PT 1116 / 3

LES BAS FOURNEAUX MÉROVINGIENS DE BOÉCOURT, LES BOULIES (JU / SUISSE)

Ludwig Eschenlohr et Vincent Serneels

Cahier d'archéologie jurassienne 3

PT 1116/3

LES BAS FOURNEAUX MÉROVINGIENS DE BOÉCOURT, LES BOULIES (JU, SUISSE)

1.469.255

BPU NEUCHATEL
32000 000835647

Cahier d'archéologie jurassienne 3
Collection dirigée par François Schifferdecker

LES BAS FOURNEAUX MÉROVINGIENS DE BOÉCOURT, LES BOULIES (JU, SUISSE)

Ludwig Eschenlohr
et
Vincent Serneels

avec la collaboration de :

Bernard Hiltpold

OFFICE DU PATRIMOINE HISTORIQUE
SOCIÉTÉ JURASSIENNE D'ÉMULATION
PORRENTRUY 1991

La Collection des **CAHIERS D'ARCHÉOLOGIE JURASSIENNE** est publiée sous les auspices du CENTRE D'ÉTUDES ET DE RECHERCHES (CER) qui réunit les principales associations et institutions du Jura, en particulier l'Office du patrimoine historique et la Société jurassienne d'Emulation.

La Collection est née de la collaboration de la Section d'archéologie de l'Office du patrimoine historique et du Cercle d'archéologie de la Société jurassienne d'Emulation.

La direction scientifique de la Collection est assumée par François Schifferdecker, archéologue cantonal.

Recherches et rédaction :

Office du patrimoine historique
Section d'archéologie
Case postale 64
CH - 2900 Porrentruy 2
(tél. 066. 66.57.85)

Edition et diffusion :

Cercle d'archéologie de la
Société jurassienne d'Emulation
Rue de l'Eglise 36
CH - 2900 Porrentruy
(tél. 066. 66.68.96)

© 1991 by Société jurassienne d'Emulation et Office du patrimoine historique, CH - 2900 Porrentruy.

ISBN 2-88436-001-8

Publié avec le concours du Département de l'Education et du Département de l'Environnement et de l'Equipement de la République et Canton du Jura.

PT 116/3

BIBL. PUBL. NEUCHÂTEL ET UNIV.

A

1992 / 140

Code de citation préconisé

Eschenlohr Ludwig et Serneels Vincent. Les bas fourneaux mérovingiens de Boécourt, les Boulies (JU, Suisse). Office du patrimoine historique et Société jurassienne d'Emulation, Porrentruy, 1991, 144 p., 86 fig., 23 tab., 10 pl. (Cahier d'archéologie jurassienne, 3).

Illustrations de la couverture :

Reconstitution du site métallurgique des Boulies
Au dos de l'ouvrage : reconstitution des bas fourneaux

Dessins de Simon Deshusses

Table des matières

Table des matières 5

Avant-propos 7

1 Présentation du site 9

1.1 Situation géographique 9
1.2 Le site minier 10
1.3 Le site métallurgique 12
1.4 L'industrie du fer dans le Jura 12
1.5 Datation 13
1.5.1 Datation par la méthode du Carbone 14 14
1.5.2 Archéomagnétisme 14
1.5.3 Conclusion 15
1.6 Chronique des travaux 15
1.7 Méthodologie 16

2 La végétation et le charbon 19

2.1 Palynologie 19
2.1.1 Analyse 19
2.1.2 Description des spectres polliniques 19
2.1.3 Interprétation 21
2.2 Anthracologie 22
2.2.1 Analyse 22
2.2.2 Interprétation 22
2.3 L'impact humain 24

3 Les mines et le minerai 27
avec la collaboration de B. Hiltpold

3.1 Le soubassement géologique 27
3.2 Le minerai 29
3.2.1 Le Sidérolithique à l'affleurement 29
3.2.2 Le minerai sidérolithique 31
3.3 Les activités minières dans le Rayon de Séprais 35
3.3.1 Cartographie des vestiges 35
3.3.2 Les structures minières 36
3.3.3 Répartition spatiale des vestiges 37
3.3.4 Les modes d'exploitation 38
3.4 Les activités minières dans le vallon des Boulies 40
3.4.1 Les anomalies topographiques 41
3.4.2 Interprétation des structures 43
3.4.3 Liens technologiques et chronologiques 46
3.5 Organisation du complexe minier et métallurgique 46

4 Les bas fourneaux 49

4.1 Principes de la réduction 49
4.1.1 La réduction des oxydes de fer par le carbone 49
4.1.2 La réduction dans le bas fourneau 49
4.2 Architecture des bas fourneaux 51
4.2.1 Le bas fourneau 1 52
4.2.2 Le bas fourneau 2 54
4.2.3 Synthèse 55
4.3 La soufflerie 56
4.3.1 Le tirage naturel 57
4.3.2 Le tirage artificiel 58
4.3.3 Les tuyères 58
4.3.4 La double soufflerie 63
4.4 Reconstruction des bas fourneaux 64
4.4.1 Paroi en élévation 64
4.4.2 Les tuyères 66
4.4.3 La porte 66
4.5 Classification des bas fourneaux 66

5 Fonctionnement des bas fourneaux 69

5.1 La charge 69
5.2 Les parois 69
5.3 Les produits 71
5.4 Les scories coulées 71
5.4.1 Description générale 71
5.4.2 La dernière coulée de scories du bas fourneau 2 71
5.4.3 La dernière coulée de scories du bas fourneau 1 78
5.4.4 Les autres scories coulées 80
5.4.5 Composition chimique et minéralogique 80
5.5 Les scories internes massives 82
5.6 Les scories internes rouillées 83

6 **L'atelier de réduction** 85

6.1 La stratigraphie 85
6.1.1 L'atelier 85
6.1.2 Le bas fourneau 1 87
6.1.3 Le bas fourneau 2 88
6.1.4 Les foyers de grillage 90
6.2 Répartition spatiale des vestiges sur l'atelier 90
6.2.1 Les matières premières 90
6.2.2 Les matériaux de construction 91
6.2.3 Les éléments de soufflerie 92
6.2.4 Les résidus 92
6.2.5. Les pièces en fer 93
6.3 Synthèse 93
6.4 Histoire de l'atelier 96

7 **L'exploitation : approche quantitative** 99

7.1 Quantification des trouvailles 99
7.2 Calcul du rendement des bas fourneaux 100
7.2.1 Formation des scories 101
7.2.2 Contribution du charbon de bois 103
7.2.3 Comportement des éléments traces 103
7.3 Estimation de la production 104
7.3.1 La production 104
7.3.2 La consommation de bois 105
7.3.3 Le temps de travail 106

8 **Les scories en forme de calotte** 107

8.1 Le raffinage de l'éponge de fer 107
8.2 Les calottes des Boulies 107
8.3 Composition chimique et minéralogique 112
8.4 Les calottes : résidus du raffinage de l'éponge de fer 114
8.5 L'atelier de raffinage 115

9 **Conclusion** 117

9.1 Les étapes de la chaîne opératoire 117
9.2 Le district sidérurgique du Jura 120
9.3 Le peuplement mérovingien du Jura 120
9.4 Bilan et perspectives 121

Résumé 123
Zusammenfassung 125
Abstract 127

Bibliographie 129

Liste des illustrations 133

Liste des tableaux 135

Annexe 1 : Archéomagnétisme 137
Annexe 2 : Anthracologie 139
Annexe 3 : Méthodes d'analyses 141

Avant-propos

En 1866, Auguste Quiquerez publia son ouvrage "De l'âge du Fer. Recherches sur les anciennes forges du Jura bernois". En 1871, quand il compléta ses observations par un article intitulé "Notice sur les forges primitives dans le Jura", il se doutait peut-être alors qu'il était un précurseur de la future "archéologie industrielle" et qu'il ouvrait la voie à une recherche qui, de nos jours, est loin d'être achevée.

Malheureusement les travaux d'A. Quiquerez n'inspirèrent guère les chercheurs suisses. Aucun successeur direct ne prit la relève. Il fallut surtout attendre les travaux de Paul-Louis Pelet, publiés dès 1973, pour que le sujet apparaisse à nouveau avec quelque vigueur. Mais ces publications traitaient principalement de la région vaudoise.

Certes, à propos du Jura, il y eut en 1973-74 la fouille d'un bas fourneau du XIVe siècle à Lajoux, mais l'étude n'a pas encore pu être menée à terme.

Il aura fallu la construction de l'autoroute Transjurane pour inciter la Section d'archéologie de l'Office du patrimoine historique à se lancer à l'eau et à prendre la difficile, mais passionnante, succession d'A. Quiquerez sur les mêmes lieux et sites.

Ludwig Eschenlohr "archéologue" et Vincent Serneels "archéomètre" ont su, par la finesse des travaux et des observations sur le terrain, puis en laboratoire, relever le défi et la présente monographie vient couronner leur effort.

Cet ouvrage n'est pourtant pas une nouvelle synthèse sur l'histoire du fer dans la région de la vallée de Delémont. Le sujet est trop vaste pour être repris et traité en quelques mois. A juste titre, me semble-t-il, les auteurs ont préféré se consacrer à une analyse fine du site des Boulies et investir leur temps dans la reconstitution des fourneaux et dans l'approche de la rentabilité de cette installation de réduction de minerai de fer.

Plusieurs points forts ressortent ainsi de cette étude, comme le signale le prof. P.L. Pelet dans une lettre qu'il nous adressait le 14 septembre 1991, après avoir bien voulu lire ce texte avant son envoi à l'imprimerie. Il relève, entre autres, comme apport : "le soin apporté lors des fouilles et l'effort de reconstitution des vestiges (tuyères, scories) qui permettent d'aboutir à des résultats qu'aucune fouille antérieure n'a obtenu, par exemple :

- la détermination du poids et du volume des scories de la dernière chauffe,
- la reconstitution jamais faite à ce jour des scories coulées, qui révèle que la variabilité de leur aspect résulte uniquement des phénomènes d'écoulement et de refroidissement,
- la preuve qu'à Boécourt les scories coulent par dessus un seuil, une "dame" qui barre la porte; les forgerons de Boécourt témoignent d'un savoir-faire qui leur est propre,
- la disposition et l'angle de ventilation des tuyères, qui n'ont jamais été sérieusement étudiés (et qui mériteraient une série d'expérimentations),
- le calcul soigneusement fondé et prudent de la production des fourneaux qui relève une productivité supérieure aux estimations faites aux Bellaires (VD) (rendement à Boécourt : 16,6 %; rendement présumé des Bellaires : 10 %)".

A ces remarques, on peut encore ajouter les nouveautés dues aux approches archéométriques, comme, par exemple, la formulation mathématique du processus de la formation des scories.

L'étude approfondie des scories en forme de calotte apporte des éléments nouveaux quant à leur interprétation.

Les spécialistes de cette technologie du fer découvriront encore dans les pages qui suivent nombre de données nouvelles qu'il serait fastidieux d'énumérer.

Sur un autre plan, il faut relever la collaboration entre deux auteurs et deux institutions : d'un côté, l'archéologue avec, derrière lui, un service cantonal d'archéologie et, de l'autre, l'archéomètre, doctorant au Centre d'analyse minérale de l'Université de Lausanne. La conjonction des données de terrain et des analyses physico-chimiques a été telle qu'il s'est avéré très rapidement impossible de faire un ouvrage traditionnel où chaque spécialiste signe ses propos. A tous les niveaux, les analyses archéométriques confirmaient ou infirmaient les hypothèses archéologiques et vice-versa.

Ainsi, peu à peu, descriptions et conclusions se sont entièrement liées. Les deux chercheurs ne pouvaient donc que signer conjointement cette étude.

Le professeur Michel Mangin, qui a également accepté très amicalement de relire le manuscrit, relève cette entente en ces termes: "Inutile de dire que ce travail est remarquable de précision et de sérieux. Je ne connais pas d'équivalent pour ce type de site. La collaboration entre archéologue et archéomètre a été parfaite et est sensible tout au long d'un ouvrage vraiment archéométallurgique".

Cette profonde relation a aussi permis de dépasser la forme ordinaire de tels travaux. La présentation par thèmes, par sujets de recherche, et non selon le canevas traditionnel, description-analyse-interprétation, a permis d'alléger considérablement les renvois d'un chapitre à l'autre et rend la lecture plus agréable.

Les résultats ainsi collectés permettront de poursuivre et d'élargir la recherche sur l'exploitation du minerai de fer dans la région sur une base solide. D'ores et déjà, le mouvement a été lancé : le Cercle d'archéologie de la Société jurassienne d'Emulation a donné naissance à un groupe de Jurassiens passionnés par le sujet. Un recensement des sites miniers et des bas fourneaux sur l'ensemble du territoire prend forme; les premiers travaux de prospections et de collectes de données ont déjà permis de situer plus d'une cinquantaine de gisements à scories. A. Quiquerez en relevait 400 dans ses écrits. L'observation de ces ateliers apportera probablement de nombreux résultats nouveaux. On comprend ainsi mieux la prudence des auteurs à n'avoir pas voulu élargir leur sujet et tenter une synthèse locale prématurée.

Cette recherche, comme toutes celles liées à la construction de la Transjurane, n'aurait pas été possible sans le concours de nombreuses institutions et personnalités que nous tenons à remercier chaleureusement ici. Mentionnons pour commencer MM. Gaston Brahier, Président du Gouvernement et Ministre de l'Education et Bernard Prongué, chef de l'Office du patrimoine historique, MM. François Mertenat, Ministre de l'Equipement et de l'Environnement et André Voutat, chef du Service des Ponts et Chaussées et ingénieur en chef de la Transjurane, ainsi que l'Office fédéral des Routes représenté au sein de la Commission d'Archéologie pour la N16 dans le Canton du Jura par M. Andreas Gantenbein.

Sur le terrain, la petite équipe de fouille sut s'adapter à un type de site inattendu et s'engagea sans compter dans le sauvetage de ce gisement. On ne peut que lui témoigner notre gratitude. Il en va de même à Yvan et Gisèle Montavon des Lavoirs pour leur accueil sur le site ainsi qu'à Carole Berberat et Renata Bisol, secrétaires; l'on doit à la première les travaux de dactylographie et à la seconde la mise en page.

Ensuite, notre reconnaissance s'adresse à MM. Paul-Louis Pelet, professeur d'histoire à l'Université de Lausanne, Michel Mangin, professeur d'archéologie classique à l'Université de Besançon et Philippe Andrieux, archéologue départemental du Val de Marne. Tous trois, spécialistes de la sidérurgie ancienne, ont soutenu, encouragé et conseillé l'équipe de recherches dès les premiers coups de truelles. Leur expérience et les discussions nourries qui eurent lieu sont à la base de la plupart des résultats acquis. Un merci tout spécial est adressé à P.-L. Pelet et M. Mangin qui ont accepté de lire le manuscrit et de le critiquer, et cela dans des délais très courts. Tous deux auraient souhaité que les auteurs insistent davantage sur les résultats nouveaux de leur travail pour mieux le mettre en évidence. Les auteurs ont préféré la modestie, ce qui est tout à leur honneur.

Il faut également encore mentionner ici le personnel du Centre d'Analyse minérale de l'Université de Lausanne et son directeur Hans-Rudolf Pfeifer, ainsi que les spécialistes et laboratoires privés qui ont participé, chacun à sa manière, à cette aventure: Alain et Christian Orcel, directeurs d'Archéolabs, Ian Hedley de l'Institut de minéralogie de l'Université de Lausanne, Annemarie Rachoud-Schneider, palynologue et enfin Bernard Hiltpold, géologue et Martine Thièvent, préparatrice, tous deux rattachés à la Section d'Archéologie de l'Office du Patrimoine historique à Porrentruy. Que chacun trouve ici notre gratitude pour sa collaboration.

Notre considération se tourne aussi vers Emmanuel Abetel, rédacteur de l'étude sur les bas fourneaux de Montcherand (VD), qui a bien voulu mettre à disposition son manuscrit avant parution et envers tous les collègues qui, d'une manière ou d'une autre, ont apporté leurs connaissances et contributions.

Enfin et surtout, nous tenons à remercier les auteurs qui ont fourni un effort particulier lors de l'élaboration de ces fouilles et qui ont respecté leurs engagements et les délais fixés.

Comme le prof. M. Mangin l'a souligné, "cet ouvrage est une excellente monographie qui sera bien utile à tous". P.-L. Pelet ajoute : "ce travail est d'une qualité supérieure et je pense qu'il fera date par toutes les précisions qu'il apporte sur le fonctionnement des fourneaux à fer". Cette étude fait donc honneur à la collection des Cahiers d'archéologie jurassienne et l'on ne peut que lui souhaiter de rencontrer, auprès des spécialistes en la matière et parmi le grand public, le succès qu'elle mérite.

Porrentruy, le 28 octobre 1991

F. Schifferdecker
Archéologue cantonal

Chapitre 1

Présentation du site

1.1 Situation géographique

Le site de sidérurgie ancienne des Boulies (commune de Boécourt, JU) se trouve au pied des contreforts de la dernière chaîne du Jura qui sépare la vallée de Delémont de la plaine de l'Ajoie. Il occupe, entre 500 et 600 mètres d'altitude, le fond et les versants d'un petit vallon remontant en direction du sud-ouest. Celui-ci débouche en amont du hameau des Lavoirs dans une vallée latérale située à l'extrémité nord-ouest du bassin de Delémont (coordonnées nationales : 584'500-585'000 / 245'500-245'750; fig. 1).

Deux grands ravins humides orientés du nord au sud se rejoignent au lieu-dit les Lavoirs : la Combe des Boules où coule l'Avatte et le Cras des Fonnés creusé par la rivière la Rouge Eau. Les deux cours d'eau confluent un peu en aval du hameau.

Le petit ruisseau du vallon des Boulies a aujourd'hui disparu, mais son lit se dessine encore clairement dans le relief. Le fond du vallon remonte progressivement de 520 jusqu'à 550m d'altitude. La partie basse est orientée d'ouest en est. La dénivellation des versants est d'une vingtaine de mètres du côté nord et

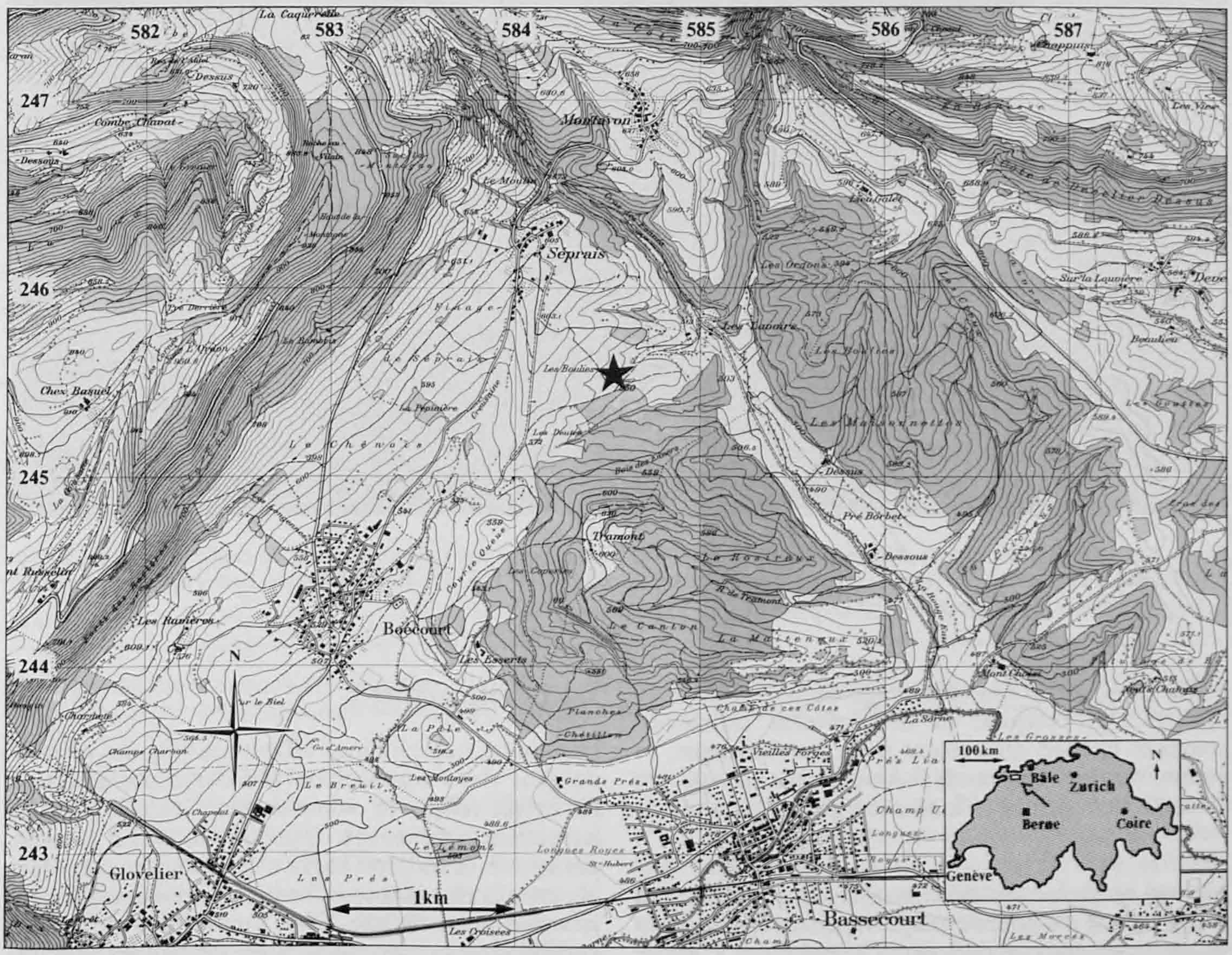


Fig. 1. Situation générale du site des Boulies. Reproduit avec l'autorisation de l'Office fédéral de topographie du 10.05.1991.

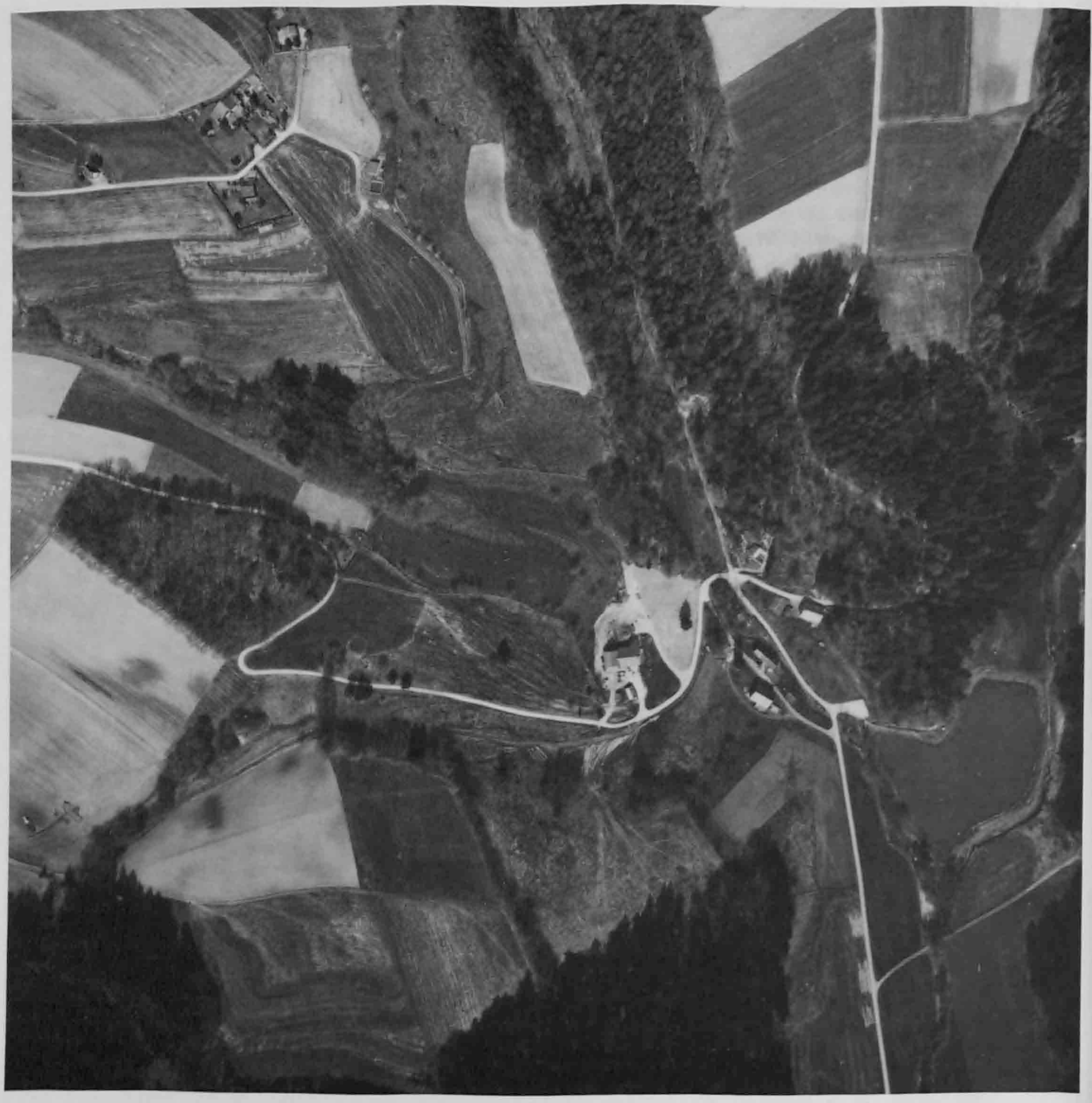


Fig. 2. Vue aérienne du secteur d'investigation (30 mars 1989). Le hameau des Lavoirs apparaît au centre de l'image. Le site des Boulies, au sud-ouest, se trouve en bas à gauche (terrains cultivés; pl. 1, p. 33). Reproduit avec l'autorisation de la Direction des mensurations cadastrales du 15.10.1991.

d'une dizaine au sud; elle augmente de l'est vers l'ouest. Des bosquets et des arbustes clairsemés couvrent le pied du versant sud. A mi-hauteur, le vallon dessine un coude. Au-delà, la pente des versants s'adoucit et le fond s'élargit.

Le paysage, avec ses champs cultivés, ses pâturages et ses forêts, n'a guère changé depuis la fin du siècle passé jusqu'aux grands travaux actuels (fig. 2; chap. 1.6, p. 15).

1.2 Le site minier

Le minerai sidérolithique affleure le long des versants du Cras des Fonnés et de la Combe des Boules à l'interface entre le soubassement calcaire et les formations plus jeunes. Dans le vallon des Boulies, par contre, le Sidérolithique n'est affleurant que dans la partie la plus basse, à l'embouchure du vallon dans la vallée de la Rouge Eau. En effet, le ruisseau a entaillé moins profondément les formations vosgiennes qui sont d'une épaisseur importante.

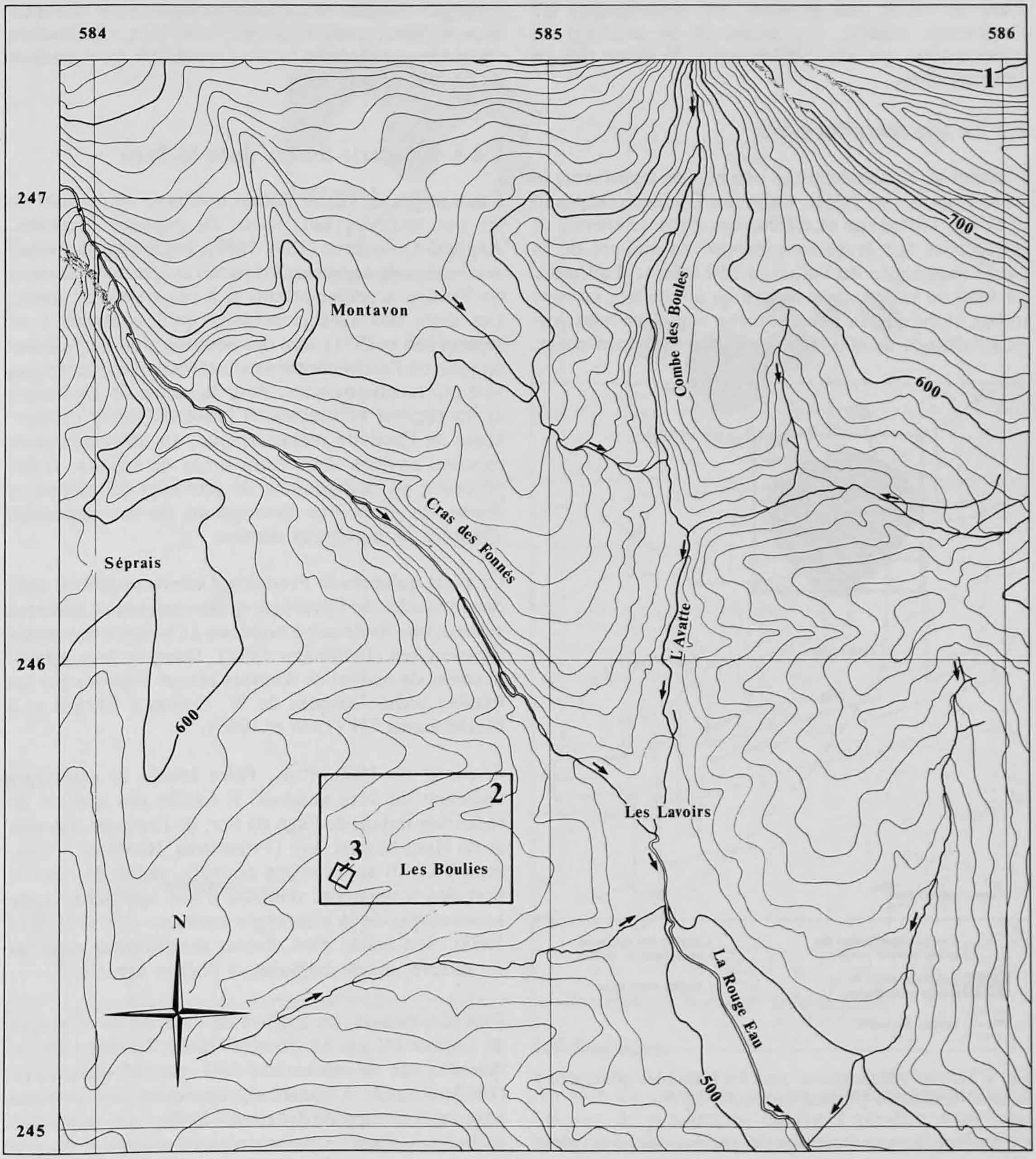


Fig. 3. Les différents secteurs d'investigation. 1 : Rayon de Séprais, cartographie des vestiges miniers (dépliant n° 1); 2 : vallon des Boulies, relevé topographique et sondages des vestiges miniers (fig. 25, p. 42); 3 : atelier de réduction, fouille archéologique (fig. 5, p. 13).

La topographie est fortement marquée par l'exploitation du minerai de fer. Le périmètre de 4km² environ, à l'intérieur duquel ces traces ont été étudiées, correspond approximativement au Rayon de Séprais, l'ancienne concession minière décrite par A. Quiquerez (1881; fig. 3 et 23). On y rencontre toutes sortes de dépôts de minerai, des puits et des minières comblés, des galeries effondrées et bien d'autres vestiges. L'exploitation de ce gisement s'est étendue probablement sur plus de 20 siècles. Les travaux récents se superposent aux plus anciens en les occultant partiellement, voire totalement. Les activités sidérurgiques qui se sont déroulées dans ce secteur ont d'ailleurs laissé leur empreinte dans la toponymie locale : les Lavoirs et la Rouge Eau évoquent le lavage du minerai.

Dans le vallon des Boulies, des témoignages de l'extraction minière, du lavage et du stockage du minerai ainsi que de la fabrication du métal ont pu être identifiés.

1.3 Le site métallurgique

L'atelier de réduction est le lieu où l'on transforme le minerai de fer en métal. Celui des Boulies comprend deux bas fourneaux et différentes aires de travail. Il est localisé sur le versant exposé au sud-est de la partie supérieure du vallon, à 550 mètres d'altitude. Le fond du vallon ne se trouve qu'à 6 mètres en contrebas alors que la pente s'élève régulièrement jusqu'à l'altitude de 600 mètres en direction nord-ouest.

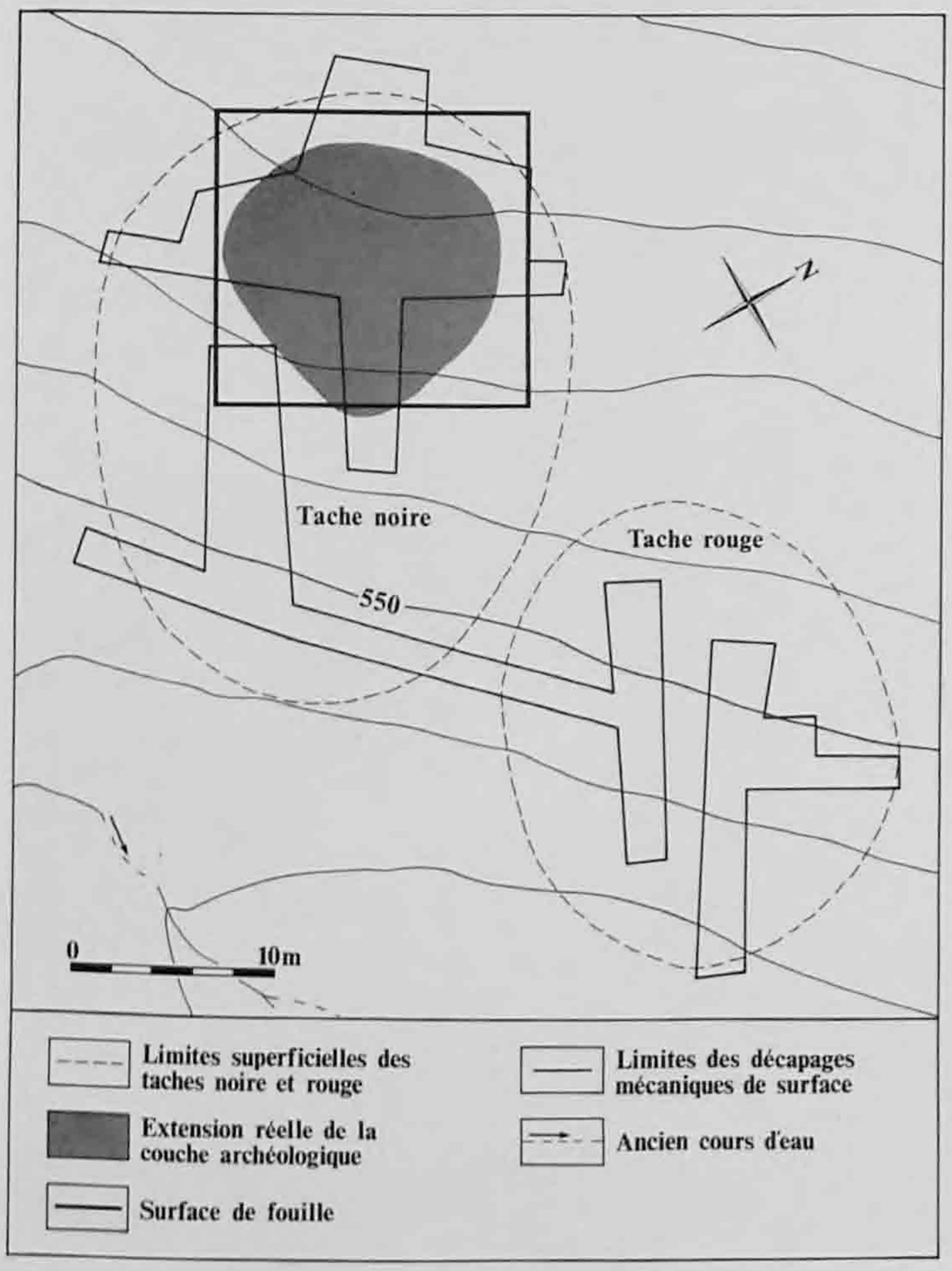


Fig. 4. Le site métallurgique avec les tranchées effectuées à la pelle mécanique (surface de fouille, fig. 5).

En surface, le site était signalé par une tache de terre noirâtre d'une superficie de 550m², parsemée de scories et de débris divers. L'extension de la couche archéologique, par contre, se limite à 130m² environ (fig. 4). L'atelier est de taille restreinte et ne présente qu'une seule phase d'activité.

Les bas fourneaux jumelés sont adossés à la pente en haut du site. Un peu en contrebas, sur le côté, sont répartis au moins sept foyers destinés au grillage du minerai. Enfin, quantité de débris de fourneaux et de résidus de production ont été rejetés à la périphérie, principalement dans le sens de la pente.

Contigu à l'atelier de réduction s'étendait le dépôt de minerai lavé, matérialisé par une tache faiblement rougeâtre en surface; la terre contenait à cet endroit de nombreux pisolithes.

1.4 L'industrie du fer dans le Jura

Les vestiges de l'exploitation ancienne du minerai de fer ont toujours fait partie du paysage jurassien. Auguste Quiquerez (1801-1882), ingénieur des mines et chercheur passionné, fut parmi les premiers savants en Europe à prêter attention à ces traces du passé. Les deux ouvrages principaux qu'il consacre à ce sujet (1866 et 1871) sont des oeuvres pionnières à une époque où l'archéologie ne s'intéresse pas encore aux vestiges technologiques. Pour la vallée de Delémont et les régions adjacentes, il laisse entrevoir l'importance de l'activité métallurgique, en affirmant avoir reconnu environ deux cents amas de scories. Il fait procéder au dégagement de plusieurs fourneaux et donne les premières descriptions de ces appareils, illustrées de nombreux dessins.

Ce n'est qu'après la Première Guerre mondiale que, dans le cadre de l'évaluation des ressources minières suisses, on s'intéresse à nouveau à l'histoire des mines jurassiennes (Fehlmann 1932). Dans le Jura schaffhousois, de nouvelles données seront fournies par les fouilles archéologiques de W. Guyan à Bargen et à Merishausen SH (1946 et 1965).

A partir de 1960, P.-L. Pelet étudie la sidérurgie ancienne du Jura vaudois. Il fouille des ateliers de réduction datant de l'âge du Fer, de l'époque romaine et du Haut Moyen Age (Prins-Bois, Bellaires et Bossena VD). Il apporte une nouvelle vision de l'évolution des techniques, doublée d'une approche socio-économique de la sidérurgie ancienne (1973, 1978 et 1983). Son étude d'un district sidérurgique régional est encore unique en Suisse à l'heure actuelle.

Plus récemment, les fouilles de l'atelier de réduction de Lajoux JU par M. Joos (1972-73; Steiner 1979) et de celui de Montcherand VD par M. Klausener (1983; Abetel, à paraître), apportent des données ponctuelles supplémentaires. Enfin, de nouvelles recherches dans ce domaine se développent en plusieurs endroits de Suisse (GSAF 1991b).

A une échelle plus locale, les travaux miniers récents et anciens du Rayon de Séprais sont connus grâce aux travaux d'Auguste Quiquerez (1855 et 1866). Son ouvrage manuscrit sur les minières du Jura, en particulier, se trouve être une précieuse source d'informations : l'exploitation des minières de Séprais y est largement décrite et les travaux de mines (anciens et modernes) y sont reportés sur une carte (Quiquerez 1881 et fig. 25).

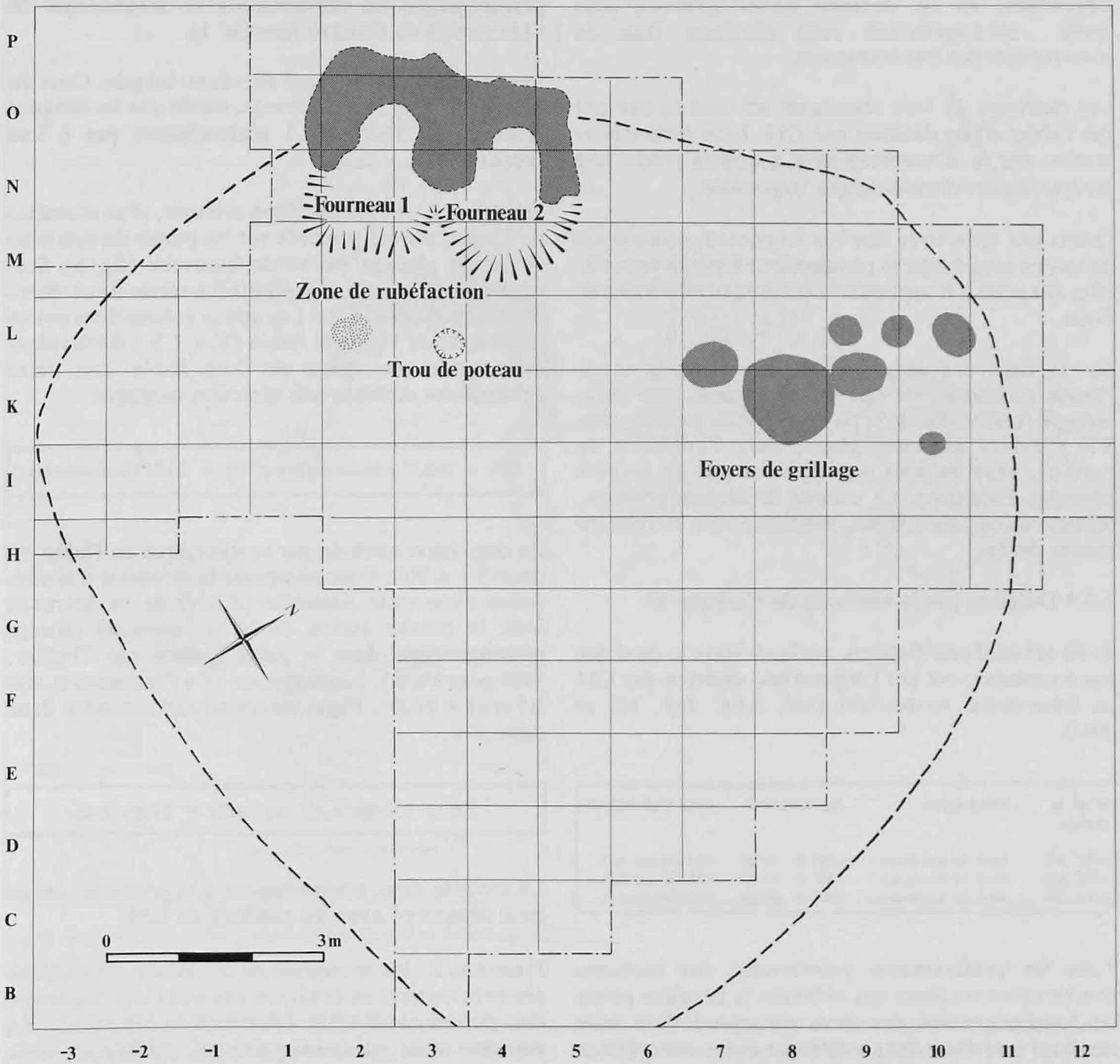


Fig. 5. Le site métallurgique. Surface de fouille. Structures et extension réelle de la couche archéologique.

Le vallon des Boulies figure sur cette carte sous le nom de "Combe des Boulies" et sur ses deux flancs, les pointillés indiquent des travaux miniers anciens, c'est-à-dire bien antérieurs au XIXe siècle. Un puits du siècle passé est toutefois reporté dans le fond de la combe.

L'ingénieur des mines rapporte à ce sujet que plusieurs puits anciens ont été réouverts à son époque, dans l'espoir que les argiles sidérolithiques n'étaient pas totalement épuisées. Ces tentatives se sont révélées infructueuses, de sorte que le projet d'une nouvelle exploitation a dû être abandonné. Ces excavations du XIXe siècle sont encore visibles à l'heure actuelle sous forme de larges dépressions bordées de déblais amoncelés dans les forêts avoisinantes.

1.5 Datation

Au sein du complexe minier et métallurgique, seul l'atelier de production du fer a pu être daté sans ambiguïté. Les vestiges miniers n'ont livré aucun matériel archéologique datable et les raccords stratigraphiques sont impossibles à établir.

