéologique mis au jour par la fouille, la datation a dû être faite par examen dendrochronologique des charbons de bois utilisés pour le chauffage des fours ou, dans certains cas, à partir de dosages du carbone 14: des tentatives de mesures de la rémanence magnétique ont été faites, alors que les diverses essences de bois utilisées ont été déterminées. Plusieurs scories ont fait l'objet d'une étude géochimique.

La prospection magnétique

L'Institut de Géophysique de l'Université de Lausanne, a procédé à l'exploration préliminaire du périmètre concerné à l'aide d'un magnétomètre à protons. Deux zones présentant des caractéristiques

¹ Elle répond d'ailleurs aux souhaits mêmes de P.-L. Pelet (1974, 798) qui, en parlant des exploitations sidérurgiques, relevait: «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».

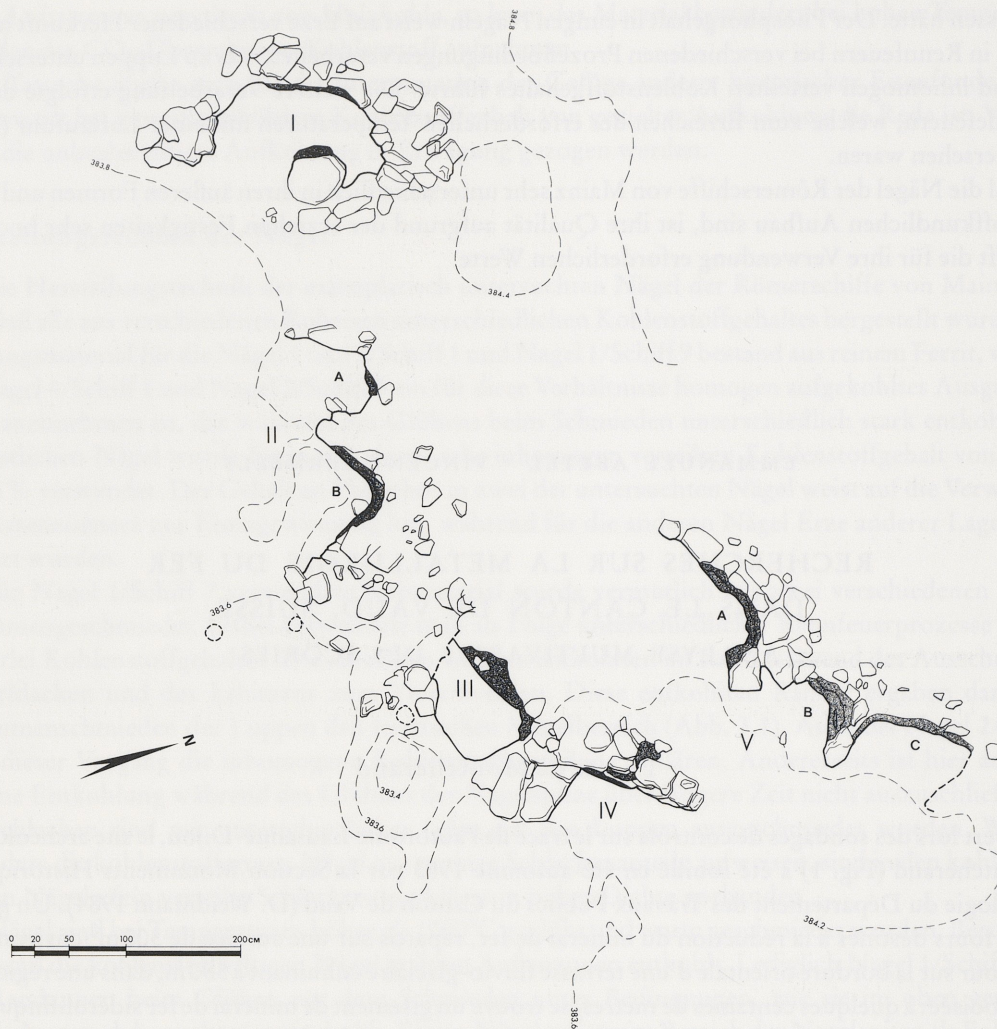


Fig. 1 Plan des fouilles de Montcherand (dessin C. Grand).

magnétiques anormales ont été mises en évidence (Fig. 2). Ces zones à fort gradient magnétique correspondent aux aires d'évidement des fours, les scories s'entassant devant ceux-ci lors des vidanges successives.

Les structures

La plupart des fours a été utilisée à plusieurs reprises avant son abandon, ce qui est attesté par une succession de revêtements intérieurs argileux. Il ne subsiste malheureusement que la base des fours qui devaient être en forme de dômes construits en pierres schisteuses d'origine morainique, liées à l'argile: les fours sont creusés directement dans les graviers de la terrasse et leur fond est parfois garni d'argile. A l'arrière de deux des installations, une aire de travail a été reconnue, sous forme d'une terrasse en creux où étaient encore visibles les traces des opérations de chargement du four, matérialisées par un mélange de charbon de bois et de minerai de fer.

Des fours doubles ont également été découverts; cette disposition particulière peut s'expliquer par leur utilisation en alternance, l'un étant remis en état pendant que l'autre fonctionnait (Pelet 1973, 159);

