

Étude des scories

Objektyp: **Chapter**

Zeitschrift: **Cahiers d'archéologie romande**

Band (Jahr): **54 (1992)**

PDF erstellt am: **01.09.2024**

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

CHAPITRE IV

ÉTUDE DES SCORIES¹

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 instant². 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 fabriqués³ –: 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 avantagement 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 ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	FeO	TiO ₂	MnO	MgO	P ₂ O 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, p. 283
Dudelange	19,38	10,69	9,93	8,00	47,74	-	0,50	1,98	3,60	W. SCHMID, 1932, p. 45(211)
Erzberg	23,44	4,70	7,12	6,03	46,00	0,33	9,28	1,78	-	W. SCHMID, 1932, p. 8(174)
Windischgrätz	20,72	1,96	3,85	10,33	55,72	0,27	3,38	1,85	-	M. BARTUSKA et R. PLEINER, 1968, p. 101
Hüttenberg	21,48	2,54	1,99	12,62	55,39	-	2,46	1,33	-	
Mühlthal 129a	9,28	1,65	1,80	22,37	53,40	-	0,36	0,32	0,47	
Mühlthal 129b	8,18	1,20	0,79	37,35	43,55	-	0,20	0,08	0,41	
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 (la table 2 portant deux fois le CuO (n° 18 et 20), le n° 18 se lira CaO)
	68,70	13,80	2,00	6,30	4,70	-	0,50	1,00	0,35	
	13,70	4,10	0,80	7,30	38,50	-	1,50	0,30	0,44	
	20,40	7,40	0,90	5,80	49,00	-	1,90	0,40	0,30	
	30,40	8,45	7,60	9,90	29,70	-	1,89	2,20	0,25	E. PLOECKINGER et alii., 1964, pp. 26, 27 et 29
	27,90	3,33	7,90	8,70	36,10	-	4,70	1,40	0,19	
	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., 1973, p. 43, tabl. 5
	30,00	14,00	16,00	-	23,20	-	0,80	2,60	4,10	
	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 Fe₂O₃ 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 Windischgrätz 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 une forte présence de magnétite (ibid. p. 99), cette problématique d'une extrême importance échappant toutefois à notre propos⁴.

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, P₂O₅ 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 SiO₂ et, sauf pour l'un d'entre eux, en Al₂O₃.

Les échantillons de Mühlthal aux teneurs en SiO₂ 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 Fe₂O₃), 6,8% de CaO, 6,6% de SiO₂, 0,48% de Al₂O₃, 4,25% de MnO, 0,4% de MgO, 0,026% de P₂O₅ 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 SiO₂, 4% de Al₂O₃, 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 Fe₂O₃), 4,63% de CaO, 10,5% de SiO₂, 7% de Al₂O₃, 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 fondamentales⁵. 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 mesures⁶.

Relevons que souvent les fouilleurs ne rencontrent que quelques scories éparses dans des niveaux remaniés, et qu'il serait difficile de les commenter longuement⁷.

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-fourneau⁸, le groupe D à celles du raffinage dans le bas-foyer⁹.

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 fer¹⁰.

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 Erzeugungstätten...» (G. SPERL, 1980, p. 15)

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

¹⁰ «Oft finden sich an Schmiedepätzen hocheisenhaltige 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 calottes¹¹.

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 éparpillées 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 boursoufflé, 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 subi¹⁴, 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 principal¹⁵; 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 (...) Schlacken Kuchen (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 n° 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 n° 7 (Photos IAHA).

b) vue de dessous



2.2.1. Scories

N°	Description	Provenance Bas-fourneau				Remarques	Section polie	Lame mince	Rayons X
		I	IIb	V	site				
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 Montcherand¹⁶

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				Remarques	Section polie	Lame mince
		I	IIb	V	site			
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)	×	×

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 Suisse¹⁷.