N'étant pas situé dans le contexte d'un site d'habitat, l'atelier de réduction du minerai de fer est pratiquement dépourvu d'éléments traditionnels de datation, tels que structures d'habitation, mobilier archéologique, etc. Mis à part un petit fragment de céramique commune et quelques clous, dont la datation demeure incertaine, seuls les nombreux fragments de tuiles romaines fournissent un indice chronologique.

Cependant, ils ne donnent qu'un terminus post quem : ces matériaux sont réutilisés dans la construction des bas fourneaux.

Les charbons de bois abondants sur tout le site ont fait l'objet d'une datation par C14. Leur forte déformation due à la combustion a toutefois rendu une analyse dendrochronologique impossible.

Quant aux structures des bas fourneaux, soumises à de hautes températures pendant leur fonctionnement, elles ont permis d'appliquer la méthode archéomagnétique.

Sur la base des séquences stratigraphiques et de l'étude architecturale des bas fourneaux, une chronologie relative fiable a pu être établie pour le site. S'il y a bien plusieurs phases dans l'évolution de l'atelier, elles ne sont pas séparées par de longues périodes d'abandon. Le volume de déchets produits, somme toute assez faible, confirme une activité de courte durée.

1.5.1 Datation par la méthode du Carbone 14

Trois échantillons distincts, prélevés dans le fond des bas fourneaux, ont fait l'objet d'une datation par C14 au laboratoire Archéolabs (réf. ARC 361, 363 et 386).

N° de la mesure	Provenance	Age C14 brut	Date C14 calibrée
ARC 361	fond du fourneau 1	1520 ± 50 BP	410-650 cal AD
ARC 363	fond du fourneau 1	1500 ± 50 BP	420-650 cal AD
ARC 368	fond du fourneau 2	1560 ± 60 BP	340-650 cal AD

Tous les prélèvements proviennent des horizons charbonneux en place qui reflètent la dernière phase de fonctionnement des deux structures. Les trois résultats sont d'une telle cohérence entre eux qu'il n'a pas été nécessaire d'augmenter le nombre de mesures. D'ailleurs, la fourchette d'imprécision de chaque datation ne permet pas de déterminer la durée de production du site.

De par sa position stratigraphique, le fourneau 2 est postérieur au fourneau 1. En outre, d'après le remplissage des cuvettes, le fourneau 2 a visiblement fonctionné après l'abandon du fourneau 1. Il en résulte que seules les deux dates du fourneau 1, entre 410 et 650 cal AD, doivent être retenues. L'époque romaine, même tardive, est exclue, d'autant plus que dans nos régions, il n'y a guère de témoignages d'une présence romaine après le milieu du IVe siècle.

1.5.2 Archéomagnétisme

L'étude archéomagnétique des deux bas fourneaux a été effectuée par Ian Hedley au laboratoire de pétrophysique du département de minéralogie de l'Université de Genève (annexe 1).

Les résultats obtenus sont de valeur inégale. Ceux du fourneau 1 sont très cohérents, tandis que les données relatives au fourneau 2 n'aboutissent pas à une datation.

Fourneau 1 : 14 échantillons orientés, d'un diamètre de 23mm, ont été prélevés sur les parois du fourneau et dans le placage qui borde la cuvette (fig. 6). Seul un échantillon a dû être éliminé à cause de sa viscosité magnétique élevée. Les autres échantillons ont un coefficient de viscosité faible (V = 1.3 ± 0.9%); leur aimantation rémanente est donc fiable. Les treize échantillons donnent une direction moyenne.

(D) = 358.5° (déclinaison) et (I) = 70.8° (inclinaison)

La dispersion calculée par la statistique de Fisher est de $\alpha 95 = 4.50°$. Pour comparer la direction d'aimantation rémanente naturelle (ARN) de ce fourneau avec la courbe étalon de la variation du champs géomagnétique dans le passé (publié par Thellier, 1981 pour Paris), il faut ajouter 1° à l'inclinaison, soit I(Paris) = 71.8°. Cette direction correspond à deux dates :

700 ± 150 ap. J.-C. ou 1650 ± 50 ap. J.-C.

La seconde date, contrairement à la première, est en total désaccord avec les résultats du C14.

Fourneau 2 : les mensurations des douze échantillons prélevés mettent en évidence une très forte dispersion des directions d'ARN (distribution aléatoire). La structure n'est par conséquent pas datable sur cette base. Selon le spécialiste, seuls les échantillons n° 8, 10 et 12 sont en place, tandis que les échantillons n° 1 et 9 auraient été déplacés ou basculés. Il ne dispose donc pas d'un nombre suffisant d'échantillons mesurables, condition sans laquelle une datation par archéomagnétisme n'est pas réalisable.

Ces résultats appellent quelques commentaires. Il ne fait pas de doute que, d'un point de vue archéologique, les échantillons n° 8, 9, 10 et 12 ont été prélevés dans la structure en place. En effet, le n° 8 provient de l'arrière de la paroi déjà bien dégagée en profondeur, tandis que les trois autres prélèvements ont dû être extraits au marteau et au burin de la paroi scorifiée. Les n° 1, 2 et 11 ne sont en revanche probablement pas en place. Restent encore les échantillons n° 3 à 7 : il est possible, et c'est la seule explication plausible, que les prélèvements aient été faits à une trop faible profondeur, sur des éléments de

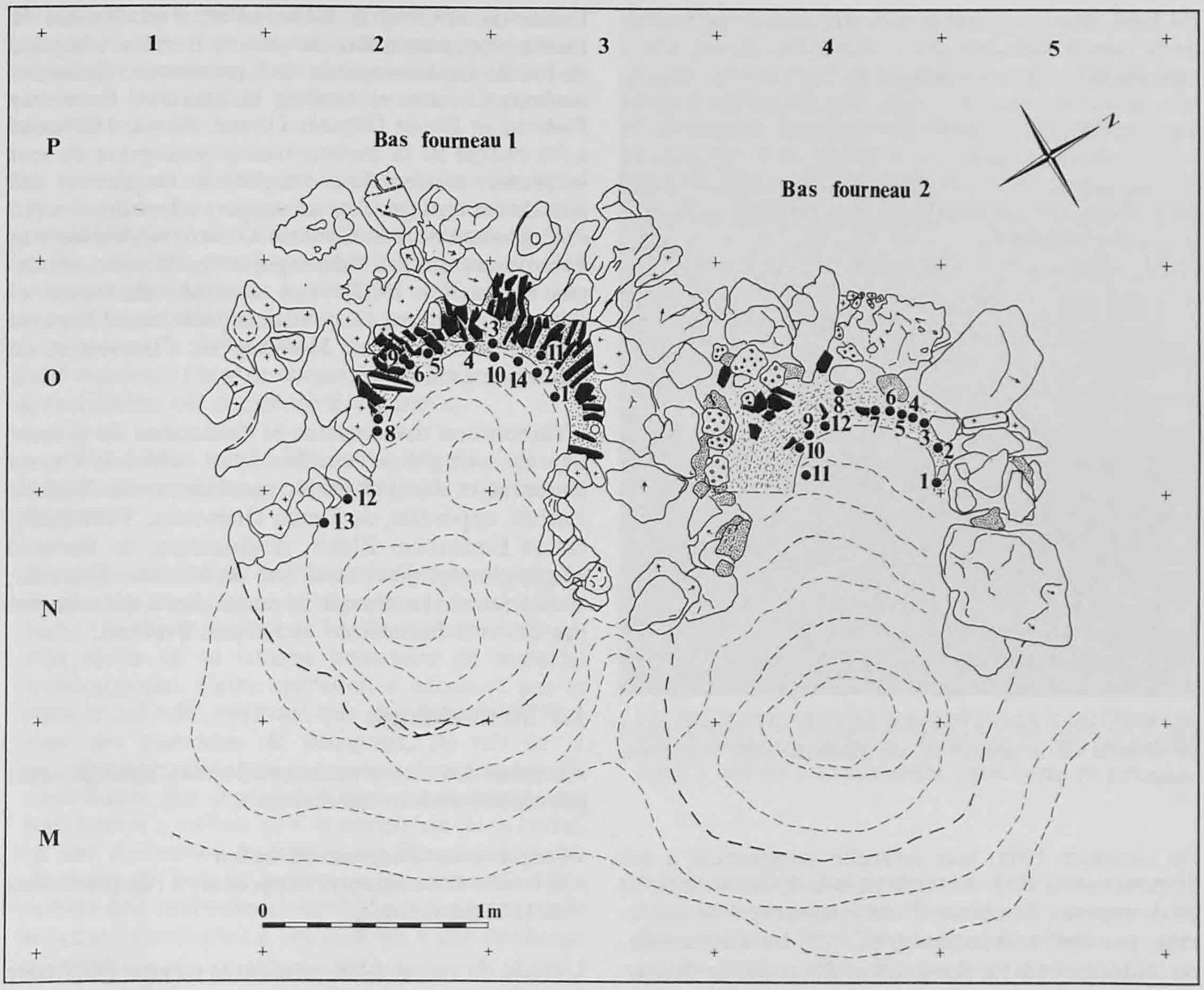


Fig. 6. Emplacement des prélèvements pour l'archéomagnétisme.

paroi non homogène, voire déplacés. L'analyse archéomagnétique semble corroborer cette affirmation : les échantillons n° 2 à 7 et 11 sont peu ou pas cuits, d'une couleur brun foncé. Il en résulte que dans le stade actuel des recherches en archéomagnétisme et dans l'impossibilité d'effectuer des prélèvements supplémentaires, le nombre trop restreint d'échantillons fiables empêche de donner une datation du fourneau 2 des Boulies.

1.5.3 Conclusion

Si l'on tient compte des résultats obtenus par les deux méthodes de datation, il semble possible de restreindre davantage la fourchette chronologique. L'archéomagnétisme suggère avec une grande probabilité que la date ne peut être antérieure à 550 ap. J.-C. Dans deux des trois datations C14, la probabilité entre 525 et 650 cal AD est supérieure à 50%. Par conséquent, nous plaçons le site des Boulies entre 550 et 650 ap. J.-C., c'est-à-dire en pleine période mérovingienne du Haut Moyen Age. La prudence doit cependant être de mise étant donné que la corrélation entre les deux méthodes de datation n'est pas encore établie.

La comparaison des deux fourneaux mis au jour avec d'autres installations semblables confirme cette datation. La durée de fonctionnement de l'atelier (environ deux années), ne peut être affirmée avec certitude.

1.6 Chronique des travaux

Dans le cadre de la construction de la route nationale N16-Transjurane, une grande partie du vallon des Boulies devait servir à l'entreposage de déblais. Celui-ci est aujourd'hui complètement comblé. Les recherches archéologiques ont été menées à bien par la Section d'archéologie de l'Office du patrimoine historique, sous la direction de François Schifferdecker.

En 1987, une prospection pédestre dans le périmètre de la future décharge avait relevé l'existence d'une topographie très accidentée et de deux taches rougeâtres sur les versants du vallon. Ces anomalies avaient été considérées comme des vestiges éventuels de travaux miniers datant de l'époque d'A. Quiquerez (C. Masserey et N. Pousaz, Archéologie et N16, prospection des zones de décharge, rapports internes, 25.03 et 21.07.1987).

Fig. 7. La tache noire à l'emplacement du site métallurgique au moment de la découverte en automne 1988. Vue nord-ouest.

En automne 1988, une nouvelle prospection a été effectuée, afin de préciser la nature de ces vestiges et de déterminer l'ampleur d'une intervention de sauvetage par les archéologues (C. et L. Eschenlohr, Archéologie et N16, prospection des zones de décharge, rapport interne, 25.10.1988).

C'est à l'occasion de cette reconnaissance de terrain qu'une tache noire, de forme ovale et d'une superficie de 20 x 30m environ, flanquée d'une tache rougeâtre (22 x 25m), a été repérée à flanc de coteau, au sud-ouest du vallon des Boulies (fig. 7).

Des sondages ponctuels à l'aide d'une tarière confirmaient la présence de couches archéologiques. L'un d'eux en particulier, pratiqué dans la partie ouest de la tache noire, sur un léger replat où se trouvaient dispersés des blocs calcaires en partie chauffés, a révélé la présence d'un niveau très charbonneux, à 0.60m de profondeur; celui-ci surmontait un niveau de sables rubéfiés.

En 1989, durant le mois de mars, des relevés topographique et photographique du vallon des Boulies ont été effectués par Corinne et Ludwig Eschenlohr avec l'aide de Jean-François Nussbaumer et d'Emmanuel Ziehli. Les travaux de décapage à la surface des taches noire et rouge et les sondages dans le vallon ont eu lieu durant la première moitié du mois d'avril.

Enfin, de mi-avril à début juillet s'est déroulé la fouille proprement dite du site des Boulies. L'équipe de fouille était constituée de 5 personnes : Gabrielle Aubert, Corinne et Ludwig Eschenlohr, Piernicola Federici et Blaise Othenin-Girard. Bernard Hiltpold a été chargé de la documentation géologique de tout le secteur minier. Les données de terrain ont été présentées ensuite dans un rapport intermédiaire (L. et C. Eschenlohr, B. Othenin-Girard, Archéologie et Transjurane, le site sidérurgique des Boulies, sondages et fouilles 1989). Les analyses chimiques et minéralogiques ont été conduites par Vincent Serneels au Centre d'Analyse Minérale de l'Université de Lausanne (annexe 3).

L'élaboration des données et l'exécution du présent ouvrage ont été accomplies avec l'aide de Carole Berberat et Renata Bisol, secrétaires, de Rachèle Lachat, apprentie, de Simon Deshusses, Yves Juillerat et Emmanuel Ziehli, dessinateurs, de Bernard Migy, photographe, ainsi que de Martine Thiévent, technicienne. Le travail de correction a été effectué par Corinne Eschenlohr et Jacques Bombail.

1.7 Méthodologie

Au début de l'intervention aux Boulies, deux objectifs principaux avaient été établis :

- l'exploration intégrale du vallon
- la fouille des structures supposées, à l'emplacement de la tache noire.

L'étude du vallon a été considérée comme prioritaire en raison du calendrier des travaux des Routes Nationales. L'intervention dans cette partie s'est

Fig. 8. Sondages creusés à la pelle mécanique dans la partie basse du vallon. Vue sud.

déroulée sur le terrain en deux temps : premièrement, la documentation topographique et photographique du vallon; deuxièmement, les sondages à la pelle mécanique ou à la tarière à l'emplacement de certaines anomalies (fig. 8).

Ces investigations ont permis d'approcher les différents aspects d'un site minier complexe, mais ont restreint la durée de la fouille du site métallurgique. Les découvertes, plus importantes que prévues, n'en furent que plus délicates à gérer. En effet, la position topographique des vestiges et la présence de nombreux blocs à la surface de la tache ne laissaient pas grand espoir sur l'état de conservation des structures : les recherches ont démontré le contraire.

Fig. 9. Les tranchées effectuées à la pelle mécanique à l'emplacement du site métallurgique. Vue nord-ouest.

La méthode de fouille découle en partie de ces considérations. Elles ont motivé les opérations suivantes :

- décapage mécanique de l'humus noirâtre, en évitant la zone des blocs épars de la partie supérieure de la tache (fig. 9). Il avait pour but de délimiter l'extension réelle de la couche contenant du matériel archéologique. Cette opération a nécessité par la suite le contrôle systématique des déblais en bordure des tranchées de décapage, du fait de la quantité de matériel qui se trouvait dans cette partie superficielle des dépôts. Un approfondissement des tranchées n'a eu lieu qu'à la périphérie de la tache, où une diminution frappante des éléments tels que charbons de bois et scories a été constatée. Il a montré que la couche archéologique reposant sur le substrat naturel était à ces endroits d'une épaisseur minimale.

- pose d'un carroyage, orienté dans le sens de la pente. Cette méthode de subdivision de l'espace fouillé, classique en pré- et protohistoire, a permis d'enregistrer avec précision les différentes catégories de vestiges aux abords des fourneaux, de même que les deux structures proprement dites. L'approche de la zone des deux fourneaux, dont l'emplacement ne pouvait être de prime abord déterminé avec exactitude, s'est effectuée en fouillant les mètres carrés en damier, afin d'obtenir un maximum de coupes stratigraphiques.

- fouille de la zone périphérique. Elle a eu lieu avant que ne soit entreprise la fouille des bas fourneaux proprement dits. Le décapage à la pelle mécanique avait révélé des concentrations de mobilier dans l'espace. L'impossibilité de protéger l'ensemble de ces surfaces contre les intempéries et le piétinement causé par notre passage répété sur le lieu de fouille nous a amené à documenter cette zone en priorité.

- fouille des deux bas fourneaux. Dès le moment où leur contour a pu être discerné, une coupe a été ménagée dans l'axe longitudinal de chaque structure. La fouille s'est effectuée en procédant à un décapage fin de chaque couche. Une fois la coupe longitudinale élaborée et décrite, l'autre moitié du remplissage a été fouillée suivant les unités stratigraphiques définies, permettant ainsi de les vérifier. Compte tenu de l'asymétrie du remplissage de ces structures, ce choix logique n'est peut-être pas le meilleur.

- prélèvement par plâtrage d'un tronçon de la paroi de chaque fourneau, afin d'affiner les observations de terrain.

Chapitre 2

La végétation et le charbon

Les activités minières et métallurgiques ont un impact important sur le milieu naturel et en particulier sur la végétation. La forêt environnante doit fournir le combustible pour le traitement du minerai. Dans une moindre mesure, les travaux d'extraction et de lavage nécessitent du bois d'oeuvre. Il faut par ailleurs aménager des voies d'accès ainsi que des aires de travail, voire même construire un habitat et défricher des champs à cultiver. Au moment de choisir un emplacement pour leurs fourneaux, les artisans ont certainement voulu minimiser les transports, tant du minerai que du charbon. Compte tenu de leurs importants besoins en bois, on peut s'attendre à ce qu'ils se soient donc installés volontiers en forêt ou à proximité immédiate de celle-ci.

2.1 Palynologie

2.1.1 Analyse

Les données palynologiques qui figurent dans ce chapitre proviennent d'un rapport établi par A.-M. Rachoud-Schneider.

Cette approche ne manque pas d'intérêt même si l'interprétation des résultats atteint ses limites, étant donné que la conservation pollinique n'est pas excellente et que seuls trois échantillons ont été testés. Cet état de fait implique que le raisonnement développé sur cette base reste hypothétique et devra être étayé par d'autres études du même type.

30gr de sédiment ont été traités en laboratoire selon la méthode classique d'enrichissement pollinique des sédiments minéraux : HCl, liqueur de Thoulet, HF, HCl, acétolyse, KOH, glycérine (Bastin 1971).

Echantillon	Provenance	Résultat
1	fond du bas fourneau 1	stérile
2	foyer de grillage L10	527 pollens
3	sommet bas fourneau 2	672 pollens

Le prélèvement 1, effectué dans le niveau charbonneux qui tapisse le fond du bas fourneau 1, s'est révélé stérile. L'absence de pollens s'explique probablement par le fait que le fourneau est une structure fermée, ce qui restreint les contaminations de l'extérieur. De plus, pendant la période d'activité du fourneau, des températures supérieures à 1000°C ont été atteintes : elles ont dû avoir pour effet de détruire les rares pollens.

Les séquences 2 et 3 sont par contre assez riches en pollens. Six lames ont été comptées pour chaque niveau, afin d'obtenir des sommes polliniques statistiquement utilisables. La somme pollinique comprend tous les pollens, à l'exception de ceux des plantes aquatiques et des spores de fougères.

La part importante de spores de fougères - dont la résistance est élevée - et de pollens corrodés indique des phénomènes de corrosion différentielle (Couteaux 1977). A notre avis, ce fait est dû à des phénomènes sédimentaires et pédogénétiques postérieurs à l'abandon des lieux et non pas au type de site ou aux activités qui s'y sont déroulées.

2.1.2 Description des spectres polliniques

Echantillon 2 (fig. 10) : les pollens arboréens atteignent 85%; le bouleau (17%) et le charme (16%) dominent. Le noisetier (13%), l'aulne (8%), le sapin (8%), le pin (7%), le chêne (6%) et le hêtre (5%) sont également bien représentés.

Parmi les pollens non arboréens, les poacées ou graminées (4.5%) et le plantain lancéolé (3%) sont les taxons les plus importants. Les céréales sont aussi présentes. Les spores monolètes de filicinées indéterminées atteignent 22% et les pollens corrodés 15%. Quant au nombre de taxons polliniques (35), il est élevé.

Echantillon 3 (fig. 10) : les pollens arboréens atteignent 75%; le noisetier (20%) est un peu plus abondant que le chêne (19%). Le bouleau (14%) et le pin (12%) sont également bien représentés. La présence discrète du charme (2%), du sapin (1%), du hêtre (1%) et de l'aulne (1%) est à relever.

Les poacées (7%) dominent largement parmi les pollens non arboréens. Viennent ensuite les cypéracées, le plantain lancéolé, les apiacées et les asteracées.

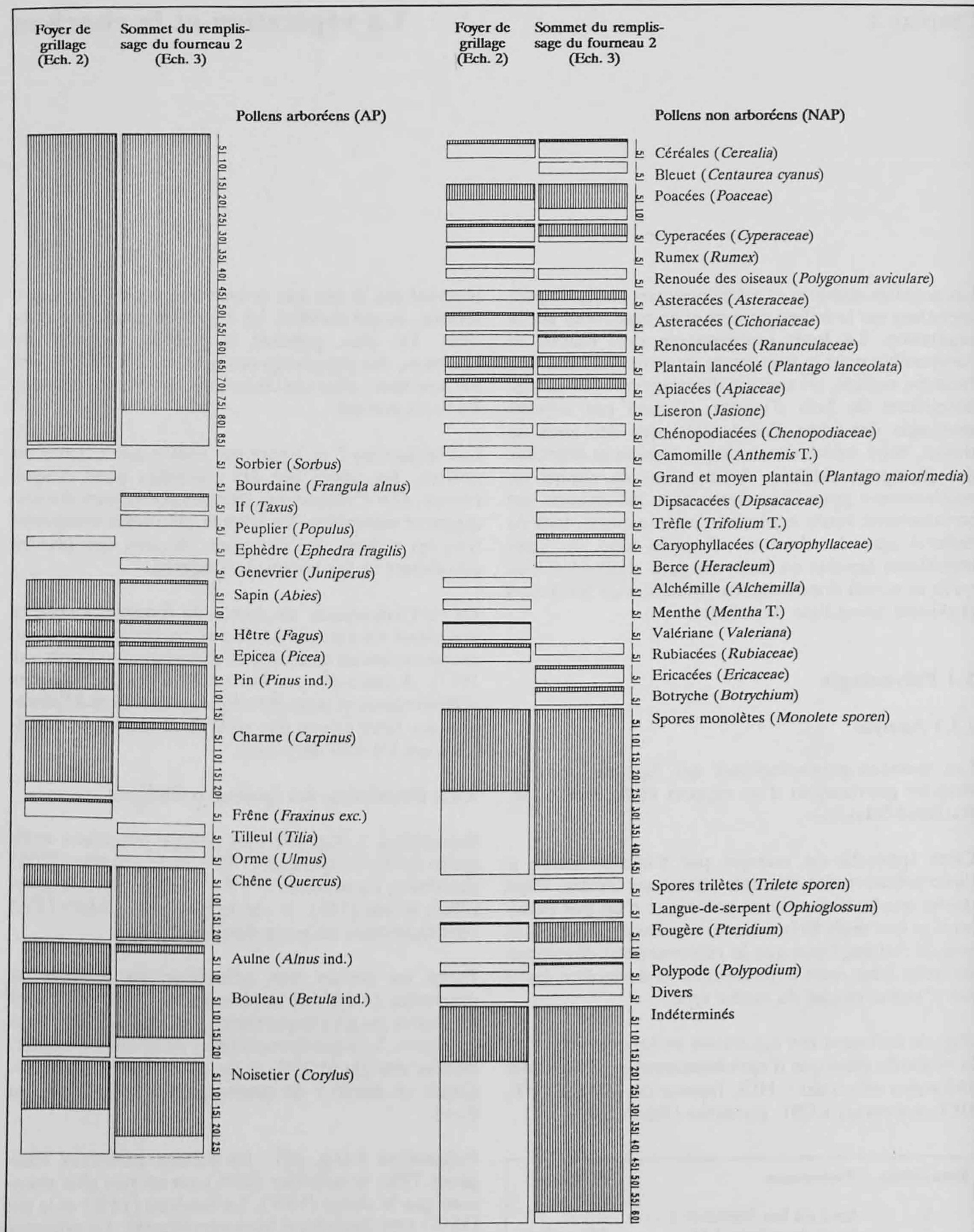


Fig. 10. Diagrammes polliniques.

Les céréales, ainsi que le bleuet sont présents. Les spores monolètes de filicinées indéterminées sont très nombreuses (43%). La fougère aigle et le polypode vulgaire sont présents. Les pollens corrodés atteignent 43%. Enfin le nombre de taxons polliniques est très élevé (38).

2.1.3 Interprétation

Les spectres polliniques provenant de sédiments terrestres (minéraux) doivent être interprétés avec davantage de prudence que ceux relatifs à des milieux humides. Il n'est pas possible par exemple de déterminer le taux de boisement à partir du pourcentage de pollens arboréens (Rachoud-Schneider, communication orale).

Le prélèvement 2 provient d'un foyer de grillage du minerai. Les pollens qui s'y trouvent ont pu se déposer pendant le fonctionnement du site et après son abandon. Un apport de pollens avec le charbon ou le bois utilisé comme combustible, bien que peu vraisemblable, n'est pas exclu.

Le spectre de pollens issus de la couche de destruction du bas fourneau 2 (prélèvement 3) est essentiellement influencé par la pluie pollinique naturelle pendant la période postérieure à l'abandon de la structure.

Essence	N° 2	N° 3	Différence
Aulne (*Alnus* ind.)	9.40	1.40	- 8.0%
Bouleau (*Betula* ind.)	20.00	18.70	
Charme (*Carpinus*)	18.80	2.80	- 16.0%
Chêne (*Quercus*)	7.10	25.30	**+ 18.2%**
Epicéa (*Picea*)	2.40	2.10	
Frêne (*Fraxinus excelsior*)	1.20	0	
Hêtre (*Fagus*)	5.90	1.40	- 4.5%
If (*Taxus*)	0	1.40	
Noisetier (*Corylus*)	15.30	26.70	**+ 11.4%**
Pin (*Pinus* ind.)	8.20	16.00	**+ 8.6%**
Sapin (*Abies*)	9.40	1.40	- 8.0%

Tab. 1. Comparaison des essences arboréennes des deux spectres polliniques (normées à 100%).

En conclusion, il est fort probable que les spectres polliniques sont le reflet du paysage végétal environnant plus ou moins proche du site. Le couvert forestier semble important dans les deux spectres, mais ce sont les essences pionnières, recherchant la lumière et l'humidité, qui apportent la plus grande contribution (bouleau et noisetier; tab. 1). Les toponymes indiquant la présence du bouleau, tels que "Les Boulies" et "Combe des Boules", sont fréquents dans le Rayon de Séprais (Jaccard 1985). Ils témoignent des activités de défrichement qui ont permis au bouleau de s'implanter dans le paysage (fig. 11). Néanmoins, un lien chronologique entre la végétation de l'époque mérovingienne et la toponymie locale actuelle ne peut être établi. Le hêtre et le sapin sont particulièrement discrets. La forêt est plutôt claire et des espaces ouverts existent, comme en témoignent également les fougères. L'impact humain est également bien marqué par le plantain lancéolé; la présence de champs cultivés dans les environs est d'ailleurs attestée par les céréales et le bleuet.

Les deux prélèvements montrent toutefois des différences notables.

Fig. 11. Végétation dans la partie sud-ouest du vallon. Vue nord-ouest. Le bouleau est prédominant dans les bosquets du versant.

Les changements mis en évidence par le tableau pourraient indiquer que les deux séquences ne sont pas contemporaines. Il n'est pas exclu que l'impact humain sur les environs du site (abattage) ait favorisé l'apport de pollens d'origine plus lointaine. Les différences entre les deux spectres s'expliqueraient alors par une modification des proportions entre les pollens d'origine locale et ceux transportés sur une plus grande distance. Les facteurs chronologique et anthropique sont toutefois interdépendants.

La comparaison de l'image locale donnée par le spectre des Boulies et celle plus globale de la vallée de Delémont fait apparaître des différences. D'après la carte de la végétation de la Suisse (Schmid 1949), la vallée de Delémont se trouve dans la ceinture du hêtre et du sapin. A l'époque romaine, ces derniers entourent, avec le pin et des forêts de ravins humides, le site des Montoyes à Boécourt (Rachoud-Schneider 1991).

L'interprétation demeure problématique : les différences sont-elles le reflet direct de l'influence des activités sidérurgiques sur l'environnement local ou simplement celui des changements intervenus entre l'époque romaine et le Haut Moyen Age dans le paysage végétal ?

Il se pourrait aussi que la situation topographique de l'atelier par rapport aux vents dominants ait une

influence sur la composition du spectre pollinique : une hêtraie-sapinière a pu occuper le versant nord de la colline du Tramont située au sud-ouest des Boulies, sans que sa présence ait été détectée par les analyses polliniques (Moor 1952). En effet, les courants d'ouest auraient emporté la majorité des pollens en direction de la vallée de Delémont, d'où leur absence dans les sédiments du site.

2.2 Anthracologie

Aux Boulies, le principal combustible utilisé pour les opérations métallurgiques est le charbon de bois. Bien qu'il soit abondant dans toutes les couches archéologiques, il n'a pas été possible de reconnaître sans équivoque une structure liée à la fabrication ou au stockage de ce matériau. L'utilisation de bois, que l'on peut invoquer pour le préchauffage des fourneaux ou le chauffage préliminaire des pisolithes, n'a pu être confirmée par les données de terrain. Elle ne peut toutefois être exclue.

Le pouvoir calorifique du charbon de bois est de ± 8000 kcal/kg, alors que celui du bois sec n'est que de 4000 à 4500 kcal/kg (Fluzin 1983).

Le charbon de bois est un matériau qui convient parfaitement au double rôle qu'on lui assigne en sidérurgie : c'est un bon combustible qui dégage beaucoup de chaleur et une grande quantité de monoxyde de carbone (chap. 4.1, p. 49).

2.2.1 Analyse

La détermination des essences de charbons de bois a été effectuée par Archéolabs (rapports ARC90/R799B, ARC90/R799B/2 et ARC91/R1011B; tab. 2). Des problèmes de croissance et de déformations dues à la combustion partielle ont empêché d'autres démarches (analyse dendrochronologique, taille et âge des bois charbonnés, etc.).

Essence	Nombre	%
Aulne (*Alnus* sp.)	31	2.2
Chêne (*Quercus* sp.)	4	0.3
Erable (*Acer* sp.)	11	0.8
Frêne (*Fraxinus excelsior*)	1	0.1
Hêtre (*Fagus silvatica*)	886	**64.0**
Noisetier (*Corylus avellana*)	3	0.2
Orme (*Ulmus* sp.)	4	0.3
Résineux (*Picea, Pinus, Larix*)	15	1.1
Sapin (*Abies alba*)	426	**30.7**
Saule/peuplier (*Salix* sp. / *Populus* sp.)	4	0.3
Total	1385	100.0

Tab. 2. Essences de charbon de bois.

Les lots 1 à 15 et 21 ont été prélevés à vue (tab. 3; annexe 2). Les fragments dont la surface transversale était supérieure à 3 ou 4mm² ont été identifiés. Pour les lots 16 à 20, prélevés en vrac, les charbons jusqu'à 0.5mm² de surface transversale ont été pris en compte.

Essence	Prélevé à vue	En vrac
Aulne (*Alnus* sp.)	**7.9**	**0.1**
Chêne (*Quercus* sp.)	-	0.4
Erable (*Acer* sp.)	2.4	0.2
Frêne (*Fraxinus excelsior*)	-	0.1
Hêtre (*Fagus silvatica*)	**62.7**	**64.4**
Noisetier (*Corylus avellana*)	0.5	0.1
Orme (*Ulmus* sp.)	0.5	0.2
Résineux (*Picea, Pinus, Larix*)	-	1.5
Sapin (*Abies alba*)	**26.0**	**32.6**
Saule/peuplier (*Salix* sp. / *Populus* sp.)	-	0.4
Total	100%	100%

Tab. 3. Comparaison des essences arboréennes en fonction du mode de prélèvement.

Nous retiendrons que les résultats sont sensiblement les mêmes pour les lots prélevés à vue et en vrac.

Quant au mode de traitement en laboratoire, l'étude montre qu'il n'est pas nécessaire de déterminer des charbons de très petite taille. Le choix des ensembles à échantillonner importera par contre beaucoup plus : il s'agira d'effectuer des prélèvements en vrac dans toutes les unités définies par la stratigraphie ou par décapage.

Les taxons majeurs, le hêtre et le sapin, sont partout présents sur le site et ne subissent pas de variations importantes. Néanmoins, il faut noter que des ensembles clos, tels les charbons issus du dernier fonctionnement du fourneau 2 (lot 8), peuvent montrer des variations sensibles par rapport au spectre général : l'aulne en est un bon exemple (fig. 12).

2.2.2 Interprétation

Sur l'ensemble du site, le hêtre est, avec 64% des fragments, l'essence dominante. Le sapin est également bien représenté (30.7%). Les huit autres essences qui ont été identifiées ne forment que 5.3% du total (tab. 4).

Si le bois qui pousse sur les terrains avoisinants est souvent celui que l'artisan semble préférer du fait de sa proximité, des critères techniques (qualité du charbon) peuvent aussi entrer en ligne de compte (Pelet 1973). Cet aspect est très largement souligné par les auteurs anciens. Enfin, des contraintes sociales (propriété de la forêt) peuvent également influencer le choix des artisans.

Attribution	F1-a	F1-d	F1-f	F2-a	F2-d	F2-f	Fdg	Zdr	Total
Essence									
Aulne		1	3		4	23			31
Chêne			4						4
Erable		6					2	3	11
Frêne							1		1
Hêtre	24	67	53	24	6	30	581	101	886
Noisetier						2	1		3
Orme						2	2		4
Résineux							15		15
Sapin		19	14	3	1	11	308	70	426
Saule ou peuplier			1				3		4
Total	24	93	75	27	11	68	913	174	1385
%	1.7	6.7	5.4	2.0	0.8	4.9	65.9	12.6	100

F1 : fourneau 1
F2 : fourneau 2
Fdg : foyers de grillage
Zdr : zones de rejet

a : alentours
d : destruction
f : fonctionnement

Tab. 4. Essences arboréennes dans les différents contextes archéologiques.

Les charbons forts, tirés des feuillus à bois dur (chêne, hêtre, etc.) donnent plus de chaleur à volume égal que les charbons doux des résineux (pin, sapin, etc.) ou des feuillus à bois tendre (aulne, bouleau, saule, peuplier, etc.) (Dubois 1990).

Pour la réduction du minerai de fer, les charbons forts sont, en principe, les combustibles les mieux adaptés, mais l'utilisation de charbons doux est bien attestée pour les périodes historiques (Pelet 1983). Les recommandations des auteurs anciens sont floues et contradictoires. Elles reflètent probablement avant tout des traditions régionales.

En résumé, le choix du bois utilisé pour le charbon peut être déterminé par les qualités propres aux différentes essences (contraintes technologiques) autant que par les ressources disponibles dans l'environnement de l'atelier.

Peu de sites archéologiques ont livré jusqu'à ce jour des données comparables (Pelet 1973; Abetel, à paraître). P.-L. Pelet souligne que "les forgerons de tous les ateliers ont préféré le hêtre et le chêne (plus de 70%) au meilleur pouvoir calorifique". Quant au sapin et autres résineux, il ajoute qu'"aucun conifère n'est utilisé, soit parce que le charbon de sapin n'est pas assez riche en calories pour la réduction du minerai, soit parce que les résineux, rares dans la forêt actuelle, sont absents de la sylve antique". Ce choix correspond cependant à la hiérarchie actuelle des feuillus, si l'on exclut les résineux.

Les fouilles d'un fourneau à Lajoux (Schweingruber 1976) donnent par contre des résultats semblables à ceux des Boulies : 57% de hêtre et 35% de sapin. Ce site est à 1000m d'altitude environ, tandis que celui des Boulies, distant de 13km à vol d'oiseau, se trouve à 550m.

La forêt naturelle du Jura est actuellement dominée par le hêtre entre 600 et 1000m d'altitude environ. Plus bas, entre 400 et 600m, elle est constituée essentiellement de chêne et de charme. Or, la bande de transition entre ces deux types de végétation n'est pas de largeur constante : sur les versants à pente uniforme, elle s'étend sur au moins 100m d'altitude (Moor 1952). La région des Boulies se situe justement dans cette zone. Par conséquent, le hêtre, le charme et le chêne faisaient certainement partie à l'époque de la forêt environnante, sans qu'il soit possible de préciser à quelle distance du site et dans quelles proportions. Selon toute vraisemblance, le taux du hêtre était plus élevé avant l'exploitation systématique des forêts, qui débute vers la fin du Moyen Age (Schweingruber 1976).

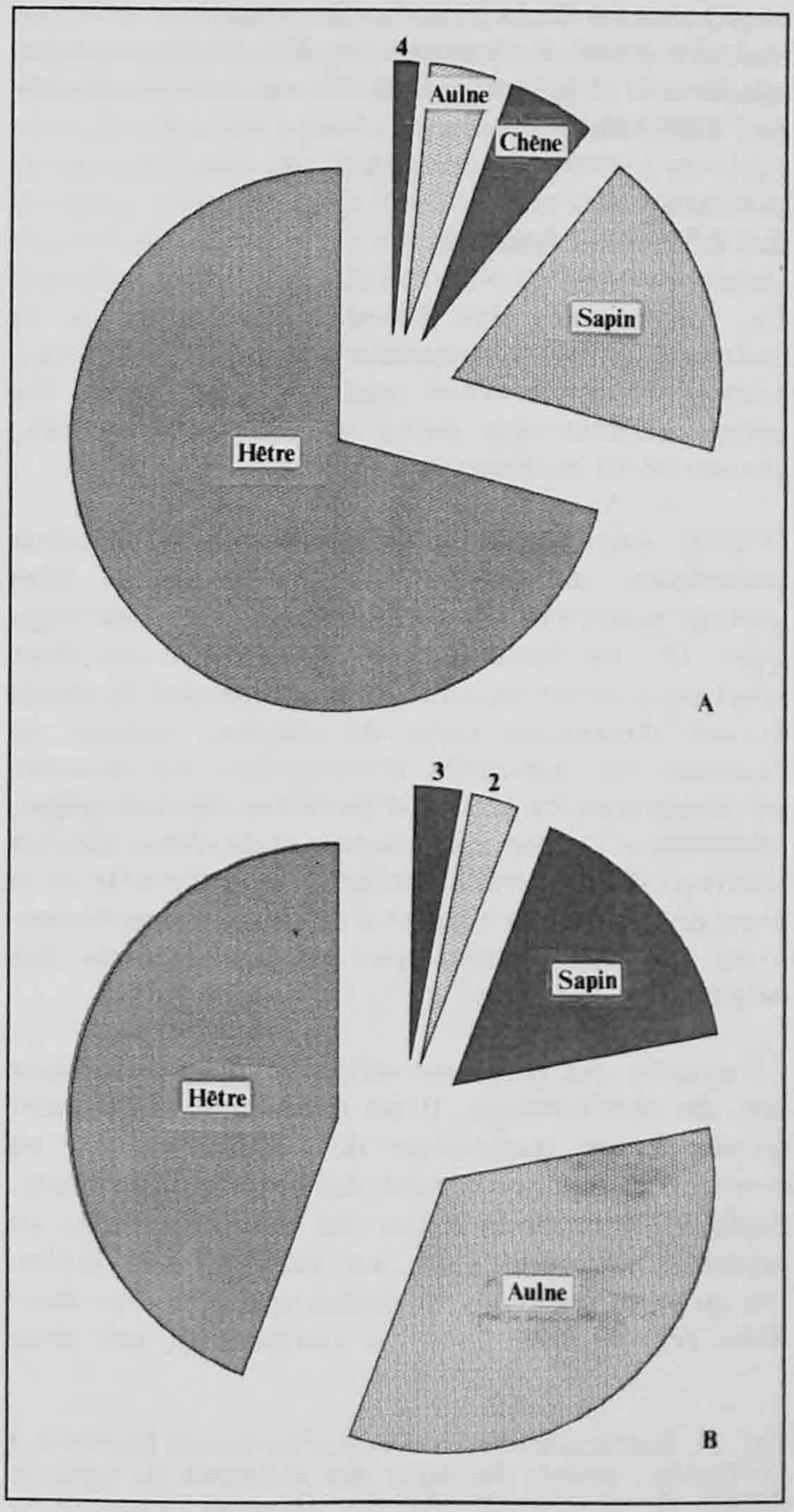


Fig. 12. Proportions des essences arboréennes de charbons de bois (normées à 100%). A : sédiment du fond du fourneau 1. B : sédiment du fond du fourneau 2. 2 : noisetier; 3 : orme; 4 : saule / peuplier.

La proportion de deux tiers de hêtre pour un tiers de sapin qui ressort de l'analyse des charbons des Boulies témoigne d'un abattage sélectif des arbres. En effet, la part importante de charbon doux (sapin) dans les combustibles est l'indice incontestable d'une sélection du bois à charbonner. Ce choix bien dosé des essences peut être davantage détaillé. Lors du dernier fonctionnement du bas fourneau 1, les charbons forts (hêtre et chêne) représentent 76%. En revanche, pour le bas fourneau 2, le charbon fort n'atteint plus que 47% dans la dernière utilisation qui correspond à l'ultime emploi des installations de l'atelier (fig. 12; chap. 6.3, p. 93).

Cette modification des proportions pourrait être le témoignage d'une évolution des habitudes de charbonnage au cours de la période d'exploitation. A la fin, le hêtre vient à manquer et des essences moins adaptées le remplacent. Faut-il y voir une des raisons de l'abandon du site ?

2.3 L'impact humain

La comparaison des données palynologiques et anthracologiques fait apparaître de nettes différences. L'absence de certaines essences, tant parmi les pollens (érable) que parmi les charbons (bouleau, charme et if) est frappante (fig. 13).

D'après leur position stratigraphique, les spectres polliniques témoignent vraisemblablement d'un paysage postérieur à la période des activités sidérurgiques. Or, les variations observées entre ces deux spectres, à savoir un accroissement marqué du chêne et une diminution nette du charme, mettent en évidence les difficultés d'interpréter les données palynologiques en termes d'évolution chronologique. Néanmoins, l'absence du charme et du chêne dans les charbons du site tend à souligner la postériorité de la pluie pollinique par rapport à la phase de fonctionnement du site; à moins que ces pollens aient une origine plus lointaine.