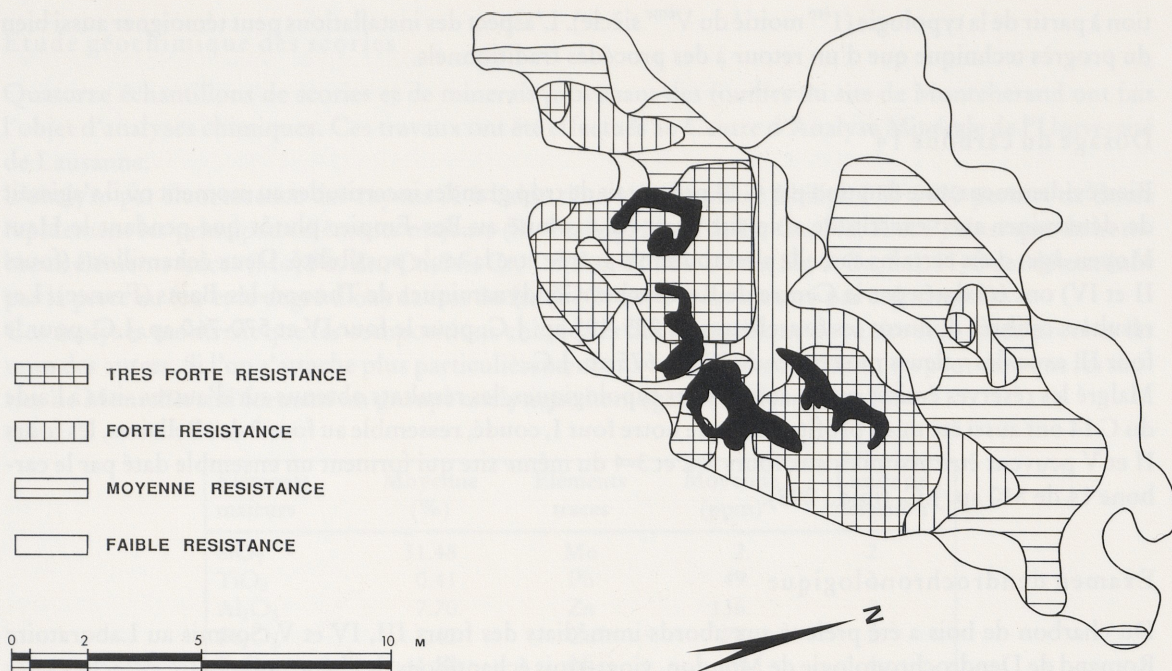


Fig. 2 Carte magnétique du site de Montcherand: en noir, implantations des fours (dessin M. Klausener).

l'orientation différente de l'axe du second four permet en outre de proposer un recuit de la loupe qui suivrait immédiatement sa première cuisson, le forgeron n'ayant qu'à effectuer une rotation d'un quart de tour pour introduire la masse métallique dans le second foyer (ibid., 161).

Datation du site (Tableau 1)

Sur ce type de site, les relations stratigraphiques sont souvent difficiles à établir en raison des remaniements réguliers des installations entre lesquels s'intercalaient des périodes d'abandon complet. Les procédés habituels de datation basés sur la céramique ou sur le recours à une typologie d'un autre ordre – celle des fours dans le cas présent – n'offraient que peu de possibilités. Les trouvailles matérielles se limitent à quelques tessons dont il est seulement possible de dire qu'ils remontent à la période du Haut Moyen-âge (céramique décorée à la molette des VI et VII^{ème} siècles ap. J.C.), tandis que toute chronologie reposant sur les variations de la forme des fourneaux s'est avérée aléatoire: nous en voulons pour preuve la comparaison entre les datations par dendrochronologie des morceaux de charbon de bois prélevés dans le four de Bossena I (609/610 ap. J.C.) et celle que Pelet (1973, 208) proposait pour cette même installa-

Four	IV	III	V	II	I
stratigraphie	1	2	3	4	5
dendrochronologie		609	609		
carbone 14	375			675	
rémanence magnétique ¹	525				
typologie des fours ²			510	510	510

Tableau 1 Données chronologiques concernant le site de Montcherand. Toutes les dates sont postérieures au début de notre ère.
¹ Fourchette 350 à 700, la moyenne figure ici à titre indicatif. – ² Datations C¹⁴ des fours des Bellaires.

tion à partir de la typologie (1^{ère} moitié du V^{ème} siècle). L'aspect des installations peut témoigner aussi bien du progrès technique que d'un retour à des procédés traditionnels.

Dosage du carbone 14

Bien évidemment, une datation par C 14 présentait de trop grandes incertitudes au moment où il s'agissait de déterminer avec exactitude si le site avait été exploité au Bas-Empire plutôt que pendant le Haut Moyen-âge: dans certains cas, elle s'est toutefois avérée être la seule possibilité. Deux échantillons (fours II et IV) ont été datés par le Centre de Recherches Géodynamiques de Thonon-les-Bains (France). Les résultats calibrés donnent les fourchettes de 255-495 ap. J.C. pour le four IV et 570-760 ap. J.C. pour le four II, avec des valeurs moyennes de 375 et 675 ap. J.C.

Malgré les réserves émises quant aux critères typologiques, les résultats obtenus sur d'autres sites à l'aide du C 14 ont aussi été mis à profit: alors que notre four I, coudé, ressemble au four 2 des Bellaires, les fours II et V peuvent être assimilés aux fours 1-2 et 3-4 du même site qui forment un ensemble daté par le carbone 14 de 510 ap. J.C. (ibid., 208).

Examen dendrochronologique

Du charbon de bois a été prélevé aux abords immédiats des fours III, IV et V. Soumis au Laboratoire Romand de Dendrochronologie de Moudon, vingt-trois échantillons de chêne purent être rattachés à des courbes de référence d'Allemagne du Sud: il n'existe pas encore de courbe pour le canton de Vaud. Des datations semblables furent obtenues à partir de matériel du site de Bossena prélevé seize ans plus tôt par P.-L. Pelet. Le bois des deux exploitations aurait été coupé en automne/hiver 609/610 ap. J.C.: faut-il imaginer la préparation de grandes quantités de bois au cours d'une campagne d'abattage qui aurait précédé les travaux sidérurgiques et qui aurait été destinée à l'approvisionnement contemporain des deux sites?

Mesure de la rémanence magnétique

Des prélèvements effectués dans le fond du four IV par le Laboratoire de Pétraphysique du Département de Minéralogie de l'Université de Genève, ont permis de procéder à des mesures de rémanence magnétique. Une fourchette allant de 350 à 700 ap. J.C. a été obtenue par comparaison avec la courbe étalon de la région parisienne. A l'heure actuelle, de telles mesures servent surtout à l'établissement de la courbe étalon régionale à partir de structures datées par d'autres procédés. En effet, la même courbe d'étalonnage ne peut convenir que pour une aire géographique donnée.

Détermination des essences de bois utilisées

2735 échantillons prélevés à Montcherand ont été examinés par le Laboratoire de Paléoethnobotanique du Département d'Anthropologie de l'Université de Genève: c'est principalement le chêne qui a été utilisé pour faire fonctionner ces fours: on ne relève la présence d'aulne que dans le four III; mais, comme c'est fréquemment le cas, ne serait-ce que pour l'allumage, pour lequel on recourrait même à l'utilisation de racines et de branchages encore verts, les ferriers semblent ne pas avoir hésité à utiliser, en petites quantités, d'autres essences telles que le hêtre, l'érable, le frêne, l'épine noire ou le noisetier.

Les résultats de Pelet (1973, 186) plaçaient le hêtre en tête (44% des morceaux examinés) et le chêne en seconde position (34%) mais ignoraient l'aulne. L'érable était également bien représenté (10,5%). Le peuplier, l'orme et les arbres fruitiers tels que le pommier et le poirier, répertoriés à Bellaires, Bossena ou Prin-Bois sont absents à Montcherand. De toute manière, le hêtre, autant que le chêne, avait les faveurs des forgerons en raison de son haut pouvoir calorifique.