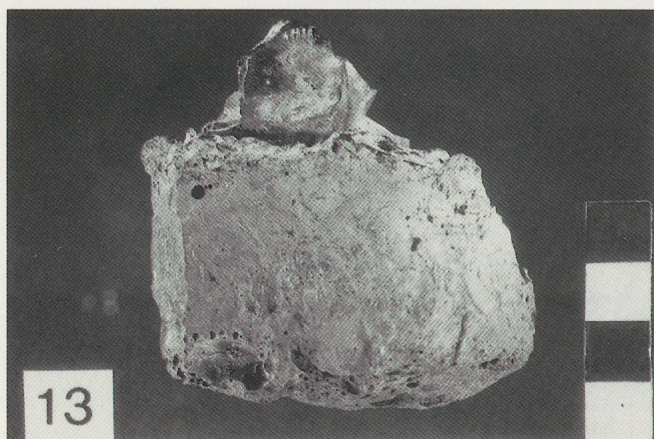
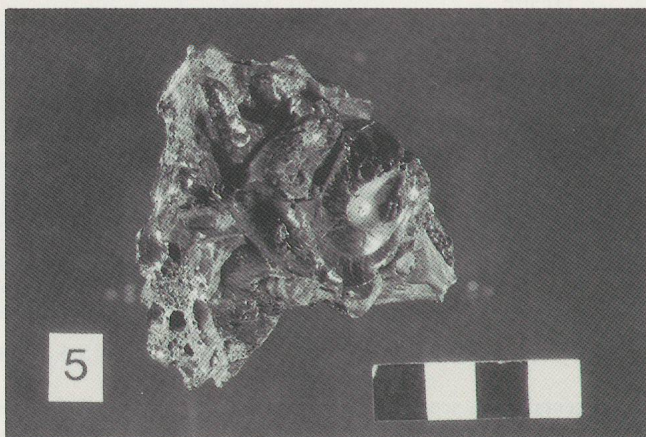
¹⁶ Nous remercions V. SERNEELS d'avoir procédé pour nous à cette détermination.

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



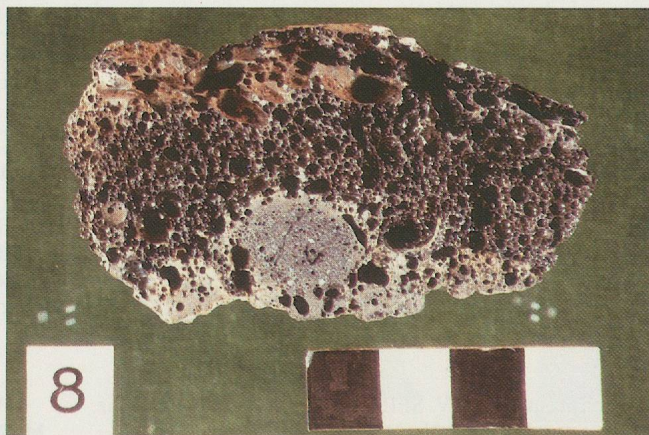
◀ Fig. 32 Scorie coulée provenant du
bas-fourneau V - échantillon n° 9.
Echelle 1:1,5
(Photo MHAVD).

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).



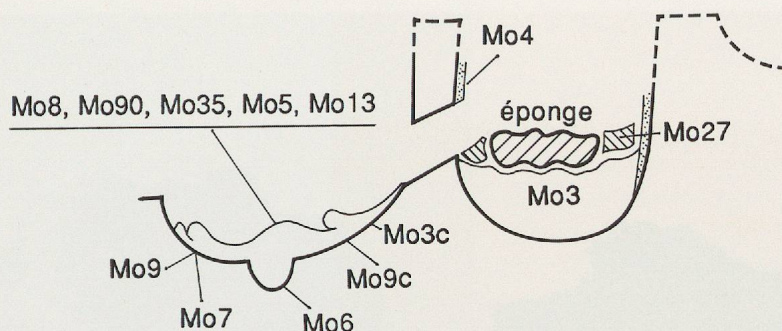


Fig. 36 Répartition schématique des scories par rapport aux bas-fourneaux (Dessin IAHA).

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 CO₂ est dosé séparément par coulométrie, H₂O a été déterminée par la perte au feu, le degré d'oxydation du fer FeO/Fe₂O₃ 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 fer¹⁹.

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.