Le spectre des charbons reflète les choix effectués lors du charbonnage. Il ne donne par conséquent qu'une image incomplète de l'environnement au moment du fonctionnement des deux bas fourneaux. Seuls le hêtre et le sapin ont été consommés en quantités importantes sur l'atelier. Il est donc probable qu'au moment de l'installation du premier fourneau (et d'autres dans les environs ?), ces deux

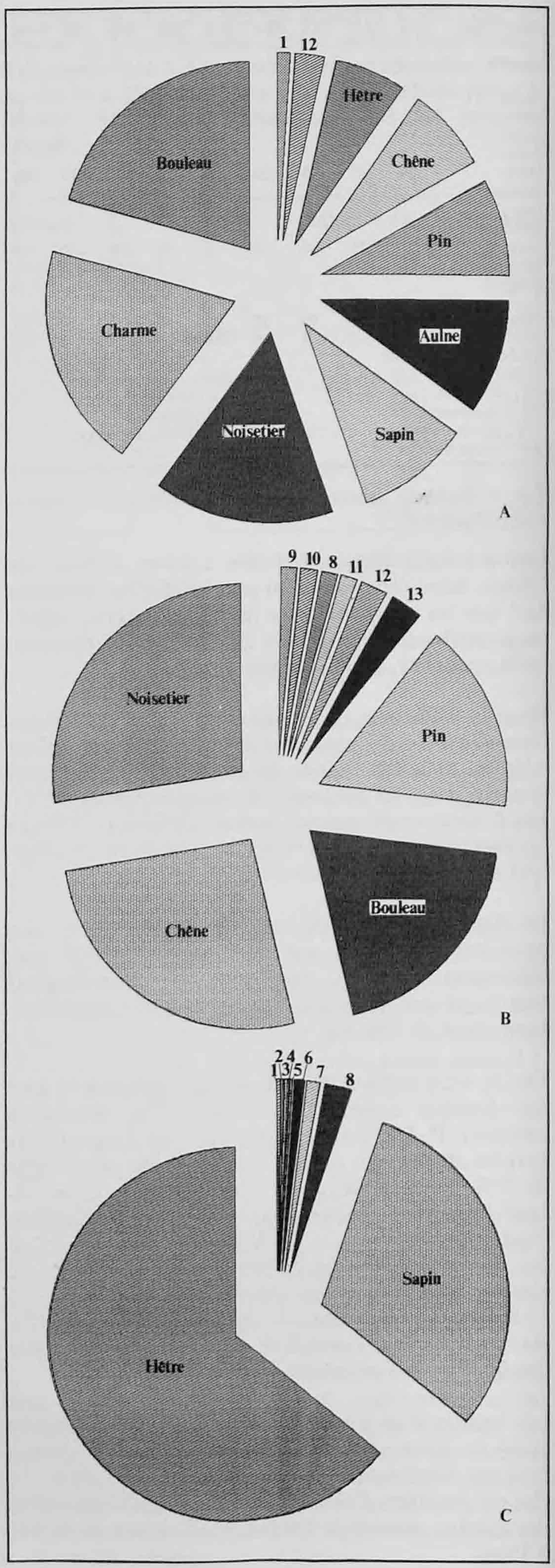


Fig. 13. Proportions des essences arboréennes (normées à 100%). A : spectre pollinique des sédiments du foyer de grillage; B : spectre pollinique des sédiments du sommet du remplissage du bas fourneau 2; C : spectre des charbons. 1 : frêne; 2 : noisetier; 3 : orme; 4 : saule / peuplier; 5 : chêne; 6 : érable; 7 : épicéa / pin / mélèze; 8 : aulne; 9 : if; 10 : hêtre; 11 : sapin; 12 : épicéa; 13 : charme.

essences faisaient encore partie du paysage végétal alentour, à moins que le charbon ait été transporté sur une plus grande distance.

En conclusion, le paysage qu'évoquent les spectres polliniques est celui d'une forêt dégradée où existent des espaces ouverts. Le hêtre et le sapin y sont très discrets. L'atelier des Boulies a pu contribuer à cet état de fait, mais sa consommation reste modeste (chap. 7, p. 99). Il n'est sans doute pas le seul responsable.

L'installation de cet atelier mérovingien n'est certainement pas intervenue en pleine forêt. Au contraire, il y a de fortes chances pour que l'industrie métallurgique dans ce secteur soit antérieure aux VI/VIIe siècles (Quiquerez 1866). L'image de la végétation corrobore cette impression : les essences dominantes (bouleau, noisetier), aimant la lumière et l'humidité, recolonisent des espaces défrichés avant ou pendant l'utilisation du site sidérurgique.

Les pollens non arboréens tendent à compléter cette vision : les céréales et le plantain parlent pour l'existence de champs cultivés dans les environs, c'est-à-dire peut-être dans des zones défrichées auparavant pour fabriquer du charbon ou pour un autre type d'exploitation.

Rappelons qu'à l'époque mérovingienne, le peuplement humain de la vallée de Delémont est déjà dense (chap. 9, p. 117); il succède à une importante phase de colonisation datant de l'époque romaine (Paccolat 1991).

L'image du paysage ainsi reconstituée reste floue dans l'espace et dans le temps. Si l'on tient compte de l'influence des vents dans les phénomènes de pollinisation, il est possible que les artisans aient trouvé du hêtre et du sapin en quantité suffisante, par exemple sur le versant proche de la colline du Tramont. On ne peut pas apporter la preuve que les alentours immédiats de l'atelier ont réellement fourni le bois nécessaire. Le charbon a peut-être aussi été fabriqué à une certaine distance des fourneaux ou acheté à un charbonnier, mais dans l'état actuel des connaissances, nous ne sommes pas encore en mesure d'aborder ces questions qui relèvent du domaine socio-économique.

Chapitre 3

Les mines et le minerai

avec la collaboration de Bernard Hiltpold

Sur le plan régional, le territoire prospecté comprend un ensemble de petits vallons situés à l'extrémité nord-ouest du Bassin de Delémont ouvert dans la partie nord du Jura plissé. Cet ensemble constitue une sorte d'appendice à la convergence des anticlinaux de la Caquerelle et du Vorbourg, affecté, tout au nord, par une zone de cisaillements d'influence rhénane (Laubscher 1948).

A l'échelon plus local, le territoire est marqué principalement par une tectonique liée au plissement du Jura. Les vallons principaux se creusent dans l'assise calcaire du Malm au pied du versant sud de l'anticlinal de la Caquerelle. Les pendages, régionalement fort variables, se stabilisent aux environs de 10° dans le contexte des Lavoirs.

Au lieu-dit Les Lavoirs, à la confluence de la Rouge Eau et de l'Avatte, les gorges, jusque-là étroites, s'élargissent en une petite vallée alluviale (Quaternaire). A cet endroit, la création d'un étang artificiel a largement modifié la géomorphologie locale (non cartographié).

Le petit vallon des Boulies, quant à lui, se creuse dans les Graviers vosgiens (Pliocène). La rivière qui le parcourait entaillait le Sidérolithique (Eocène) au sud-est de la ferme des Cerneux. Devenue éphémère, elle n'avait plus aucun pouvoir érosif.

3.1 Le soubassement géologique

Cet aperçu stratigraphique se réfère à la notice explicative de la feuille 40 de l'Atlas géologique de la Suisse au 1:25'000, 1085 St-Ursanne (Laubscher 1963; fig. 14).

Le Kimméridgien (Malm)

D'une puissance maximale de 90m, le Kimméridgien, constitué de calcaires généralement micritiques, parfois microsparitiques ou oolithiques, se divise en bancs massifs métriques, voire parfois en plaquettes décimétriques. Dans la partie sommitale, les calcaires sont largement disloqués par des diaclases élargies en chenaux ou en d'autres types de cavités karstiques. Ce lapiaz plus ou moins profond est généralement comblé de matériaux sidérolithiques (Eocène). Sur l'esquisse géologique, tout au nord, le Portlandien apparaît de manière sporadique. Toutefois, il reste insignifiant dans notre étude et n'a pas fait l'objet d'un figuré particulier.

L'Eocène

A l'affleurement, seul le Sidérolithique a été reconnu. Il est représenté par une formation argileuse rouge ou rouge-orangée à concrétions ferrugineuses. Sur la majeure partie du territoire, le Sidérolithique est très fortement érodé. Sa position dans les structures karstiques du Kimméridgien lui confère une répartition spatiale très aléatoire, fortement perturbée par l'exploitation minière. Seuls les affleurements sidérolithiques marqués d'un triangle constituent des localités à séquence non perturbée par l'exploitation minière. Les deux meilleurs affleurements sont la séquence stratigraphique de référence des Cerneux et une suite de cavités karstiques à argile très riche en pisolithes au Cras des Fonnés.

L'Oligocène

Aucune formation oligocène n'a été reconnue régionalement, que ce soit dans les forages, dans les sondages ou durant les investigations de terrain.

Le Pliocène

Il s'agit essentiellement des Graviers vosgiens (ou Galets vosgiens) à matrice argilo-sableuse fine. Les galets et cailloux sont composés de roches cristallines, volcaniques, métamorphiques, calcaires ou exceptionnellement de grès.

Ces formations sont discordantes sur l'Eocène ou le Kimméridgien et auraient été mises en place par de grands fleuves qui, au Plio-Pléistocène, s'écoulaient du pied des Vosges vers le Bassin helvétique (Liniger 1966). Elles constituent une des curiosités géologiques du Jura septentrional.

Quaternaire

Les fonds de vallons sont principalement occupés par des alluvions constituées d'un mélange de graviers vosgiens et d'éléments calcaires dans une matrice

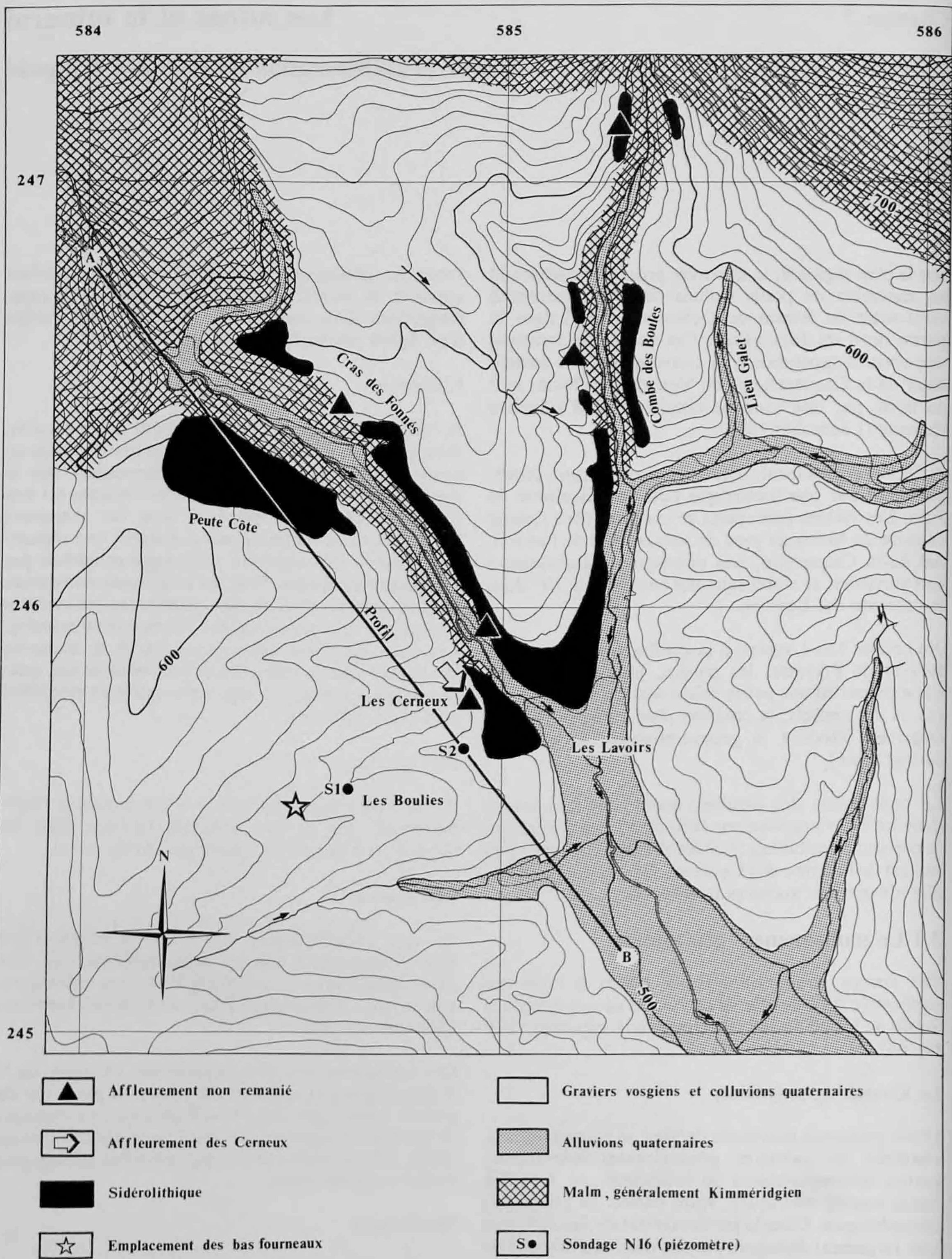


Fig. 14. Esquisse géologique du Rayon de Séprais. Situation du profil géologique (fig. 15). Echelle : 1:12500.

limono-sableuse. En surface, depuis les Lavoirs jusqu'au confluent avec la Sorne et même au-delà, les sédiments comportent une forte proportion d'argile rouge résultant de l'activité minière (lavage) et de l'érosion des dépôts sidérolithiques perturbés.

Dans la région de l'étang artificiel des Lavoirs, la dérivation du cours de l'Avatte a entaillé une formation palustre bien développée d'environ 3m de puissance.

Sur les versants et au pied des falaises, on trouve des colluvions à base vosgienne et des débris de pente grossiers à base calcaire.

Les différentes observations du terrain alentour nous permettent de suggérer un profil géologique (fig. 15). Cette représentation est fortement simplifiée, puisque la répartition spatiale, la géométrie et la situation karstique exacte des dépôts sidérolithiques sont, de par la nature même du sédiment, impossibles à préciser localement. Les séquences des forages S1 (recouvrement tertiaire et quaternaire 12.2m, Sidérolithique 7.8m) et S2 (recouvrement tertiaire et quaternaire 6.4m, Sidérolithique 6.4m), recoupent toutes deux le niveau de bolus à pisolithes. On peut donc supposer que le Sidérolithique s'étend de façon continue sous le vallon des Boulies pour finalement affleurer au sud-est de la ferme des Cerneux. Une photo aérienne du 15 mars 1972 signale à cet endroit la présence d'une carrière aujourd'hui entièrement comblée.

3.2 Le minerai

3.2.1 Le Sidérolithique à l'affleurement

Le nom de Sidérolithique désigne une formation géologique complexe caractérisée par des argiles rouges (bolus) à concrétions ferrugineuses (pisolithes). Généralement, le bolus est accompagné d'autres sédiments de nature très variée (sables siliceux, argiles diverses et même des calcaires plus ou moins conglomératiques). L'ensemble de ces dépôts dérive de paléosols ferralitiques continentaux d'âge Eocène (Fleury 1909). Ils constituent le résultat d'un processus physico-chimique complexe sous l'action d'un climat chaud et humide (Segalen 1964). Dans le secteur étudié, en raison de phénomènes d'érosion postérieurs, le Sidérolithique se présente aujourd'hui sous forme de remplissage karstique dans les nombreuses cavités perforant le sommet des calcaires du Kimméridgien, voire en lambeaux d'extension variable. Dans tous les cas, le Sidérolithique est discordant sur les calcaires du Kimméridgien.

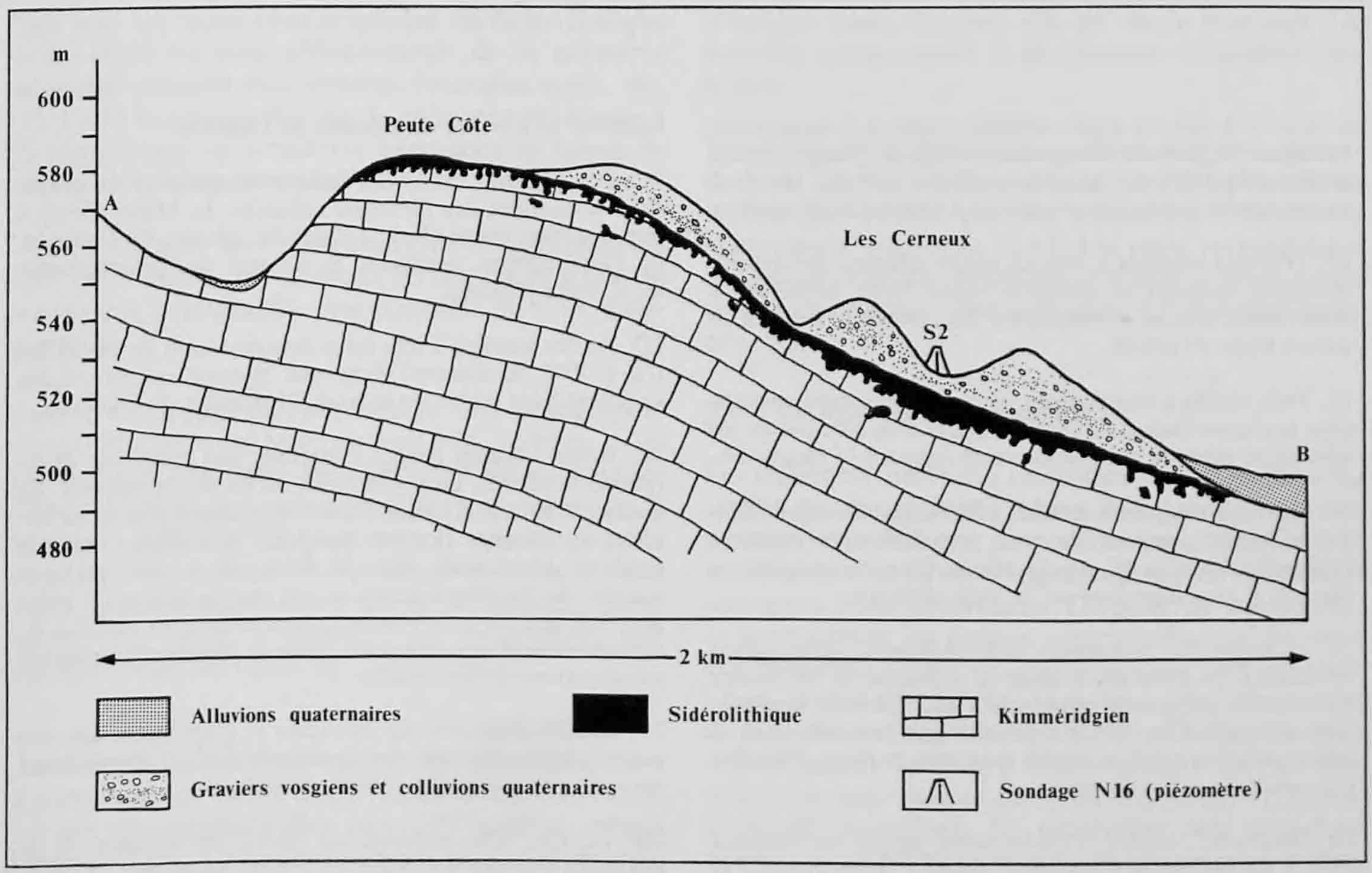
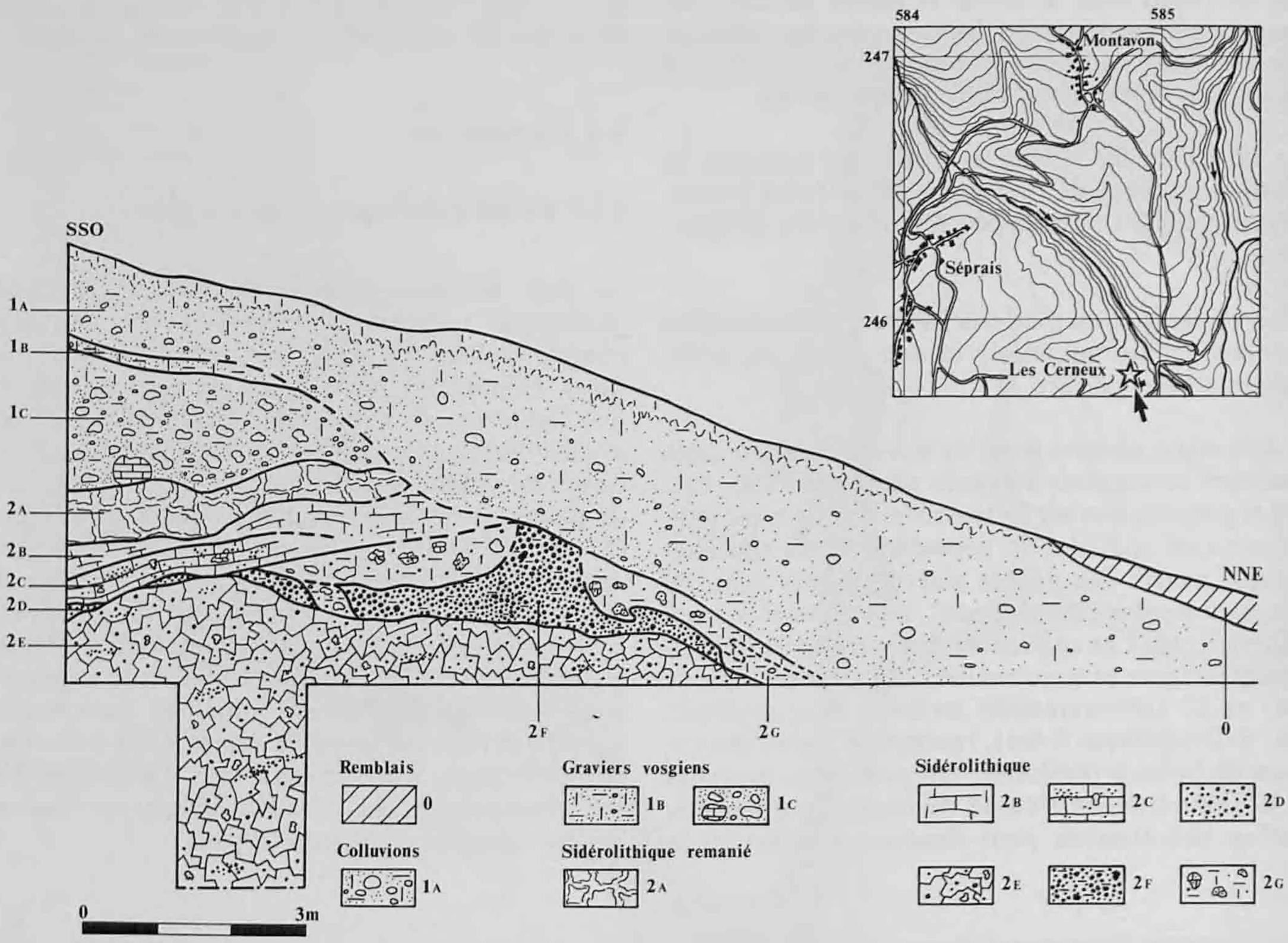


Fig. 15. Profil géologique schématique A-B (fig. 14). Le vallon des Boulies (avec le sondage S2) entaille largement les Graviers vosgiens dont il est difficile de distinguer la part colluviale. Les hauteurs sont exagérées 6 fois par rapport aux largeurs.



0. Gravier à matrice argilo-sableuse rouge et à composante humique. Il contient des graviers vosgiens (5cm), de très nombreux pisolithes ainsi que quelques agrégats (4cm). Il est interprété comme un remblai lié à l'exploitation minière.

1A. Graviers vosgiens à matrice argilo-sableuse décalcifiée. Eléments vosgiens et calcaires d'une taille inférieure à 20cm. Cette couche correspond à des colluvions scellant un ancien front d'érosion.

1B. Petit niveau à composante vosgienne fine dans une matrice argileuse diffuse. Il pourrait s'agir d'un très ancien sol développé avant le colluvionnement formant le niveau 1A.

1C. Graviers vosgiens à matrice sablo-argileuse décalcifiée. Ce sédiment contient de très gros éléments calcaires (130cm). Le niveau 1C représente les Graviers vosgiens en place et il est discordant sur le Sidérolithique.

2A. Lentille de matériaux sidérolithiques hétérogènes décalcifiés. La coloration divise le sédiment en un damier à géométrie polygonale semblable à des figures de dessiccation. Il s'agit d'un dépôt sidérolithique remanié dont la limite inférieure est marquée par une surface d'érosion (présence de petits chenaux).

2B. Niveau de calcaire crayeux altéré, pauvre en éléments figurés et parfois légèrement disloqué. Il est corrodé et constitue le sommet du calcaire de Daubrée.

2C. Conglomérat calcaire à forte concentration de pisolithes. Il contient des éléments calcaires du Malm (5cm) à imprégnation rouge (fer). Il s'agit du calcaire de Daubrée, ou Gompholithe, marquant le sommet du Sidérolithique local, voire régional.

2D. Petites lentilles à très forte concentration de pisolithes (60 à 70% du volume) dans une matrice calcaire. Elles semblent faire partie de la base du calcaire de Daubrée.

2E. Bolus : argiles rouges contenant des pisolithes épars (patine verdâtre), en petits filons ou en petits paquets. La matrice argileuse contenant une faible proportion de carbonates au sommet devient compacte à cassante dans le sondage. Disséminés dans le bolus on trouve quelques reliques de fragments calcaires corrodés et diffus. Le bolus constitue une sorte de brèche compacte dont les surfaces de démantèlement sont des petits plans de glissement indiquant un réajustement tectonique.

2F. Lentille compacte de pisolithes et d'agrégats dans une matrice argileuse rouge peu abondante (bolus). Pisolithes et agrégats occupent jusqu'à 60% du volume.

2G. Lentille d'un mélange de bolus, de calcaire et de pisolithes formant une sorte de brèche marneuse.

Fig. 16. Coupe stratigraphique de l'affleurement de Sidérolithique des Cerneux (pl. 1, p. 33).

L'étude systématique des dépôts sidérolithiques dans le périmètre d'investigation nous a permis de définir trois catégories d'affleurements. Les pourcentages de surface sont approximatifs.

Les affleurements en position stratigraphique normale sont des dépôts non perturbés par l'exploitation minière (fig. 14). Ils se trouvent en contact avec le substrat calcaire du Kimméridgien ou sont scellés par un banc calcaire à éléments conglomératiques : le calcaire de Daubrée. Ce dernier constitue le sommet du Sidérolithique local. Cette catégorie comprend 5% des surfaces visibles.

Les épandages miniers sont des dépôts sidérolithiques remaniés par l'exploitation minière en position stratigraphique normale (dépliant n° 1 : trame claire). Il s'agit donc d'affleurements naturels que l'exploitation minière a élargis et remaniés. C'est le cas de 85% des surfaces étudiées.

Les dépôts en position secondaire correspondent à des matériaux sidérolithiques amenés par l'homme sur des sédiments plus jeunes (dépliant n° 1 : trame sombre). Ils constituent en quelque sorte des parasites cartographiques sans liens stratigraphiques normaux. Dans notre étude, ils se situent généralement sur les Graviers vosgiens et plus rarement sur des sédiments quaternaires. Cette catégorie englobe environ 10% des surfaces visibles (taches, monticules, etc.).

Pour une approche stratigraphique du Sidérolithique local, seuls les cinq affleurements de la première catégorie peuvent être retenus (triangles noirs, fig. 14). Dans la plupart des cas, le sédiment se résume à un remplissage de structures karstiques en forme de poches métriques ou de lapiaz.

C'est seulement lors de travaux de construction au nord de la ferme des Cerneux qu'il a été possible de relever une stratigraphie plus complète du Sidérolithique local.

Dans le talus nord de l'excavation, une stratigraphie exceptionnelle a été mise au jour (fig. 16 et pl. 1, p. 33). Celle-ci a en outre été complétée par un sondage supplémentaire interrompu à -270cm en raison de la dureté du sédiment (bolus compact) sans atteindre le soubassement calcaire. Le profil, relevé sur le talus d'une pente variant entre 20 et 40 degrés, a été corrigé de façon à obtenir, par projection, une représentation verticale de l'affleurement.

Les travaux ont encore permis de découvrir, dans la partie est (au mètre 12, à 3m en avant du profil), la trace rectangulaire d'un puits (160 x 90cm) rempli d'argile rouge. Celui-ci rejoignait le Sidérolithique. La fonction de ce puits reste énigmatique du fait de l'impossibilité de poursuivre les investigations pour en connaître le fond ou le prolongement dans le Sidérolithique. Cependant, ni dans la coupe ni dans le sondage, des traces de travaux miniers ne perturbent la stratigraphie.

Le complexe séquentiel fortement tourmenté du Sidérolithique local témoigne d'un ensemble de cycles d'érosions et de dépôts imbriqués. Il corrobore aussi l'hypothèse d'un sédiment continuellement remanié, enrichi et modifié par des processus physico-chimiques complexes. Une corrélation des niveaux avec les autres affleurements est donc tout à fait subjective. La séquence entrecoupée de nombreuses microdiscontinuités n'est qu'une expression locale des dépôts sidérolithiques. L'étude des autres affleurements en position stratigraphique normale, tous en liaison avec un lapiaz bien développé, permet de suggérer une géométrie analogue pour la base de la séquence des Cerneux. La nature du dépôt sidérolithique de cet environnement karstique est, dans la majorité des cas observés, similaire à celle de la lentille 2F. L'ensemble des affleurements étudiés, ainsi que ceux de la bibliographie (Fleury 1909), amène à la conclusion que les niveaux les plus riches en pisolithes se situent généralement au contact avec le substrat calcaire, et plus rarement sous forme de lentille d'extension variable dans le bolus.

Scellant le Sidérolithique, le calcaire de Daubrée marque un changement dans la dynamique sédimentaire qui devient carbonatée. Une nouvelle phase d'érosion laisse derrière elle un résidu marneux 2A pouvant correspondre à un éventuel Oligocène très réduit.

Vient ensuite le dépôt des graviers vosgiens discordant sur 2A et le Sidérolithique. Ils sont eux-mêmes érodés puis scellés par des colluvions à très forte composante vosgienne (1A). Un puits rectangulaire creusé à même ces colluvions et à proximité du profil atteste que ceux-ci sont antérieurs à l'exploitation du minerai.

3.2.2 Le minerai sidérolithique

Les différents matériaux sidérolithiques, aussi bien les argiles que les sables et même les calcaires, contiennent toujours du fer en proportions variables. Celui-ci se présente sous forme d'imprégnations, de substances amorphes ou de concrétions. Du point de vue minier, ce sont surtout les formes concrétionnaires qui sont intéressantes. Les plus caractéristiques sont les pisolithes, grains de couleur jaune-brun, globuleux, aux surfaces arrondies et lisses (fig. 19). Leur taille varie ordinairement de 1mm à 1cm, mais il n'est pas rare d'en rencontrer de plus petits ou de plus gros (jusqu'à 20cm de diamètre). Ils présentent une structure interne caractéristique composée d'un noyau homogène entouré d'enveloppes concentriques fines (fig. 18). Les agrégats, composés de plusieurs pisolithes

Ech.	SEP 101	SEP 111	BOE 105	BOE 106	BOE 109	BOE 111	SEP 102	SEP 112	SEP 113	SEP 121	BOE 104	BOE 107	BOE 108	BOE 110	BOE 112	BOE 101	BOE 102	BOE 103
Eléments majeurs [% poids]																		
SiO2	33.46	20.28	35.25	45.36	19.48	15.49	10.69	9.84	10.00	14.15	10.35	12.64	11.24	12.32	11.06	10.72	12.13	11.76
TiO2	1.22	0.80	1.82	1.49	0.75	0.63	0.73	0.45	0.55	0.80	0.53	0.62	0.68	0.61	0.63	0.80	1.29	1.42
Al2O3	25.17	17.73	24.04	26.60	14.83	11.85	13.25	11.41	12.20	15.22	12.38	13.54	13.13	12.88	12.44	14.84	15.53	16.24
Fe2O3	27.43	46.92	25.92	14.65	51.87	59.93	60.84	63.94	63.28	55.35	62.99	57.82	60.33	60.76	62.30	67.06	62.98	63.35
FeO	0.08	0.27	0.09	0.03	0.13	0.20	0.13	0.15	0.01	0.22	0.20	0.56	0.37	0.11	0.09	0.28	0.18	0.56
MnO	0.06	0.11	0.04	0.03	0.11	0.08	0.10	0.10	0.11	0.07	0.05	0.09	0.08	0.08	0.11	0.10	0.07	0.07
MgO	0.12	0.14	0.09	0.20	0.14	0.06	0.11	0.09	0.12	0.04	0.06	0.09	0.09	0.06	0.10	0.00	0.00	0.00
CaO	0.24	0.67	0.28	0.38	0.22	0.19	0.15	0.16	0.15	0.10	0.10	0.19	0.12	0.12	0.17	0.05	0.03	0.05
Na2O	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K2O	0.24	0.15	0.11	0.42	0.10	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02
P2O5	0.12	0.33	0.11	0.07	0.25	0.26	0.21	0.60	0.55	0.24	0.29	0.28	0.19	0.33	0.33	0.34	0.30	0.26
H2O	11.71	11.33	10.95	9.85	10.78	10.13	12.35	11.95	12.04	12.17	11.99	12.60	12.40	11.48	11.62	4.36	5.77	3.99
CO2	0.38	1.23	0.44	0.29	0.82	0.85	0.94	0.79	0.63	1.01	0.61	0.91	0.73	0.79	0.92	1.10	0.96	1.30
FeM	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	100.25	99.96	99.14	99.38	99.48	99.69	99.51	99.50	99.66	99.38	99.56	99.35	99.37	99.55	99.79	99.67	99.25	99.02
Eléments traces [ppm]																		
Zr	243	174	435	310	198	182	214	99	136	197	139	165	164	149	180	194	332	361
Y	26	39	29	26	42	43	45	54	48	35	39	45	49	39	47	33	36	34
Sr	29	33	36	34	20	16	15	23	21	20	17	18	17	16	16	11	12	7
Rb	31	22	16	60	14	4	2	3	4	3	2	3	3	3	3	4	3	2
Ba	68	51	81	101	51	30	32	25	24	20	25	49	22	25	31	27	26	22
V	450	452	463	290	1020	1348	1597	470	656	1297	1416	1219	1031	1260	1274	1444	1350	1517
Sn	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Sb	<5	<5	<5	<5	5	<5	5	5	<5	7	7	<5	<5	<5	6	<5	10	7
Ag	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2
As	47	166	133	41	102	133	123	188	211	97	125	94	135	112	142	132	94	104
Pb	72	71	71	69	97	119	91	30	44	106	115	92	83	85	93	119	87	93
Zn	85	109	72	66	125	129	147	141	163	115	166	118	112	108	139	111	122	112
Cu	31	41	16	16	52	62	64	42	49	45	48	38	31	43	59	46	28	27
Ni	103	146	92	79	128	135	146	149	171	158	138	128	132	105	141	160	136	128
Cr	298	234	311	177	519	754	882	150	312	406	354	391	347	366	602	357	370	507
Co	48	74	33	16	62	71	91	80	90	95	91	94	88	69	74	104	80	67

Ech.	Localisation	Description
SEP 101	Les Lavoirs (affleur. 594950/245950)	tout-venant (35% pisolithes)
SEP 111	Combe des Boules (affleur. 585300/247200)	tout-venant (50% pisolithes)
BOE 105	Les Boulies dépression 18	tout-venant (± 20% pisolithes)
BOE 106	Les Boulies monticule 1	tout-venant (± 5% pisolithes)
BOE 109	Les Cerneux (affleur. 584925/245775)	tout-venant (56% pisolithes)
BOE 111	Les Cerneux	pisolithes lavés (± 10% argiles)
SEP 102	Les Lavoirs	pisolithes lavés
SEP 112	Combe des Boules	pisolithes lavés
SEP 113	Combe des Boules	pisolithes (± 10% argiles)
SEP 121	Cras des Fonnés (affleur. 584500/246650)	pisolithes lavés
BOE 104	Les Boulies tache 6	pisolithes lavés
BOE 107	Les Boulies monticule 2	pisolithes (± 10% argiles)
BOE 108	Les Boulies puits 7	pisolithes lavés
BOE 110	Les Cerneux	pisolithes lavés
BOE 112	Les Cerneux	pisolithes lavés
BOE 101	Les Boulies P4, c.1 (site)	pisolithes grillés
BOE 102	Les Boulies tranchée 8	pisolithes grillés
BOE 103	Les Boulies tranchée 8	pisolithes grillés

Tab. 5. Analyses de minerais.

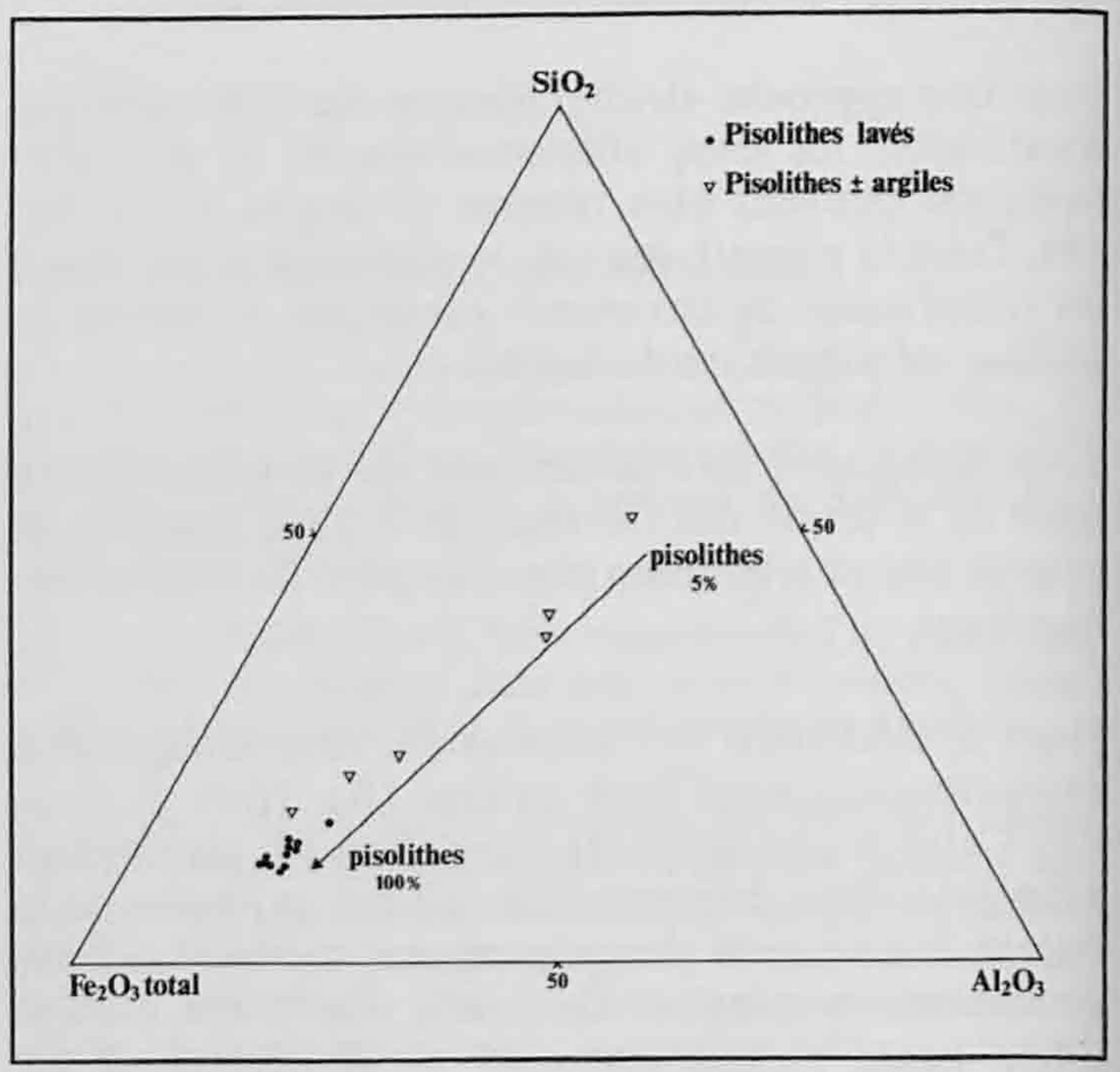


Fig. 17. Composition chimique des minerais. Variation en fonction du pourcentage de pisolithes.

enrobés par une enveloppe commune, sont également très fréquents; d'autres types de concrétions se rencontrent aussi.

Ces concrétions sont essentiellement composées d'Hématite (Fe2O3) et de Goethite (FeO.OH). Elles ne sont toutefois jamais pures et contiennent de la Silice (SiO2) ainsi que des minéraux argileux tels que la Kaolinite (Al2Si2O5 (OH) 4).

Des pisolithes provenant du site et d'affleurements proches ont été analysés (fig. 17 et tab. 5; annexe 3). Le fer, très abondant, est presque totalement au degré d'oxydation 3^+. Il y a systématiquement un peu plus d'alumine que de silice. Si l'on ajoute l'eau à ces trois composants, ils représentent plus de 97% du poids total des échantillons.

Planche 1 :

En haut : vue aérienne du secteur d'investigation. La partie supérieure du vallon des Boulies, orientée vers le sud-ouest, se distingue par des taches rouges sur les deux versants; le site métallurgique (tache noire) est localisé dans cette partie (fig. 2, p. 10; fig. 25, p. 42).

En bas : coupe stratigraphique de l'affleurement de Sidérolithique des Cerneux. Au centre de l'image, on distingue dans les sédiments rouges (bolus) une lentille rouge foncé, riche en pisolithes (fig. 16, p. 30).

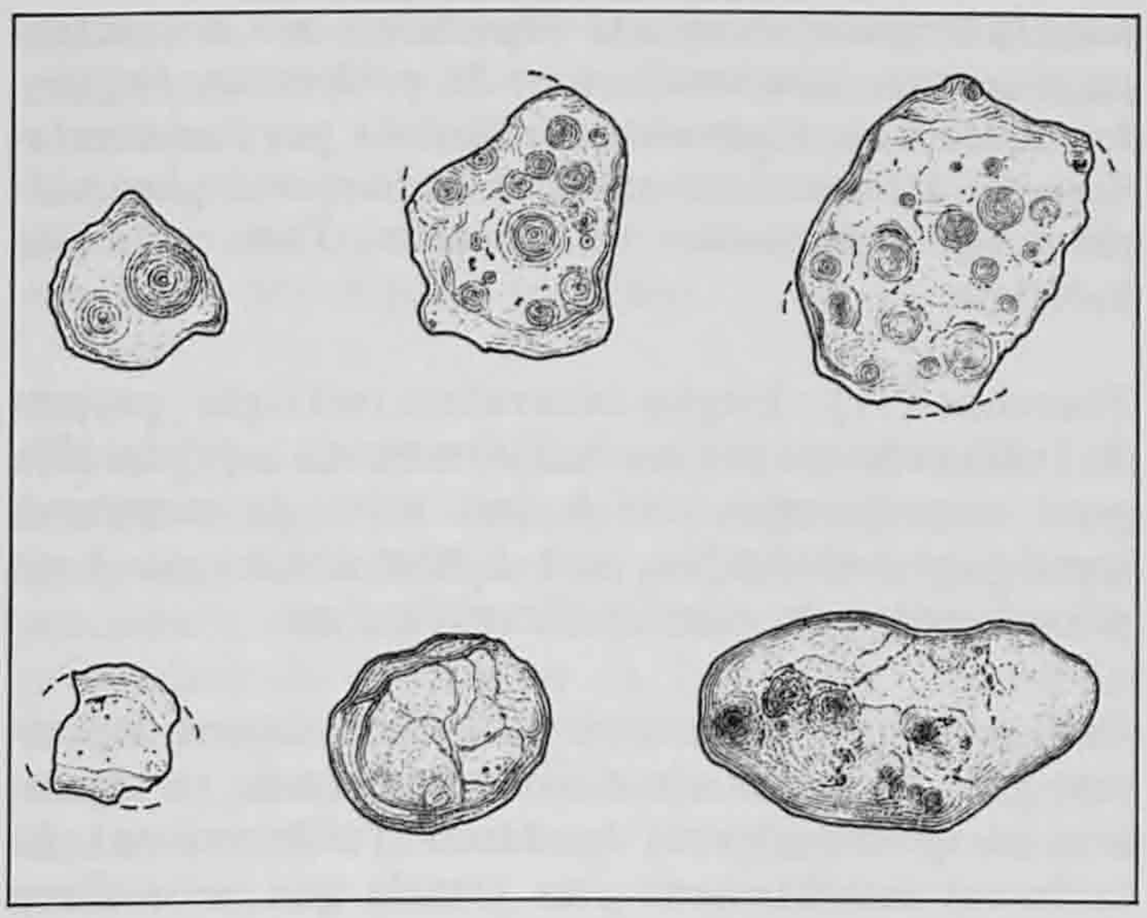


Fig. 18. Pisolithes. Coupe. Echelle : 1:1.