Etude géochimique des scories

Quatorze 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 au Centre d'Analyse Minérale de l'Université de Lausanne.

L'analyse par fluorescence des rayons X à l'aide d'un spectromètre Philips PW 1400 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 (Mo, Pb, Zn, Cu, Ni, Cr, Co, Ag, Th, Bi, U, As, Sb, S, Ba, Sn). H₂O est déterminée par la perte au feu et le degré d'oxydation du fer (FeO/Fe₂O₃) est mesuré par colorimétrie.

Ces analyses montrent que les compositions chimiques des échantillons de ce site sont assez proches les unes des autres. Si l'on s'attache plus particulièrement aux seuls éléments traces, on peut dire que les scories de Montcherand forment un groupe analytique homogène (Tableaux 2 et 3).

Eléments majeurs	Moyenne (%)	Eléments traces	Moyenne (ppm)	Limite de détection
SiO ₂	31.48	Mo	2.	2.
TiO ₂	0.41	Pb	49.	3.
Al ₂ O ₃	7.70	Zn	136.	2.
Fe ₂ O ₃	3.42	Cu	75.	2.
FeO	41.58	Ni	13.	4.
FeO tot	44.65	Cr	549.	4.
MnO	2.32	Co	262.	2.
MgO	0.89	Ag	51.	3.5
CaO	7.21	Th	13.	4.5
Na ₂ O	0.21	Bi	9.	2.
K ₂ O	0.58	U	7.	2.
P ₂ O ₅	0.94	As	88.	4.
H ₂ O	0.68	Sb	2.	5.
		S	6.	2.5
		Ba	181.	9.
		Sn	0.	2.

Tableau 2 Analyses des scories de fer du site de Montcherand: moyennes pour 9 échantillons.

Eléments majeurs	Moyenne (%)	Eléments traces	Moyenne (ppm)	Limite de détection
SiO ₂	25.98	Mo	7.	2.
TiO ₂	0.36	Pb	54.	3.
Al ₂ O ₃	6.31	Zn	346.	2.
Fe ₂ O ₃	44.04	Cu	96.	2.
FeO	8.74	Ni	222.	4.
FeO tot	48.37	Cr	4.61	4.
MnO	2.53	Co	4.51	2.
MgO	0.59	Ag	43.	3.5
CaO	3.32	Th	11.	4.5
Na ₂ O	0.13	Bi	21.	2.
K ₂ O	0.23	U	5.	2.
P ₂ O ₅	0.78	As	222.	4.
H ₂ O	3.86	Sb	6.	5.
		S	39.	2.5
		Ba	275.	9.
		Sn	0.	2.

Tableau 3 Analyses des minerais de fer du site de Montcherand: moyennes pour 4 échantillons.

Lors de la fouille d'installations sidérurgiques, d'énormes quantités de matériaux (scories et minerai) sont généralement découvertes: ainsi à Montcherand il a été possible d'en conserver des volumes relativement importants. Mais dans tous les cas, l'archéologue se trouve dans l'obligation de procéder à un échantillonnage, problème auquel il est peu sensibilisé. Il nous paraît nécessaire d'insister sur l'importance de ce choix qui doit être, dans la mesure du possible, représentatif de toutes les catégories de matériaux présentes. Il faut aussi rappeler que la constitution de groupes analytiques de référence, basés sur un nombre suffisant de données, est essentielle et qu'il y a peu de choses à tirer d'analyses isolées. L'aspect quantitatif ne doit pas être négligé et l'estimation du volume ou du poids de scories présentes est également une donnée fondamentale pour la compréhension du site, surtout en l'absence d'installations sidérurgiques en place.

Des descriptions précises de ces trouvailles avec la mention des quantités et de leur répartition sur le terrain seraient indispensables. Malheureusement, ce vocabulaire descriptif fait actuellement défaut et il nous est encore impossible de proposer des critères d'appréciation.

Les scories de fer dans le Canton de Vaud

Alors que d'autres sites sidérurgiques qui présentaient un meilleur état de conservation et un matériel plus abondant avaient déjà fait l'objet d'une publication exhaustive, dans le cas de Montcherand, se présentait l'opportunité d'une démarche plus générale sur la métallurgie antique dans le Canton de Vaud. Le but d'une telle étude est de caractériser chimiquement les scories liées aux lieux de traitement du minerai et, au moyen de comparaisons, de tenter de rattacher aux sites de production, des scories trouvées dans d'autres endroits. L'examen de divers sites archéologiques nous a montré que l'on trouve des scories de fer dans deux types de contexte archéologique distincts: d'une part aux endroits où était traité le minerai (ferrière) et d'autre part sur les lieux d'utilisation du métal (habitation, village, etc.) où a pu avoir lieu un second traitement.

Les ferrières sont forcément liées aux gisements de minerai et donc à certaines formations géologiques susceptibles d'en contenir (C. Schmidt 1920). Ces sites sont généralement implantés à proximité immédiate de la mine; mais dans certains cas, en particulier lorsque l'approvisionnement en bois le rend nécessaire, le minerai a pu être transporté sur quelques kilomètres. Les ferrières sont caractérisées par la présence de fourneaux et surtout de grands crassiers (haldes) renfermant plusieurs mètres cubes de scories. Dans cette catégorie, en plus du site de Montcherand, ce sont les haldes des régions de Ferreyres et de Cuarnens (Pelet 1973) qui ont fourni les échantillons pour nos analyses. D'autres sites de ce type sont connus en Suisse, comme à Heiligkreuz près du gisement de fer de Sargans-Gonzen (SG) et naturellement dans le canton du Jura (A. Quiquerez 1871).