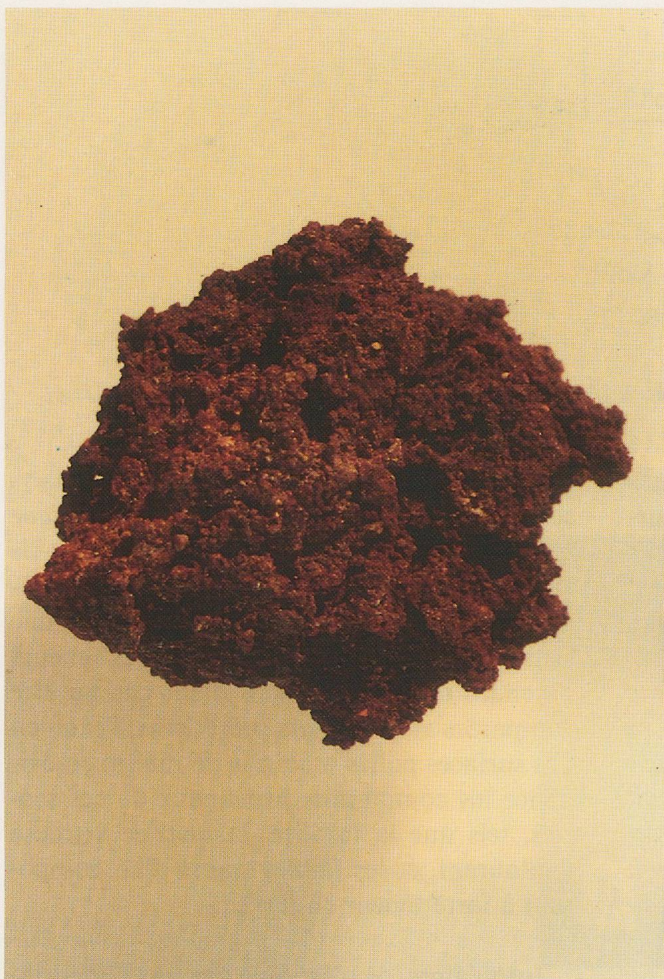


Fig. 37 Scorie formée à proximité de l'éponge - échantillon n° 3.
Echelle 1:1,5
(Photo MHAVD).

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

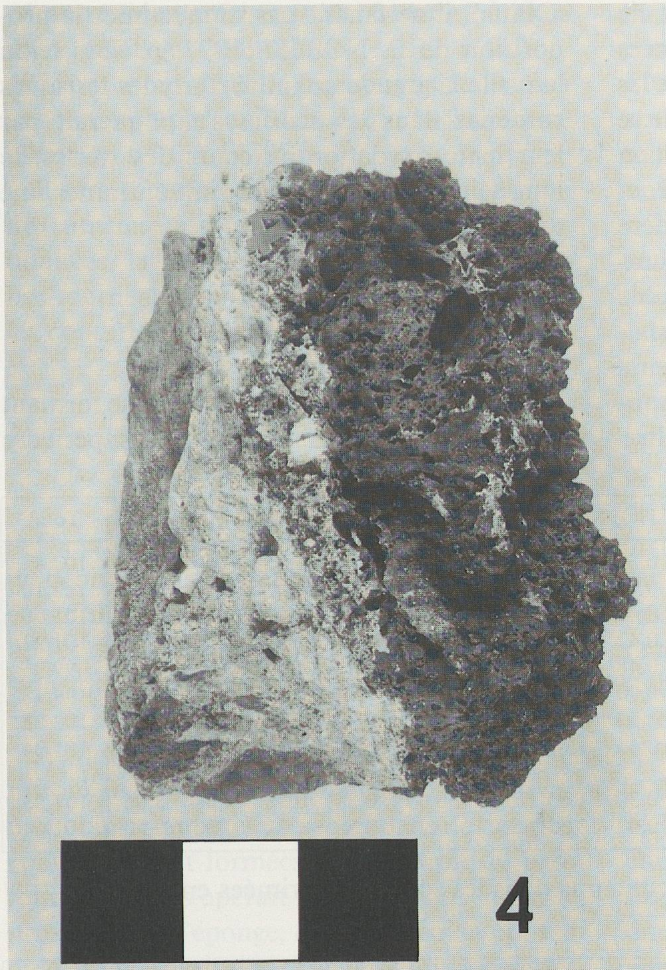
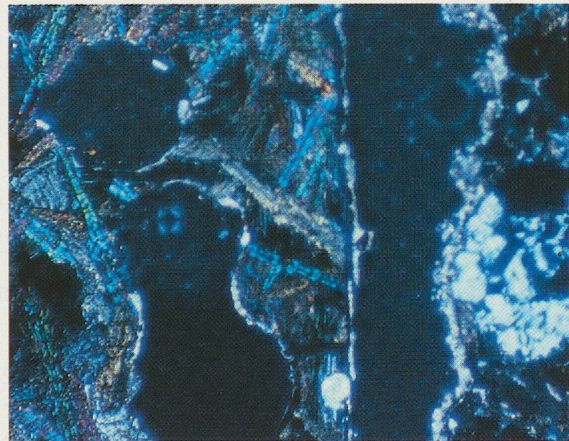