Pisolithes lavés : principaux composants chimiques				
	Fe2O3	**Al2O3**	**SiO2**	**H2O**
Maximum	63.94	15.22	15.49	12.60
Minimum	55.35	11.41	9.84	10.13

Parmi les éléments majeurs et mineurs, seul P2O5 présente des concentrations notables (0.19 à 0.60%) alors que les autres éléments sont pratiquement absents. Le calcium, en particulier, n'est présent qu'en quantités infimes (CaO ‹ 0.2%). Parmi les éléments traces, le vanadium (V, 500 à 1500 ppm) et dans une moindre mesure le chrome (Cr, 150 à 900 ppm) sont abondants.

Dans le secteur des Boulies, le bolus contient des concrétions ferrugineuses en proportions très diverses. Les échantillons analysés montrent bien que la teneur en fer globale est directement proportionnelle à l'abondance des pisolithes (fig. 17).

Argiles rouges sidérolithiques à pisolithes (bolus)		
	% pisolithes	**% Fe2O3**
Les Lavoirs	35	27.43
Combe des Boules	50	46.92
Les Cerneux	56	51.87

Ce sont donc les accumulations de pisolithes qui forment la matière première la plus intéressante pour les mineurs. Ces zones riches se rencontrent en poches ou en lentilles dans toute l'épaisseur des terrains sidérolithiques du secteur et en particulier à proximité du contact avec le soubassement calcaire.

Il faut noter que les argiles qui accompagnent les pisolithes sont très faciles à séparer. Il suffit d'un concassage grossier et d'un lavage à l'eau courante pour débarrasser les concrétions ferrugineuses de leur gangue argileuse. Entreposé à l'air libre, le minerai subit rapidement un lessivage considérable.

Ce lavage, élémentaire et facile à mettre en oeuvre, offre deux avantages : il permet d'une part d'obtenir un concentré (les pisolithes) à une teneur moyenne de 42% Fe et d'autre part de mettre en valeur des concentrations de pisolithes assez faibles.

Fig. 19. Pisolithes.

3.3 Les activités minières dans le Rayon de Séprais

3.3.1 Cartographie des vestiges

Les premières visites sur le terrain ont rapidement démontré un net désaccord entre les cartes géologiques (1085 St-Ursanne, Laubscher 1963; 1086 Delémont, Liniger 1966; 1:25'000) et la réalité. En effet, de nombreux épandages de matériaux sidérolithiques, parfois en position secondaire, sont cartographiés comme affleurements.

La carte que nous avons relevée (dépliant n° 1) constitue une représentation graphique de la répartition, de l'étendue et de la nature des remaniements liés à l'exploitation minière.

A cet effet, les critères cartographiques ont été de deux ordres :

- géologiques : ils rendent compte de la qualité, de la quantité et de la position stratigraphique des matériaux sidérolithiques contenus dans les sédiments de surface. On obtient ainsi la répartition territoriale des remaniements et des affleurements naturels.
- archéologiques : ils qualifient la nature du remaniement en tenant compte de la présence ou de l'absence de structures d'exploitation, de leur nombre, de leur emprise ainsi que de leur type.

La majeure partie de la surface cartographiée se trouve actuellement sous un couvert forestier plus ou moins dense. Le reboisement jardiné de différents secteurs du territoire a certainement conduit à un nivellement de structures à faible relief telles que les minières.

Le potentiel élevé de colluviabilité des pisolithes et des graviers vosgiens, ainsi que le lessivage des rejets de mine relativisent fortement l'interprétation spatiale et qualitative des environnements miniers. Toutefois, en l'absence de terres rouges ou orangées, les pisolithes en grand nombre restent l'indice local le plus probant de l'existence d'un dépôt sidérolithique remanié ou non.

Dans la partie supérieure des Lavoirs, l'épaisseur de l'épandage de stériles entre les structures d'exploitation atteint parfois un mètre. Il devient donc pratiquement impossible de distinguer l'affleurement proprement dit de son environnement remanié.

> De fait, les limites définies sur la carte correspondent à des limites arbitraires d'encadrement de zones comportant des matériaux sidérolithiques et non à des limites géologiques strictes.

3.3.2 Les structures minières

Les lettres entre parenthèses se rapportent à la carte du dépliant n° 1.

Structures d'extraction

Toutes les structures d'extraction décrites ci-dessous sont largement comblées par des colluvions et de la matière organique.

Minière (E, excavation) : structure d'exploitation minière à ciel ouvert. Sur le terrain, elle se présente sous la forme d'une petite dépression de 1 à 3 mètres de diamètre, subcirculaire et de profondeur limitée. La bordure est légèrement rehaussée par l'accumulation de déblais. Une minière correspond généralement à l'exploitation du contenu d'une structure karstique.

Tranchée (Tr) : longue excavation rectiligne, partant de l'affleurement perpendiculairement à la pente. Elle peut correspondre soit à une suite de structures karstiques imbriquées, soit à une entrée ou à un effondrement de galeries d'exploitation.

Petit puits (p) : petite excavation formant une dépression plus ou moins circulaire et profonde, se situant à la périphérie directe des zones d'affleurement. Sa taille est sensiblement plus grande que celle d'une minière. Le rehaussement de la bordure est aussi plus marqué. Les petits puits correspondent généralement à des sondages à partir de l'encaissant et plus rarement à des cheminées d'aération d'exploitations souterraines. Les matériaux de rejet, souvent constitués d'un mélange de graviers vosgiens et de matériaux sidérolithiques très lessivés, se situent toujours en position stratigraphique secondaire et, dans de nombreux cas, leur étendue rejoint, par colluvionnement ou épandage, la zone d'affleurement et d'exploitation à ciel ouvert.

Grand puits (P) : trou généralement vertical de section constante, creusé dans le sol en vue d'une exploitation minière : puits de sondage, d'aération ou d'exploitation. Sur le terrain, ils sont signalés par un monticule plus ou moins circulaire de 15 à 20 mètres de diamètre, comportant un trou central d'environ 3 mètres de diamètre plus ou moins comblé. Généralement, une partie du monticule est abaissée de façon à permettre l'évacuation des déblais ou du minerai. La nature des rejets du monticule permet de définir si les puits ont été productifs ou non. Les puits observés sont situés dans des zones éloignées des affleurements et creusés au travers de la couverture vosgienne. Ils témoignent d'une interprétation judicieuse de la géomorphologie.

Galerie (Ω) : voie de communication horizontale ou légèrement inclinée, permettant d'accéder à un front d'exploitation souterrain. Dans notre cas, elles suivent le sommet de l'assise calcaire du Kimméridgien afin de joindre des lambeaux ou des poches de minerai sous l'épaisse couche de graviers vosgiens. Aujourd'hui, nous observons encore de rares entrées à moitié comblées ou effondrées.

Structures de dépôts

Monticule (M) : amas de matériaux sidérolithiques en position stratigraphique secondaire et contenant généralement un pourcentage assez élevé de pisolithes. Excepté pour le monticule M4, la distance qui

les sépare du grand puits connu le plus proche, est supérieure à 50m. Leurs dimensions, à la base, n'excèdent pas 10 à 20m tandis que leur forme varie fortement : conique, conique tronqué, oblongue, déjective dans une pente, etc. Seule la longueur du monticule M8 dépasse les 100m.

Tache (T) : structure plus ou moins circulaire, de couleur rouge. La coloration rouge est due à des matériaux sidérolithiques en position stratigraphique secondaire. La surface varie de 100 à 400m² et la profondeur de coloration de 2 à 25cm. Toutes les taches rouges observées se situent sur les graviers vosgiens, généralement au-dessus des zones d'exploitation. Il est fort probable qu'il s'agisse de monticules arasés.

Autres structures

Barrage (B) : amas structuré de matériaux sidérolithiques ou vosgiens transformant actuellement des petits vallons en zones marécageuses. Il s'agit probablement de constructions liées directement ou indirectement au lavage du minerai.

Chenal (C) : sorte de rigole. On les rencontre en séries de 3 à 6 subparallèles; elles convergent du haut du versant vers sa base. Leur largeur (2 à 3m) est quasi constante; leur longueur (50 à 150m), par contre, varie selon la position dans le versant et la superficie de celui-ci. Outre les colluvions, le remplissage se traduit parfois par un humus boueux dû à un ruissellement (Les Lavoirs) ou par un gravier lessivé, dans la zone de convergence (Les Cerneux).

Leur fonction exacte reste énigmatique. Cependant, il s'agit certainement d'aménagements liés à la collecte des eaux de ruissellement.

3.3.3 Répartition spatiale des vestiges

Le secteur minier se divise en trois grandes zones d'exploitation.

L'ensemble minier du Cras des Fonnés nord et la Peute Côte se caractérise exclusivement par une exploitation à ciel ouvert sur des affleurements structuraux. La géomorphologie se définit par deux petites plates-formes séparées par la gorge de la Rouge Eau. Leur charpente est constituée par un banc rocheux kimméridgien fortement karstifié. L'exploitation qui s'est effectuée au moyen de minières, suit l'enchaînement et la taille des structures karstiques. En dehors de la forêt, il faut noter que le nivellement agricole efface certainement de nombreuses structures.

Dans le secteur du Cras des Fonnés sud et de la Combe des Boules, les affleurements originels se situent dans les versants entre le talus de graviers vosgiens colluvionnés et la barre rocheuse kimméridgienne. La bordure de la barre est exploitée par des minières et par des tranchées qui s'enfoncent dans les versants. Parfois nous observons encore de rares vestiges de galeries effondrées dans le prolongement des tranchées. Celles-ci sont assez courtes et, dans la partie supérieure du versant, des petits puits ont été creusés. Il est très difficile d'en connaître chaque fois la fonction exacte. La configuration géomorphologique est donc déterminante quant au mode d'exploitation.

Le secteur des Lavoirs et des Cerneux (y compris la zone des Boulies) est situé à l'extrémité sud du plongement des couches géologiques, sous l'épaisse couverture vosgienne et les alluvions de la vallée. Il présente la particularité d'un affleurement assez large, très fortement remanié. Tous les types de structure d'exploitation et de dépôts y sont représentés. En chapelet autour de cette zone nous avons répertorié une série de puits parfois très éloignés des zones d'affleurements. Il témoigne déjà d'une bonne connaissance géomorphologique et structurale. A l'est de la ferme des Cerneux, un remblai moderne recouvre une grande partie de l'affleurement exploité.

Localement, l'impact des travaux miniers est extrêmement fort. La zone située en amont du confluent des ruisseaux de la Rouge Eau et de l'Avatte est un bon exemple (fig. 20). D'après les notes d'A. Quiquerez, une galerie aurait été réouverte par son équipe dans le microvallon à l'extrémité nord-ouest de la halde. La carte d'E. Baumberger confirme un ensemble de deux galeries, dont l'une partiellement effondrée, est encore visible au sud de la zone (fig. 22).

Il est certain que la halde correspond à une structure moderne, comme d'ailleurs un bon nombre de monticules au nord. L'ensemble des minières est plus difficile à situer dans le temps du fait que certaines, creusées dans les monticules mêmes, indiquent plutôt un essai de réexploitation des déblais.

Les minières se répartissent entre le début et la fin de l'exploitation, alors que les galeries, haldes et monticules appartiennent à une période plus récente. Dans la partie centrale, un ensemble de microtranchées et de minières semble se rapporter à une exploitation primitive.

Il est très difficile de donner une chronologie relative de ces structures, du fait d'un fort colluvionnement par lessivage et éboulement. Celui-ci serait dû à un déboisement intense durant l'exploitation. Aujourd'hui, la zone est couverte d'une forêt jardinée depuis 20 à 30 ans.

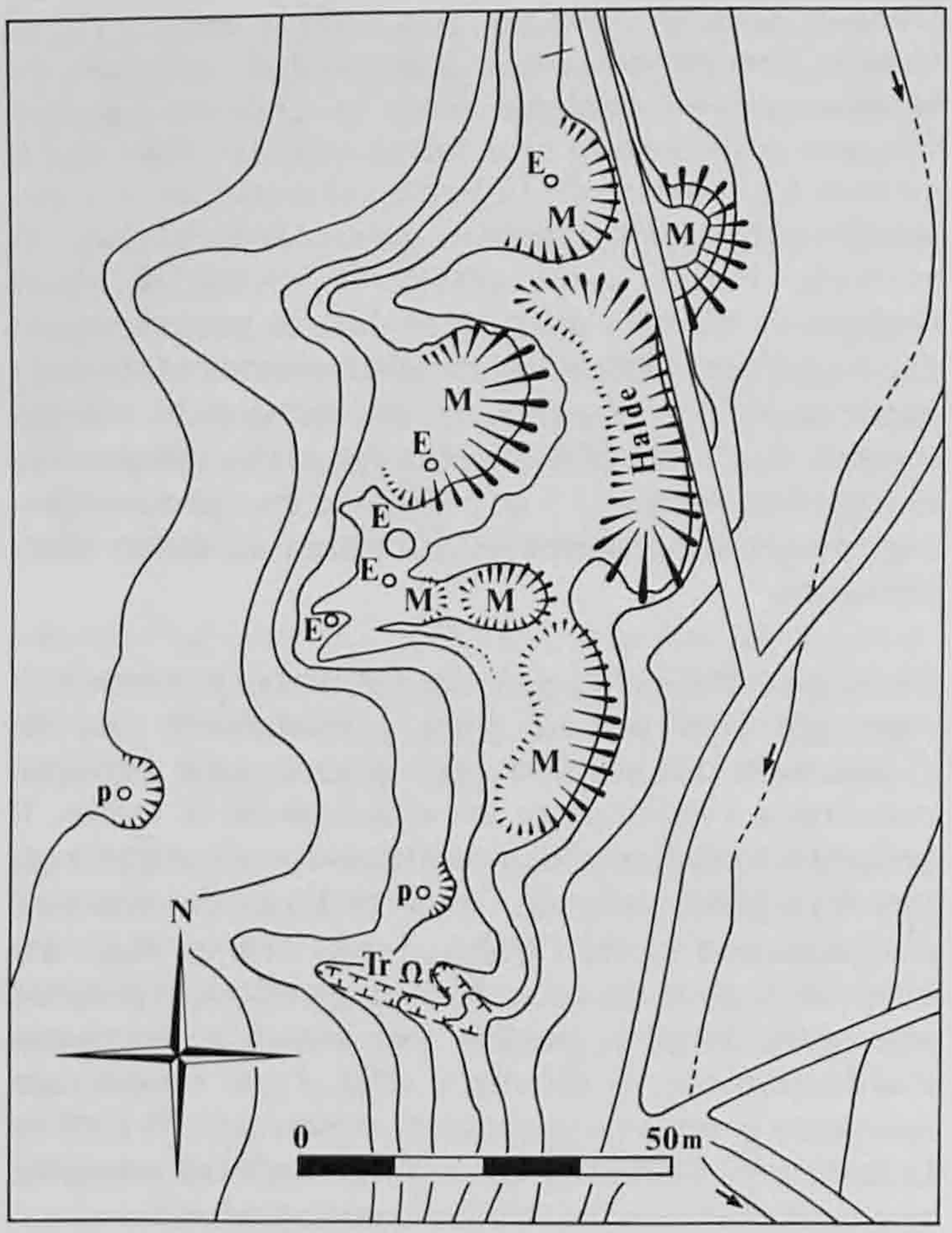


Fig. 20. Relevé schématique des structures minières (cadre I, dépliant n° 1). E : excavation (minière); M : monticule; p : petit puits; Tr : tranchée; Ω : galerie.

Les barrages

La structure B1, au sud des Lavoirs, au bord d'un affluent de la Rouge Eau, est construite à partir du puits P3 et traverse le vallon; son extrémité sud est érodée. A ce jour, nous n'avons pas découvert de matériaux sidérolithiques liés à son environnement immédiat. Cet ouvrage correspond éventuellement à une retenue d'eau pour alimenter les stations de lavage du XIXe siècle qui se situaient à proximité du monticule M8.

Au Lieu Galet, une structure similaire (B2) construite à base de matériaux sidérolithiques, ferme le petit vallon. Sur la bordure ouest de l'ouvrage, nous avons repéré un monticule tronqué dont le pied baigne dans le ruisseau. Tous les éléments miniers témoignent d'un lieu d'exploitation et de lavage. Près du barrage en amont et au pied du monticule, la richesse en pisolithes et en agrégats du sédiment indique que le processus de lavage se poursuit encore actuellement de manière naturelle.

Les structures particulières

Le monticule M7 se distingue des autres par son contenu essentiellement vosgien et son sommet tronqué. Sa position se rapproche de celle d'un puits de la carte d'A. Quiquerez. Pourtant, aucune forme interne en entonnoir ne corrobore l'hypothèse d'un grand puits non productif.

Le monticule M8, très allongé et en bordure du lit de la Rouge Eau, correspond à une structure de dépôt du XIXe siècle directement liée à la station de lavage. Celle-ci figure sur le cadastre de 1849, mais est aujourd'hui entièrement détruite et nivelée.

Au nord de la Combe des Boules, l'emplacement d'une meule de charbonnier est matérialisé au sol par une tache noire.

Les effondrements

L'environnement de la ferme des Cerneux est parsemé de nombreuses dépressions de 1 à 3m de diamètre. Elles sont généralement dépourvues de bourrelets en bordure. En 1989, un petit effondrement circulaire s'est produit au nord de la ferme, ce qui permet de supposer qu'une partie de ces dépressions témoigne de l'effondrement du toit de cavités souterraines.

La vallée alluviale de la Rouge Eau

La Rouge Eau a charrié de nombreux matériaux sidérolithiques, depuis l'étang des Lavoirs jusqu'à l'endroit où elle rejoint la Sorne. Il n'est donc pas rare de rencontrer des terres rouges dans les champs environnants. Il s'agit de bolus remanié, généralement dépourvu de pisolithes ou d'agrégats. Dans la partie supérieure des alluvions de la Rouge Eau, on trouve encore des lentilles limono-graveleuses de couleur rouge. A l'époque de l'exploitation, la pluie sur les surfaces défrichées et le lavage du minerai entraînaient de grandes quantités d'argile rouge qui, dans la vallée, se mélangeaient aux différents sédiments.

3.3.4 Les modes d'exploitation

Le regroupement des différentes structures minières dans les versants prospectés nous amène à élaborer un modèle d'exploitation dans lequel s'inscrit éventuellement une évolution dans la méthode d'extraction du minerai.

La morphologie de ces versants se résume généralement à un talus de graviers vosgiens colluvionnés en partie sur un replat souligné par une barre rocheuse du Kimméridgien. Le talus se poursuit par des débris de pente grossiers entrecoupés de barres rocheuses fragmentées (fig. 21). Les replats présentent des surfaces accidentées révélant de nombreuses structures karstiques à remplissage sidérolithique. Cette situation a facilité une première exploitation à ciel

ouvert. Peu à peu, l'exploitation semble s'être étendue aux versants supérieurs par le creusement de tranchées, de galeries et de petits puits. Finalement, des puits plus importants ont été percés loin des affleurements.

Du fait de l'intensité des activités minières, il nous est difficile de définir une chronologie et la position exacte des premières exploitations. Une certitude est acquise : la présence de terres rouges ou brun-ocre contenant des pisolithes a été le fil conducteur de la recherche minière.

La stratigraphie des Cerneux et le profil qui comprend le forage S2 définissent une forte irrégularité séquentielle (épaisseur et extension) et un potentiel de colluviabilité élevé pour les graviers vosgiens.

Les situations géomorphologiques propices à la présence d'un affleurement primitivement sans recouvrement colluvial se trouvent dans la région des Lavoirs et des Cerneux ainsi que sur la pente quasi structurale de la Peute Côte.

Bien que la minière soit le premier mode d'exploitation local, l'hypothèse d'une évolution chronologique des méthodes d'extraction paraît fort improbable. Le mode d'exploitation correspond à une adaptation aux exigences topographiques plus qu'à une évolution technologique. C'est l'extension des exploitations à des zones plus difficiles d'accès qui a impliqué un changement de méthode.

Les cartes et documents d'A. Quiquerez (1855 et 1881; fig. 23) et d'E. Baumberger (1923; fig. 22) nous renseignent sur une douzaine d'exploitations encore en activité en 1848. Elles faisaient partie d'un lot de concessions honorées de 1847 à 1872 et échues définitivement à cette dernière date. Elles concernaient les exploitations du Lieu Galet, des Cerneux et du mandat de recherches minières d'A. Quiquerez. L'étude de ces documents permet de rapporter les grands puits à l'activité d'A. Quiquerez ou tout au plus à la reprise de structures préexistantes et vieilles de 50 ans (tab. 6). L'ensemble du cadre I des Lavoirs se précise aussi comme étant un complexe de structures réutilisées par A. Quiquerez. Les premières exploitations se sont faites à ciel ouvert par minières, tranchées ou petites carrières. Au XIXe siècle, les mêmes techniques sont toujours utilisées tandis que parallèlement une série de puits de grande dimension sont percés dans l'espoir d'atteindre des parties aveugles du gisement.

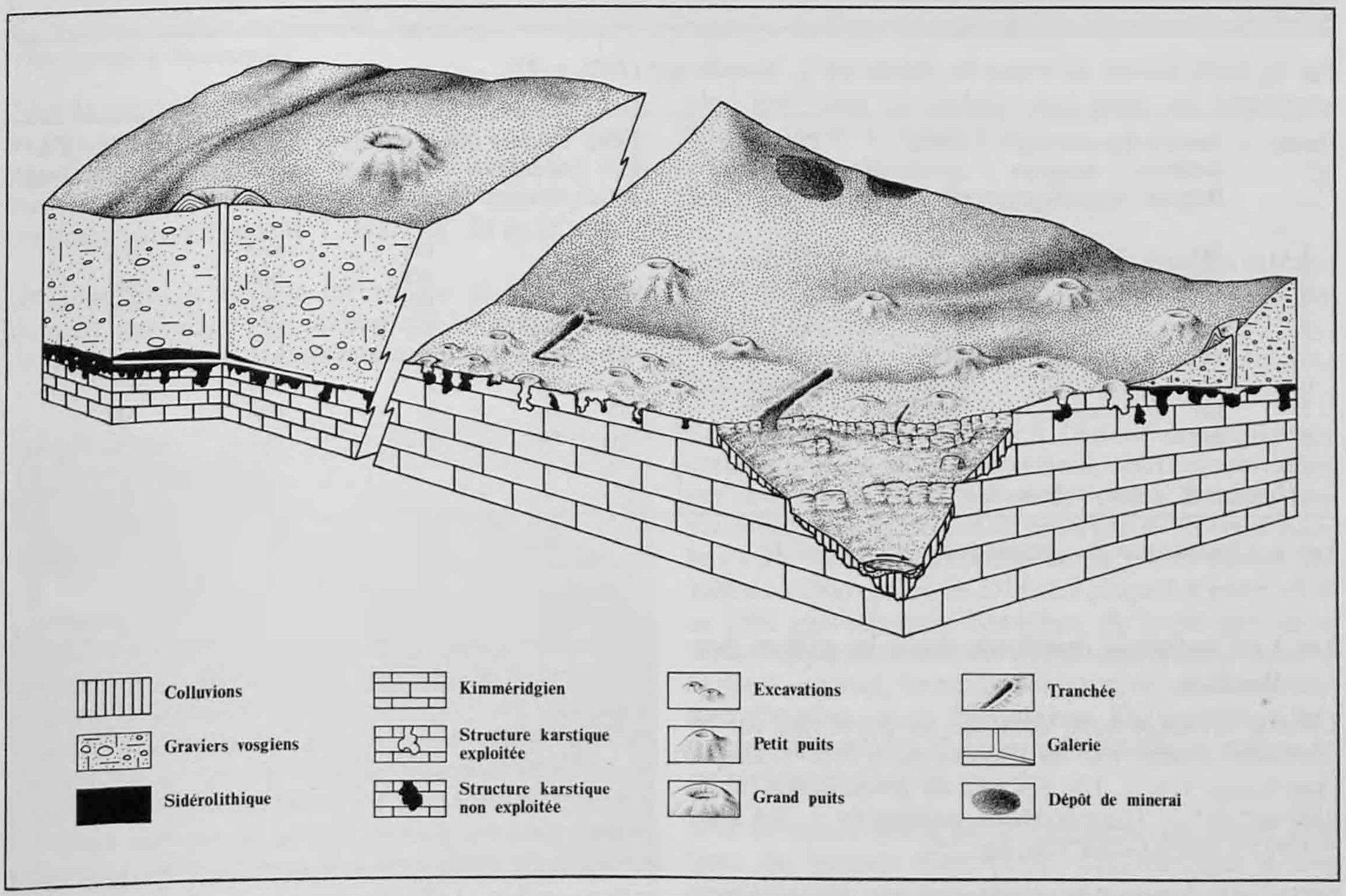


Fig. 21. Schéma des différents modes d'exploitation sur un versant (Combe des Boules, Cras des Fonnés).

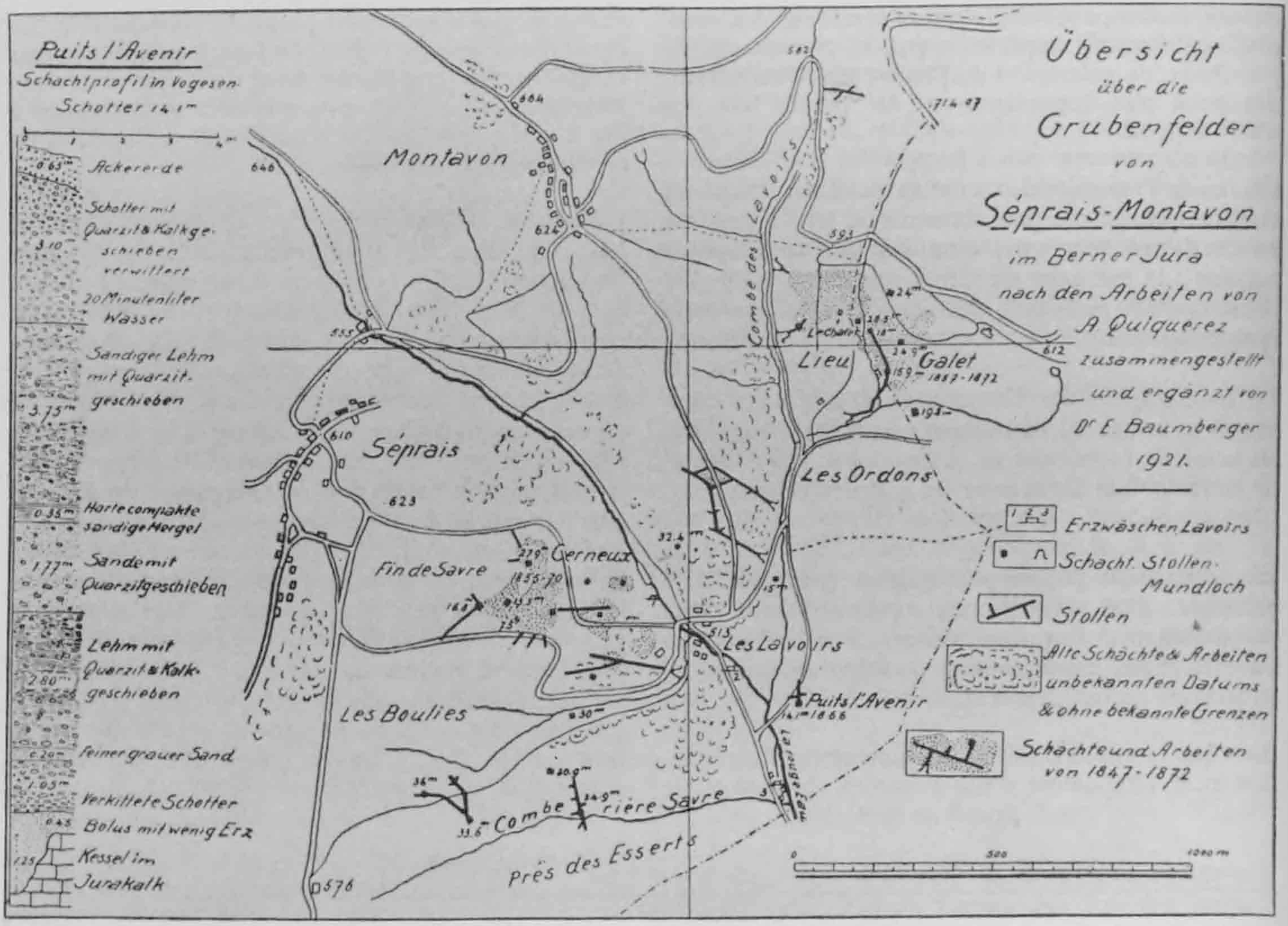


Fig. 22. Carte minière du Rayon de Séprais par E. Baumberger (1923, p. 92).

Puits n°	Nature des remblais sidérolithiques	Nature des remblais vosgiens	Puits productif	Puits d'A. Quiquerez	Puits n°	Nature des remblais sidérolithiques	Nature des remblais vosgiens	Puits productif	Puits d'A. Quiquerez
1	xxx	x	oui	oui ?	9		xxx	non	oui ?
2	xxx	x	oui	oui ?	10		xxx	non	oui ?
3		xxx	non	?	11		xxx	non	oui ?
4	xxx	x	oui	oui	12	xxx	x	oui	?
5	xxx	x	oui	oui	13	xxx	x	oui	?
6	xxx	x	oui	oui	14	xxx	x	oui	?
7	xxx	x	oui	oui	15	xxx	x	oui	oui ?
8	xxx	x	oui	oui	16	xxx	x	oui	oui

x : présent / xxx : fortement présent

Tab. 6. Classification des grands puits (dépliant n° 1).

3.4 Les activités minières dans le vallon des Boulies

L'étude archéologique détaillée ne porte que sur le périmètre touché par les travaux de la N16-Transjurane (chap. 1.3, p. 12). Il s'agit du grand cadre sur le dépliant n° 1 (coordonnées nationales : 584'500-584'925 / 245'500-245'725; fig. 25).

Différentes anomalies topographiques ont été repérées dans le vallon des Boulies. Les travaux effectués (relevés et sondages) mettent clairement en évidence leur caractère artificiel. Elles sont le reflet des activités humaines qui se sont déroulées à cet endroit au cours des âges. Les observations de terrain, confrontées aux documents plus anciens, ont montré que des travaux miniers avaient été effectués pendant plusieurs siècles dans le Rayon de Séprais. Elles ont permis de préciser dans une certaine mesure le cadre technologique et chronologique de ces vestiges (fig. 23 et tab. 7).

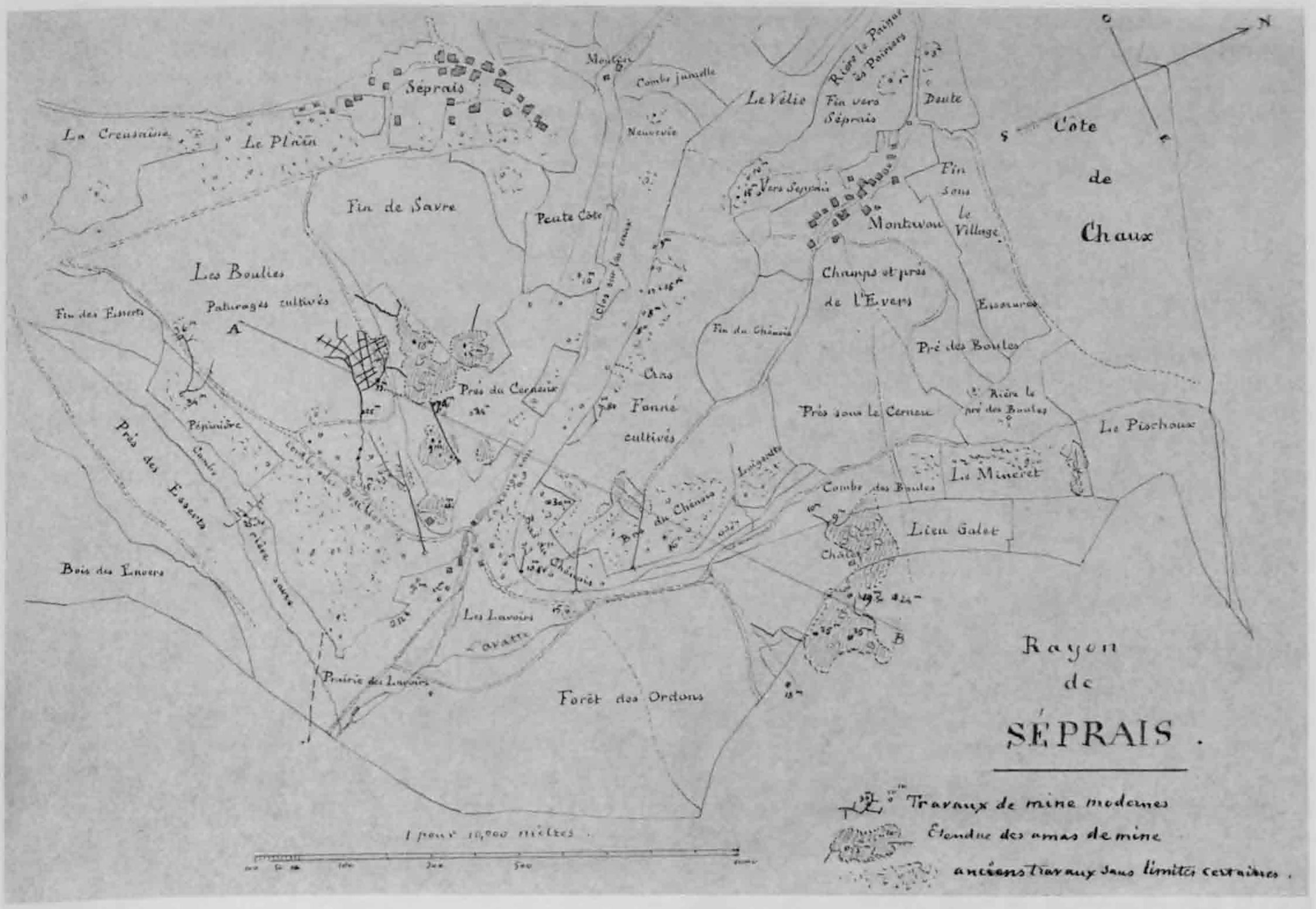


Fig. 23. Carte minière du Rayon de Séprais par A. Quiquerez (manuscrit de 1881; reproduit avec l'autorisation du Musée de l'Hôtel-Dieu à Porrentruy).

Dans la partie la plus étroite du vallon (au nord-est), les très nombreuses anomalies du relief ont été documentées en détail. Dans sa partie élargie (au sud-ouest), elles ont été reportées sur le relevé photogrammétrique à l'échelle 1:1000 (fig. 24 et 25).

Les sondages à la pelle mécanique et à la tarière donnent une image plus précise que les seules observations de surface. L'interprétation peut donc être plus fine dans ce secteur que pour les structures étudiées dans le chapitre 3.3.

Fig. 24. Vallon des Boulies. Versant sud. Vue sud-ouest.

3.4.1 Les anomalies topographiques

Les anomalies se répartissent en trois grandes catégories : les dépressions (D), les monticules (M) et les taches (T) (tab. 7).

Les dépressions (D)

Les dépressions 1 à 4 et 6 à 18 sont des structures creuses plus ou moins circulaires, souvent marquées par la présence d'arbustes ou de ronces. De diamètre variable, elles se trouvent réparties à diverses hauteurs sur les deux versants de la partie étroite du vallon, à l'exception de D18. La plupart d'entre elles se sont partiellement comblées, de sorte que leurs limites apparaissent moins nettement. Dans le sens de la pente, en aval, certaines comportent une accumulation d'argiles rouges à pisolithes. Par ailleurs, d'importants épandages d'argiles sidérolithiques marquent en surface le fond du vallon.

Une structure isolée en arc-de-cercle est située à la base du versant nord (D5). On distingue à son emplacement, sur une photo aérienne de 1972, des traces probablement laissées par des travaux récents.

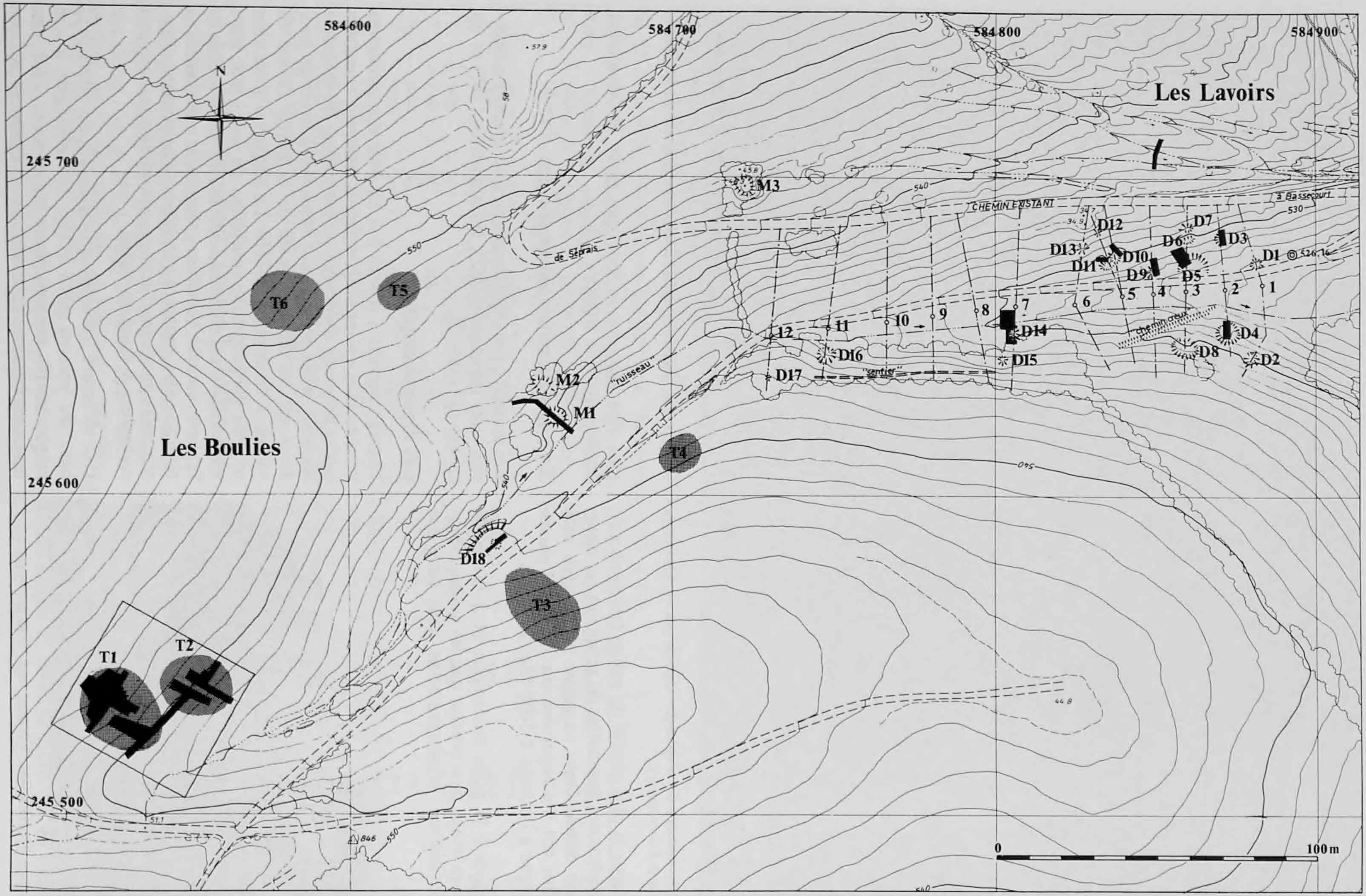


Fig. 25. Vallon des Boulies. Situation des vestiges et des investigations. Profils topographiques 1 à 12; anomalies (D : dépression; M : monticule; T : tache); zone fouillée à l'emplacement des deux bas-fourneaux (T1); (cadre : fig. 4, p. 12).

Deux structures creuses de forme allongée sont également visibles. L'une, qui correspond au lit d'un ancien cours d'eau, évolue de manière discontinue au fond du vallon. Elle est particulièrement marquée au pied de D14, à la lisière des bosquets sur le flanc sud. Elle se perd dans le coude que forment les deux parties du vallon, mais réapparaît plus à l'ouest, là où le vallon s'élargit. Passant au pied de M1 et à côté de D18, elle semble s'évanouir au sud-ouest dans les bosquets, en aval de l'atelier; toutefois elle se poursuit encore en direction du village de Boécourt (fig. 25).

Anomalie n°	Axe N = 0°	ø axe 0°	ø axe 90°	Interprétation	Relation avec le site
Dépression					
D1	0°	3.35	4.35	--	--
D2	20°	5.00	5.50	--	--
D3	20°	2.95	3.30	fosse de lavage ?	possible
D4	5°	6.00	6.70	puits	non
D5	0°	6.25	8.20	moderne ?	non ?
D6	0°	1.90	2.30	--	--
D7	0°	3.85	3.90	--	--
D8	14°	6.05	7.00	glissement de terrain	non
D9	0°	2.70	2.30	fosse de lavage	oui
D10	0°	5.80	3.90	glissement de terrain	non
D11	170°	3.90	3.90	puits d'essai / lavage ?	possible
D12	0°	2.65	2.60	lavage ?	possible
D13	166°	3.50	4.35	lavage ?	possible
D14	10°	4.20	3.50	puits	non
D15	20°	3.00	2.90	minière / fosse de lavage	possible
D16	34°	4.85	5.20	minière / fosse de lavage	possible
D17	0°	1.50	1.50	minière / fosse de lavage	possible
D18	120°	2.50	2.50	puits d'essai / lavage ?	possible
Ruisseau	--	--	--	lavage	oui
Chenaux	--	--	--	lavage ?	possible
Tache					
T1	120°	29.40	23.00	atelier de réduction	--
T2	120°	22.20	19.00	dépôt de minerai lavé	oui
T3	135°	29.00	17.00	monticule arasé	possible
T4	135°	12.00	15.00	dépôt de minerai	possible
T5	140°	12.50	15.00	dépôt de minerai	non
T6	125°	22.50	19.00	dépôt de minerai	non
Monticule					
M1	130°	15	6	déblai d'extraction ?	non
M2	125°	8	4	dépôt de minerai	possible
M3	0°	4	3	dépôt de minerai	?

Tab. 7. Anomalies topographiques du vallon des Boulies.

L'autre structure, interprétée comme un chemin creux, se dessine nettement en contrebas de D8, sur le versant sud (fig. 24). Elle disparaît peu avant la lisière, mais il n'est pas impossible que le sentier qui borde les bosquets, au sud, en soit le prolongement. Ce dernier se perd en direction de l'ouest au-dessus de D16 (fig. 25).

Rappelons enfin l'existence de dépressions en forme de chenaux, qui ont été observées dans la partie supérieure du versant nord du vallon, au-dessus du chemin actuel (chap. 3.3.2, p. 36).

Les monticules (M)

Ils se dressent à l'ouest des dépressions circulaires. Deux d'entre eux (M2 et M3), situés dans la pente, se sont conservés à l'abri de petits bosquets. Ils sont caractérisés par un amoncellement d'argile sidérolithique. Un sondage à la tarière pratiqué au sommet de M2 a révélé des argiles sidérolithiques contenant des pisolithes - concentrés à la surface de l'amas, suite à des phénomènes de lessivage - sur une épaisseur de 70cm au moins.

Les taches (T)

Mis à part les taches noire et rouge contiguës (T1 et T2), qui signalent l'emplacement de l'atelier de production du fer, quatre taches rougeâtres ont été repérées. Deux d'entre elles (T3 et T4) s'étalent sur le versant sud-est; les deux autres (T5 et T6) sont situées en haut du versant nord-ouest.

La plus grande (T3) est d'une superficie de 16m sur 29m environ. Les couches de bolus qui la constituent vont en s'amincissant vers le haut de la pente. Un sondage à la tarière a été pratiqué au bas de la tache. Sous une très faible épaisseur d'humus rougeâtre, il a révélé la présence d'argiles rouges contenant des pisolithes et des graviers épars jusqu'à une profondeur de 20cm; cette couche surmonte des limons sableux rouges (avec quelques passées brunâtres) recelant des morceaux de gangue sidérolithique sur 30cm; le tout repose sur des limons sableux avec graviers, passant du rouge au jaune-ocre vers la base du sondage (-80cm à partir de la surface du sol).