De nombreuses trouvailles de scories de fer en quantité restreinte ont été faites lors de fouilles archéologiques sur des sites où on ne connaît pas les fourneaux²; de plus, aucun minerai n'est disponible dans les environs immédiats. Les quantités découvertes n'étant absolument pas comparables à celles des ferrières dont nous venons de parler, nous pensons que ces trouvailles illustrent non pas un traitement du minerai, mais une opération de purification des loupes produites dans les ferrières. De telles scories sont connues en Suisse, sur les oppida du Mont-Vully (FR), du Mont-Terri (JU) et du Münsterhügel à Bâle, sur les refuges du Bas-Empire de Toos-Waldi (TG) et de Châtel-sur-Montricher (VD) ainsi que dans de nombreuses villae romaines (citons les découvertes faites pendant les cinq dernières années à Colombier [NE], Courlevon [FR] et Biberist [SO] et dans les établissements isolés de Motta Vallac [GR] et Morens [FR]). A Lousonna-Vidy, vicus romain dont une grande partie a été fouillée, aucune installation de traitement n'a

² Ce n'est qu'au cours de ce colloque que nous avons été rendus attentifs à l'existence de fondeurs itinérants qui, à la rigueur, auraient même été susceptibles d'installer leur bas-foyer pour une durée limitée à une seule opération

sidérurgique: cet élément, s'il explique dès lors l'absence de structures archéologiques, n'infirme en rien l'idée d'un deuxième traitement du minerai, bien au contraire.

pu être mise en relation avec les scories découvertes en plusieurs points du site. La situation est la même pour les vici de Marsens (FR) et de Nyon (VD), ainsi qu'à Avenches (VD), capitale de l'Helvétie romaine. Il nous semble donc possible d'étudier la commercialisation du produit des mines de fer par le biais des analyses chimiques de scories. En caractérisant chimiquement les scories des différents sites de traitement du minerai, il sera possible de rattacher à l'un ou à l'autre les scories découvertes sur les »sites d'utilisation«.

L'examen d'échantillons de scories bien datées archéologiquement nous donnerait prise sur l'évolution du marché au cours du temps; malheureusement, nous avons vu à propos du site de Montcherand que les problèmes de datation des ferrières sont difficiles à résoudre. Sur les »sites d'utilisation« les datations devraient être plus précises, mais, de par leur nature de déchets, les scories sont souvent retrouvées dans des niveaux de remblais où la chronologie n'est pas facile à établir.

Etat de la recherche dans le Canton de Vaud

Pour le Canton de Vaud, nous disposons déjà de premiers résultats qui illustrent cette démarche. Il faut souligner ici que cette recherche n'est encore qu'à ses débuts et que bien des points restent en suspens. Actuellement, nous disposons d'environ cent cinquante analyses réparties de manière très inégale entre une dizaine de sites ou groupes de sites.

Dans la catégorie des ateliers de traitement du minerai, nous avons travaillé sur Montcherand, sur les halles de la région de Ferreyres et sur celles de Cuarnens. Quelques analyses, encore trop isolées, proviennent de la région au Nord-Ouest du lac de Neuchâtel (commune de Provence) où les sites sont encore mal connus. Toutes ces localités se trouvent au pied du Jura dans une zone où il existe de nombreuses petites poches de minerai de fer sidérolithique. A Cossonay, se trouve vraisemblablement une ferrière, bien que ce site soit plus éloigné des gisements potentiels. Les scories provenant des fouilles de Lousonna-Vidy, d'Avenches, d'Yverdon et du Mont-Vully correspondent aux »sites d'utilisation« (Fig. 3).

Les comparaisons sont faites par analyse multivariée (J. C. Davis 1973) sur la base des analyses en fluorescence des rayons X. Le dendrogramme que nous proposons (Fig. 4) est construit pour 126 échantillons en tenant compte de tous les éléments traces dosés dans les scories. Il exprime le degré de parenté chimique entre les différents échantillons et permet de mettre en évidence des regroupements. A partir de ce document, on peut tenter de faire une interprétation archéologique, mais il faut souligner que si le dendrogramme est cohérent, bien des points de détail trouvent difficilement une explication dans l'état actuel de nos travaux.

Les échantillons qui sont rejetés à l'extérieur du dendrogramme correspondent à des scories liées au travail d'autres métaux, en l'occurrence le cuivre et le plomb. Il est intéressant de constater que les scories et les minerais de fer d'un même site ne se trouvent jamais côte à côte sur le dendrogramme. Au contraire, ce sont plutôt les minerais d'origines différentes qui se regroupent entre eux. Ceci montre clairement que le traitement métallurgique altère les teneurs de certains éléments traces au moins. Cette démarche n'est donc pas appropriée pour mettre en relation un minerai avec les scories qui en sont issues. Par contre, les scories d'une même ferrière sont généralement rassemblées. L'interprétation de ces groupes reste complexe, mais il est possible d'en tirer quelques enseignements:

Groupe 1 (»Ferreyres 1«): Ce groupe comprend quatre échantillons provenant de localités différentes de la région de Ferreyres et deux autres de Cossonay. Plusieurs analyses de scories d'Avenches (50% des échantillons de ce site) et de Lousonna-Vidy (45%) se rattachent à ce groupe.

Groupe 2 (»Vidy fosse 32«): Bien que peu nombreux, les échantillons de ce groupe sont intéressants car ils proviennent tous d'un même contexte archéologique, à savoir une fosse du vicus de Lousonna-Vidy. Cet ensemble basé sur le chimisme recouvre donc une réalité archéologique.

Groupe 3 (»Lac de Neuchâtel«): Ce groupe est présent à Lousonna-Vidy (30%), à Avenches (20%) et surtout au Mont-Vully (85%). Nous n'avons pas encore assez d'indices pour fixer définitivement la localisation des sites d'extraction du minerai. Il est vraisemblable que ceux-ci doivent être recherchés dans la région située au Nord-Ouest du lac de Neuchâtel (échantillons de Provence et d'Yverdon).