Fig. 38a Paroi de bas-fourneau et scorie attenante provenant de IIB - échantillon n° 4 (Photo IAHA).

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 fer²⁰; contrairement à leurs collègues de Bellaires I²¹, 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 uns 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'espérons, 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 soufre²².

3.1.1. Températures atteintes

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

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	FeO	Fe	TiO ₂	MnO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O+	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'Al₂O₃, le CaO, le K₂O et le MgO (H. SCHMID, 1977, p. 22), tandis que dans certains cas on attribue l'augmentation de la teneur en SiO₂ 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 diamantée²⁵: 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			Remarques
		IIb	V	site	
27	Composé gris		×		se serait formé à l'intérieur du bas-fourneau
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

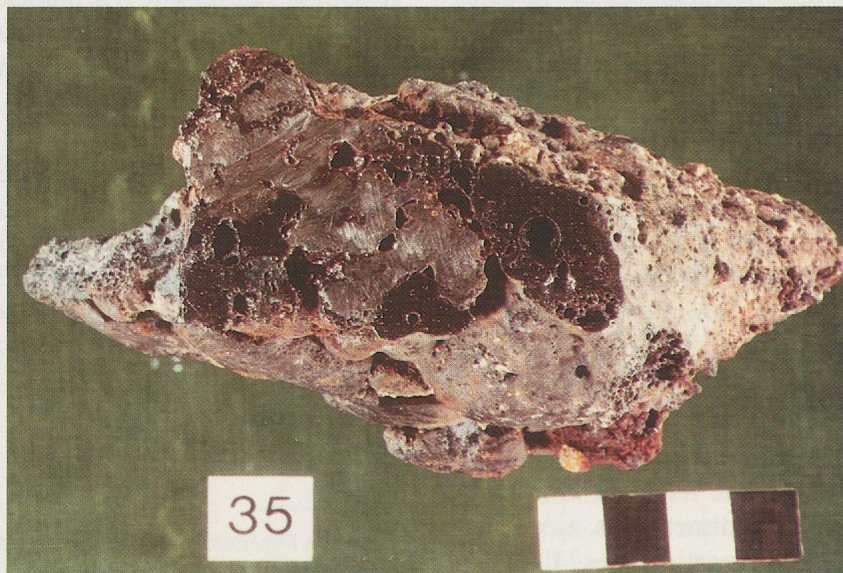


Fig. 39a à c Nodules de fer formés à proximité des éponges et provenant des bas-fourneaux V - échantillons n° 27, 35 et 90 (Photos IAHA).

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃ tot	TiO ₂	MnO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O 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.