3.4.2 Interprétation des structures

A la suite de ces observations préliminaires et aux relevés topographiques, dix sondages mécaniques ont été effectués, afin de mieux appréhender les activités dont témoignent ces structures. Les observations et interprétations ont porté sur D3 à D5, D9 à D11, D14 et D18, sur la dépression allongée du fond du vallon à proximité de D14 et au pied de M1, ainsi que sur M1 (fig. 25).

Structures d'extraction

Deux structures d'extraction de forme rectangulaire ont été mises en évidence (dimensions : 70cm x 90cm pour D4 et 1.1m x 1.95m pour D14). Elles ont été creusées dans les Graviers vosgiens et leur remplissage est composé d'argiles sidérolithiques à inclusions vosgiennes. Dans D14 celles-ci renfermaient le squelette d'un poulain. Compte tenu de leur emplacement (bas de versant pour D4 et fond du vallon pour D14) et de leur exécution technique (profondeur supérieure à 4m et traces d'étayage), il peut s'agir de puits de sondage, d'aération ou éventuellement d'exploitation.

Rappelons que les affleurements de Sidérolithique - lieux potentiels d'exploitation à ciel ouvert du minerai de fer - se situent tous en dehors du périmètre d'investigation du vallon des Boulies (chap. 3.3, p. 35 et dépliant n° 1).

Vestiges relatifs au lavage

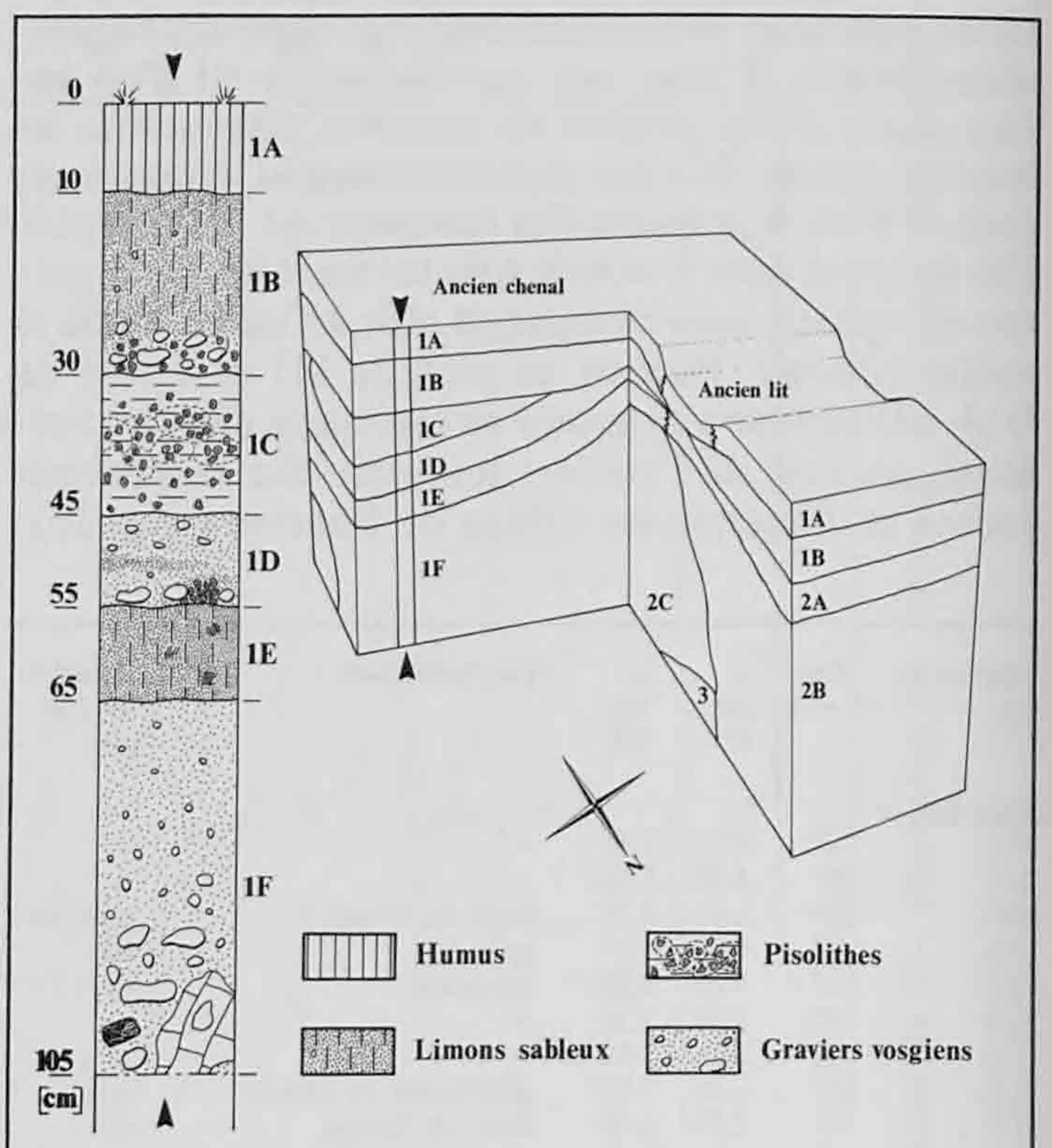
La dépression 9, celle observée aux abords de D14 et celle au pied de M1 constituent les vestiges de lavage les plus évidents.

Fig. 26. Dépression 9. Coupe sud-nord. Vue ouest.

Le sondage effectué à l'emplacement de la dépression 9 a permis de dégager une cuvette de forme ovale (1.5m x 1.7m), profonde d'environ 1.4m et creusée dans les Graviers vosgiens (fig. 26). Du côté du fond du vallon son flanc est abrupt, tandis que de l'autre, elle remonte en pente douce.

Le remplissage est formé d'argiles sidérolithiques rouges et jaunes, contenant de nombreux pisolithes, ainsi que des Graviers vosgiens. Le même matériel sédimentaire se trouve, en amont de cette fosse, sous-jacent à l'humus; en aval par contre, ces argiles se heurtent au bord de la dépression et ne s'étalent pas

Fig. 27. Coupe sud-nord du lit du ruisseau. Vue ouest.



1A. Terre végétale

1B. Limons sableux passant graduellement à des limons rougeâtres plus argileux. Ils contiennent des pisolithes et Graviers vosgiens, ainsi que quelques morceaux de marne jaunâtre à la base.

1C. Lentille d'argiles rouges à pisolithes qui se présentent en partie sous forme de morceaux compacts. Elle s'emboîte dans 1D.

1D. Lentille graveleuse à microstructures sableuses et concentrations de pisolithes plus ou moins granoclassés.

1E. Limons sableux riches en matière organique et en charbons de bois. Latéralement, ce niveau semble passer de manière diffuse à 2A, qui ne contient par contre pas de pisolithes.

1F. Couche graveleuse à dominante vosgienne émoussée (diamètre maximal de 0.25m) dans une matrice sableuse abondante. La base de cette couche est constituée d'une sorte de surface à blocs enchevêtrés (diamètre maximal 0.45m) corrodés en surface. Latéralement, la couche passe, avec quelques variations de faciès, à la couche 2C. La vision macroscopique permet d'interpréter l'ensemble comme le remplissage d'un ancien chenal, dépourvu de pisolithes.

2A. Limons sableux riches en charbons de bois, surtout à la base de la couche. Ils contiennent aussi quelques galets épars. Vers le milieu du vallon, la couche s'épaissit, ce qui lui confère un aspect de chenal.

2B. Couche graveleuse grossière à matrice argilo-sableuse abondante. Elle contient des graviers généralement arrondis. Elle figure un chenal plus ou moins bien délimité.

2C. Couche partiellement graveleuse de couleur grise contenant des débris de bois. Elle s'interrompt vers le nord.

3. Couche graveleuse à blocs calcaires (diamètre maximal de 0.4m) riche en matériel vosgien.

Fig. 28. Colonne stratigraphique et bloc-diagramme schématique de l'ancien lit du ruisseau et du chenal antérieur.

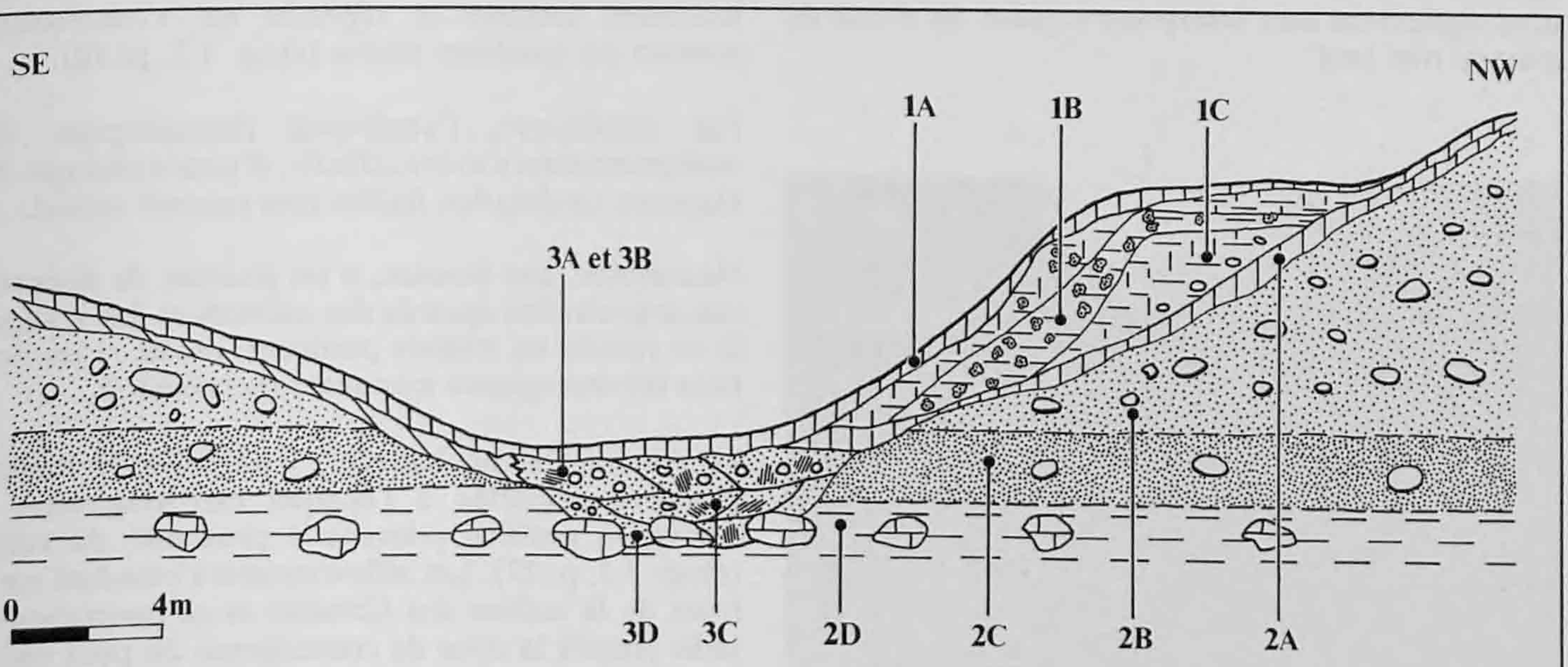
au-delà. Les sédiments du fond de la structure se présentent en formations lenticulaires. Ce mode de dépôt pourrait indiquer une mise en place influencée par l'action de l'eau. Au centre du remplissage, les charbons de bois sont plus nombreux.

D'après les observations géologiques, il est probable que la cuvette D9 ait servi soit de bassin de décantation destiné à séparer le minerai de sa gangue, soit de bassin pour recueillir les argiles à la sortie d'un canal de lavage. Dans ce cas, elle pourrait être en relation avec les chenaux qui se trouvent en amont (chap. 3.3, p. 35).

A côté de D14, dans le fond du vallon, un prolongement du sondage mécanique a permis d'opérer une coupe à travers l'ancien lit du cours d'eau et un chenal comblé plus ancien, qui n'apparaissait pas en surface (fig. 27 et 28).

Des dépôts de ce même cours d'eau ont été observés au pied du monticule 1. Leur description stratigraphique figure ci-dessous (lieux de stockage, fig. 29). Les structures lisibles dans les deux coupes correspondent à un ensemble de chenaux emboîtés, remplis d'alluvions de fond de vallon. La dynamique fluviatile est allée en diminuant pour disparaître de nos jours. Il est fort probable qu'à un moment donné, le cours du ruisseau ait été déplacé artificiellement comme en témoigne l'existence d'un lit plus jeune à côté de l'ancien chenal.

La présence de Sidérolithique remanié dans les structures fluviatiles (c.1A à c.1E) indique que le cours d'eau est contemporain des anciens travaux miniers du vallon. Le minerai extrait a pu y être lavé. Aucun vestige archéologique ne permet de préciser les modalités de cette opération.



1A. Limons argileux homogènes contenant de nombreux pisolithes et des morceaux encore consolidés de bolus brunâtre.

1B. Limons argileux lie-de-vin assez homogènes avec pisolithes. Vers la base de ce niveau se trouvent des morceaux de bolus consolidés.

1C. Niveau marneux avec de nombreux galets calcaires et vosgiens. Du sommet à la base, la coloration passe graduellement de gris-verdâtre à gris-ocre.

2A. Niveau sablonneux de couleur grise, riche en charbons de bois et à petits galets, concentrés vers la surface.

2B. Graviers vosgiens et calcaires dans une matrice argilo-sableuse très abondante.

2C. Niveau sableux dans les Graviers vosgiens.

2D. Marnes nodulaires à blocs calcaires, faisant également partie des Graviers vosgiens.

3. Alluvions de fond de vallon riches en charbons (cf. sondage annexe à D14). On distingue, sur 1.5m d'épaisseur, sous l'humus peu développé :

3A. Niveau de limons argileux gris avec des marbrures ocres à la base.

3B. Niveau de limons argileux rouges, à pisolithes, graviers et cailloux calcaires.

3C. Niveau de limons sableux gris-jaune avec lentilles graveleuses contenant de nombreux charbons de bois. Dans ce niveau ont été trouvés trois fragments de scories.

3D. Faciès latéral de 2D : dans le lit du ruisseau, les blocs calcaires ont été dégagés de leur matrice et corrodés sur leur face inférieure.

Fig. 29. Schéma stratigraphique à travers le fond du vallon et le monticule 1 (M1, fig. 25).

Lieux de stockage

La tache 2 (T2) est contiguë à la tache noire qui signale l'emplacement des bas fourneaux. Elle se distingue des autres taches par une coloration rougeâtreplus discrète, ce qui pourrait indiquer que le minerai stocké à cet endroit était lavé, c'est-à-dire débarrassé de sa gangue argileuse rouge (chap. 6.2, p. 90).

Adossé à la base du versant nord-ouest, le monticule 1 (M1) s'élève dans la partie plus large du vallon et se prolonge jusqu'au bord de l'ancien lit du ruisseau. Il s'étend dans le sens de la pente sur une longueur d'environ 15m (fig. 29 et 30).

La séquence des dépôts du monticule 1 rappelle la succession stratigraphique observée sur les affleurements de Sidérolithique, mais se trouve inversée. Il pourrait s'agir des matériaux stériles extraits lors du creusement d'un puits (remblais). Les pisolithes sont néanmoins abondants : cet amoncellement pourrait donc également être interprété comme un dépôt de minerai non lavé.

Fig. 30. Monticule 1. Vue nord-ouest.

Au bas du monticule, les sédiments fluviatiles indiquent une dynamique du ruisseau plus élevée qu'actuellement. La présence de scories au fond du lit de ce ruisseau marque probablement le lien existant entre le cours d'eau et les activités sidérurgiques qui se sont déroulées sur ses rives. Enfin, les dépôts fluviatiles sont stratigraphiquement antérieurs aux dépôts sidérolithiques du monticule 1, voire même à l'ancien sol sur lequel ces derniers reposent.

3.4.3 Liens technologiques et chronologiques

Dans le périmètre des bas fourneaux, on ne trouve que du minerai lavé et le dépôt de minerai le plus proche de l'atelier (T2) est pauvre en argile. Il est donc évident que des installations de lavage contemporaines des bas fourneaux ont existé à proximité de l'atelier. Le cours d'eau du fond du vallon a servi au lavage du minerai et la présence de scories dans les sédiments du ruisseau renforce la présomption du lien technologique et chronologique entre les vestiges de lavage et l'atelier de réduction.

Un lavage préliminaire par exposition du minerai à la pluie et aux eaux de ruissellement, éventuellement canalisées (chenaux), a pu avoir lieu sur les versants du vallon (D9). Toutefois, aucun argument archéologique ne confirme un lien chronologique.

3.5 Organisation du complexe minier et métallurgique

Les régions riches en matière première, tel le Rayon de Séprais, sont marquées par des interventions humaines intenses et répétées qui s'échelonnent souvent sur plusieurs siècles (chap. 1.2, p. 10).

Par conséquent, l'attribution chronologique des vestiges miniers s'avère difficile, d'autant plus que des éléments de datation fiables font souvent défaut.

Néanmoins, aux Boulies, il est possible de discerner une organisation spatiale des activités et des vestiges. Il en résulte un schéma pertinent, même si les données chronologiques manquent de précision.

Le minerai "archéologique", c'est-à-dire la matière première exploitée à l'époque mérovingienne, se trouve en position primaire à proximité du vallon (chap. 3.1, p. 27). Les affleurements s'étendent sur le front de la colline des Cerneux et se poursuivaient jadis jusqu'à la zone de convergence du petit vallon des Boulies avec le vallon principal de la Rouge Eau (fig. 14, p. 28).

Pendant le Haut Moyen Age, l'exploitation à ciel ouvert, voire par petites galeries, est plus plausible que le recours à l'extraction par puits et galeries conséquentes, mais aucun argument archéologique ne vient confirmer cette hypothèse, étant donné l'impact important des travaux du XIXe siècle dans ce secteur.

Une fois extrait, le minerai devait être acheminé dans le vallon des Boulies pour subir un lavage, avant d'être amené à l'atelier.

Les voies de circulation peuvent être reconstituées de diverses façons : les déplacements devaient s'effectuer depuis les temps anciens sur le chemin caillouteux du fond du vallon, qui longeait le ruisseau. Le chemin creux et le sentier du flanc sud représentaient peut-

être une alternative. Par contre, le chemin actuel de Séprais aux Lavoirs ne figure pas encore sur la carte d'A. Quiquerez de 1881 (fig. 23).

Les installations de lavage ne peuvent guère être reconstituées sur la base des vestiges fugaces qu'elles ont laissé. Des constructions rudimentaires devaient suffire, du moment que l'on disposait d'un cours d'eau. L'absence d'installations de lavage plus élaborées pourrait confirmer la contemporanéité des activités de lavage avec celles de l'atelier. Des restes d'installations plus récentes se trouvent encore dans le hameau des Lavoirs et le long de la Rouge Eau.

Les structures d'extraction souterraine (D4 et D14) et de stockage intermédiaire (T3 à T6 et M1 à M3) par contre rendent le schéma plus complexe.

Certaines taches (T3 et T4) et certains monticules (M2 et M3) peuvent faire partie des vestiges témoignant des activités de l'époque mérovingienne. En revanche, des indices stratigraphiques permettent d'écarter avec certitude un lien chronologique entre l'atelier et le monticule 1. Il en va de même pour les puits D4 et D14; une de ces deux structures d'excavation figure même sur la carte d'A. Quiquerez de 1881 (fig. 23). D'après cette carte, il est également possible que les structures T5 et T6 (en liaison avec P7 et M1, dépliant n° 1) soient d'une époque plus tardive. Rappelons toutefois qu'aucun atelier de réduction postérieur au Haut Moyen Age n'a été découvert dans les alentours du site métallurgique mérovingien.

En résumé, malgré le fait que des vestiges s'échelonnant sur plusieurs siècles se superposent et se côtoient dans le rayon de nos investigations, il est plausible de reconstituer l'enchaînement des opérations de la manière suivante : depuis les affleurements des Cerneux, où l'on pratique l'extraction du minerai à ciel ouvert, celui-ci est remonté dans le vallon des Boulies, afin de subir un lavage dans le cours d'eau qui coule à cet endroit; après ce traitement préliminaire, le minerai lavé est déposé à proximité de l'atelier de réduction.

Chapitre 4

Les bas fourneaux

4.1 Principes de la réduction

4.1.1 La réduction des oxydes de fer par le carbone

Dans les oxydes, l'élément métallique M est combiné avec l'oxygène O. Il se trouve à un degré d'oxydation n+, ayant engagé une partie de ses électrons périphériques dans des liaisons généralement covalentes avec l'oxygène. Pour le faire passer à l'état métallique et le séparer de l'oxygène, il faut lui fournir des électrons supplémentaires.

L'élaboration du métal consiste donc en une réduction, c'est-à-dire une réaction chimique de transfert d'électrons. Ces électrons seront fournis au métal M^{n+} par un autre élément ou composé chimique X.

$$M^{n+} + ne^- \rightarrow M^\circ$$

$$MO + ne^- \rightarrow M + \tfrac{1}{2} O2$$

Dans ses différents oxydes (Fe2O3, Fe3O4, FeO), le fer se trouve au degré d'oxydation 2^+ ou 3^+. A haute température, on peut réduire ces composés en utilisant le monoxyde de carbone CO gazeux ou le carbone C solide comme agents réducteurs. En effet, dans ces conditions, ces substances ont une plus forte tendance à former des oxydes que le fer. Cette réaction se déroule par étapes successives à différentes températures :

$$3\ Fe2O3 + CO \rightarrow 2\ Fe3O4 + CO2$$
$$Fe3O4 + CO \rightarrow 3\ FeO + CO2$$
$$FeO + CO \rightarrow Fe + CO2$$

$$3\ Fe2O3 + C \rightarrow 2\ Fe3O4 + CO$$
$$Fe3O4 + C \rightarrow 3\ FeO + CO$$
$$FeO + C \rightarrow Fe + CO$$

En brûlant du charbon de bois dans le fourneau, on dégage donc l'énergie thermique nécessaire à la réaction ainsi que le monoxyde de carbone réducteur (Durrer 1957).

La transformation des oxydes de fer en métal commence dès que la température dépasse quelques centaines de degrés par le contact des gaz réducteurs chauds avec les grains du minerai. Plus la température augmente, plus cette réaction est favorisée. De même, plus le temps de contact entre les oxydes et les gaz est grand, plus la réaction progresse.

Lorsque l'on atteint une température voisine de 1100°C, les composants du minerai qui n'ont pas été réduits (SiO2, Al2O3, CaO et une partie du FeO) commencent à fondre. Dans le liquide pâteux qui se forme, la réaction continue. Elle est favorisée par le contact direct du liquide avec les morceaux de charbon incandescents. Le métal se sépare du liquide résiduel par gravité.

4.1.2 La réduction dans le bas fourneau

L'air introduit par la tuyère dans la partie inférieure du fourneau entre en contact avec le charbon de bois (Osann 1971; Tylecote et al. 1973). L'oxygène de l'air se combine avec le carbone du charbon : celui-ci brûle en dégageant de la chaleur et du gaz carbonique (réaction 1, tab. 8). A faible distance de la tuyère, la plus grande partie de l'oxygène aura été utilisée. Dès lors, le gaz carbonique réagira à son tour pour donner du monoxyde de carbone (réaction 2). Aussi longtemps qu'il y a du gaz carbonique libre, c'est cette réaction qui domine.

Au-delà de cette zone, le monoxyde de carbone est, en théorie, le seul composé carboné gazeux présent. Le CO2 qui se forme par réduction des oxydes de fer se régénère (réaction 3) tant que la température est élevée (supérieure à 600-700°C).

A proximité de la tuyère, l'atmosphère est oxydante, tandis que dans la partie supérieure, elle devient de plus en plus réductrice (Schürmann 1958).

L'air injecté est froid, mais l'oxydation du carbone dégage rapidement une grande quantité de chaleur (réaction exothermique). A faible distance de la tuyère, la température augmente donc très fortement

	Température °C	Réactions gaz / charbon	Réactions gaz / minerai	Comportement minerai / scorie
Gueulard		dilution dans l'air		
	300-400	CO2 ne se régénère plus en CO	3 Fe2O3 + CO -> 2 Fe3O4 + CO2 (4) Fe3O4 + 4 CO -> 3 Fe + 4 CO2 (5) (avec CO/CO2 élevé)	
Cuve	600-700	CO2 + C -> 2 CO (3)	Fe3O4 + CO -> 3 Fe + CO2 (6) FeO + CO -> Fe + CO2 (7)	
	1100-1200			liquéfaction
	1100-1400	CO2 + C -> 2 CO (2)		FeO + C ->
Tuyère	30 -> 1400	O2 + C -> CO2 (1)		Fe + CO (8)
Fond				solidification

Tab. 8. Réactions chimiques principales pendant la réduction d'un minerai de fer oxydé dans un bas fourneau.

en fonction de la quantité d'air injecté. Les gaz chauds montent ensuite dans le fourneau en se refroidissant. Il s'établit dans le fourneau un gradient de température essentiellement vertical.

Le minerai, introduit par l'ouverture supérieure, subit d'abord un simple échauffement. L'humidité du minerai et l'eau de constitution des hydroxydes de fer sont chassées. En descendant dans le fourneau, le minerai rencontre des températures toujours plus élevées.

Lorsque la température est de quelques centaines de degrés, la réduction des oxydes de fer par le monoxyde de carbone commence (réactions 4 et 5). A ce stade, les réactions entre les oxydes de fer solides et le carbone solide sont négligeables.

Aux environs de 600°C débute la formation de FeO, un autre oxyde de fer, instable aux températures inférieures (réaction 6). Ce dernier commence rapidement à être réduit en fer métallique (réaction 7). La réduction progresse de cette manière jusqu'à des températures de 1100°C environ.

Dès lors, les autres composants du minerai et les oxydes de fer non réduits forment un mélange fusible et commencent à fondre. Les réactions entre les oxydes de fer du liquide et le carbone solide peuvent prendre à partir de ce moment une certaine importance (réaction 8). Le fer métallique quant à lui reste solide. Les particules de fer se rassemblent en une masse. La scorie liquide s'écoule par gravité et se sépare ainsi du métal.

A des températures supérieures à 1150°C, un autre phénomène entre en ligne de compte : le fer et le carbone peuvent former une solution solide, c'est-à-dire qu'une certaine quantité d'atomes de carbone peut être incorporée dans les cristaux de fer de manière interstitielle. Cette quantité est très réduite à basse température (à peine 0.02% à moins de 700°C), mais, à 1150°C, elle peut être d'un peu plus de 2%. La présence de carbone influe beaucoup sur les propriétés physiques du métal et en particulier sur son point de fusion. En l'absence de carbone dans sa structure, le fer ne fond qu'à 1536°C.

Si, au cours de l'opération sidérurgique, le carbone a suffisamment diffusé, la fusion du métal peut intervenir dès 1150°C.

D'autre part, en liquéfiant le métal, même s'il faut pour cela monter jusqu'à 1536°C, on facilite énormément la diffusion du carbone qui provoque une baisse du point de fusion.

Dans ce cas, deux liquides coexistent dans le fourneau : un liquide métallique (la fonte) et un liquide résultant de la fusion des autres constituants du minerai (le laitier). En prolongeant l'opération suffisamment longtemps, il est possible de réduire la quasi-totalité des oxydes de fer du minerai.

Dans le bas fourneau, le temps de contact entre les gaz et les oxydes de fer à haute température est généralement trop court pour arriver à une diffusion suffisante du carbone dans le métal. Le fer, plus ou moins carburé, n'est pas liquéfié; il reste à l'état solide ou pâteux.

La méthode directe de réduction du minerai de fer dans le bas fourneau permet donc de fabriquer en une seule opération du fer, voire de l'acier (moins de 1.7% de carbone dans le fer). Ce métal, une fois débarrassé des scories, est immédiatement utilisable à la forge pour la fabrications d'objets usuels.

Il n'empêche qu'accidentellement, de la fonte a pu être fabriquée dans ce type d'appareil (Pelet 1973). Mais ce n'est qu'avec le haut fourneau, appareil beaucoup plus grand et fonctionnant à des températures nettement plus élevées, que l'on cherchera systématiquement à tirer parti de la diffusion du carbone.

La méthode indirecte de réduction du minerai de fer dans le haut fourneau permet de produire de la fonte. C'est un excellent alliage pour le moulage, mais il ne convient pas à la forge. Pour obtenir du fer ou de l'acier, il faut affiner la fonte, c'est-à-dire la décarburer en partie.

4.2 Architecture des bas fourneaux

Les bas fourneaux des Boulies devaient atteindre une hauteur d'environ 1.50m, dont un tiers se trouvait encastré dans le sol. Seule cette dernière partie, ainsi que la première assise de l'élévation ont été conservées sur 60cm.

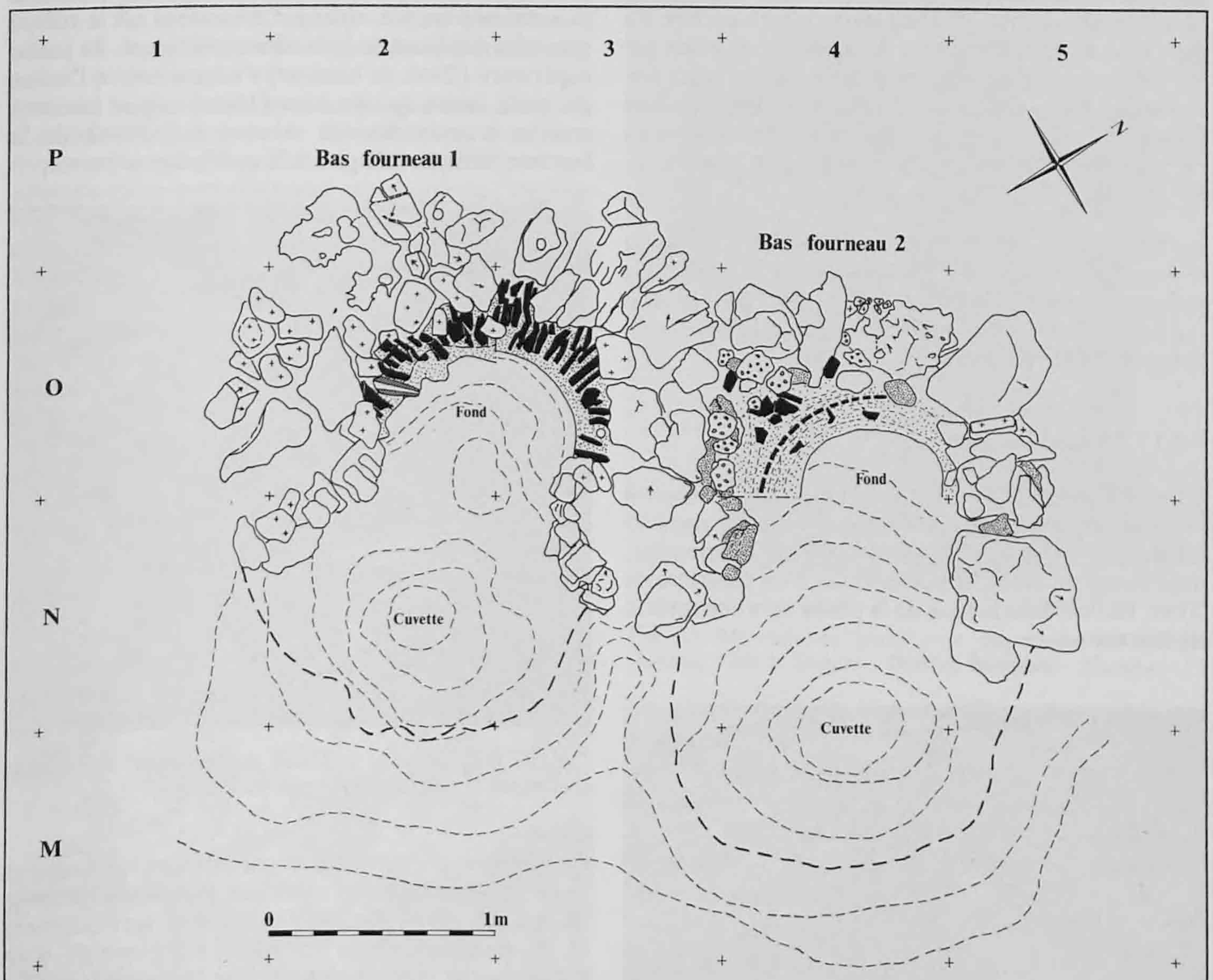


Fig. 31. Bas fourneaux 1 et 2.

Le fourneau comporte un fond plus ou moins hémisphérique creusé dans le substrat. Ce fond est surmonté par la cuve, dont les parois sont formées, à l'intérieur, par un revêtement sablo-argileux et, à l'extérieur, par un manteau de pierres. La limite de la paroi construite de la cuve se situe à une vingtaine de centimètres au-dessus de la base de l'appareil.

En aval, à l'avant de la porte du fourneau non conservée, s'ouvre une cuvette, également creusée dans le substrat. Elle est bordée de chaque côté par un muret (fig. 31).

Bien que juxtaposés, les deux fourneaux seront décrits séparément. Toutefois, le fourneau 1 servira de base à la description des principaux éléments caractérisant ce type d'installation. L'architecture du deuxième bas fourneau sera détaillée en insistant sur ses différences par rapport à celle de la première structure. La synthèse des principales observations concernant notamment les relations fonctionnelles entre les deux structures interviendra plus loin (chap. 6.3, p. 93).

La description est effectuée par rapport à un point d'observation situé face à l'ouverture de chaque bas fourneau. Il sera donc question de l'arrière (ou amont), de l'avant (ou aval), de la partie gauche et de la partie droite du fourneau.

4.2.1 Le bas fourneau 1

L'installation de la structure s'est faite sur le substrat vosgien, en bordure d'une fosse creusée dans le terrain. Le fond du fourneau n'est pas horizontal, mais forme un creux hémisphérique d'un diamètre de 70cm, incliné dans le sens de la pente vers l'ouverture du fourneau.

Fig. 32. Bas fourneau 1. Vue générale. A l'avant-plan : la cuvette avec les murets. A l'arrière-plan : le fond du fourneau partiellement fouillé.

La base de la paroi en élévation est constituée d'une bordure extérieure de blocs disposée en demi-cercle (fig. 32). Les matériaux de construction comprennent des éléments calcaires et cristallins d'une dimension variant entre 10 et 70cm environ (chap. 4.2.3, p. 55). Une seule assise de 10 à 20cm de hauteur a subsisté. Elle compte une quarantaine d'éléments, qui ont été posés à même le sol. En outre, une cinquantaine de blocs et de cailloux ont été relevés en position secondaire au-dessus et à l'avant du fourneau.

La face interne de la bordure lithique du fourneau a été recouverte par une paroi sablo-argileuse. L'épaisseur de ce revêtement varie entre un peu plus de 20cm à l'arrière et 10 à 15cm environ vers l'ouverture. En hauteur, il a été préservé sur une trentaine de centimètres; son niveau d'arasement est le même que celui des blocs de la bordure extérieure. Sa partie supérieure (20cm de hauteur) s'adosse contre l'assise de blocs, alors que sa base (10cm) repose sur une marche creusée dans le substrat à l'aplomb de la bordure lithique (chap. 6.1.2, p. 87, fig. 64).

Fig. 33. Bas fourneau 1. Détail du "hérisson" de tuileaux renforçant le revêtement interne de la paroi.

Ce revêtement interne est soigneusement renforcé par des fragments de tuiles romaines placés très proches les uns des autres. Ils ont été disposés verticalement et de manière radiale - comme les piquants d'un hérisson - par rapport au centre du fourneau (fig. 33). Ces tuileaux se répartissent dans la totalité de l'arc de cercle de la paroi; à l'avant, ils butent contre les premiers blocs de la bordure de la cuvette. La teinte qui les caractérise en surface est grise à proximité de la source de chaleur (vers l'intérieur du fourneau) et passe progressivement à l'orange dans la partie externe de la paroi. La zone de transition entre les deux couleurs est décalée par rapport à celle de la paroi sableuse encaissante.

A 55cm au-dessus du fond du fourneau, le sommet de la paroi conservée est constitué, de l'intérieur vers l'extérieur, d'une bande grise de 6 à 8cm d'épaisseur, scorifiée et vitrifiée. La coloration change vers l'extérieur, de manière assez tranchée, en dominante orange, avec quelques variations, pour passer finalement à une teinte grise; celle-ci forme une bande de 4 à 5cm d'épaisseur contre les blocs. En hauteur, la scorification n'est visible que sur une vingtaine de centimètres. Elle s'arrête donc à 35cm environ au-dessus du fond du fourneau. Sa limite inférieure est graduelle : la bande grise de coloration interne s'amincit et devient nettement moins scorifiée.

L'état de conservation de la structure est précaire : elle a été protégée essentiellement par les blocs de la bordure, la surface du champ n'étant que 10cm à peine au-dessus du sommet des éléments conservés.

Quant à la paroi en élévation proprement dite, elle n'a pas été préservée et les éléments dont nous disposons donnent lieu à diverses interprétations. Les activités qui se sont déroulées aux abords de l'installation ont fortement perturbé la zone où s'étaient accumulés les restes de la superstructure du fourneau à l'abandon (chap. 4.4, p. 64 et chap. 6.3, p. 93).

Une tuyère est conservée en place au sommet de la paroi sablo-argileuse dans la partie gauche. A cet endroit, la paroi intérieure est fortement marquée par l'impact de la chaleur. Elle a même fondu et flué (fig. 34 et chap. 5.1, p. 69).

L'intérieur du fourneau est délimité du côté de la cuvette par des fragments de paroi sableuse dans le remplissage (chap. 6.1.2, p. 87). Il s'agit selon toute vraisemblance d'éléments de construction qui formaient le cadre de la porte frontale. Leur mauvais état de conservation empêche de détailler l'architecture de cette porte qui devait être voûtée. Les traces visibles sur ces morceaux de paroi, en forme de rainures, ont été laissées par les tuileaux insérés dans la paroi, comme ceux conservés dans le pourtour du fourneau.

Un grand bloc portant de telles traces permet de renforcer l'hypothèse d'une voûte. L'orientation des rainures est verticale, mais leur disposition est légèrement radiale par rapport au bas de la pièce (fig. 35).

Fig. 35. Morceau de paroi avec empreintes de tuileaux (hauteur : 20cm, largeur : 19cm et épaisseur : 10cm).

La scorification de la face inférieure suggère que celle-ci était à l'air libre, c'est-à-dire qu'elle se situait dans la partie supérieure du cadre de la porte (chap. 4.4, p. 64, fig. 45).

Devant l'ouverture du fourneau, l'assise lithique est prolongée par des murets qui bordent de chaque côté une cuvette. Les blocs qui les constituent ont été plaqués contre les bords de la cuvette à l'aide d'un liant argilo-sableux.

La majorité de ces pierres, ainsi que celles de la bordure, portent des traces de rubéfaction. Certains blocs cristallins montrent également des traces d'éclatement et des fissures dues à la chaleur.

La surface creusée de la cuvette apparaît nettement rubéfiée et les restes d'un chapage argilo-sableux la tapissaient par endroits. La profondeur maximale de l'excavation réalisée dans la pente atteint 40cm au

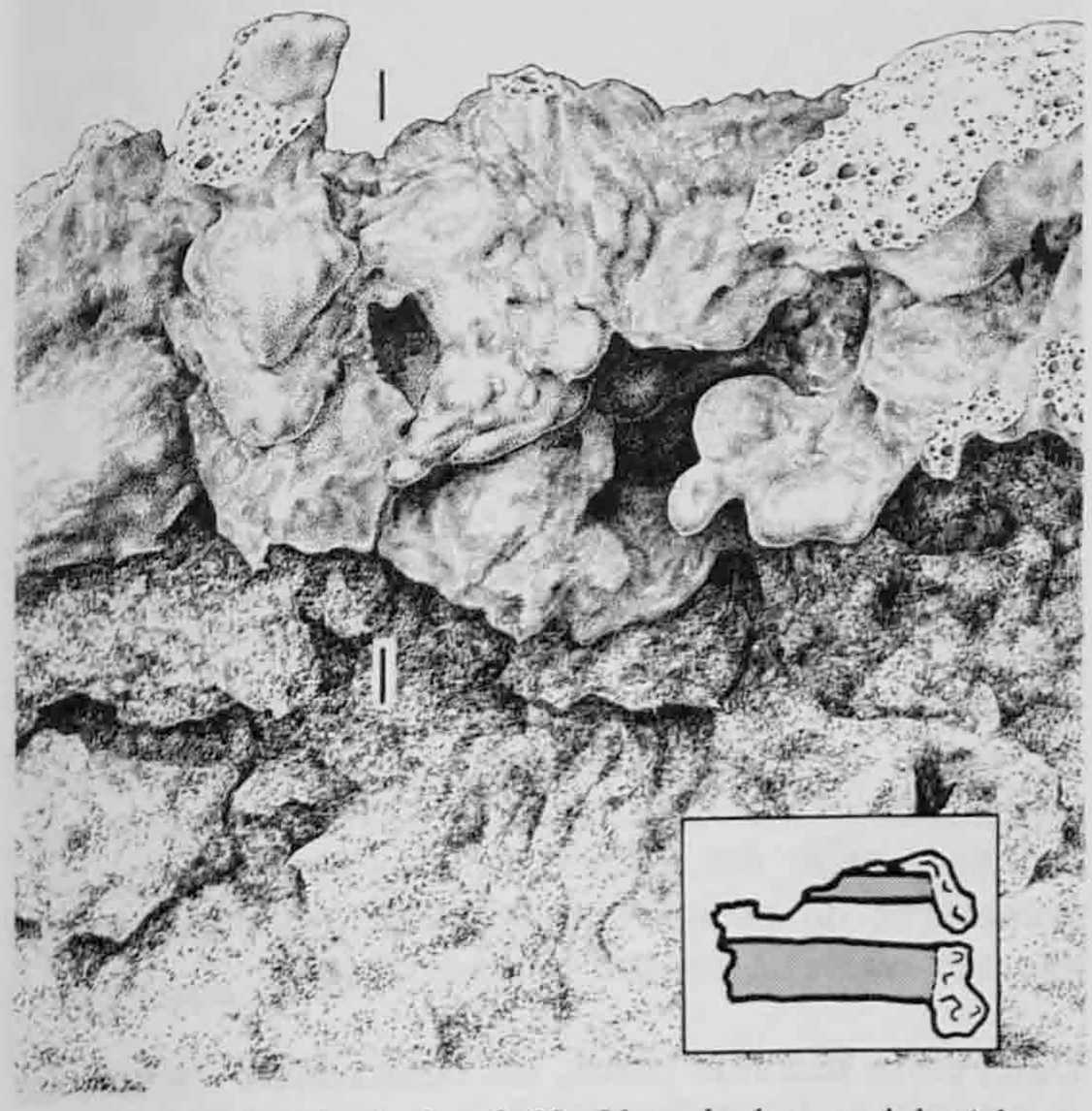


Fig. 34. Tuyère latérale n° 30. Vue de la paroi intérieure fortement scorifiée du fourneau 1 et coupe.

fond de la cuvette et un peu plus de 30cm au fond du fourneau. La longueur totale de la dépression creusée (fond du fourneau et cuvette) atteint 2.5m, la largeur maximale 1.6m et la largeur minimale 1m.

4.2.2 Le bas fourneau 2

La bordure extérieure de pierres du bas fourneau 2 dessine un arc de cercle. Au niveau de l'ouverture, du fourneau elle se prolonge de manière rectiligne et parallèle vers l'aval et borde de chaque côté la cuvette (fig. 36).

Fig. 36. Bas fourneau 2. Vue générale.

Les éléments qui la composent montrent une plus grande hétérogénéité que ceux du fourneau 1. On distingue des blocs calcaires de 10 à 70cm; des grès molassiques d'une couleur rouge ou jaune, souvent fortement désagrégés (leurs parties solides mesurent entre 10 et 20cm); des pierres cristallines (de 5 à 30cm), des fragments de tuiles et enfin des scories en calotte. Ces dernières sont, comme ces tuileaux, un matériau de réemploi (chap. 6.2, p. 90 et chap. 8, p. 107). Une septantaine de ces éléments composites se trouvaient en place dans la partie extérieure de la paroi.