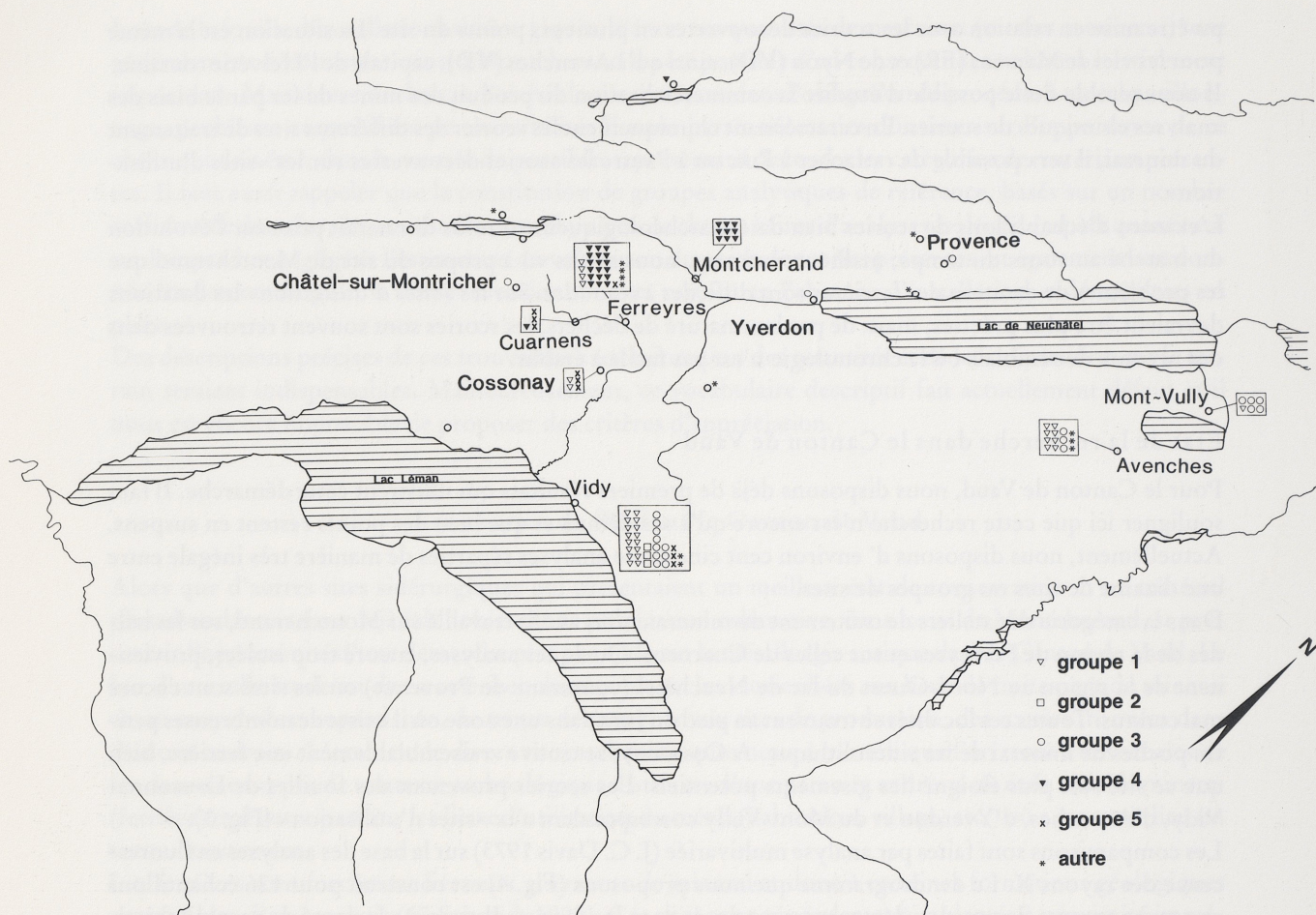


Fig. 3 Carte de répartition des échantillons de scories analysés: les symboles renvoient aux groupes définis sur la base du dendrogramme de la fig. 4 (dessin P. Friedemann). – M = 1:750 000.

Group 4 («Ferreyres 2»): Ce groupe rassemble la grande majorité des haldes de la région de Ferreyres ainsi que celle de Montcherand. Par ailleurs, ce dernier site s'individualise très bien lorsque l'on tient compte des teneurs en MnO qui y sont beaucoup plus élevées. Pour l'instant, aucune exportation ne peut être rattachée à ce groupe.

Group 5 («Cossonay-Cuarnens»): Le groupe 5 est constitué de trois scories de la région de Cuarnens, trois de Cossonay et une de Ferreyres. Nous pensons que la mine se trouve à proximité du village de Cuarnens et que dans les autres cas, le minerai a été transporté sur quelques kilomètres. Trois scories de Vidy s'intègrent à cet ensemble.

Considérations chronologiques

Les données chronologiques (Fig. 5) concernant les objets que nous avons étudiés sont peu nombreuses. Aux problèmes de la datation archéologique que nous avons évoqués, s'ajoute le fait que les sites étudiés ne présentent qu'exceptionnellement des témoignages d'époques vraiment distinctes. Dans cette partie de la Suisse, les occupations protohistoriques, du Haut et du Bas-Empire ne sont que rarement superposées. Il y a donc peu d'endroits qui permettent à eux seuls de saisir une évolution du marché du fer dans le temps: quelques observations peuvent néanmoins être esquissées à ce sujet.

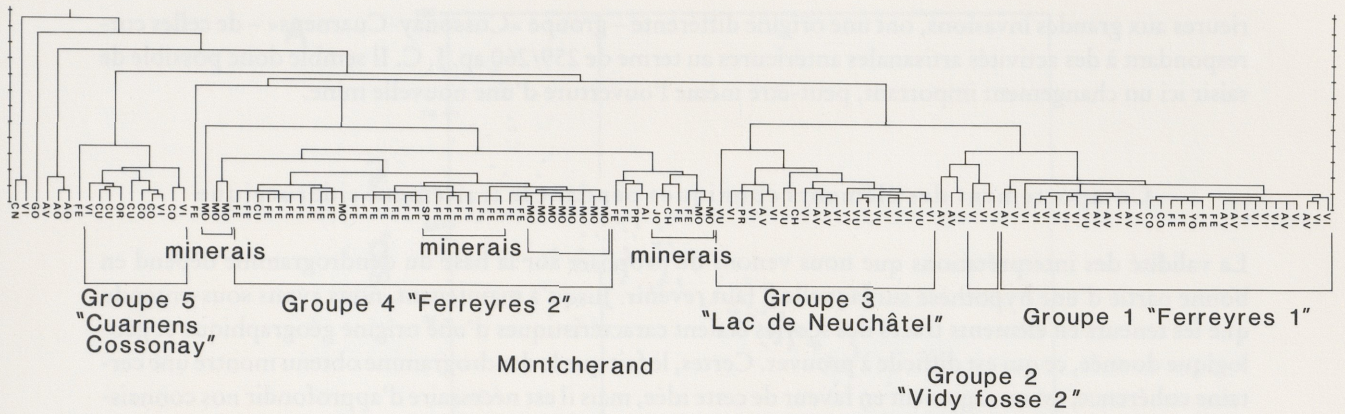


Fig. 4 Dendrogramme exprimant le degré de parenté chimique entre les échantillons (126). Lieux de trouvaille des échantillons: AI Aine (France). – AO Vallée d'Aoste (Italie). – AV Avenches. – CH Châtel-sur-Montricher. – CN Concise. – CO Cossonay. – CU Cuarnens. – FE Ferreyres. – GO Goumoens-le-Jux. – JO Vallée de Joux. – MO Montcherand. – PR Provence. – SP Lac de Saint-Point. – VI Lousonna-Vidy. – VU Mont-Vully. – YO Yonne (France). – YV Yverdon (dessin P. Friedemann).