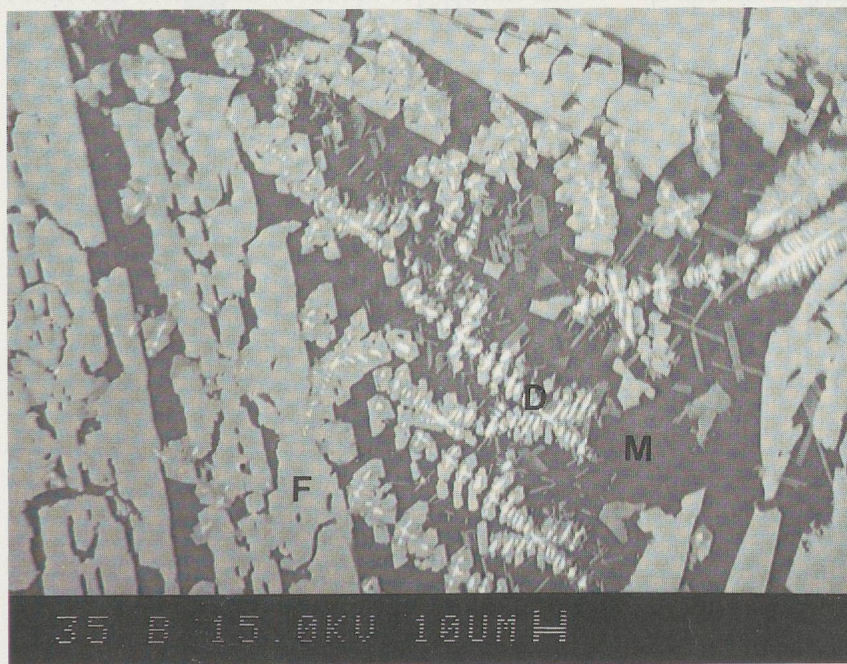


Fig. 40 Image obtenue par observation de l'échantillon n° 35 au microscope électronique.

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).