Deux lits de pierres, voire trois par endroits, constituent l'assise du fourneau. Ils ont été implantés dans le substrat creusé. L'essentiel de la partie externe de l'appareil est constitué de blocs calcaires dont les interstices ont été bouchés localement par de petits galets. La limite gauche de la bordure lithique du fourneau est formée par un alignement de grès molassiques, coiffés par une série de scories en forme de calotte; le tout est adossé aux pierres calcaires de la bordure externe du premier fourneau (fig. 31). La constitution de cette paroi gauche est particulièrement hétéroclite.

Cet appareil de pierres et de scories est conservé sur une hauteur de 35cm environ. Sa partie basse est scellée dans un appareil sablo-argileux jaune-beige. Plus haut, le remplissage entre les blocs de construction est constitué de limons sableux brun-rouge.

La dépression excavée atteint des dimensions légèrement supérieures à celle du fourneau 1, avec une longueur de 2.8m et une largeur variant entre 1.5m et 1.8m.

La partie interne de la paroi du fourneau est constituée d'un revêtement composite à matrice sablo-argileuse. Son épaisseur varie entre 10 et 30cm. La partie la plus épaisse (à gauche) révèle un rechapage important (fig. 37). La paroi initiale a été édifiée directement sur le substrat naturel, qui n'est que légèrement surcreusé à cet endroit. La partie rechapée repose au contraire sur une couche d'utilisation antérieure du bas fourneau, preuve que lors de cette réfection, le fond de la structure n'a pas été nettoyé intégralement.

La partie externe du revêtement plus ancien a été renforcée par des cailloux et des tuileaux, posés pour la plupart verticalement, mais sans organisation particulière. Du côté de la cuve, il est constitué uniquement de sable et d'argile. La limite de la première paroi est marquée par une nette zone de scorification. Ce revêtement n'a subsisté que dans la partie gauche du fourneau.

Fig. 37. Bas fourneau 2. Vue générale. Importante réfection du revêtement sablo-argileux dans la partie gauche.

La partie rechapée comprend également quelques tuileaux disposés verticalement. Certains d'entre eux semblent avoir été insérés dans la face interne endommagée du premier revêtement, puis recouverts par une nouvelle couche sablo-argileuse.

Dans cette seconde paroi, les colorations visibles se succèdent de l'intérieur du fourneau vers l'extérieur de la manière suivante :

- bande grise, nettement scorifiée ou vitrifiée, 4 à 5cm d'épaisseur;
- bande gris plus foncé, cuite mais non scorifiée, 4cm d'épaisseur;
- bande gris clair, 4cm d'épaisseur;
- bande jaune-orange, 3cm d'épaisseur.

Cette séquence est identique à celle observée dans l'épaisseur de la première paroi. Notons que dans les deux cas, elle a été observée et mesurée au sommet de la paroi conservée, à 50cm au-dessus du fond du fourneau.

Un relevé altimétrique de la surface d'implantation du bas fourneau révèle que le parement refait est décentré par rapport à l'axe longitudinal de la dépression (fig. 31). Autrement dit, ce rechapage a déplacé l'ensemble de la cuve (partie basse du fourneau) d'une quinzaine de centimètres vers la droite. Le volume interne a été réduit par la même occasion (tab. 9).

Le fond du fourneau, légèrement rubéfié, semble s'inscrire dans un cercle (d'un diamètre de 60cm) résultant de la prolongation du revêtement conservé. En outre, à l'endroit supposé de la porte, un grand nombre d'éléments sablo-argileux à rainures, semblables à ceux du fourneau 1, ont été mis au jour. Leur état de conservation était toutefois moins bon, du fait qu'ils étaient à peine cuits en surface.

Les murets de la cuvette sont caractérisés par des éléments calcaires plus importants que ceux du bas fourneau 1 : le bord droit est formé de deux blocs de grande taille (respectivement : 50 x 70cm et 30 x 40cm). Du côté gauche, par contre, le mauvais état de conservation du fourneau ne permet pas de déterminer si les grès reposant sur les cailloux calcaires en N4 appartiennent au muret de la cuvette ou à la partie externe de la paroi.

Fig. 38. Bas fourneau 2. Amoncellement de blocs calcaires, correspondant à l'effondrement de la superstructure.

Une masse énorme d'environ 270 blocs et cailloux recouvrait l'intérieur, mais surtout l'avant du fourneau (fig. 38; chap. 4.4, p. 64 et chap. 6, p. 85).

4.2.3 Synthèse

Les différences architecturales qui caractérisent les deux fourneaux permettent de reconstituer les étapes de leur construction (tab. 9).

Le fourneau 2 apparaît clairement adossé à celui de gauche : la dépression qui accueille l'assise lithique de ce fourneau a été creusée à partir de la bordure droite du fourneau 1, laquelle repose à la surface du substrat (fig. 39). Par ailleurs, l'assise du fourneau 1 décrit un demi-cercle intégral, tandis que celle du fourneau 2, qui vient buter contre le fourneau 1, forme un demi-cercle incomplet.

Ces observations confirment l'hypothèse selon laquelle la construction du fourneau 1 est antérieure à celle du fourneau 2.

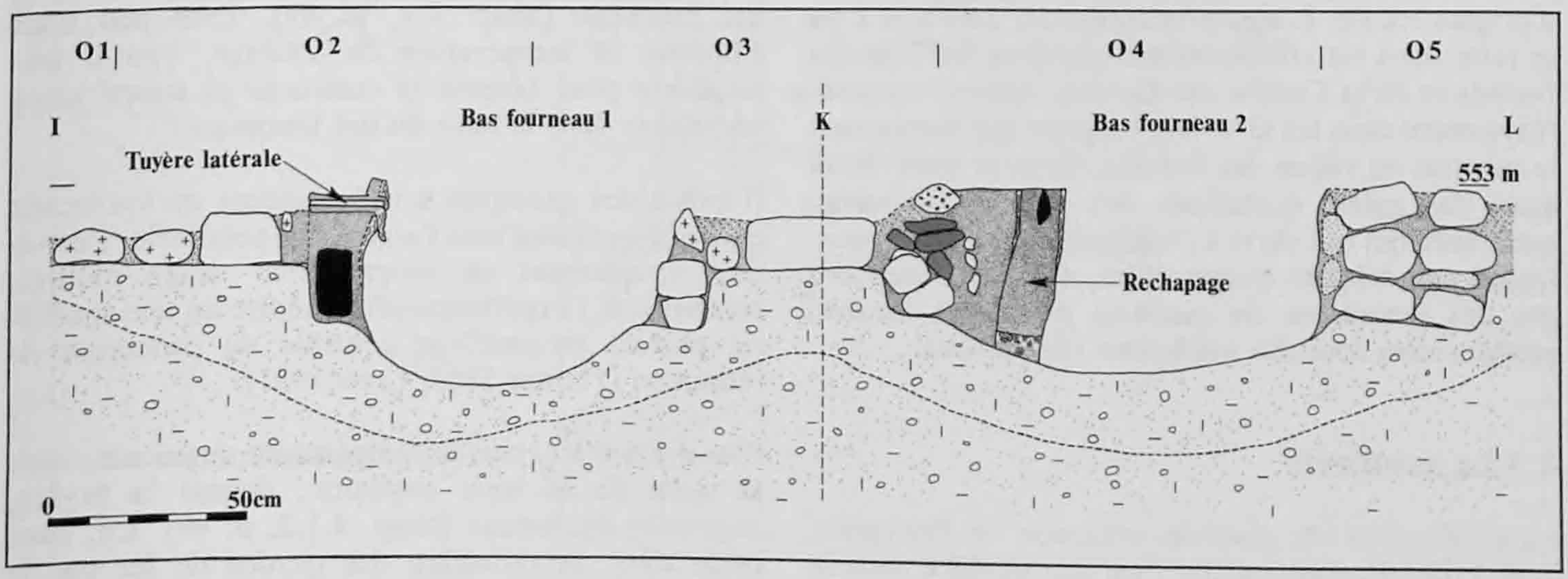


Fig. 39. Coupe transversale des bas fourneaux 1 et 2 (I-K-L, fig. 60, p. 85; symboles, chap. 6.1.1, p. 86). Projection du fond des cuvettes à l'avant des fourneaux (ligne de tirets).

	Bas fourneau 1	Bas fourneau 2
Bordure lithique		
Emplacement	à même le sol	dans le substrat creusé
Largeur	0.60 (à 0.70)m	0.40 (à 0.50)m
Hauteur conservée	1 assise : 0.10 à 0.20m	2 à 3 assises : 0.20 à 0.30m
Blocs de la bordure	40; calcaires / cristallins	60; calcaires/grès/cristallins/scories
Blocs des murets	20; calcaires	10; calcaires/grès
Blocs déplacés	50; calcaires / cristallins	270; calcaires/grès/cristallins/scories
Revêtement sablo-argileux interne		
Epaisseur	0.20m environ	0.20m à 0.40m
Hauteur conservée	0.35m environ	0.45m environ
Diamètre interne (à 50 cm au-dessus du fond)	0.70m x 0.75m 0.53m²	0.60m x 0.60m 0.36m²
Scorification (depuis le fond)	de 0.35m à 0.55m	de 0.30 à 0.50m
Tuiles	70; 40 rangées	15 à 20; éparses
Fourneau		
Hauteur conservée	0.55m	0.50m
Fond	circulaire; creusé 0.25m dans le substrat	angulaire; formé par le substrat
Diamètre du fond	0.65m x 0.70m	0.80m x 0.70m (état 1) 0.60m x 0.60m (état 2)
Superficie du fond	0.46m²	0.56m² (état 1); 0.36m² (état 2)
Cuvette		
Profondeur (sous le niveau d'arasement)	-0.70m	-0.65m
Diamètre (au sommet des murets)	1.40m x 1.40m	1.40m x 1.40m
Superficie	1.96m²	1.96m²
Surface totale du fourneau	3.2m²	2.5m²
Tuyère		
En place	tuyère latérale en O2	-
Déplacée	(tuyère frontale en O2)	tuyère frontale O4/N4
Traces de réfections	paroi en O3 et bordure de la cuvette en O2/N2	paroi en O4 et bordure de la cuvette en N3/N4 et N5

Tab. 9. Bas fourneaux 1 et 2.

Les matériaux de construction utilisés sont tous d'origine locale. L'approvisionnement en blocs a pu se faire dans les affleurements calcaires du Cras des Fonnés et de la Combe des Boules, ou plus vraisemblablement dans les Graviers vosgiens qui constituent le substrat du vallon des Boulies. Ceux-ci renferment aussi des galets cristallins, des grès et du sable, matériaux qui ont servi à l'édification des fourneaux. Quant aux calottes et aux tuiles, elles ne dépendent pas des ressources de matières premières locales, puisque elles sont des matériaux réemployés.

4.3 La soufflerie

La combustion du charbon nécessite de l'oxygène, lequel doit être fourni par l'air qui pénètre dans le fourneau. L'air est le seul comburant disponible. Bien qu'il ne contienne que 30% d'oxygène, il assure le bon déroulement du processus de réduction dans le bas fourneau (chap. 4.1, p. 49). Trop peu d'air empêche la température de s'élever. Faut-il une soufflerie pour obtenir et maintenir la température nécessaire dans la cuve du bas fourneau ?

Il existe des exemples archéologiques de fourneaux qui ont fonctionné sans l'aide d'une soufflerie, c'est-à-dire uniquement au moyen d'un tirage naturel. Néanmoins, l'expérimentation montre qu'une soufflerie permet un meilleur contrôle du processus de réduction (Pleiner 1969; Crew 1991).

Plus il y a d'air, plus la température augmente, mais la taille de la zone oxydante, devant la tuyère, augmente également (chap. 4.1.2, p. 49). Or, dans cette zone, la réduction des oxydes de fer par le monoxyde de carbone n'est pas possible. De plus, la combustion accélérée du charbon implique une

descente rapide du minerai, certes, dans une atmosphère très riche en CO, mais dans un temps plus bref. Dans un fourneau de petite taille, c'est un réel inconvénient.

Le volume d'air doit donc être proportionné à la taille du fourneau et il y a un minimum en dessous duquel on ne peut pas descendre.

En conclusion, il est difficile de préciser le volume d'air nécessaire à la bonne marche des bas fourneaux des Boulies. Etant donné que de nombreux paramètres sont encore inconnus, des calculs théoriques ne peuvent être effectués. Il y a en outre de telles disparités entre les différentes tentatives expérimentales qu'il est impossible de les utiliser pour donner un ordre de grandeur (Gilles 1958; Tylecote 1970; Pleiner 1969; Andrieux 1990).

4.3.1 Le tirage naturel

Les travaux entrepris par A. Quiquerez durant la deuxième moitié du siècle passé servent souvent de base aux partisans du tirage naturel : "Nous avons exploré les fourneaux avec trop de soin pour que l'ouverture du soufflet ait pu nous échapper." (Quiquerez 1866). Dans un seul cas, ce chercheur reconnaît l'existence possible d'un conduit d'air; celui-ci a cependant été détruit par un ouvrier avant que l'ingénieur des mines ait pu s'assurer de son authenticité.

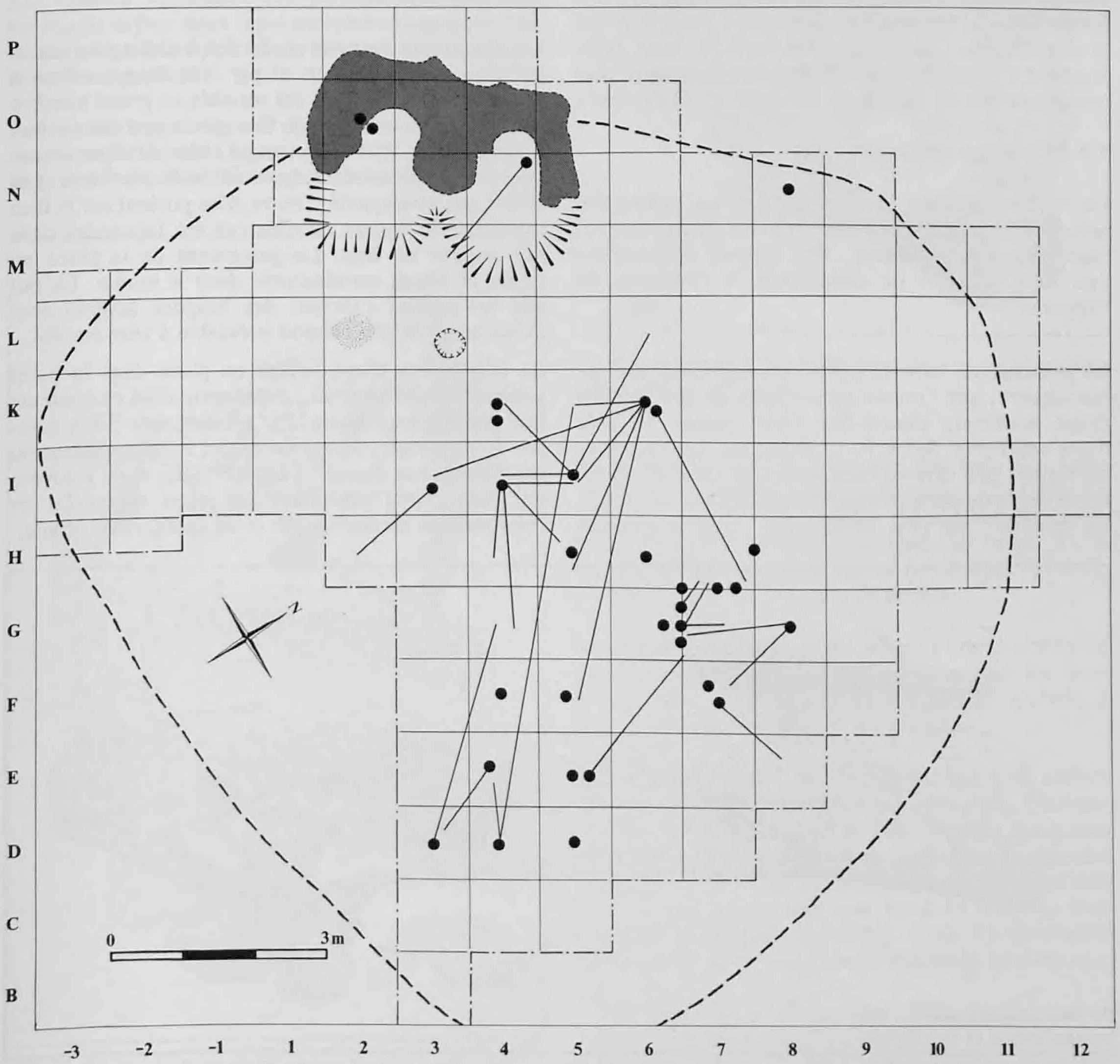


Fig. 40. Remontages des tuyères (tab. 10, p. 62). Point : fragment principal; trait : remontage.

Les fouilles d'un bas fourneau à Lajoux (JU), menées par M. Joos en 1972/73 (résultat non publié), ont mis au jour une installation datant des XIV/XVe siècles. Aucune tuyère n'y a été relevée, et le bas fourneau ne possédait aucune ouverture susceptible d'accueillir un soufflet.

Cette découverte plus récente permet de réviser une vision trop simpliste de l'évolution des systèmes de soufflerie à travers les siècles : l'absence de soufflerie ne signifie aucunement que l'installation est ancienne.

Seules les données acquises par des fouilles modernes seront à même de faire avancer nos connaissances sur la question du tirage naturel. Notons toutefois que la majorité des bas fourneaux découverts dans nos régions dans le courant des cinquante dernières années semble faire état d'une soufflerie. Si les fourneaux à tirage naturel existent, en particulier sur le territoire de l'ancien Evêché de Bâle, ceux fonctionnant à l'aide d'une soufflerie sont sans doute plus nombreux que ne le laissait entendre A. Quiquerez.

4.3.2 Le tirage artificiel

La tuyère est une pièce en matériau réfractaire percée d'un trou, placée dans la paroi du fourneau et raccordée à la soufflerie. Elle permet d'introduire l'air dans la zone de combustion à l'intérieur de l'appareil.

La présence de tuyères parmi les scories permet de reconnaître, que l'on est en présence de fourneaux à tirage artificiel, c'est-à-dire fonctionnant à l'aide d'une soufflerie. Selon P.-L. Pelet, les dimensions et les formes des tuyères apportent une série d'indices sur le degré de perfectionnement technique des fours. En général, les plus archaïques - qui ne sont pas nécessairement les plus anciens - adoptent les plus larges diamètres. L'amélioration de la ventilation fait adopter des canalisations de plus en plus étroites, qui ne descendent cependant pas au-dessous de 2.5cm (Pelet 1973).

Les sites des Bellaires, où les types de tuyères varient fortement et où l'on constate la présence de fourneaux d'époques et de constructions différentes, ont permis à P.-L. Pelet d'examiner de nombreux conduits d'air et d'étudier notamment leur évolution à travers les temps.

Aux Boulies, la quantité remarquable de tuyères, qui forment un ensemble chronologiquement homogène, permet une autre approche.

4.3.3 Les tuyères

Les fragments de tuyères, faciles à distinguer sur le terrain par leur couleur et par leur forme, même à l'état fragmentaire, ont été récoltés en grand nombre (un millier de morceaux). Ces pièces ont été confectionnées avec de l'argile rouge sidérolithique contenant encore un nombre appréciable de pisolithes. Les traces que la majorité d'entre elles portent sur la face inférieure indiquent qu'elles ont été façonnées dans des moules en bois. Le percement de la pièce en argile se faisait certainement dans le moule. Le fait que les parties externes des longues tuyères sont cuites suggère une cuisson préalable à leur emploi.

La découverte d'une tuyère en place dans la paroi gauche du bas fourneau 1 représente dans ce contexte une donnée importante. Par ailleurs, une pièce écrasée à l'ouverture du bas fourneau 2, immédiatement sus-jacente aux dernières coulées, elles aussi trouvées en place, vient compléter de façon inespérée les informations recueillies sur cette catégorie d'objets.

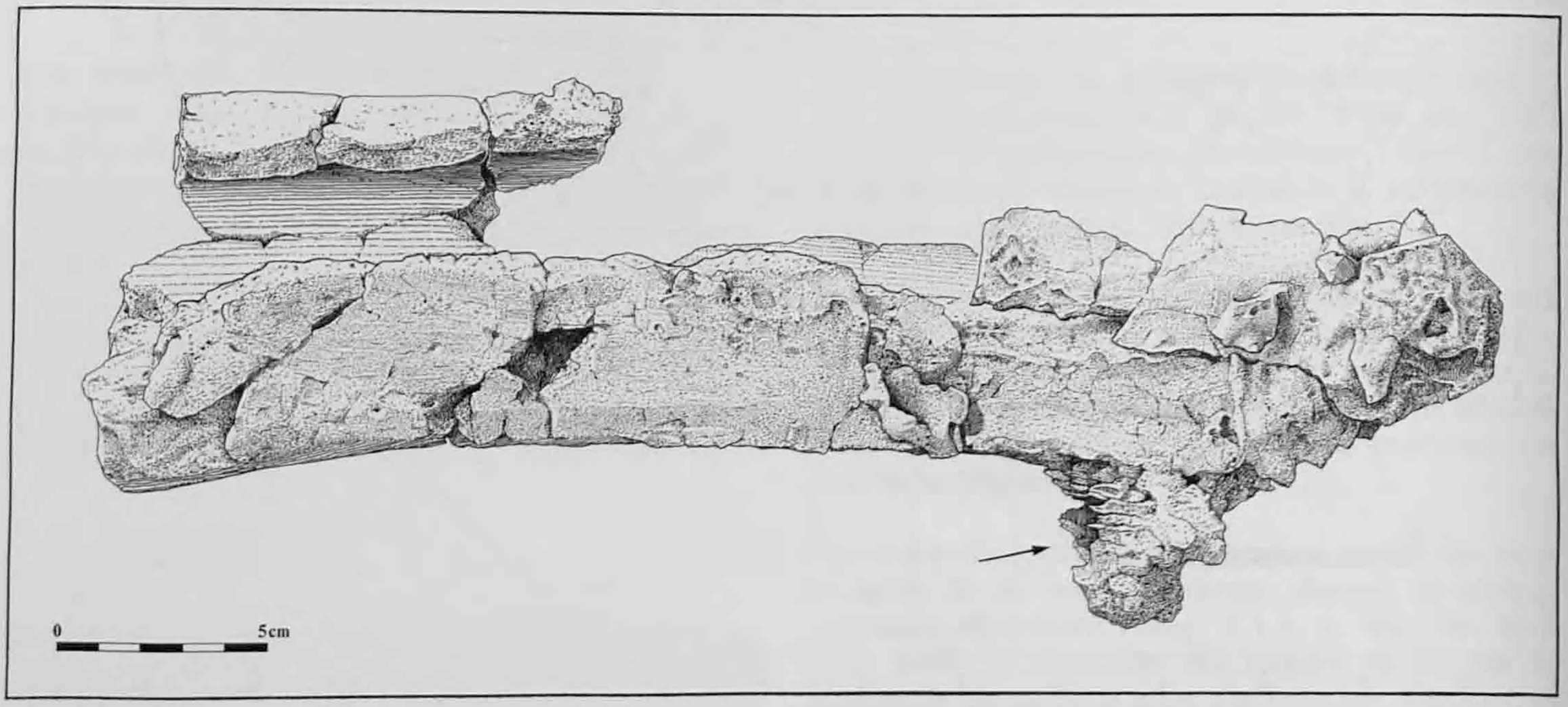


Fig. 41. Tuyère frontale n° 1. Vue latérale. Flèche : restes du support argileux.

A la suite des remontages effectués en laboratoire, 200 fragments environ ont été recollés (fig. 40). Ce pourcentage relativement faible (20%) s'explique par le mauvais état de conservation de la majorité des morceaux, d'une part, et par le laps de temps restreint réservé à ces travaux, d'autre part. Néanmoins, quarante individus au minimum ont pu être déterminés.

On constate des similitudes entre les tuyères des Boulies et celles des Bellaires que P.-L. Pelet interprète comme étant les plus évoluées (Pelet 1973). Les éléments de soufflerie du Jura vaudois constituent jusqu'à ce jour le meilleur ensemble de comparaison.

Caractéristiques morphologiques

Un examen minutieux des pièces reconstituées a permis de définir deux types morphologiquement bien distincts. La transition entre les deux ensembles est cependant graduelle.

Le premier type comprend des tuyères dont la largeur moyenne de la base (5.1cm) est moins grande que la largeur à la hauteur du conduit (5.4cm) (fig. 41; tab. 10 et pl. 2). Onze pièces minimum ont été attribuées à ce type (n° 1, 3, 8, 13, 15, 18, 20, 22, 23, 25 et 29). A l'exception du n° 2, les pièces les plus longues (longueur supérieure à 20cm) font partie de cet ensemble. La tuyère n° 5 semble également se rattacher à ce type; elle est cependant la seule à avoir été fabriquée dans un matériau différent. L'argile utilisée est de couleur jaunâtre et ne semble pas provenir de formations sidérolithiques. Elle contient davantage de débris végétaux et de grains de sable, tandis que les pisolithes y font défaut.

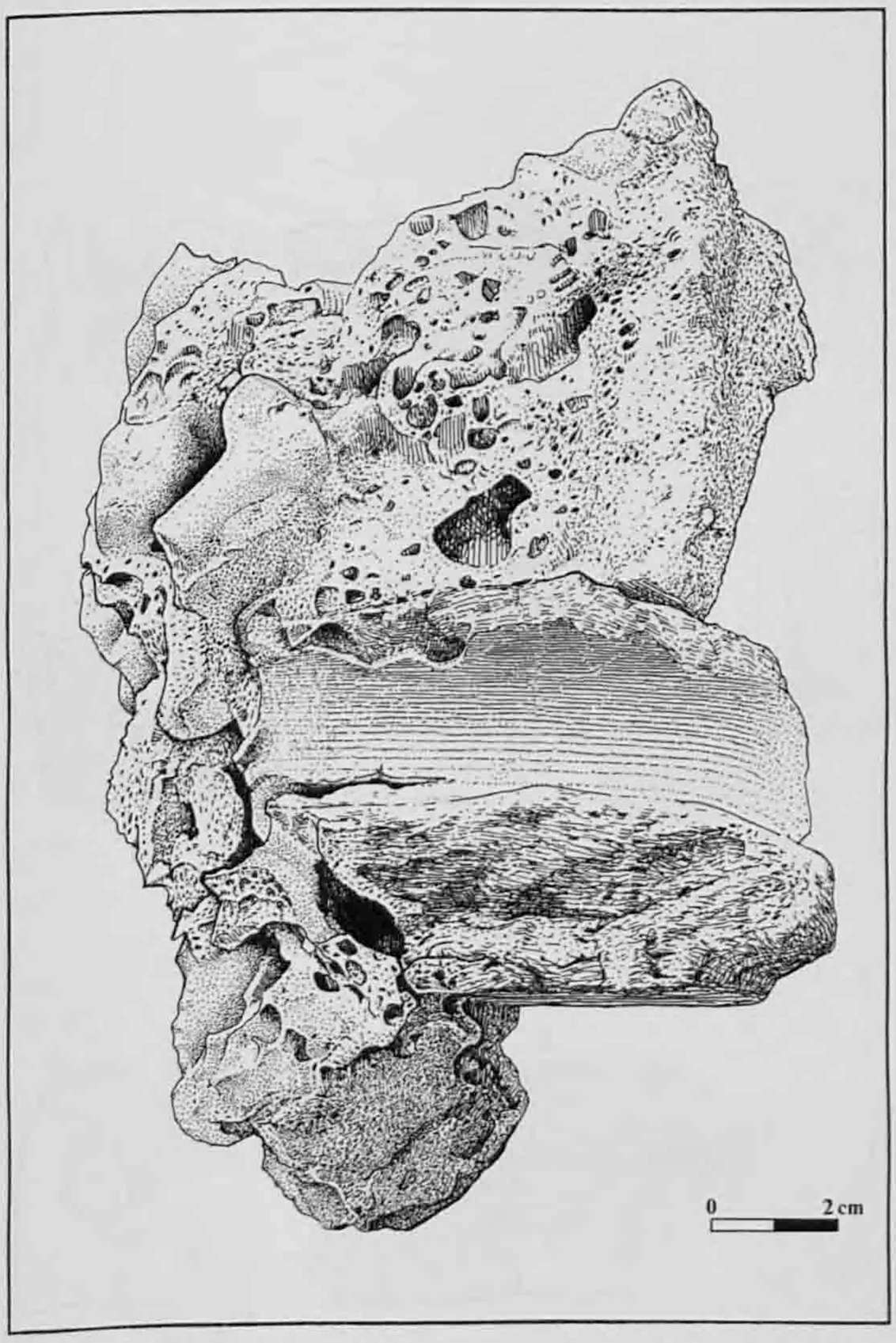


Fig. 42. Tuyère latérale n° 28, prise dans la paroi sableuse scorifiée. Vue de profil.

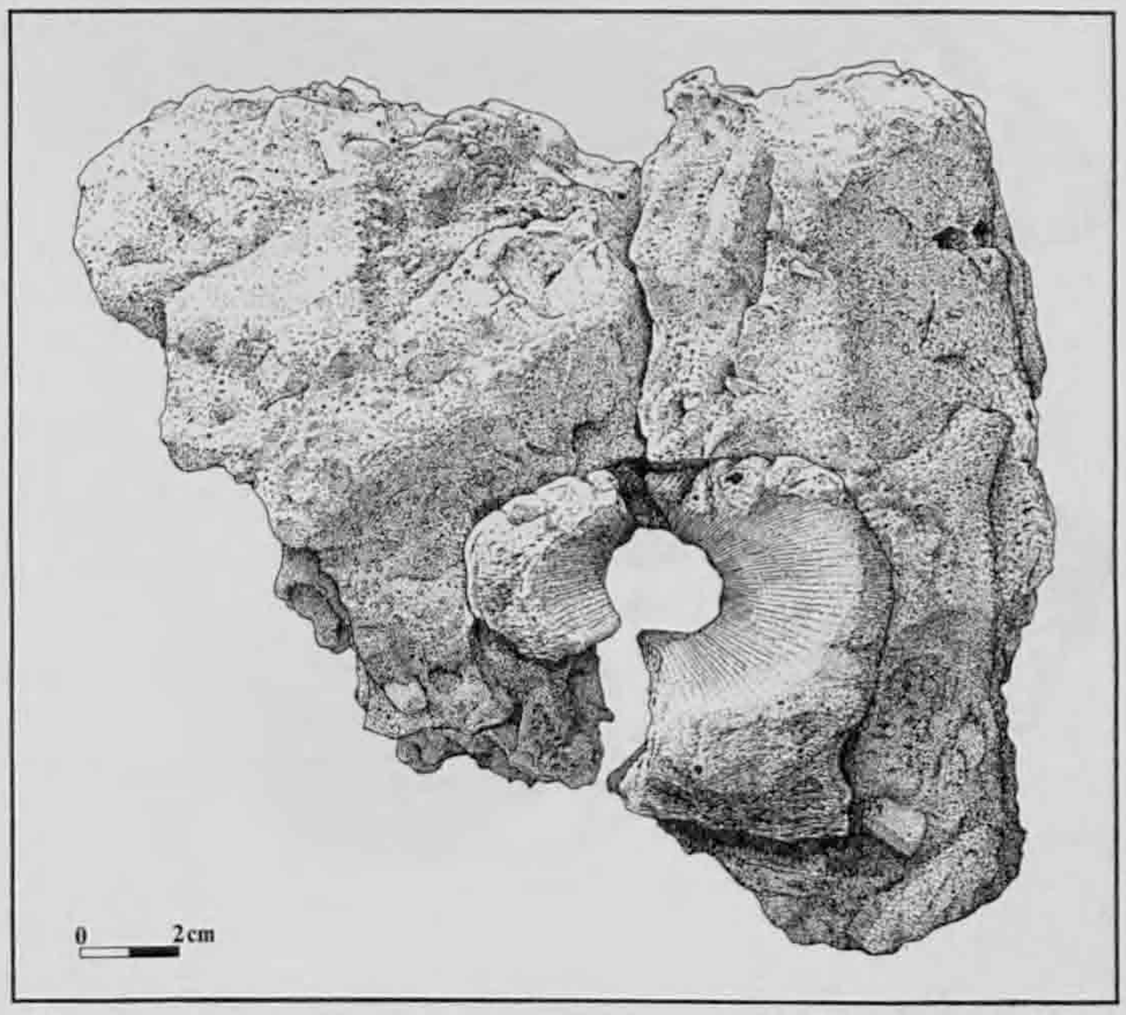


Fig. 43. Tuyère latérale n° 28, prise dans la paroi sableuse cuite. Vue de l'extérieur.

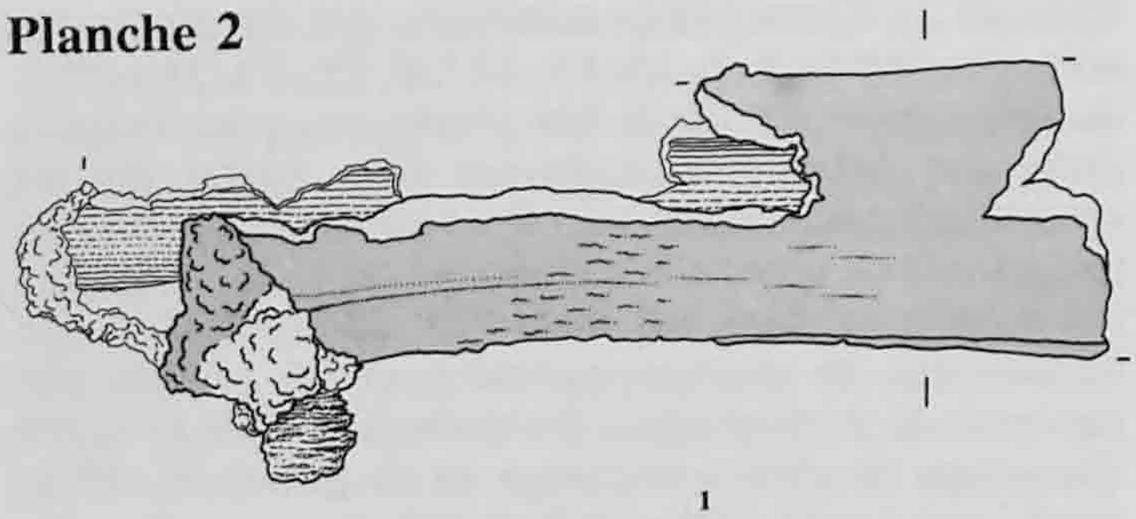
Le deuxième type est défini par une base plus large que celle du premier type (6.4cm)(fig. 42 et 43). La largeur mesurée à la hauteur du conduit est également de 6.4cm en moyenne (tab. 10 et pl. 3). Il compte dix-huit pièces au moins (n° 2, 4, 6, 7, 9 à 12, 14, 16, 17, 19, 21, 24, 26 à 28 et 30).

Les mesures de hauteur des pièces et du diamètre de conduit sont sensiblement identiques pour les deux types. Ceci confère une homogénéité globale à l'ensemble des tuyères.

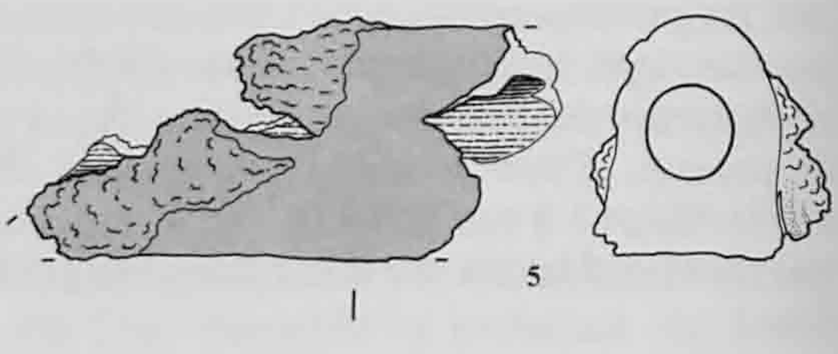
La longueur, quant à elle, est difficile à utiliser comme critère de classification. En effet, plusieurs tuyères (n° 6, 8, 13, 14 ? et 19) montrent des cassures du bec interne qui sont antérieures à la dernière utilisation. Il ne s'agit certainement que d'un nombre minimum, compte tenu que les becs internes sont toujours fortement scorifiés, d'où l'impossibilité d'identifier systématiquement les traces de cassures.

Cette observation montre que dans certains cas au moins, le bout du conduit obstrué par la scorification a été brisé volontairement, ce qui a permis de réutiliser la tuyère. Au cours de la durée d'utilisation d'une