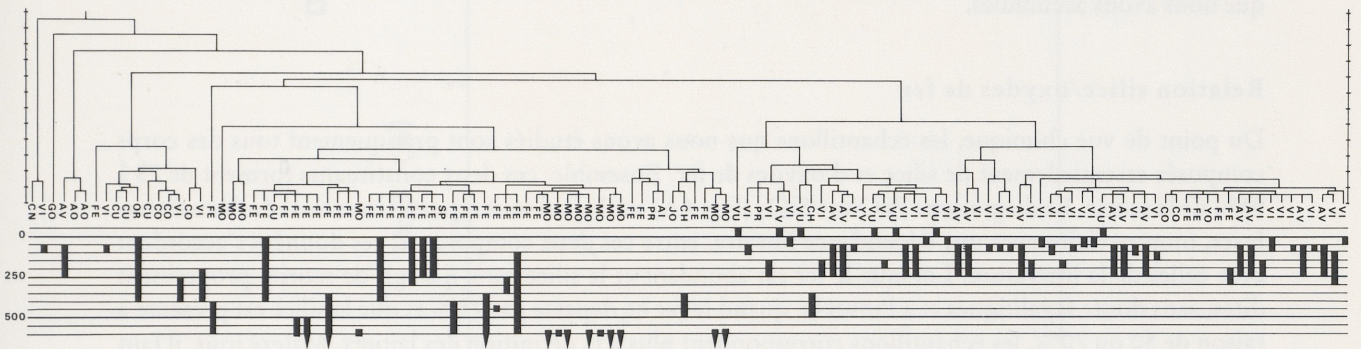


Fig. 5 Données chronologiques concernant les échantillons analysés. La fourchette s'étend de 50 av. J.-C. à 600 ap. J.-C. La liste des abréviations des lieux de trouvaille est donnée à la fig. 4 (dessin P. Friedemann).

Quelques remarques préliminaires s'imposent à propos des échantillons qu'il a été possible de dater: la plupart des scories examinées proviennent de complexes antérieurs aux grandes invasions. Le canton de Vaud étant situé en retrait du limes rhénan, il présente peu de sites fortifiés du Bas-Empire, et dans l'état actuel des recherches, peu d'établissements civils de cette période y ont été mis au jour: le vicus de Lousonna-Vidy présente toutefois des signes de reprise au IV^{ème} siècle ap. J. C. Le site de Montcherand, auquel nous n'avons malheureusement pu rattacher aucune exportation, paraît se rapporter plus au Haut Moyen-âge qu'au Bas-Empire³. La région de Ferreyres, exploitée à l'époque celtique déjà, voit se succéder 13 ou 14 ateliers jusqu'à l'époque moderne (Pelet 1973, 184), mais nous ne disposons généralement pas d'informations chronologiques précises pour les échantillons analysés.

L'oppidum helvète du Mont-Vully se fournit presque exclusivement à la source dite «Lac de Neuchâtel». La ville romaine d'Avenches qui lui succède en quelque sorte continue d'utiliser le minerai de cette région, tout en diversifiant ses approvisionnements («Ferreyres 1», etc.). A Lousonna-Vidy, le marché est également ravitaillé par plusieurs sources pendant le Haut-Empire («Ferreyres 1», «Lac de Neuchâtel», etc.). Il est intéressant de relever que les scories qui sont susceptibles de provenir de couches posté-

³ 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 une des rési-

dences des souverains du royaume de Bourgogne transjurane.

rieures aux grandes invasions, ont une origine différente – groupe »Cossonay-Cuarnens« – de celles correspondant à des activités artisanales antérieures au terme de 259/260 ap. J. C. Il semble donc possible de saisir ici un changement important, peut-être même l'ouverture d'une nouvelle mine.

Comportement des éléments chimiques pendant le traitement sidérurgique

La validité des interprétations que nous venons de proposer sur la base du dendrogramme dépend en bonne partie d'une hypothèse sur laquelle il faut revenir. Jusqu'à maintenant, nous avons sous-entendu que les teneurs en éléments traces des scories étaient caractéristiques d'une origine géographique et géologique donnée, ce qui est difficile à prouver. Certes, le fait que le dendrogramme obtenu montre une certaine cohérence, est un argument en faveur de cette idée, mais il est nécessaire d'approfondir nos connaissances du comportement des éléments chimiques et en particulier des traces, au cours du traitement métallurgique. Dans ce domaine, des analyses faites sur le matériel obtenu lors de reconstitutions expérimentales de traitement du minerai, fourniraient certainement des données précises: à cet effet nous comptons utiliser les quantités importantes de minerai qui ont été prélevées à Montcherand. En attendant de pouvoir procéder à de tels essais, nous avons entamé une réflexion à partir des résultats analytiques que nous avons accumulés.

Relation silice/oxydes de fer

Du point de vue chimique, les échantillons que nous avons étudiés sont pratiquement tous des corps composés essentiellement de silice et d'oxydes de fer. Ensemble, ces deux constituants forment de 75 à 95% de la scorie. Le diagramme $\text{FeO tot}/\text{SiO}_2$ (Fig. 6A) sur lequel sont reportés tous nos résultats d'analyses, montre clairement une dépendance linéaire, entre ces deux composants; ces données s'accordent avec celles de la littérature. Lorsque le fer est abondant et la silice rare, il s'agit de scories proprement dites, sans doute fayalitiques et à l'inverse, quand le fer ne dépasse pas 25% et que la silice est présente à raison de 50 ou 70%, les échantillons correspondent plus à la définition des laitiers. Malgré tout, il faut souligner qu'il n'est pas toujours facile de distinguer ces deux catégories par la simple observation macroscopique. La relation entre l'aspect extérieur et la composition chimique est en fait, très complexe.

Les éléments majeurs

Les autres éléments majeurs, MgO , TiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O , K_2O et dans une moindre mesure P_2O_5 et CaO , semblent également dépendants des teneurs en silice (et donc en fer). Seul l'oxyde de manganèse, MnO (Fig. 6B), présente un comportement différent de ce point de vue.

Cette interdépendance que nous constatons pour la plupart des éléments majeurs présents dans les scories nous paraît importante: elle montre que pour des minerais qui sont proches du point de vue de leur nature géologique, les différences de compositions chimiques observées dans les scories sont sans doute plus dues aux températures et aux conditions de formation qu'aux faibles différences de chimisme entre les minerais eux-mêmes. C'est donc seulement dans le cas de minerais assez différents que les éléments majeurs permettront une discrimination en fonction de l'origine géographique. Dans notre cas, où 90% des échantillons résultent du traitement de minerais de type sidérolithique, les éléments majeurs reflètent essentiellement les conditions de traitement et de formation des scories.