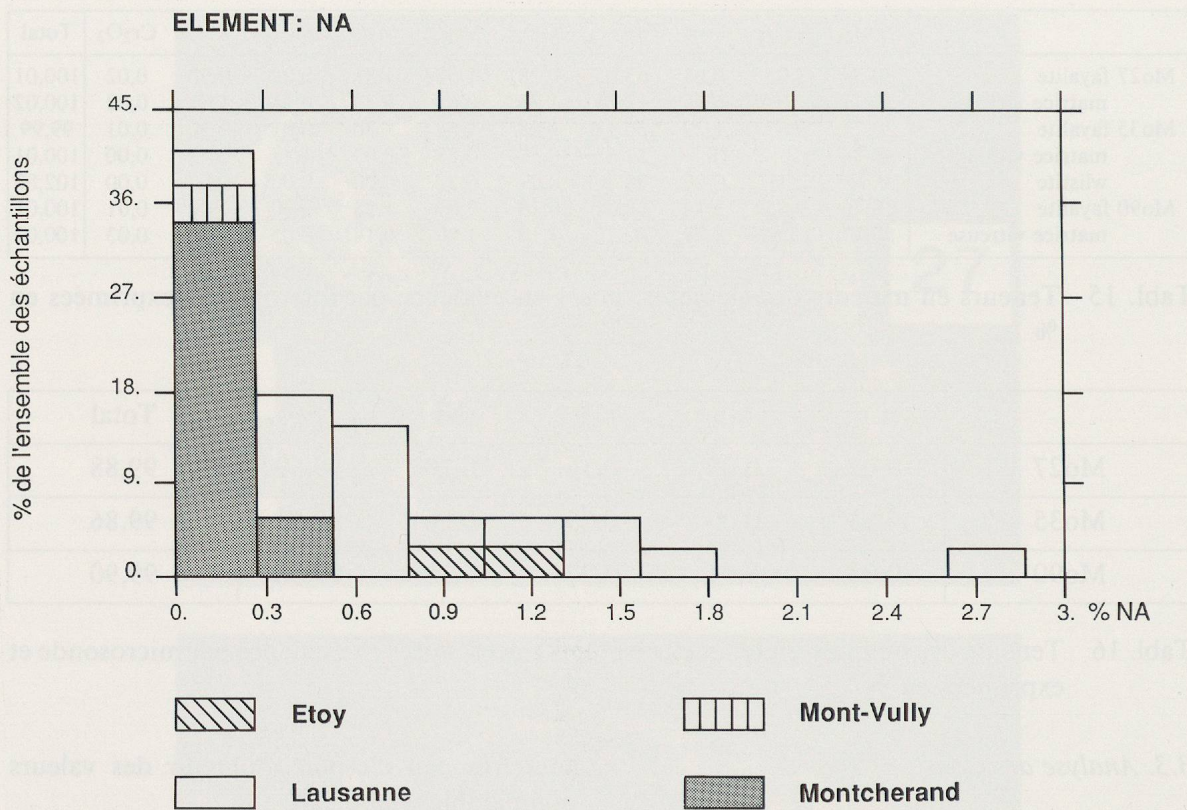


Fig. 41a Histogramme de l'élément sodium (*Centre d'Analyse Minérale*).

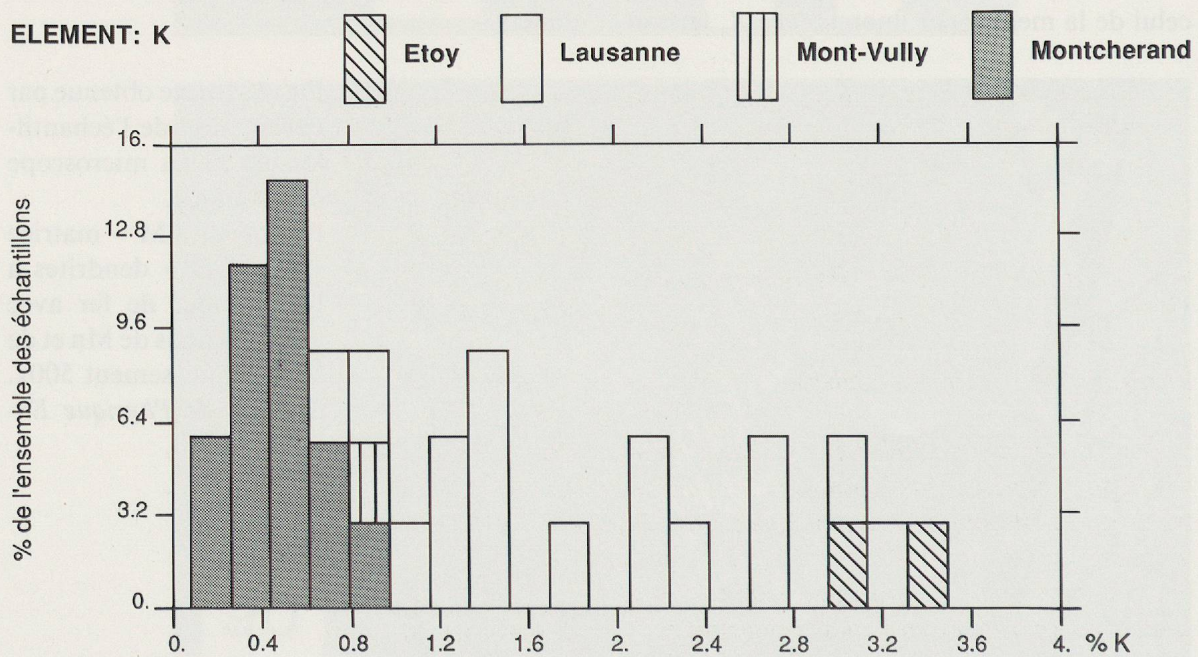


Fig. 41b Histogramme de l'élément potassium (*Centre d'Analyse Minérale*).