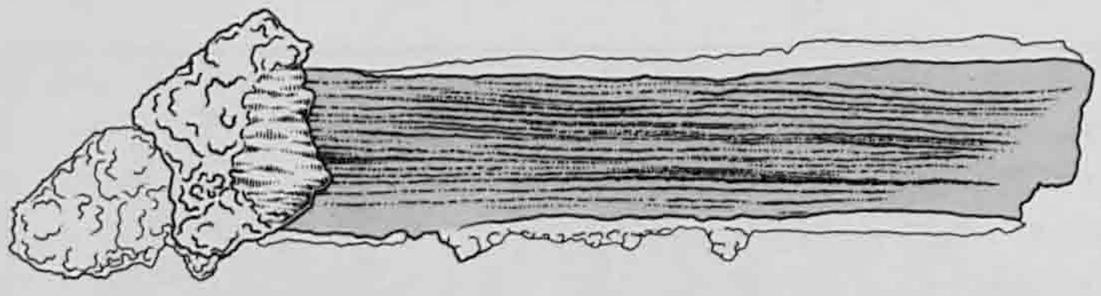
Planche 2

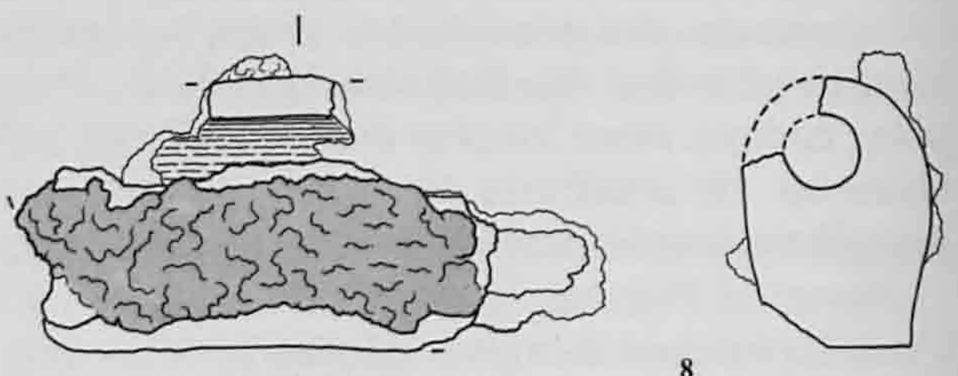


1

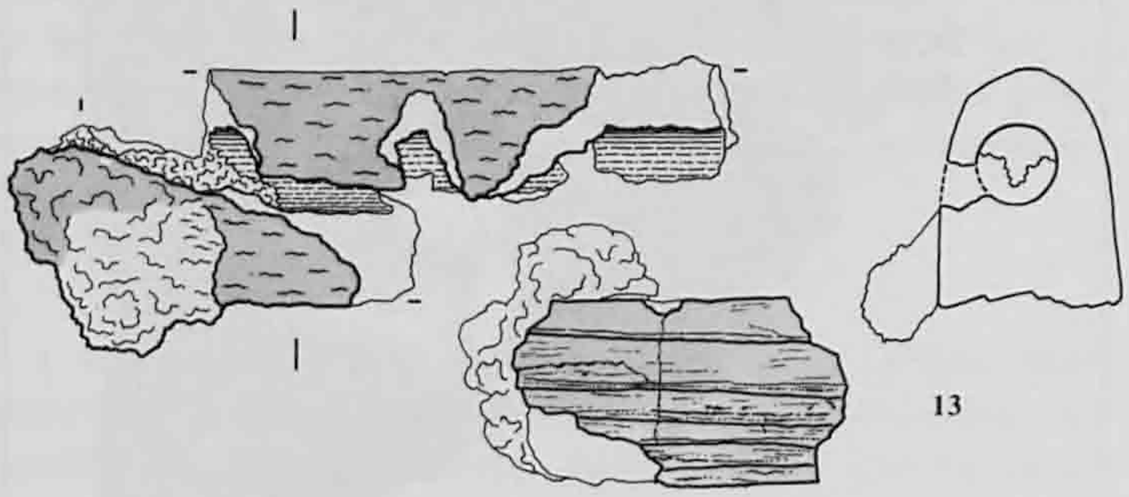


5

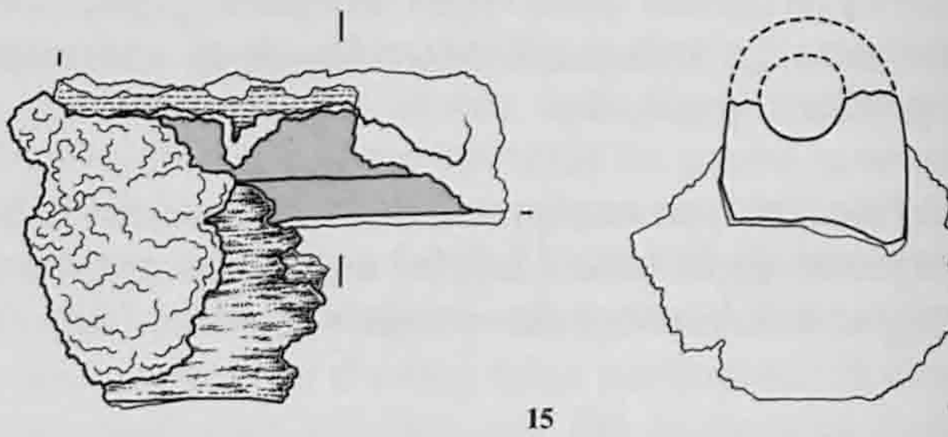




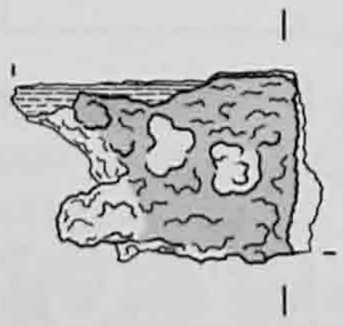
8



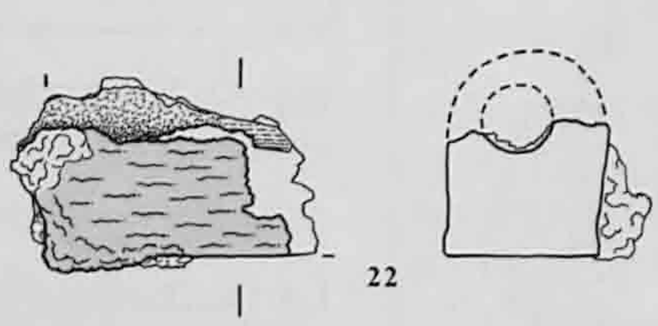
13



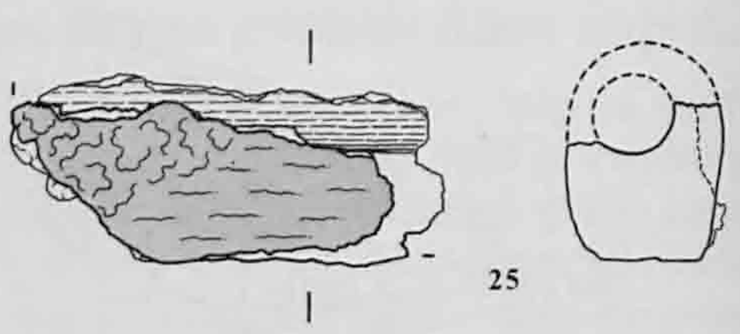
15



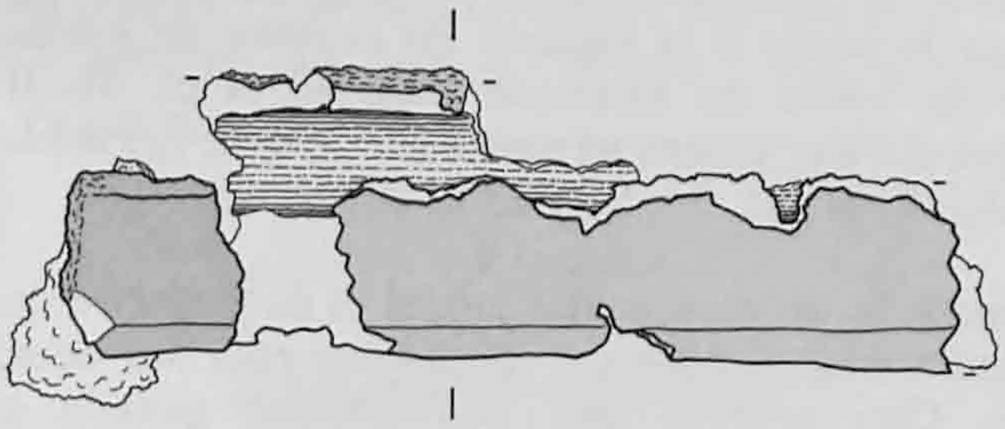
20



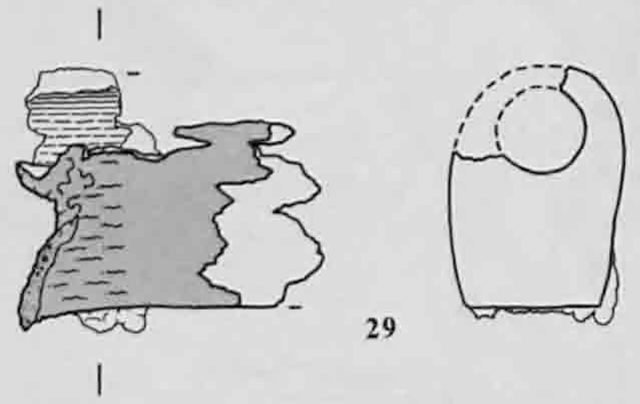
22



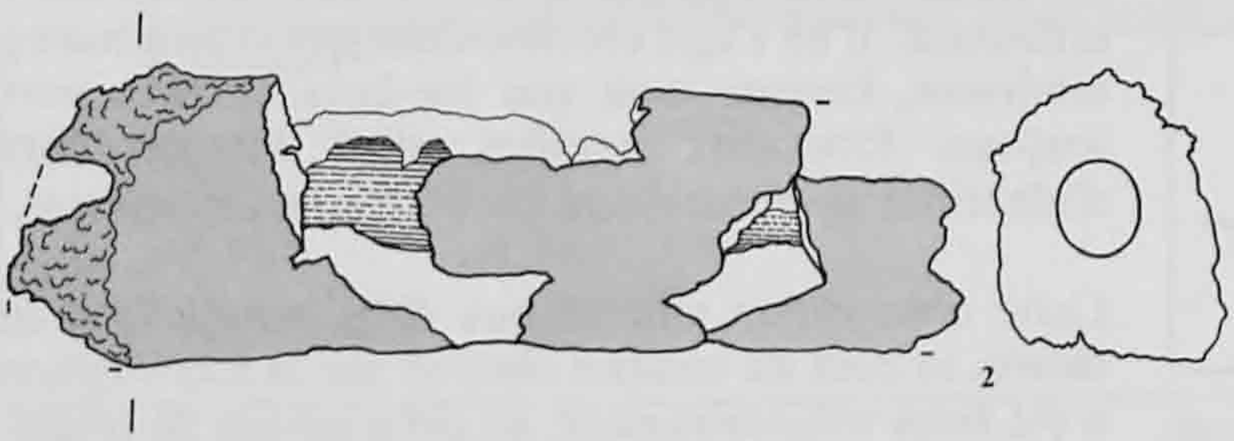
25



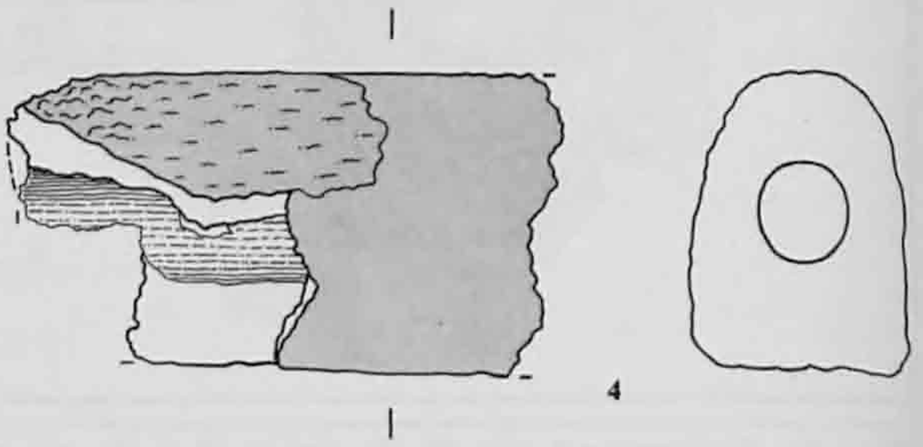
23



29



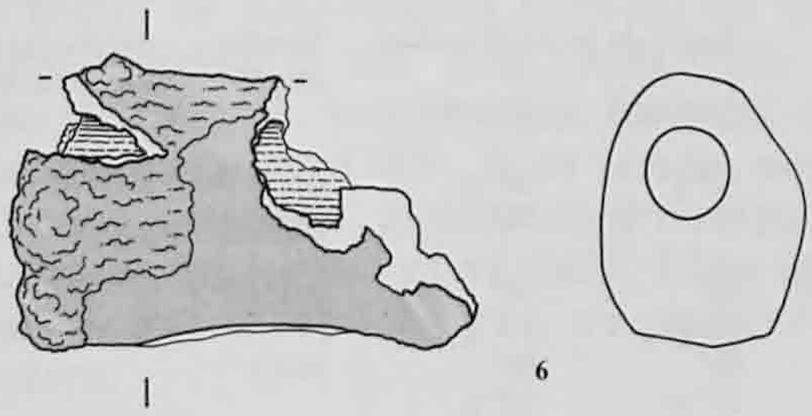
2



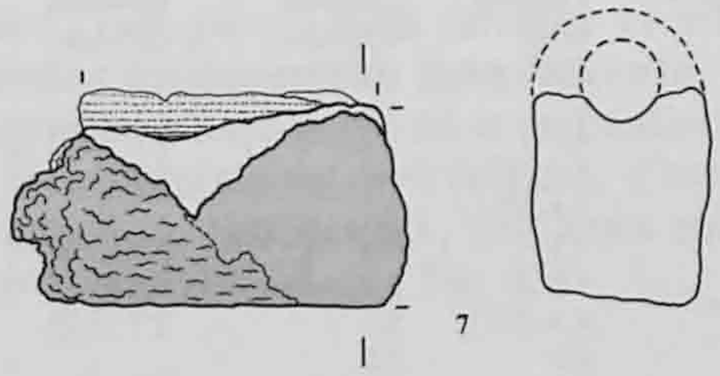
4

Tuyères. Vue latérale et section.

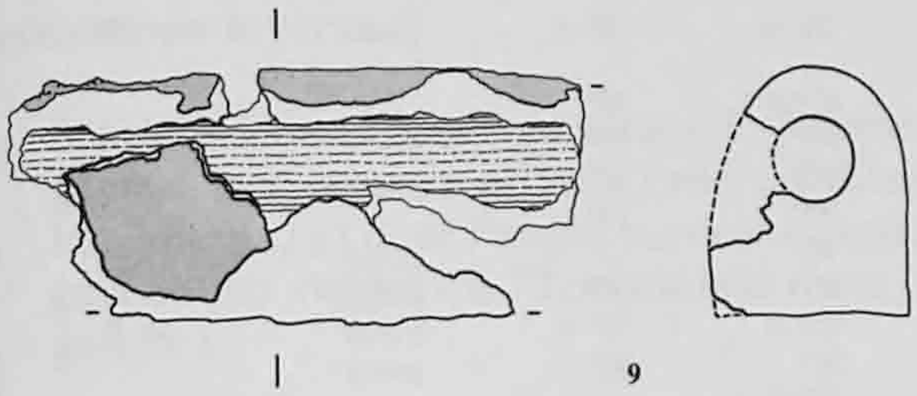
Echelle 1:4



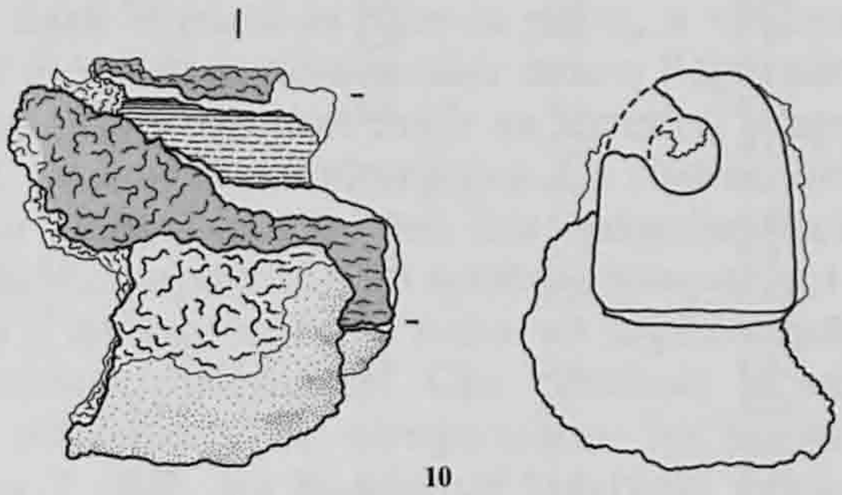
6



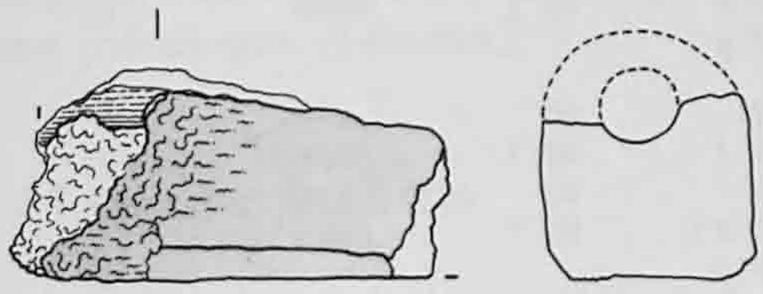
7



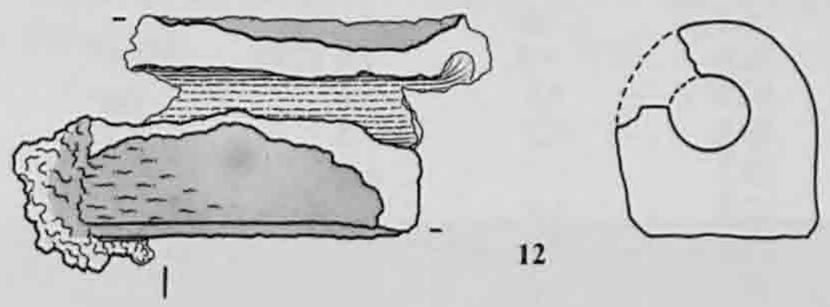
9



10



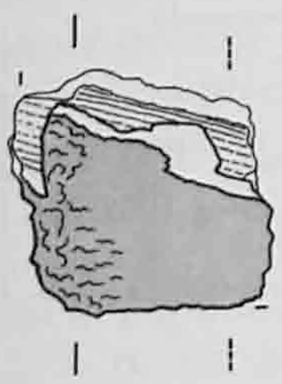
11



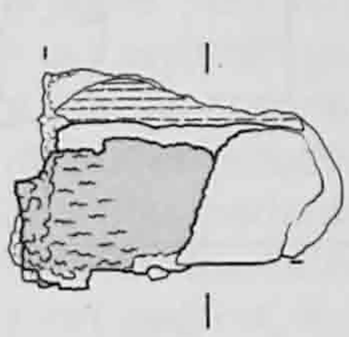
12

14

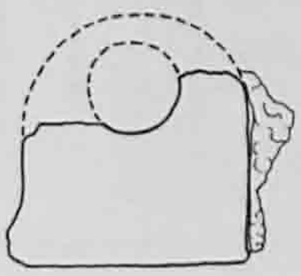
16

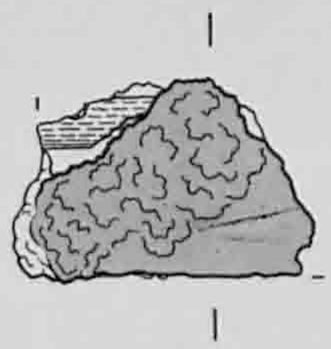


17

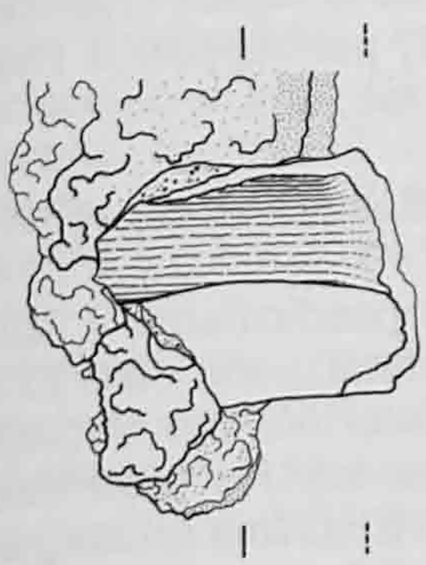


19

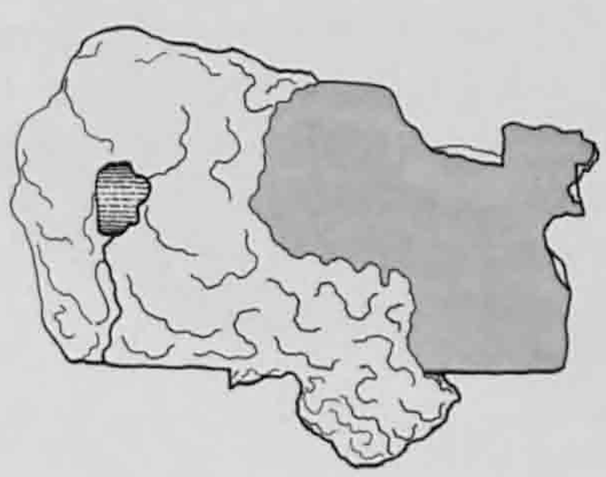




24



28



30

Tuyères. Vue latérale et section.

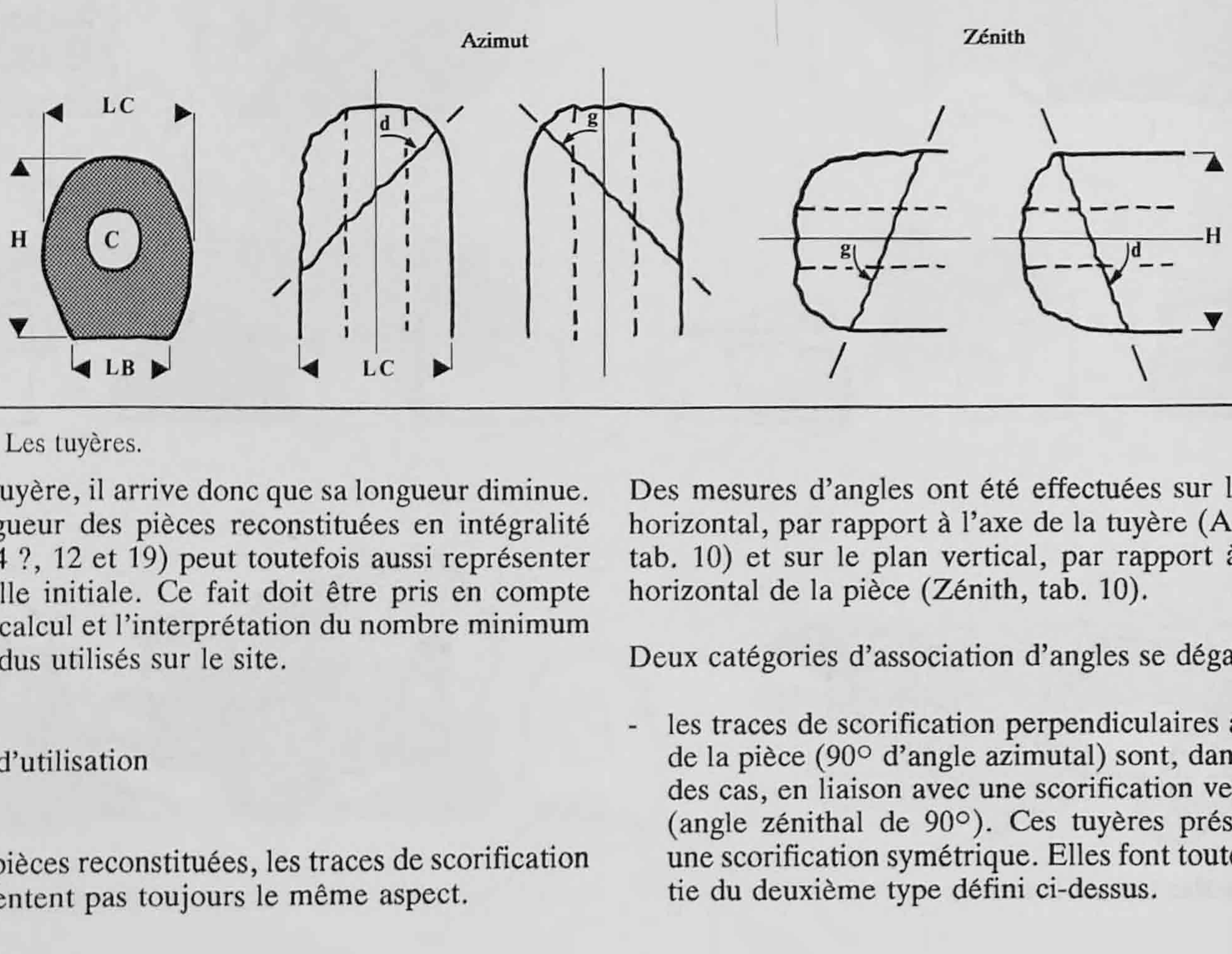
Echelle 1:4

N° objet	Longueur cm	Largeur base (LB) cm	Largeur conduit (LC) cm	Hauteur (H) cm	⌀ conduit (C) cm	Nbre de fgts	Angle de la scorification		Emplacement	Attribution au fourneau n°
							Azimut	Zénith		
1	34.0 [1]	4.7	6.0	9.0 (9.5)	2.8-3.0 (3.3) [2]	22	30° g	30° g	porte [5]	F1
2	31.0	6.7 (6.9)	6.4	7.8 (8.5)	2.8-3.1	18	90°	90°	paroi ?	
3	25.0	3.4-3.8	6.0	7.8	2.7	11				
4	18.7 [1]	7.1	6.4	9.1	2.8-2.9	8	90°	90°	paroi ?	
5	18.0	5.8	5.5	7.5	2.7x3.3	6	40° g	40° g		F1 [6]
6	15.4 [1]	4.4-(6.5)	6.1	8.7 (9.2)	2.7x3.2	6	90°	90°	paroi	
7	13.0	5.5	5.5		2.5	2	50° d	55° g		
8	19.5	5.2	5.8	8.7	2.4-2.5	5	45° g	50° g	porte ?	F1 [6]
9	18.9	6.2	5.9	7.9	2.7-2.9	11	90°			
10	13.0	6.9	6.5	7.3	2.5	4	90°	90°	paroi	
11	14.3	6.7	6.5		2.6	1	90°	90°		
12	15.7 [1]	6.2	6.5	6.7	2.7x2.9	4	35° d	50° d	porte ?	F2 [6]
13	23.5	6.0	5.3	7.6	2.6	4				
14	15.0	5.7			2.7	2	45° d ?	90°		
15	15.4	6.0			2.8	5	45° g	90°	porte [5]	F1
16	18.2	6.1	6.7		2.7	2	90°	90°	paroi	
17	8.7	5.8	6.0		2.7	1	90°	90°		
18	11.0	6.3	5.6		2.7	3	90°		porte [5]	
19	11.4	8.1			3.1	1	90°	90°	paroi	
20	10.3	4.7	4.5		2.8	1	45° d	35° d	porte	F2 [3]
21	12.8	>6		8.8	2.7	3	90°	90°	paroi	
22	10.0	5.5	4.9		2.3	1	50° g			
23	31.1	4.5-5.6	5.2	8.8	2.7	1	30° g	40° g	porte [5]	F1
24	10.0	6.1	5.7		2.8	1	55° g	45° g		
25	14.3	4.8	5.1		2.6-2.8	1	50° g	45° g	porte	F1 [6]
26	15.3	6.2				6	50° g ?			
27	6.1	7.0			3.1 ?	1				
28	10.0	>5	7.5 (7.9)	7.6	2.7x3.4 (6.4) [2]	2	90°	90°	paroi	
29	10.0	4.5	5.6	7.6	2.8	11	50° d	90° ?	porte	F2 [3]
30	19.2	6.2	7.3	9.3	3.2	3	90°	90°	paroi	F1 [4]
31	13.3		6.3	9.5	2.8	3	60° d ?	90° ?	paroi	
32	12.0	5.4				2	35° d			
33	6.6	6.6			3.0 ?	3				
34	8.2	5.6			2.7	2				
35	15.4			8.5	2.6	9	90° ?			

1) embouchure conservée

2) embouchure évasée

3) situation stratigraphique
4) en place
5) traces du support argileux
6) typologie



Tab. 10. Les tuyères.

même tuyère, il arrive donc que sa longueur diminue. La longueur des pièces reconstituées en intégralité (n° 1, 4 ?, 12 et 19) peut toutefois aussi représenter leur taille initiale. Ce fait doit être pris en compte dans le calcul et l'interprétation du nombre minimum d'individus utilisés sur le site.

Traces d'utilisation

Sur les pièces reconstituées, les traces de scorification ne présentent pas toujours le même aspect.

Des mesures d'angles ont été effectuées sur le plan horizontal, par rapport à l'axe de la tuyère (Azimut, tab. 10) et sur le plan vertical, par rapport à l'axe horizontal de la pièce (Zénith, tab. 10).

Deux catégories d'association d'angles se dégagent :

- les traces de scorification perpendiculaires à l'axe de la pièce (90° d'angle azimutal) sont, dans 85% des cas, en liaison avec une scorification verticale (angle zénithal de 90°). Ces tuyères présentent une scorification symétrique. Elles font toutes partie du deuxième type défini ci-dessus.

- les traces de scorification formant un angle azimutal inférieur à 90° sont, dans 75% des cas, associées à une scorification formant un angle zénithal inférieur à 90°. Il en résulte une scorification asymétrique, gauche ou droite par rapport aux plans horizontal et vertical. Elles appartiennent, à une exception près, au premier type de tuyères.

Au sein de la deuxième catégorie définie par des traces asymétriques, on distingue globalement deux variétés de tuyères :

- 6 pièces dont l'angle horizontal s'ouvre vers la gauche par rapport à l'axe (vue en direction du bec interne) et dont l'angle vertical s'ouvre vers la gauche par rapport à l'horizontale (bec interne à gauche).

- 2 pièces au moins dont les angles horizontal et vertical s'ouvrent vers la droite (même orientation des pièces que ci-dessus).

4.3.4 La double soufflerie

La confrontation des observations faites en laboratoire avec les données de terrain nous a amené à formuler l'hypothèse suivante : l'existence de deux types de tuyère serait à mettre en relation avec une utilisation différentielle.

Deux observations supplémentaires viennent encore étayer cette interprétation. D'une part, un grand nombre des pièces qui montrent une scorification symétrique (9 sur 11 au moins) comporte des restes de paroi sableuse scorifiée : certaines de ces tuyères ont été arrachées en même temps que des morceaux conséquents de paroi. La tuyère trouvée en place (n° 30) dans la paroi du fourneau 1 est un exemple bien représentatif de ce type d'objet. D'autre part, sur plusieurs pièces dont la scorification est asymétrique (au moins 5), des restes d'argile ont été découverts. Dans un cas, la base interne de la tuyère est soudée à un bloc d'argile (n° 15). La pièce la plus parlante est cependant celle retrouvée à l'entrée du fourneau 2. A partir des fragments récoltés à cet endroit, il a été possible de reconstituer le support en argile de la tuyère. Notons que la tuyère n° 29 épouse parfaitement l'empreinte - en forme de ⊔ - marquée à la surface de ce bloc. Ce support est constitué d'un bloc d'argile façonné à la main. Sa friabilité semble attester qu'il n'était pas cuit avant d'être utilisé. Sa face interne porte des traces de scorification (fig. 44).

Les tuyères se répartissent par conséquent en deux groupes d'après leurs dimensions, les traces de scorification et la nature du support. Elles occupent des positions différentes dans le bas fourneau. Le premier groupe est composé de pièces un peu plus larges et moins longues sises dans la paroi latérale des fourneaux. Les pièces plus étroites et plus longues, positionnées quelque part dans la porte, forment le second groupe : leur angle de scorification permet de définir leur emplacement d'origine, c'est-à-dire soit dans la porte du fourneau 1, soit dans celle du fourneau 2 (chap. 4.4.2, p. 66, fig. 45).

En conclusion, une paire de tuyères, situées respectivement dans la paroi et dans la porte, a vraisemblablement été utilisée pour mener à bien l'opération de réduction. Chacune doit avoir sa fonction propre au cours du processus métallurgique. Ce rôle est difficile à définir dans l'état actuel des connaissances, en raison de la complexité d'un système comportant deux arrivées d'air disposées de manière asymétrique et à des hauteurs différentes. Ces résultats manquent encore d'éléments de comparaison. Sur les sites de Bellaires 2 et 3, les fourneaux semblent également équipés d'une double soufflerie (Pelet 1973). Les types de tuyères sont néanmoins assez différents de ceux des Boulies.

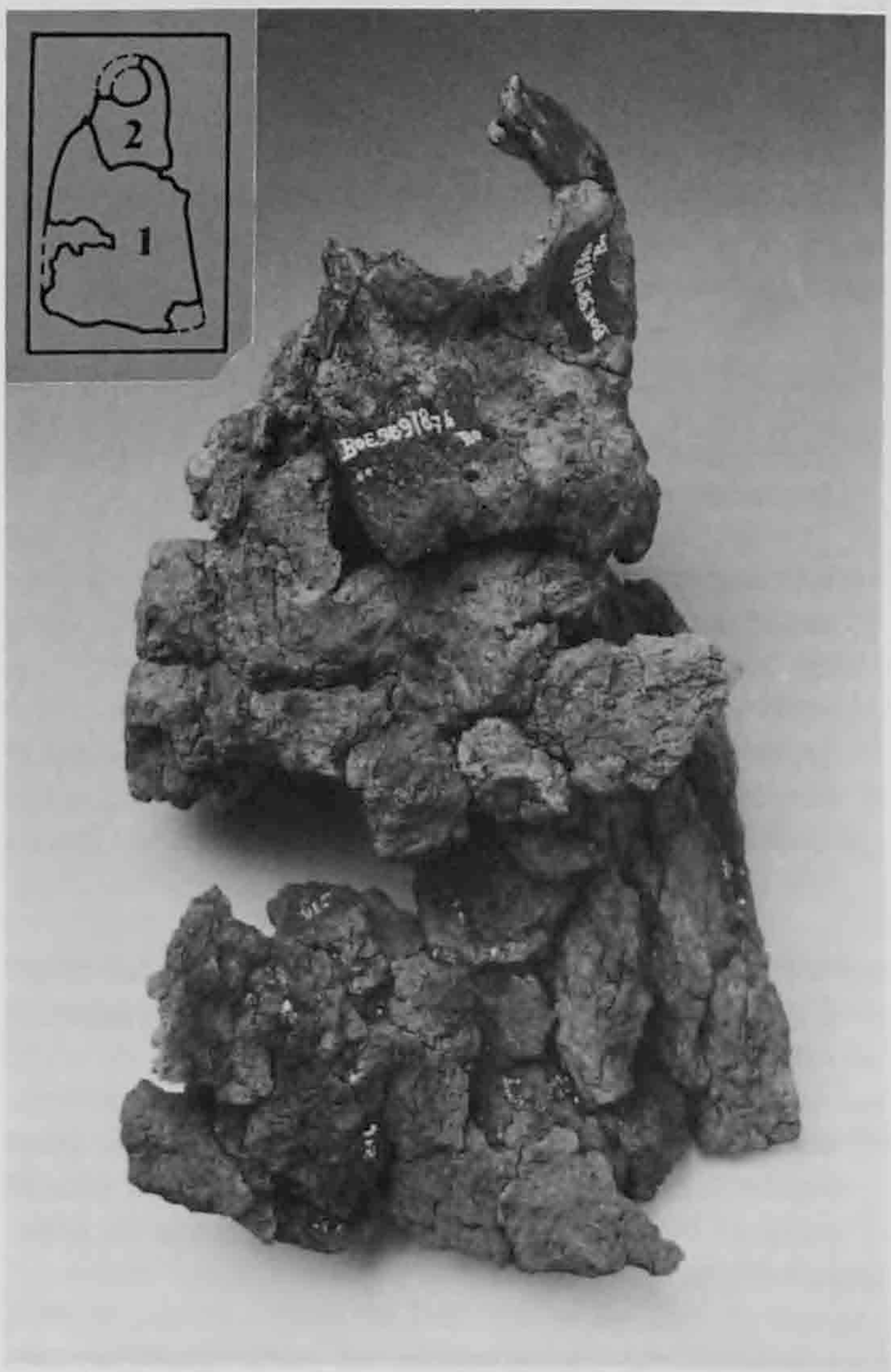


Fig. 44. Bloc-support (1; dimensions : 18 x 13cm) et tuyère frontale n° 29 (2).

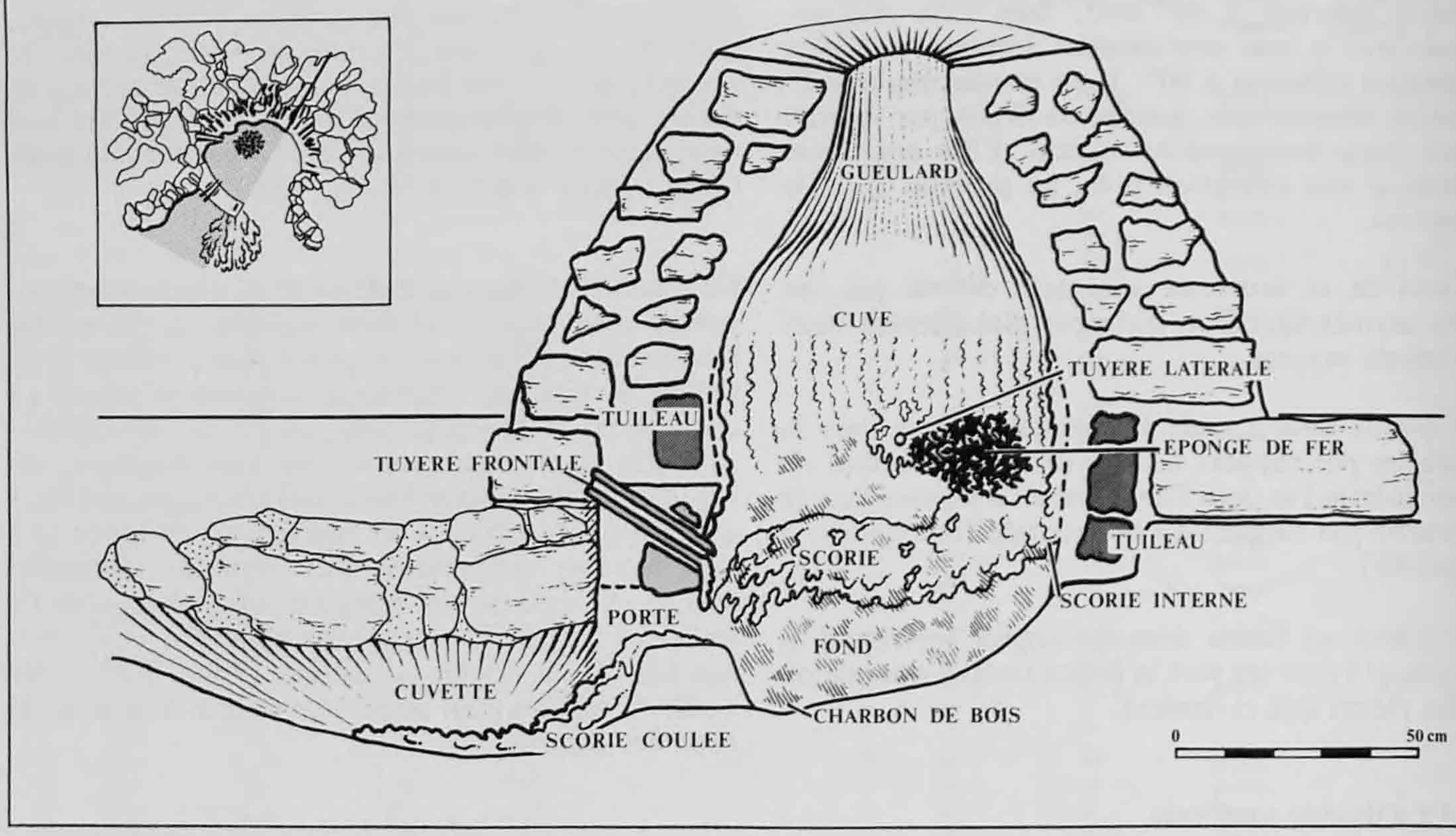


Fig. 45. Reconstitution idéale d'un bas fourneau des Boulies. Au-dessus de la ligne : reconstitution hypothétique; au-dessous de la ligne : reconstitution archéologique.

4.4 Reconstitution des bas fourneaux

La construction d'un bas fourneau dépend essentiellement de son emploi dans le processus technologique de réduction; celui-ci nécessite :

- une isolation thermique pour favoriser l'augmentation et le maintien de la température interne nécessaire (paroi : chap. 4.4.1, p. 64; fond du fourneau enterré);

- une ouverture sommitale pour introduire, à plusieurs reprises, la charge de minerai et de charbon de bois (gueulard);

- un tirage artificiel (par une soufflerie) ou naturel (en optimisant la hauteur et l'orientation du fourneau) afin d'assurer un apport d'air suffisant (tuyères : chap. 4.4.2, p. 66);

- un volume interne proportionné à celui des charges introduites et des produits qui en résultent (cuve);

- une ouverture, permanente ou temporaire, pour évacuer les scories qui remplissent peu à peu la cuve et bloquent la production du fourneau (porte : chap. 4.4.3, p. 66).

Ces critères de construction ne sont toutefois pas immuables : ils évoluent en fonction des connaissances techniques acquises dans une région donnée et s'adaptent aux conditions locales. A notre avis, le bas fourneau des Boulies se rattache à un type d'installation qui n'avait pas encore été relevé dans le Jura historique. Il est une variété locale d'un modèle bien connu depuis les fouilles du Jura vaudois. Il s'en distingue cependant sur quelques points.

La reconstitution proposée se fonde, d'une part, sur les vestiges archéologiques trouvés en place ou du moins dans un contexte spatial et stratigraphique sans équivoque; d'autre part, sur les éléments de construction déplacés, retrouvés dans les remplissages des cuvettes ou des fourneaux. Celle des parties basses est sûre, celle de la superstructure reste plus hypothétique.

Le bas fourneau 1 - qui peut être considéré comme la première installation en fonction et dont l'architecture est la plus parlante - a servi de modèle pour le schéma (fig. 45). Les données relatives au fonctionnement et à la stratigraphie des bas fourneaux seront présentées plus loin de manière exhaustive (chap. 5, p. 69 et chap. 6, p. 85).

4.4.1 Paroi en élévation

On constate, en plan et en coupe, que l'épaisseur moyenne de la paroi, au niveau de l'assise posée à même le sol, est de 70cm (chap. 4.2.1, p. 52). Toutefois, celle de la paroi en élévation ne devait guère dépasser 40cm en moyenne. A notre avis, plusieurs arguments corroborent cette interprétation :

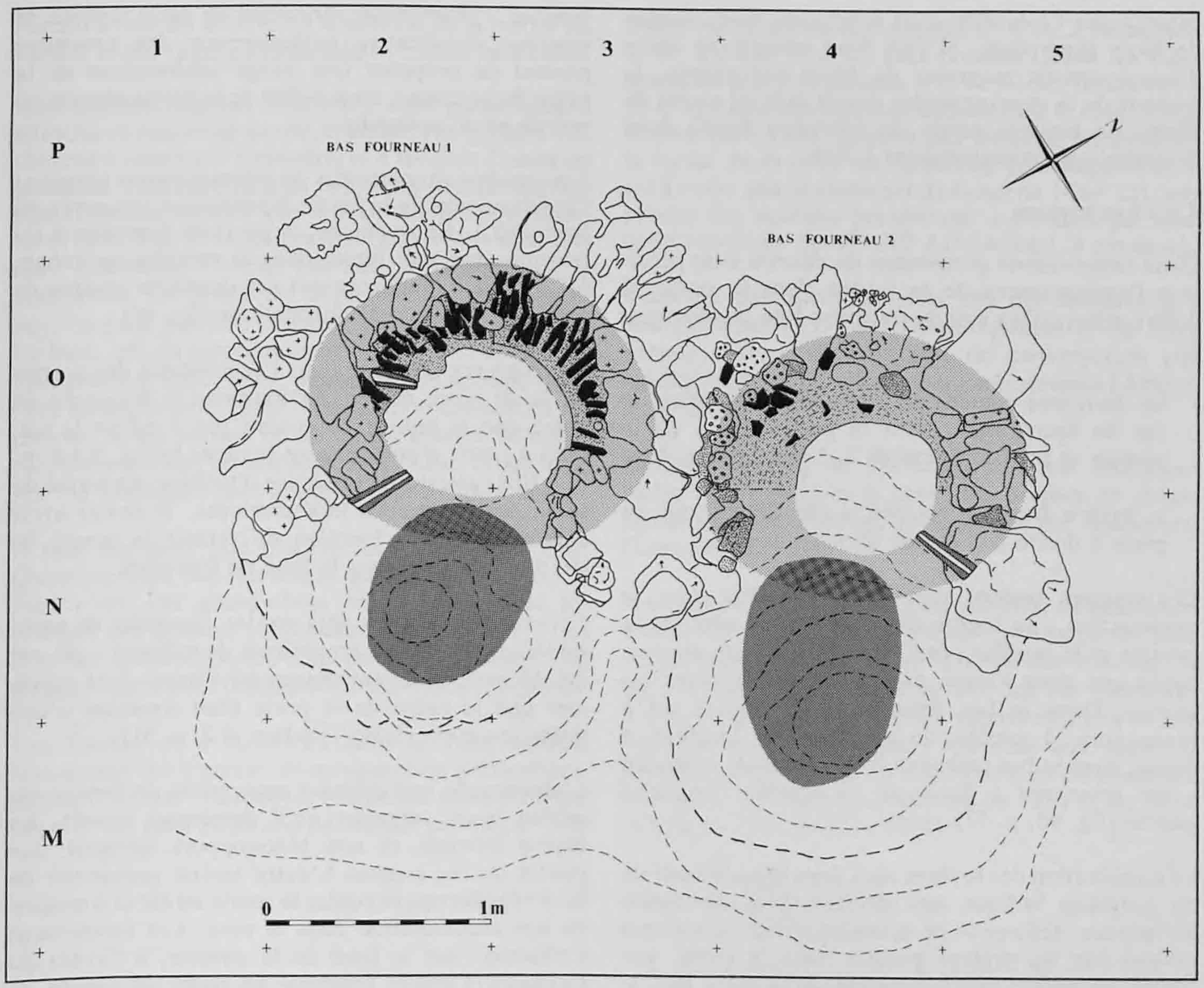


Fig. 46. Bas fourneaux 1 et 2. Reconstitution et éléments techniques (trame sombre : emplacement des dernières coulées; trame claire : épaisseur de la paroi en élévation.

- l'assemblage de galets cristallins (en O1/O2) correspond vraisemblablement à l'emplacement du soufflet, en relation avec la tuyère sise dans la paroi (en O2). Sa limite interne se situe à 40cm du bord intérieur de la paroi.

- la distance entre le bord interne de la paroi du fourneau 1 et celui de la première paroi du fourneau 2 est de 80cm.

- la paroi, de par sa fonction d'isolant thermique, est certainement d'épaisseur à peu près constante sur tout le pourtour du fourneau. Elle n'est probablement pas plus épaisse que nécessaire, afin d'éviter une surcharge de poids au-dessus de la porte. A cet endroit, la paroi devait encore s'amincir, si l'on admet qu'elle ne s'avançait pas au-delà de la moitié de la cuvette.

De par les éléments qui la constituent, la paroi de la superstructure se divise plus ou moins en deux parties : à l'extérieur, un manteau de pierres; à l'intérieur, un revêtement sablo-argileux. Les vestiges archéologiques donnent cependant une image différente pour les deux fourneaux. En effet, dans le périmètre du fourneau 1, seuls 50 blocs calcaires et galets cristallins ont été relevés. Pour le fourneau 2 en revanche, on dénombre 270 éléments lithiques (fig. 38, p. 55).

Deux hypothèses sont envisageables : soit une partie des pierres du fourneau 1 à l'abandon a été récupérée pour l'édification du fourneau 2; soit les modes de construction des deux fourneaux ont différé. Le remaniement subi par les couches superficielles sur le site ne permet pas de trancher (chap. 6.1, p. 85).

Le nombre de blocs en association stratigraphique avec le dernier état du bas fourneau 2 (270 pièces) permet néanmoins d'estimer la hauteur initiale de l'appareil. Etant donné qu'une rangée de l'assise du fourneau comporte en moyenne 30 blocs, on peut

estimer que l'élévation était constituée de 9 rangées de blocs superposés. Si l'on tient compte en outre d'une épaisseur moyenne de 10cm par rangée, la hauteur de la superstructure devait être au moins de 90cm. La hauteur totale du fourneau devait donc atteindre approximativement 1.50m.

4.4.2 Les tuyères

Deux observations permettent de décrire avec précision l'emplacement de la tuyère dans la porte; il diffère selon qu'il s'agit du fourneau 1 ou du fourneau 2 :

- les dernières coulées en place se situent, dans le cas du fourneau 1, dans la partie droite de la cuvette et pour le fourneau 2, à gauche (fig. 46);

- la tuyère frontale écrasée a été découverte en place à droite de l'entrée du fourneau 2.

Ces vestiges parlent pour une asymétrie dans la construction : la tuyère est placée d'un côté de la cuvette et le soufflet posé sur la bordure de pierres, tandis que dans l'autre partie, on fait s'écouler les scories. Dans le bas fourneau 1, la tuyère est à reconstituer à gauche, la coulée étant localisée à droite; dans le bas fourneau 2 en revanche, la tuyère a été retrouvée à droite et la dernière coulée à gauche (fig. 40, p. 57).

La scorification des tuyères sises dans la paroi latérale du fourneau indique une position plus ou moins horizontale, telle celle de la tuyère n° 29. Les traces visibles sur les tuyères placées dans la porte, par contre, suggèrent une inclinaison de la pièce vers le fond du fourneau (fig. 45). Le bloc servant de support à la tuyère confirme cette reconstitution : sa face externe forme un angle inférieur à 90° avec le plan qui accueille la tuyère. Ce fait prend de l'importance dans le déroulement du processus de réduction (chap. 5, p. 69).

L'emplacement asymétrique de la tuyère, enfin, explique l'aménagement soigné des murets de la cuvette : une fois disposé sur ces blocs, le soufflet peut être actionné sans encombrer l'espace devant la porte. De plus, dans le cas d'une soufflerie alternée, le déplacement du soufflet entre la tuyère frontale et la tuyère latérale s'effectue sans difficulté.

Aucun élément ne permet de restituer la taille et la forme des soufflets eux-mêmes (Forbes 1950).