Les éléments traces

Les éléments traces (Fig. 6C: exemple du Ba) semblent offrir une alternative à ce problème. Les analyses que nous avons pratiquées, montrent qu'ils ont en général un comportement indépendant des teneurs en silice ou en oxydes de fer.

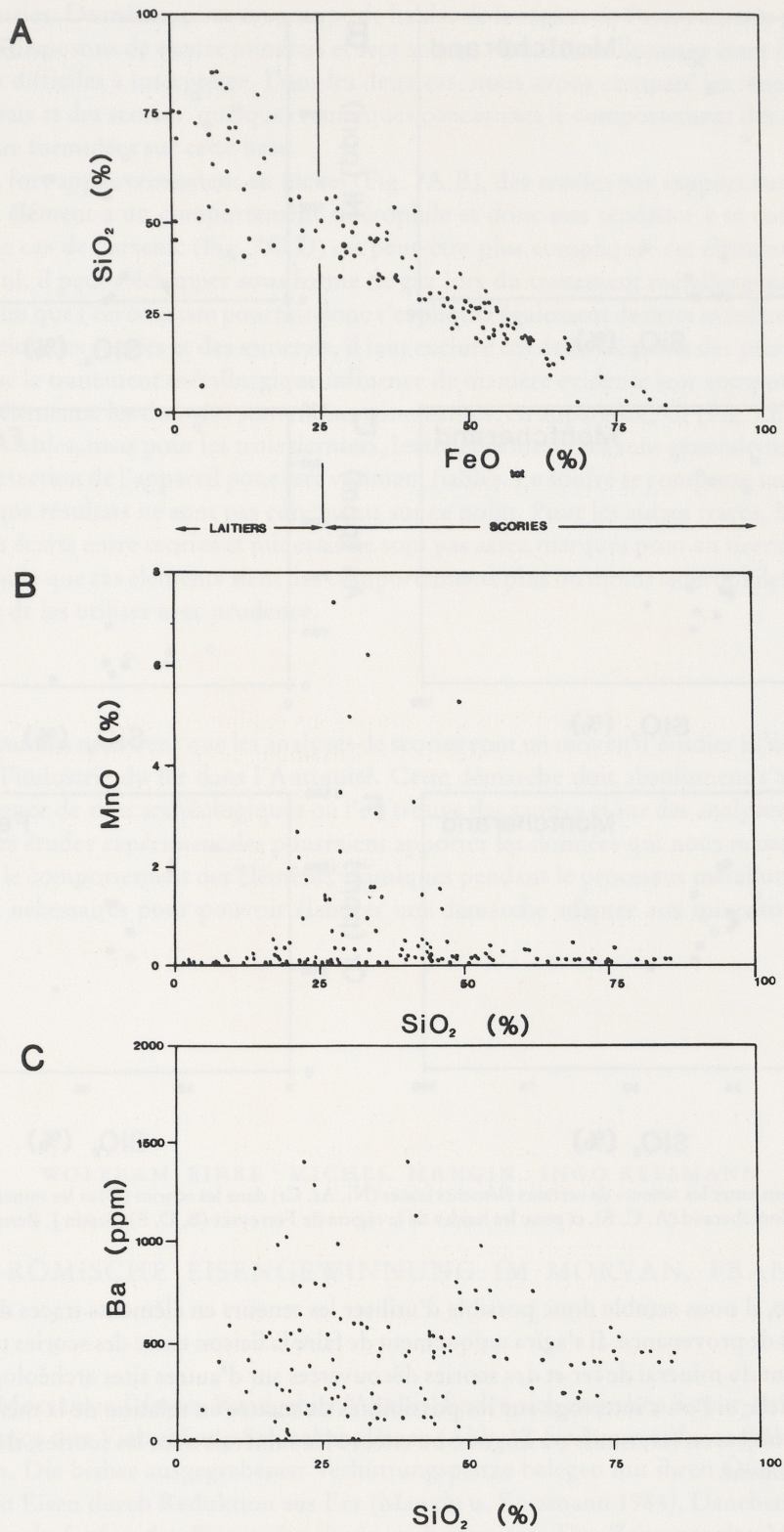


Fig. 6 A Dépendance linéaire SiO₂/FeO tot. – B Teneurs en MnO. – C Teneurs en Ba. – Les trois diagrammes correspondent à l'ensemble des échantillons analysés (dessin J. Bernal).