	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 %

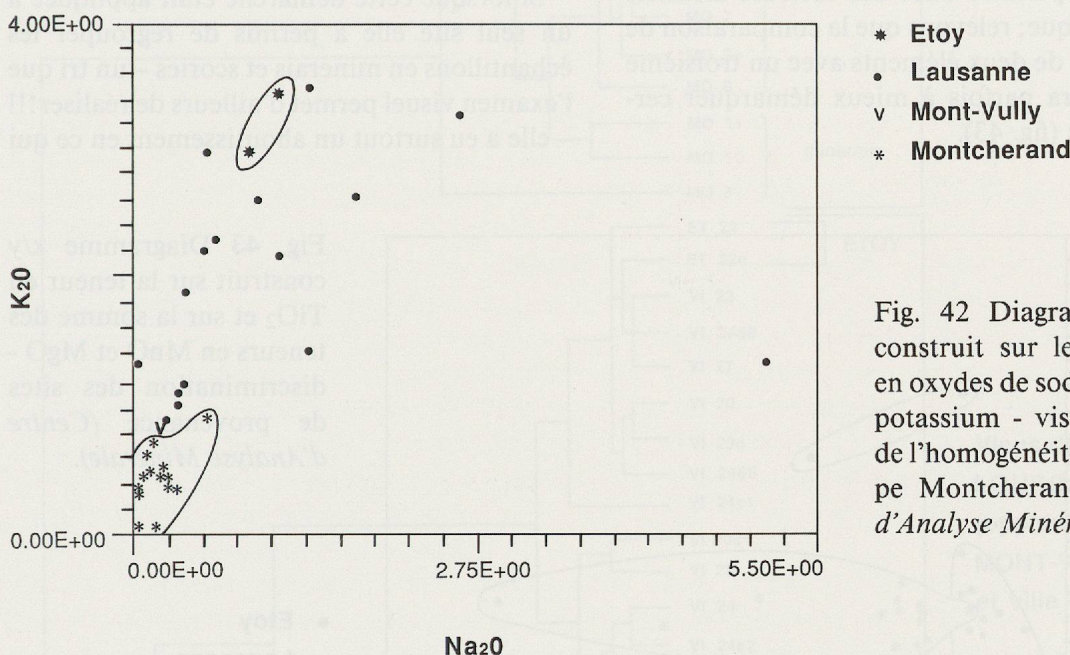


Fig. 42 Diagramme x/y construit sur les teneurs en oxydes de sodium et de potassium - visualisation de l'homogénéité du groupe Montcherand (Centre d'Analyse Minérale).

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 Tène²⁶.

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 colonne²⁷.

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).

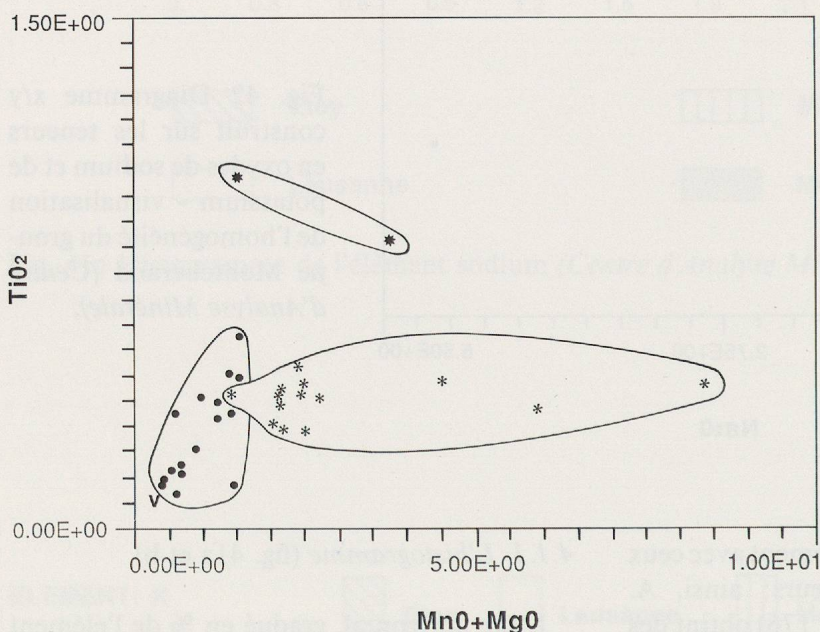


Fig. 43 Diagramme x/y construit sur la teneur en TiO_2 et sur la somme des teneurs en MnO et MgO - discrimination des sites de provenance (Centre d'Analyse Minérale).

- * Etoy
- Lausanne
- v Mont-Vully
- * Montcherand

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.

L'application des méthodes statistiques par V. SERNEELS a permis de regrouper les échantillons par lieux de provenance, à partir des éléments traces présents²⁸; 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

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 dendrogramme²⁹ 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).