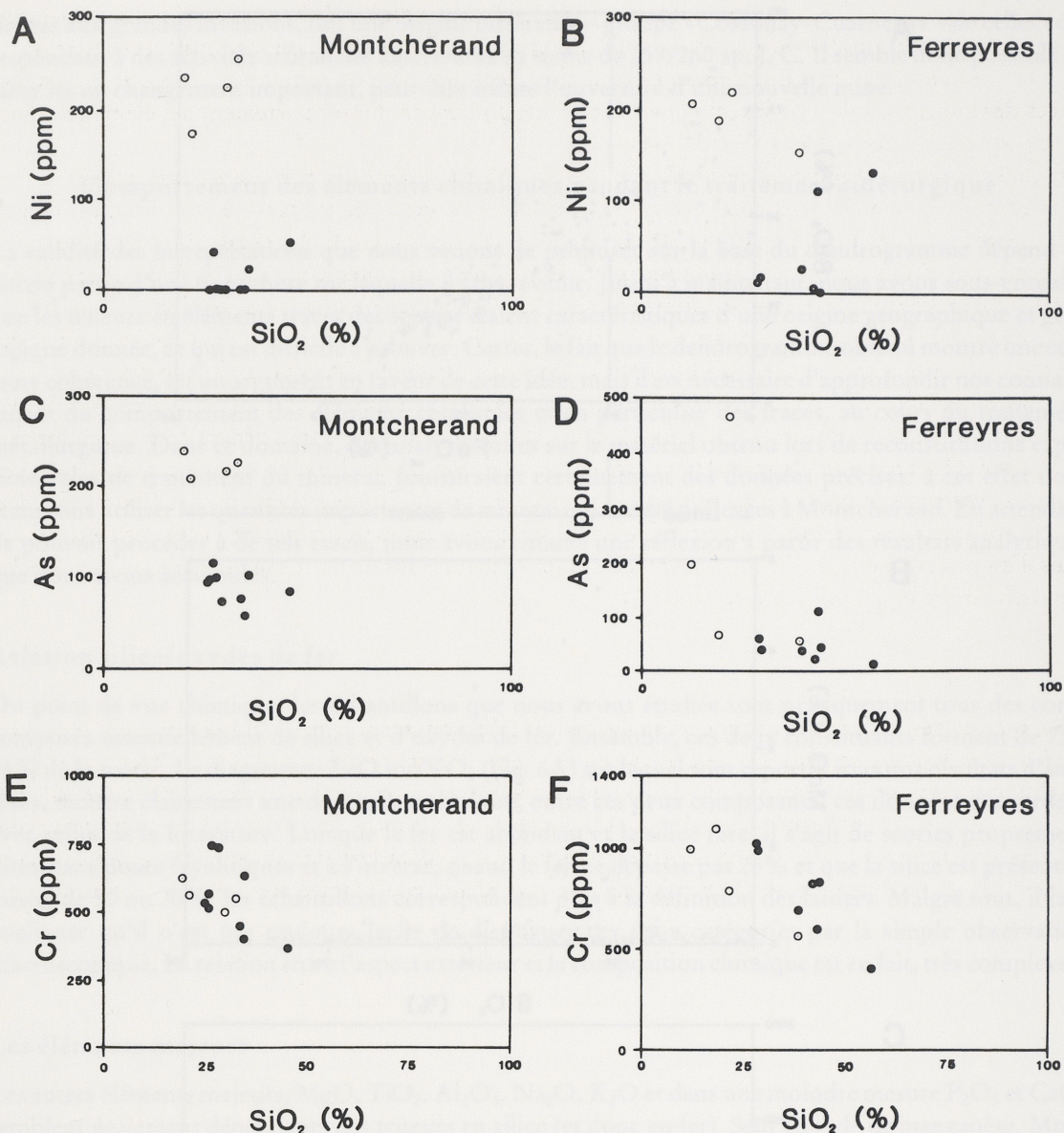


Fig. 7 Comparaisons entre les teneurs de certains éléments traces (Ni, As, Cr) dans les scories (●) et les minerais (○) pour le site de Montcherand (A, C, E), et pour les haldes de la région de Ferreyres (B, D, F) (dessin J. Bernal).

Pour cette raison, il nous semble donc possible d'utiliser les teneurs en éléments traces des scories pour tenter des études de provenance. Il s'agira uniquement de faire la liaison entre des scories trouvées sur des sites de traitement du minerai de fer et des scories découvertes sur d'autres sites archéologiques éloignés des mines. Au-delà, si l'on s'interroge sur les possibilités de mettre en relation de la même manière des scories avec des objets en fer, outils ou lingots, ou encore les minerais avec les scories, il convient d'être extrêmement prudent.

Relation scories/minerai

Concernant cette dernière démarche, nous disposons néanmoins de quelques données qui peuvent faire avancer les recherches. Pour le site de Montcherand, nous avons pu analyser quatre échantillons de mine-

rai et neuf de scories. De même, pour un groupe de haldes de la région de Ferreyres très proches les unes des autres, nous disposons de quatre minerais et sept scories. Cet échantillonnage étant fort restreint, les résultats restent difficiles à interpréter. Dans les deux cas, nous avons comparé les teneurs en éléments traces des minerais et des scories: quelques remarques concernant le comportement des éléments chimiques peuvent être formulées sur cette base.

On constate un fort appauvrissement en nickel (Fig. 7A.B), des scories par rapport aux minerais. Ceci montre que cet élément a un comportement sidérophile et donc une tendance à se concentrer dans le métal extrait. Le cas de l'arsenic (Fig. 7C.D) est peut-être plus compliqué: cet élément ayant un comportement volatil, il peut s'échapper sous forme de gaz lors du traitement métallurgique. L'appauvrissement des scories que l'on constate pourrait donc s'expliquer également de cette manière. Si l'on cherche à mettre en relation des scories et des minerais, il faut exclure ces deux éléments des procédures de comparaison puisque le traitement métallurgique influence de manière évidente leur comportement.

Pour les autres éléments, les données sont moins concluantes: en apparence, Cr (Fig. 7E.F), Ag, Ba, Th, Bi et U, restent stables, mais pour les trois derniers, les teneurs mesurées sont généralement trop proches des limites de détection de l'appareil pour être vraiment fiables. Le soufre se comporte sans doute comme l'arsenic, mais nos résultats ne sont pas concluants sur ce point. Pour les autres traces, Mo, Pb, Zn, Cu, Sn, Sb et Co, les écarts entre scories et minerais ne sont pas assez marqués pour en tirer des conclusions, mais il est probable que ces éléments aient des comportements plus ou moins sidérophiles, il nous semble donc nécessaire de les utiliser avec prudence.

Conclusion

Ces premiers résultats montrent que les analyses de scories sont un moyen d'étudier à l'échelle régionale, la structure de l'industrie du fer dans l'Antiquité. Cette démarche doit absolument s'appuyer sur une bonne connaissance de sites archéologiques où l'on trouve des scories et sur des analyses en nombre suffisant. Seules des études expérimentales pourraient apporter les données qui nous manquent pour connaître en détail le comportement des éléments chimiques pendant le processus métallurgique. Ces connaissances sont nécessaires pour pouvoir élaborer une démarche adaptée aux minerais et surtout, aux objets en fer.

WOLFRAM BIRKE · MICHEL MANGIN · INGO KEESMANN

GALLO-RÖMISCHE EISENGEWINNUNG IM MORVAN, FRANKREICH

Im nördlichen Morvan und dessen Randgebiet (Auxois) finden sich zwischen Semur-en-Auxois, Saulieu und Ste. Magnance eine Vielzahl von Schlackenplätzen (Abb. 1). Sie lassen auf eine frühere Eisenmetallurgie schließen. Die bisher ausgegrabenen Verhüttungsplätze belegen mit ihren Öfen und Halden die Gewinnung von Eisen durch Reduktion aus Erz (Mangin u. Keesmann 1984). Daneben sind zusätzlich weiterverarbeitende Stufen der Eisentechnologie nachzuweisen. Der Zeitraum der Metallgewinnung und Verarbeitung umfaßt die gallo-römische bis merowingische Periode. Die Altersstellung der einzelnen Schlackenplätze ist noch fraglich. Einzelne C^{14} -Datierungen weisen darauf hin, daß die Verhüttung im Bereich der Lagerstätten bis ins hohe Mittelalter reicht und sich erst später in die Täler verlagerte. Für