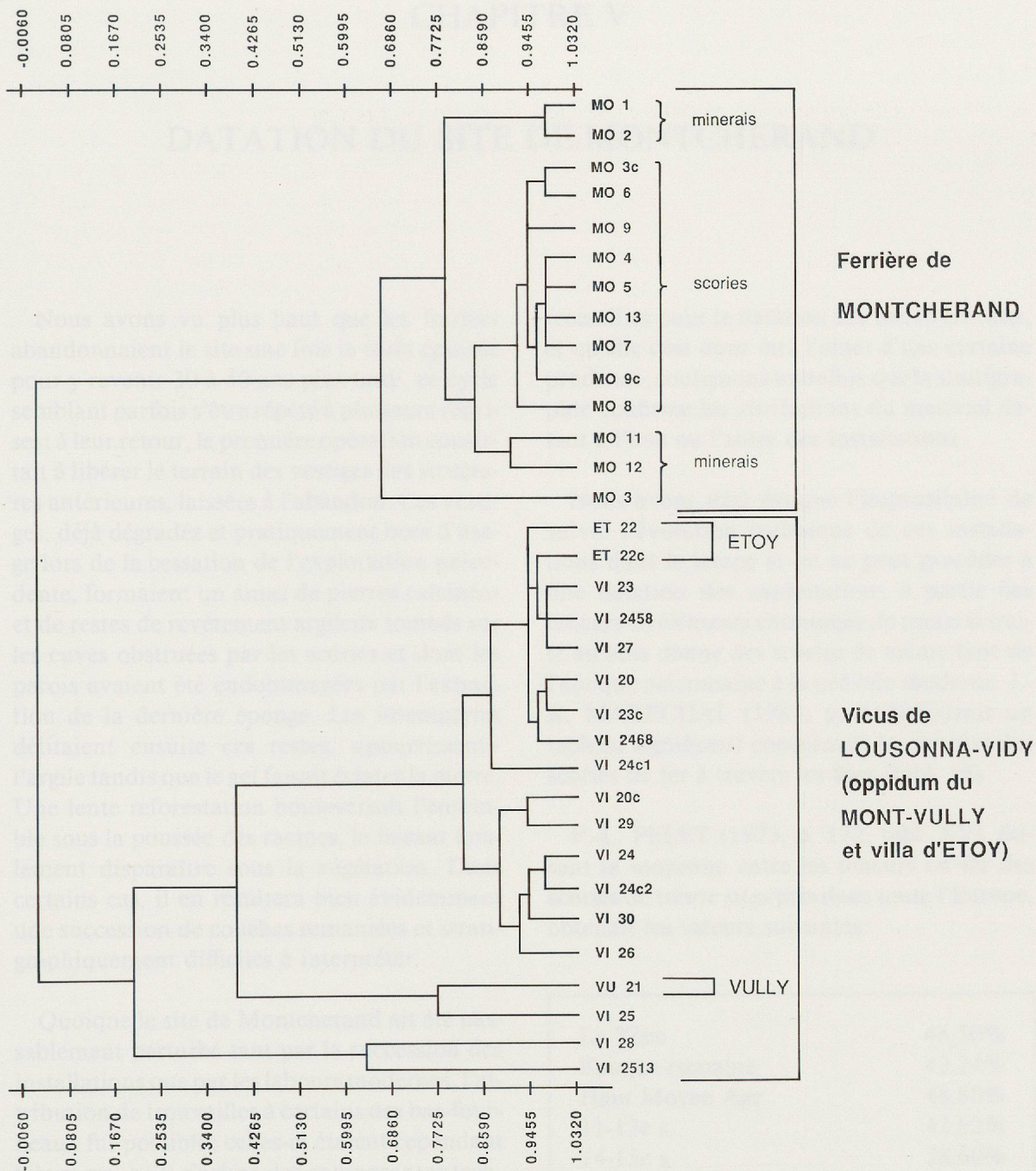


Fig. 44 Dendrogramme établi à partir des éléments traces dans les scories de Montcherand et de Lousonna-Vidy. Deux échantillons provenant d'Étoy et un du Mont-Vully sont aussi présents (*Centre d'Analyse Minérale*).

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.