4.4.3 La porte

La partie frontale du bas fourneau est dans beaucoup d'exemples archéologiques celle qui a été la plus endommagée. Son état de conservation empêche souvent de proposer une reconstitution valable. Aux Boulies, l'examen des morceaux de paroi répartis de manière significative à l'ouverture des structures permet de proposer une image schématique de la porte du fourneau, c'est-à-dire de la partie ouverte ou mobile et de son cadre.

Les courbes altimétriques du substrat creusé signalent l'emplacement de la partie frontale non conservée du fourneau 1. En revanche, la porte du fourneau 2 est marquée par une limite dans le remplissage (chap. 6.1, p. 85). L'emplacement des dernières coulées de scories confirme ces constatations (fig. 46).

Les ruptures de pente dans l'écoulement des scories de la dernière coulée du fourneau 2 indiquent en outre que le liquide ne coulait pas à même le sol, mais à partir d'une certaine hauteur (chap. 5.4.2, p. 71). Elles attestent l'existence d'un bloc, en forme de seuil, de dimensions indéterminées. Il devait avoir comme première fonction de retenir la masse de charbons de bois dans le fond du fourneau.

Comme nous l'avons déjà vu, les morceaux de paroi sableuse portant des empreintes de tuileaux - qui ont été découverts devant chaque ouverture - font présumer que le cadre de la porte était constitué d'une voûte (en plein cintre ?) (chap. 4.2, p. 51).

L'absence de tout élément susceptible de fermer cet orifice laisse supposer qu'il demeurait ouvert. La tuyère frontale et son bloc-support occupait une moitié de cet espace. L'autre moitié permettait de faire régulièrement couler la scorie au fur et à mesure de son accumulation dans la cuve. Cet écoulement s'effectuait sur le fond de la cuvette, à l'avant du fourneau. Celle-ci constitue en outre un espace de travail auquel l'artisan peut accéder soit pour faciliter l'évacuation des scories, soit pour actionner la soufflerie frontale.

En résumé, les bas fourneaux de Boécourt donnent l'image d'une installation technique très évoluée. La construction du fourneau 1 est particulièrement soignée et régulière. Celle du fourneau 2 est au premier abord moins ordonnée, mais les caractéristiques techniques sont identiques.

4.5 Classification des bas fourneaux

La classification des bas fourneaux est une démarche complexe. Dans ce domaine, l'état de la recherche ne permet pas encore de proposer une typologie claire et définitive.

En utilisant des critères technologiques, P.-L. Pelet propose de classer les bas fourneaux en fonction de leur capacité de production (Pelet 1982). Les critères retenus sont la présence d'une isolation, le type de ventilation (et, le cas échéant, le type de tuyère),

l'architecture de la cuve, la superficie et la forme du fond et enfin, la possibilité de faire couler les scories.

Aux Boulies, les bas fourneaux sont partiellement enterrés et munis de parois épaisses; les artisans ont cherché à améliorer l'isolation et à faciliter l'accès au gueulard. Des tuyères sont présentes et leur disposition complexe montre que la ventilation est parfaitement contrôlée. L'exposition par rapport aux courants d'air dominants n'exclut pas leur participation à la ventilation. La forme de la partie supérieure de la cuve ne peut pas être restituée de manière certaine. Le fond, qui est grossièrement circulaire et de dimension plutôt grande, laisse penser que le volume de la cuve est important. Enfin, l'évacuation des scories est prévue, ce qui permet de traiter un volume de minerai plus important en une seule opération. En un mot, ces bas fourneaux sont des appareils sophistiqués.

Il faut souligner que d'après les descriptions d'A. Quiquerez, les bas fourneaux qu'il a fouillés dans le Jura n'ont pas grand-chose en commun avec les vestiges des Boulies (Quiquerez 1866 et 1871). Les données archéologiques sont encore beaucoup trop fragmentaires pour définir différents types régionaux.

Les fouilles de P.-L. Pelet dans le Jura vaudois fournissent des élément de comparaison particulièrement pertinents : ce sont les fourneaux datés du Haut Moyen Age (aux Bellaires, fourneaux jumelés n° 1-2, 3-4 et 19-20, fourneaux simples n° 6 et, à Prins-Bois 2, n° 23) qui sont les plus proches. Dans les fourneaux un peu plus anciens (IV/Ve siècle; Bellaires n° 11 et 12), des tuileaux sont utilisés dans le revêtement interne de la cuve, comme aux Boulies. Néanmoins, la forme de la cuve est beaucoup plus anguleuse. Il est à noter que le fourneau de Bossena 1 (n° 22), très proche des modèles précédents, a été daté par dendrochronologie de 609/610 AD (Abetel, à paraître).

Plusieurs fourneaux jumelés ont été découverts à Montcherand (VD) et datent également du Haut Moyen Age, mais leur état de conservation très médiocre empêche une comparaison sérieuse (Abetel, à paraître).

Enfin, à Ludres, en Lorraine, cinq bas fourneaux isolés très similaires à ceux des Boulies et datant également de la même période ont été découverts (Leroy et al. 1990).

Au-delà de ces parallèles très proches, de nombreux fourneaux trouvés pour la plupart en Angleterre et en Allemagne se rapprochent de ceux des Boulies. Ils appartiennent à la grande famille des bas fourneaux à scorie coulée possédant des superstructures et une ventilation artificielle. Ils s'opposent aux appareils dans lesquels la scorie ne coule pas hors du fourneau, tels qu'on les trouve en Europe de l'Est et du Nord (Bielenin 1974; Pleiner 1965).

Chapitre 5

Fonctionnement des bas fourneaux

L'air, le charbon de bois, le minerai de fer et les parois de la cuve du bas fourneau participent ensemble à l'opération de réduction. A des températures montant jusqu'à 1400°C, ces matières réagissent entre elles et se modifient.

Une partie du fer présent dans le minerai est réduite par le carbone et s'amalgame à l'intérieur du fourneau en un bloc solide : l'éponge de fer. Une partie des autres constituants fond et forme un liquide qui, en se refroidissant, donne des scories. Le reste ne participe qu'incomplètement à la réaction mais subit d'importantes modifications liées à l'action de la chaleur : morceaux de minerai partiellement réduits, parois de la cuve scorifiées et charbons brûlés.

Au cours du refroidissement, le liquide formé dans le bas fourneau se solidifie et cristallise si la chute de température n'est pas trop brusque. La morphologie des pièces nous renseigne donc sur la position dans laquelle s'est effectué ce refroidissement. Trois grandes catégories morphologiques sont présentes aux Boulies : les scories qui se sont écoulées hors du bas fourneau (scories coulées), celles qui sont restées accrochées aux parois à l'intérieur de la cuve (scories internes massives) et celles qui sont restées dispersées dans la masse de charbons (scories internes rouillées).

5.1 La charge

Les pisolithes sidérolithiques sont le seul minerai retrouvé sur le site. Après le lavage, ils sont transportés et stockés à proximité de l'atelier (chap. 3.4, p. 40). Il n'y a pas de tri granulométrique ni de concassage.

Par contre, les pisolithes subissent un chauffage préliminaire dans des foyers de grillage avant l'enfournement (chap. 6.1.4, p. 90; Garillot 1967). Nombre d'entre eux ont été traités de cette manière : ils ont une couleur rouge sombre, sont friables et magnétiques.

Le minerai est simplement placé dans le brasier et chauffé pendant quelques heures à une température de quelques centaines de degrés. L'humidité ainsi qu'une bonne partie de l'eau de constitution de certains minéraux (hydroxydes de fer, argiles) s'évaporent. Une partie des oxydes de fer, sous forme de Fe_2O_3 dans les pisolithes, est partiellement réduite en Fe_3O_4 (chap. 4.1.1, tab. 8, p. 50).

Modifications chimiques des pisolithes grillés

Moyenne	Pisolithes lavés	Pisolithes grillés
FeO	0.21%	0.34%
H_2O	11.87%	4.70%

La diminution de volume provoquée par ces réactions de réduction et de déshydratation rend les pisolithes poreux. L'expulsion des gaz développe un réseau de microfractures. La surface de contact entre les gaz réducteurs et le minerai s'en trouve considérablement augmentée et la réaction de réduction devient d'autant plus aisée. Ce sont ces modifications, plus physiques que chimiques, qui rendent le grillage souhaitable dans le cas du Sidérolithique.

La taille des morceaux de charbon de bois utilisés peut être déterminée grâce aux empreintes visibles sur les scories. En général, les empreintes ont plus d'un centimètre de long et les plus grandes dépassent 10cm.

La charge du bas fourneau est donc composée de pisolithes grillés et de charbon en petits morceaux. S'il est certain que le chargement du bas fourneau se fait au fur et à mesure de l'opération de réduction, il n'est pas possible de préciser la méthode de chargement : en lits alternés de charbon et de minerai ou en charges mixtes.

5.2 Les parois

Les parois des bas fourneaux sont constituées d'un manteau externe en pierre et d'un revêtement interne sableux (chap. 4.2, p. 51). Les pierres ne présentent qu'une rubéfaction plus ou moins forte, tandis que le revêtement interne des parois de la cuve du bas fourneau a subi des modifications beaucoup plus importantes. Il est fait de sable dont la cohérence est renforcée par une faible quantité de matériaux

Paroi : principaux composants chimiques				
Moyenne (%)	SiO2	Al2O3	K2O	Fe2O3 total
Parois peu modifiées	81.37	10.10	2.67	3.13
Parois modifiées	78.98	9.58	2.89	6.34

argileux et de quelques éléments plus grossiers. L'analyse chimique d'échantillons faiblement modifiés par la chaleur montre le caractère essentiellement siliceux de ce matériau (fig. 47 et tab. 11). Les gaz de combustion ont circulé à l'intérieur de la paroi, modifiant l'état d'oxydation du fer (FeO › Fe2O3).

Les parties directement en contact avec le feu et la charge du bas fourneau présentent un chimisme légèrement différent (fig. 47). On constate en particulier un net enrichissement en fer.

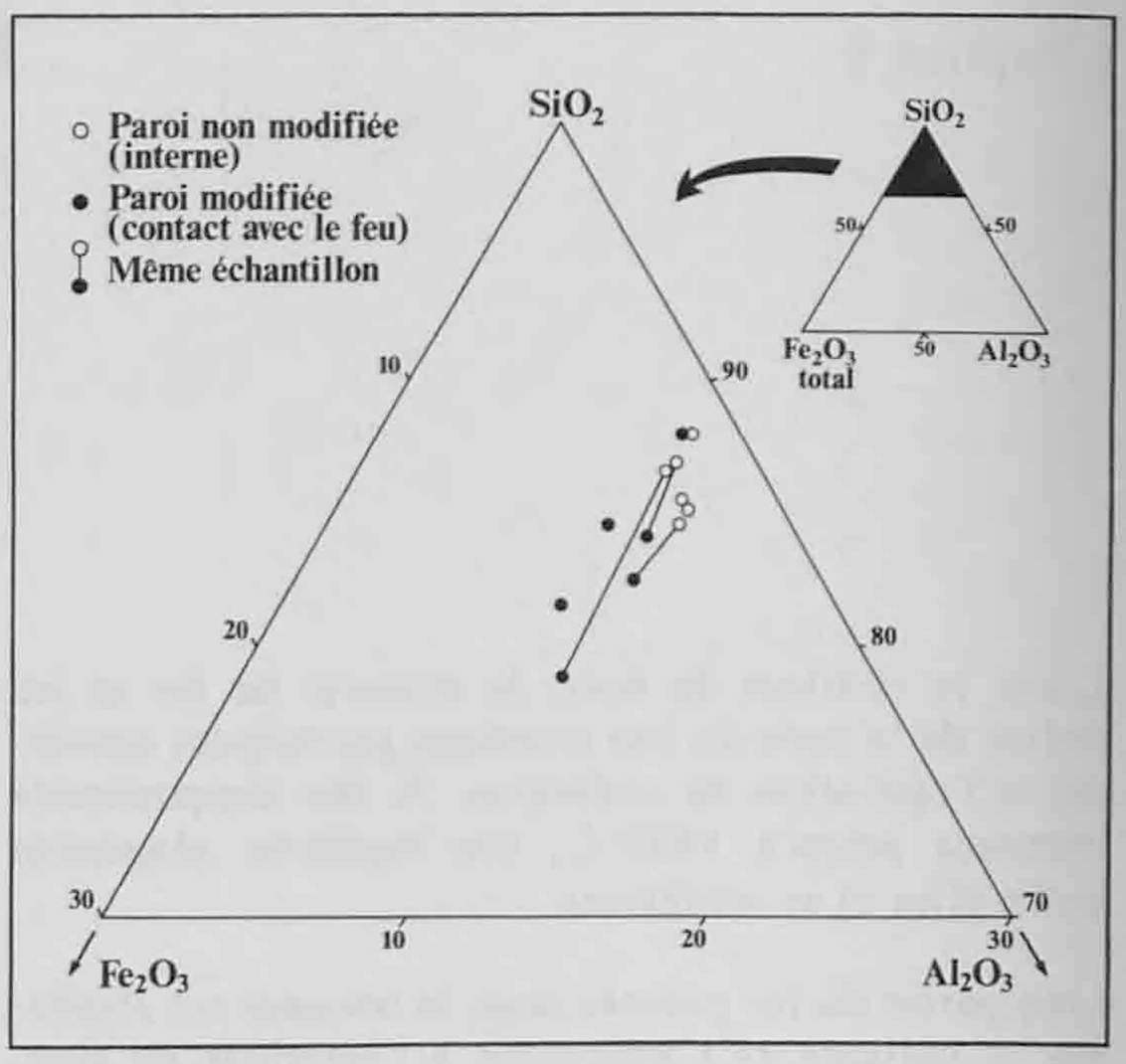


Fig. 47. Composition chimique des parois sableuses. Variation en fonction de l'impact de chaleur.

Echantillon	BOE 701	BOE 702.1	BOE 702.2	BOE 703	BOE 704	BOE 705	BOE 706.1	BOE 706.2	BOE 707.1	BOE 707.2	BOE 708.1	BOE 708.2
Eléments majeurs [% poids]												
SiO2	79.95	77.43	79.46	79.59	78.03	81.27	83.85	82.71	82.69	74.73	82.54	79.89
TiO2	0.41	0.45	0.42	0.46	0.43	0.38	0.40	0.42	0.35	0.40	0.42	0.46
Al2O2	8.78	10.36	10.74	10.96	8.82	10.40	8.99	9.29	9.59	10.17	9.63	10.36
Fe2O3	0.55	1.13	2.27	2.42	1.42	0.20	0.03	0.37	0.17	0.16	0.00	0.38
FeO	4.90	4.36	1.34	0.84	6.59	2.63	2.24	2.03	2.66	8.88	2.53	4.00
MnO	0.06	0.08	0.05	0.04	0.06	0.04	0.05	0.04	0.03	0.08	0.04	0.06
MgO	0.46	0.66	0.70	0.67	0.42	0.57	0.46	0.48	0.52	0.62	0.53	0.63
CaO	0.53	0.53	0.26	0.20	0.35	0.12	0.09	0.07	0.12	0.77	0.09	0.19
Na2O	0.23	0.26	0.26	0.29	0.23	0.38	0.21	0.17	0.24	0.19	0.33	0.26
K2O	3.27	3.20	2.75	2.70	2.46	2.74	2.52	2.45	2.82	3.34	2.55	2.55
P2O5	0.08	0.13	0.08	0.05	0.08	0.05	0.04	0.04	0.04	0.10	0.04	0.06
H2O	0.57	0.78	0.51	0.61	0.27	0.55	0.22	0.65	0.27	0.24	0.53	0.29
CO2	0.20	0.26	0.26	0.30	0.29	0.31	0.20	0.45	0.13	0.31	0.25	0.34
FeM	0.02	0.10	0.13	0.04	0.00	0.37	0.20	0.68	0.04	0.03	0.25	0.10
Total	100.01	99.73	99.23	99.17	99.45	100.01	99.50	99.85	99.67	100.02	99.73	99.57
Eléments traces [ppm]												
Zr	202	195	192	199	194	119	125	132	115	120	132	145
Y	20	20	16	15	27	19	18	17	19	21	18	20
Sr	61	62	57	57	57	46	47	44	46	51	45	48
Rb	133	131	127	125	115	123	114	107	126	124	117	117
Ba	629	433	525	506	459	519	461	468	521	563	461	475
V	130	109	76	75	80	39	30	30	42	128	38	57
Sn	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Sb	<5	5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Ag	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2
As	20	42	29	<8	28	28	46	40	29	23	49	37
Pb	<6	<6	<6	24	<6	<6	<6	14	11	13	<6	<6
Zn	<5	13	29	284	31	16	11	60	20	23	28	12
Cu	18	49	31	14	17	18	<3	<3	8	12	18	23
Ni	16	37	39	44	20	29	24	26	29	33	26	30
Cr	96	118	123	128	76	63	50	54	52	77	59	62
Co	18	40	34	27	51	205	496	470	359	234	514	267

Ech.	Localisation	Description	Remarque
BOE 701	M3, c.2 (site)	masse vitreuse noire, inclusions de sable	contact avec le feu
BOE 702.1	M3, c.2 (site)	sable scorifié gris sombre	contact avec le feu
BOE 702.2	M3, c.2 (site)	sable cuit gris sombre	paroi interne
BOE 703	M3, c.2 (site)	sable cuit rouge-orange	paroi interne
BOE 704	M3, c.2 (site)	scorie + sable cuit gris sombre	contact avec le feu
BOE 705	L4, c.2 (site)	sable cuit gris sombre	paroi interne
BOE 706.1	L9, c.2 (site)	sable cuit gris sombre	contact avec le feu
BOE 706.2	L9, c.2 (site)	sable cuit rouge	paroi interne
BOE 707.1	E4, c.2 (site)	sable cuit gris sombre	paroi interne
BOE 707.2	E4, c.2 (site)	sable scorifié gris clair	contact avec le feu
BOE 708.1	M9, c.2 (site)	sable cuit gris sombre	paroi interne
BOE 708.2	M9, c.2 (site)	sable cuit gris clair	contact avec le feu

Tab. 11. Analyses de parois sableuses.

L'observation macroscopique de coupes perpendiculaires à la paroi permet d'appréhender ces modifications de manière qualitative (fig. 48). Au contact avec le feu, la paroi est complètement fondue et scorifiée. La surface est boursouflée et crevassée, plus rarement brillante, lisse et ondulée. Elle présente des traces complexes de fluage. En coupe, l'épaisseur scorifiée est très variable : de quelques millimètres jusqu'à 5 ou 6cm. La scorification a une teinte sombre. Les grains de quartz, enrobés dans une matrice grise, y sont en proportions variées. La porosité est importante; les bulles sont généralement sphériques, plus rarement allongées parallèlement à la paroi. Des particules de fer métallique, souvent globulaires, de diamètre inférieur au millimètre, sont visibles dans cette zone de contact entre la paroi et la charge du fourneau. Une zone fondue à porosité sphérique, mais de couleur claire fait transition entre la scorification et la paroi interne où il n'y a plus trace de fusion. Cette zone de transition n'est pas présente dans tous les échantillons.

La paroi interne est gris clair sur une épaisseur de plusieurs centimètres avant de passer à des teintes rouges ou orangées. Les parties grises présentent souvent encore une certaine cohérence, alors que les matériaux orangés s'effritent immédiatement.

De nombreux fragments montrent plusieurs croûtes scorifiées successives. Ils attestent des opérations de rechapage de la cuve du bas fourneau.

C'est à proximité immédiate de la tuyère latérale que la fusion de la paroi est la plus manifeste. En s'éloignant de l'arrivée d'air, les traces de scorification de la paroi se font moins intenses (chap. 4.2, p. 51).

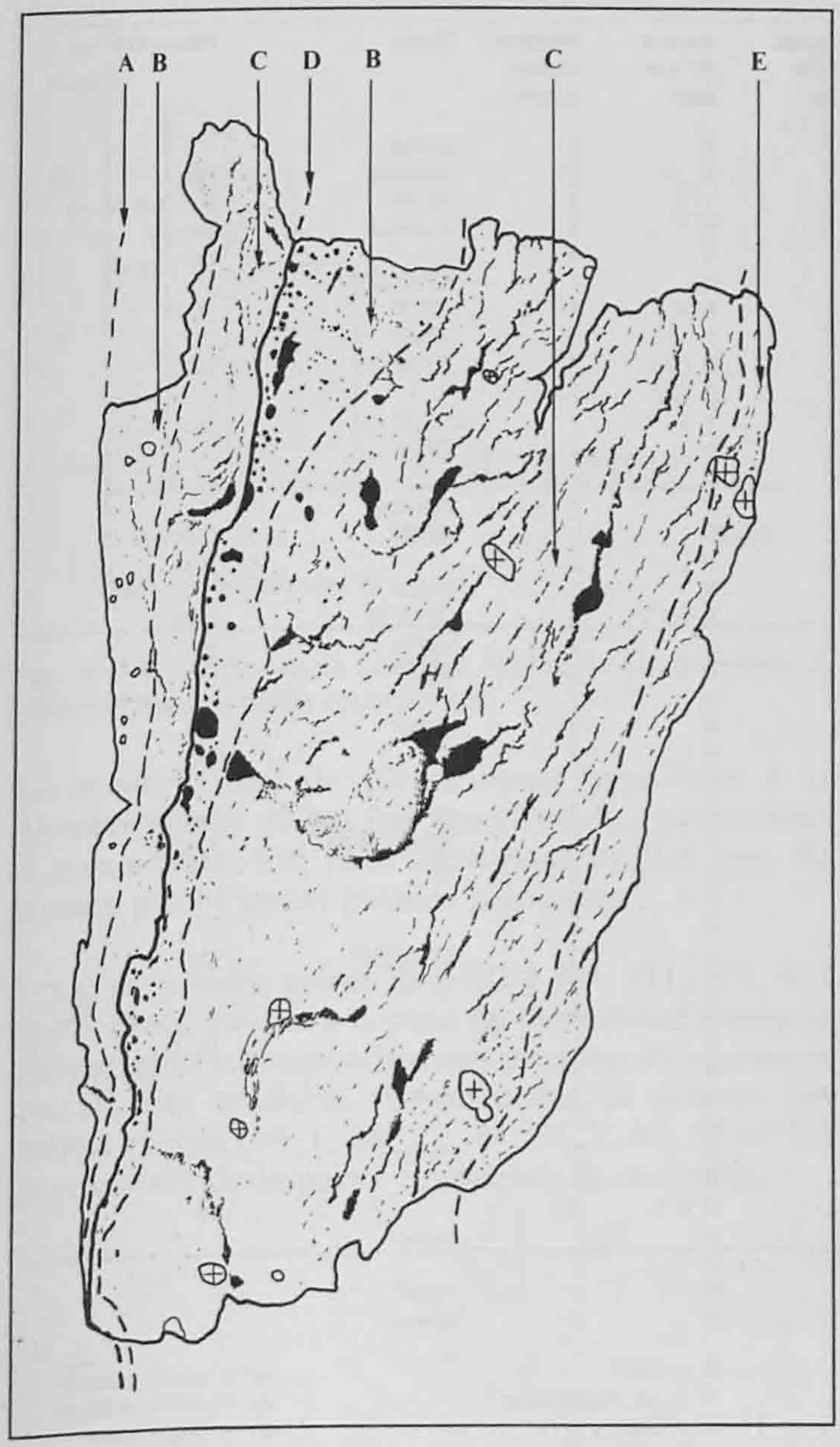


Fig. 48. Paroi sableuse n° 702. Coupe. Echelle 1:1 (A : surface scorifiée 1; B : zone fondue; C : zone cuite grise; D : surface scorifiée 2; E : zone cuite rouge).

5.3 Les produits

L'éponge de fer, c'est-à-dire la masse de fer accumulée à l'intérieur du bas fourneau lors de l'opération de réduction, est très mal connue. Les fouilles d'ateliers de réduction ne livrent généralement que de petites pièces riches en métal qui ne sont, au mieux, que des morceaux d'éponge et au pire, des rebuts. Les résultats expérimentaux restent très difficiles à interpréter (Pleiner 1969, Andrieux 1990).

Dans le meilleur des cas, on obtient un bloc composite et hétérogène. Il est constitué d'une masse de fer assez compacte, entourée de zones où la texture est beaucoup plus vacuolaire et où le fer est plus diffus. Or, l'éponge contient, encore et toujours, une grande proportion de scorie, quelques charbons et montre une importante porosité.

Aux Boulies, un bloc fracturé de forme irrégulière (10 x 9 x 4cm), riche en fer et très dense (780gr), a été découvert en L7. Il ne porte aucune trace de martelage. Quelques autres pièces plus petites pourraient également être des fragments d'éponge. Une étude métallographique apportera sans doute des informations complémentaires.

5.4 Les scories coulées

5.4.1 Description générale

Généralement, il s'agit de fragments de petites dimensions (quelques centimètres d'arête) présentant une surface inférieure lisse et faiblement ondulée, qui porte en creux les empreintes des matériaux sur lesquels le liquide s'est écoulé (charbons de bois, sable, cailloux). La surface supérieure est bombée en raison des forces de tensions superficielles. Elle peut être lisse ou ridée, ce qui exprime la déformation, par le fluage, d'un matériel en cours de solidification. Ces reliefs dessinent alors des figures en arc de cercle plus ou moins complexes, allant jusqu'à des bourrelets en forme de croissant ("vaguelettes") qui soulignent les ruptures de pente et rappellent par bien des points la morphologie des laves volcaniques.

Fréquemment, on observe sur un même fragment la superposition de plusieurs écoulements indépendants, plus ou moins soudés les uns aux autres.

Les morceaux de petite taille sont en général peu parlants et difficiles à interpréter. Malheureusement, l'importante fragmentation de ces objets est inhérente à leur nature. Le refroidissement extrêmement rapide, conjugué avec l'expulsion des gaz dissous dans le liquide, est à l'origine de cette très grande fragilité. La découverte d'ensembles dont les fragments étaient en connexion sur le terrain, leur prélèvement intégral et un long travail de reconstitution permettent de tirer de nombreux enseignements sur leur formation.

Ces vestiges sont interprétés comme le résultat de la dernière opération de réduction pratiquée dans chacun des fourneaux. Ils constituent un témoignage exceptionnel pour comprendre le déroulement de ce processus.

5.4.2 La dernière coulée de scorie du bas fourneau 2

Un premier ensemble provient de la cuvette située devant l'ouverture du bas fourneau 2 (chap. 6.1.3, p. 88). Il a été retrouvé en place dans la cuvette, à l'endroit même où les scories se sont solidifiées. Des fragments provenant de toute l'épaisseur du niveau peuvent faire partie d'une même pièce de scorie, comme l'indiquent les remontages effectués; mais l'ensemble n'a sans doute été perturbé que par les artisans eux-mêmes. Ces scories sont interprétées

N° objet	% conservé	Poids cons. gr	Extrémité sup.	Extrémité inf.	Longueur cm	Largeur cm	Epaisseur cm	Aspect de surface	Nombre écoulements	Pente	Pièces collées
401	90	400	X		15	11	5	R	2	bulbe	
402	70	1070		X	44	8	4	R (L)	3	convexe	1m
403	90	735	X	X	45	7	2	V L	1	18°/0°	3sc, 3sr, 1c, 1a
404	70	1170		X	47	14	3	R V L	4	convexe	3sr, 1a
405	50	600			33	5	2	V	2		1sr
406	95	565	X	X	30	7	1	R	1	45°/0°/15°	
407	80	870	X		37	11	4	R V L	4	25°/0°	
408	80	600	X		31	9	5	R V	1	30°/0°	
409	60	420	X	X	25	6	1	R (V)	3	30°/0°/20°	1sc
410		450		X	27	7	3	R (L)	2		
411	90	820	X	X	49	7	3	V L	1	30°/0°	2sc
412	80	920		X	53	5	3	V L	4	20°/0°	
413	90	540	X	X	25	8	4	R	1		
414	90	700	X	X	52	7	2	V L	3	convexe	
415	70	455	X	X	27	8	2	R	2	40°/0°	filament
417		275			14	9	4	R L	3		1c
418	80	200	X	X	9	7	5	R	1	bulbe	
419		295			37	2	1	R L (V)	2	0°/15°/0°	sable
420	90	280	X	X	14	7	5	R	2	bulbe	1sc
421		230	X		8	7	3	R V	2	60°/0°	
422		455		X	13	11	3	R	2		1sc, 1sr
423	90	590	X	X	20	8	5	R	2	35°/0°	1sc
424	90	220	X	X	16	8	2	R L	2		1sc
425		340		X	18	7	1	V	1		
426	80	360	X	X	20	8	4	R	3	60°/0°	1sc, 1sr
427	100	490	X	X	42	7	2	R L V	3	35°/10°/0°/10°	1sc, 1c
428		100		X	21	2	1	L	1		
429		170			18	4	1	V L	2		
430	100	65	X	X	12	3	1	R	1		
431	50	300		X	25	4	2	V L	3	45°/0°/30°	1c
432		210	X		12	6	3	R L	2	35°/0°	
433		105		X	5	6	5	R V	2		
434		130		X	11	6	2	R	1		1c, 1a
435		125		X	11	4	3	R	1		
438		135		X	10	6	5	R	1	bulbe	
440	100	105	X	X	11	6	1	R	1		
441	100	165	X	X	9	8	5	R	2	bulbe	
442		275	X	X	12	10	4	R	1		
443		335			23	5	2	R V L	3		1c
445	95	85	X	X	13	3	3	R	1	bulbe	
446		90		X	12	4	2	L	3		
450	100	110	X	X	10	5	2	R	1	bulbe	
451		305		X	12	12	5	R	1	bulbe	
Total 43		16860	24	33							
Autres		13040									
Total		29900									

R = ridé
V = en vaguelettes
L = lisse

sc = scorie coulée
sr = scorie rouillée
a = argile cuite
m = minerai
c = caillou

Tab. 12. Les scories de la dernière coulée du bas fourneau 2.

comme le résultat de la dernière opération de réduction pratiquée dans le bas fourneau 2.

En tout, 29.9kg de scories coulées ont été récupérés en place dans la cuvette (fig. 49 et tab. 12). Seuls quelques fragments semblent sans rapport avec l'ensemble. Le travail de restauration a permis de reconstituer plus ou moins complètement 43 pièces distinctes qui se sont écoulées et refroidies séparément : leur poids total est de 16.9kg. Bien qu'incomplètes, elles représentent 55% du poids total des scories récoltées. On peut estimer que ces pièces complètes pèseraient au minimum 22kg, soit près de 75%. Les plus grosses font plus d'un kilo, mais elles sont peu nombreuses. La répartition des poids estimés des pièces connues montre que la plupart des coulures se situent entre 200 et 600gr (fig. 50).

Fig. 49. Bas fourneau 2. Une partie de la dernière coulée de scories en place.

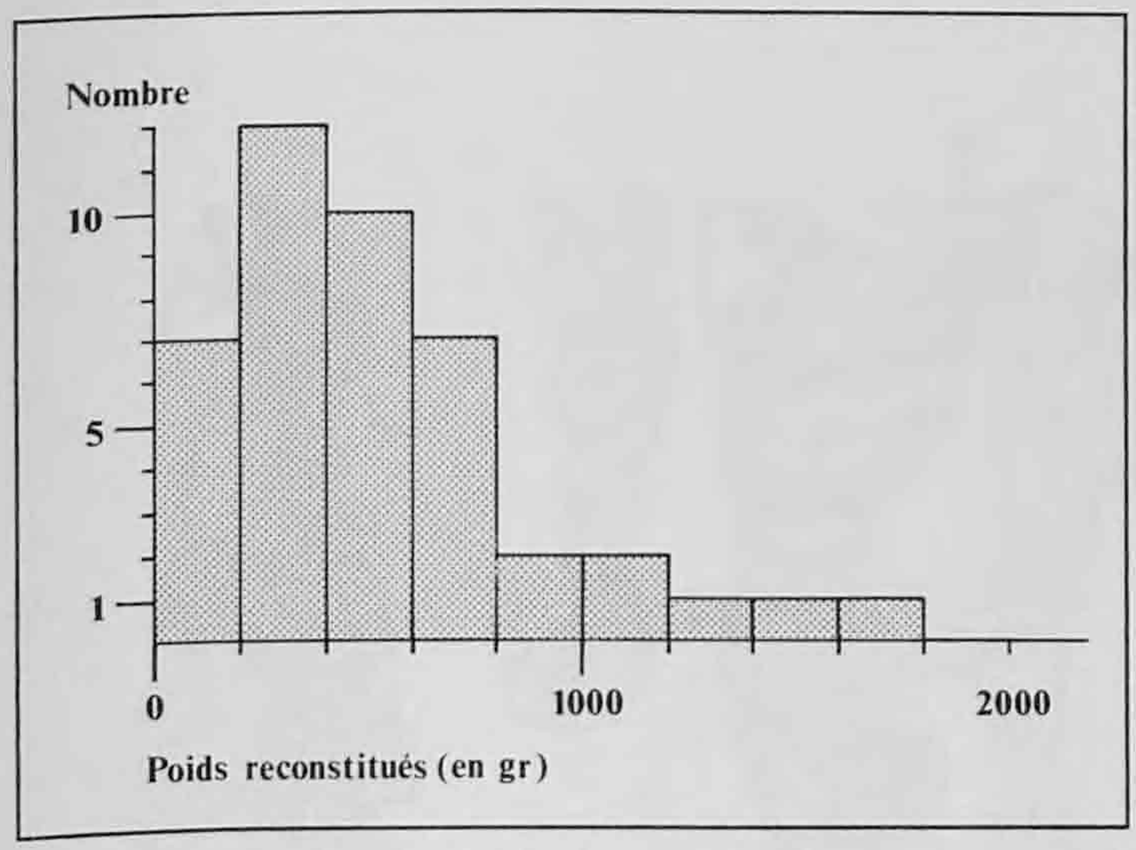


Fig. 50. Les scories de la dernière coulée du bas fourneau 2. Distribution des poids reconstitués.

Le nombre total de pièces ayant appartenu à la dernière coulée du bas fourneau 2 ne doit pas excéder la soixantaine. On peut également exclure que de grosses pièces soient passées inaperçues.

Les plus grandes pièces (n° 402 à 404, 411, 412, 414 et 427) sont situées à la base de l'ensemble stratigraphique; elles correspondent aux premiers écoulements qui se sont produits. En revanche, la plupart des petites pièces (n° 1, 18, 22, 24, 35 ?, 40, 50 et 51) proviennent de la partie supérieure de la coulée.

Les formes sont extrêmement variées mais l'on peut distinguer deux grandes familles. Les unes sont allongées de manière grossièrement parallèle à l'écoulement; étroites à l'amont, elles ont tendance à s'élargir et à se ramifier vers l'aval. Le profil indique souvent un écoulement le long d'une pente marquée (20 à 45°). Le diamètre des écoulements est de 2cm ("boudin") à 5cm ("tuyau"). Les principaux exemples sont les numéros 402 à 405, 408, 411, 412, 414, 427. Les autres sont ramassées sur elles-mêmes ("bulbe") ou légèrement allongées. Ce sont les pièces 401, 418, 420, 432, 441 et 451. Enfin, plusieurs pièces sont composées d'un bulbe à l'amont, prolongé par un ou plusieurs écoulements linéaires généralement assez courts et aplatis (n° 406, 407, 409 et 415).

Si l'on considère l'ensemble des pièces, l'aspect de la surface supérieure est très variable. La seule constante que l'on observe est l'expression du flux. Les surfaces lisses et régulières sont relativement rares : environ 10% du total. La morphologie "en vaguelettes" représente environ 30% des surfaces et l'aspect ridé domine avec 60%.

En revanche, sur les pièces complètes prises individuellement, on constate que les morphologies les plus contrastées peuvent être associées les unes aux autres et cela dans n'importe quelle proportion (dépliant n° 2). On ne peut donc dégager aucune règle, seulement des tendances générales.

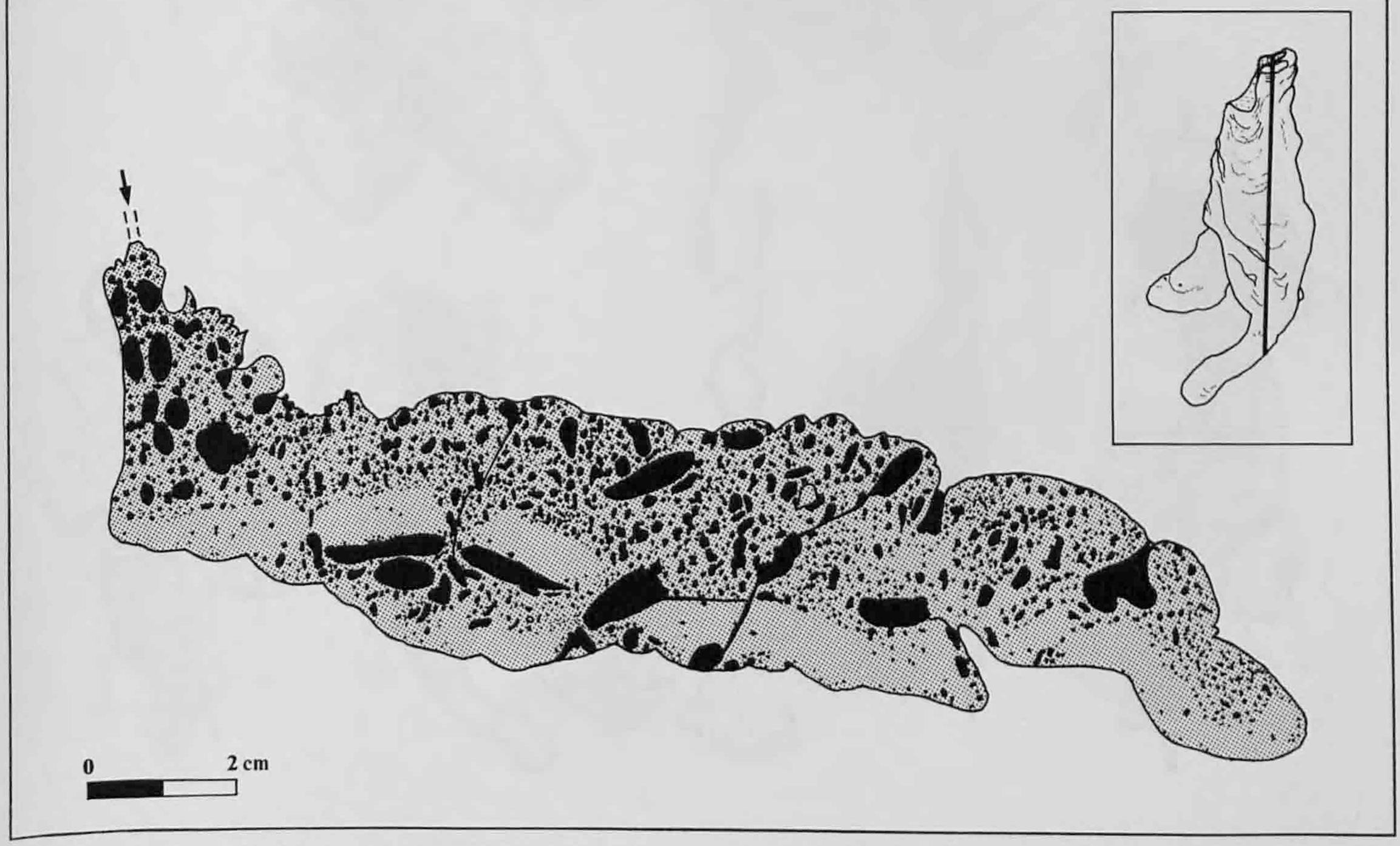


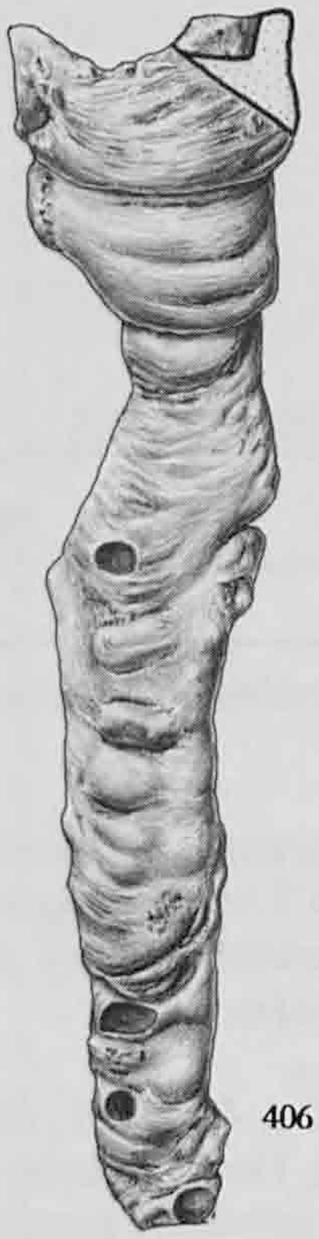
Fig. 51. Coulure n° 426. Coupe (flèche : alimentation de la coulure; surface tramée : matrice grise fayalitique; surface noire : porosité).

Planche 4

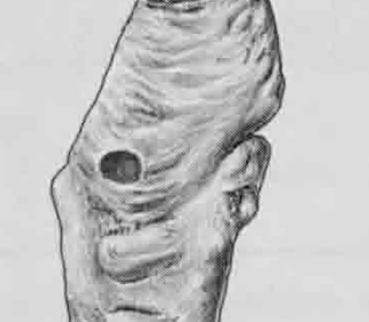
403

415

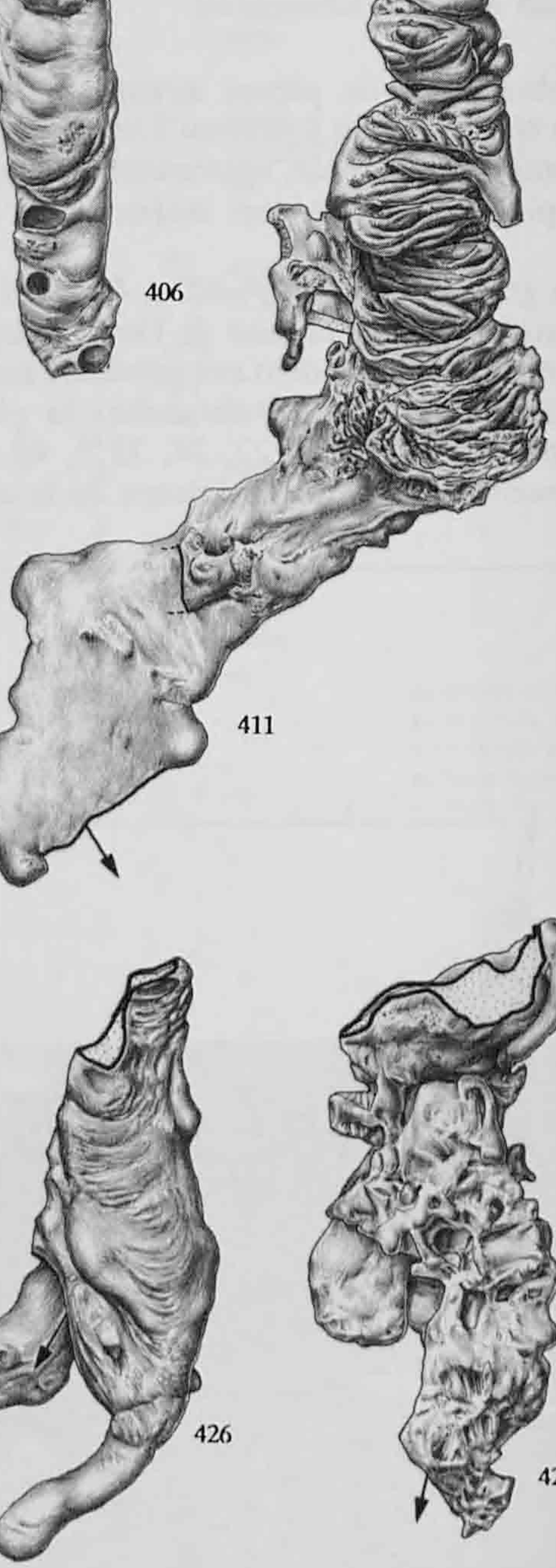
446

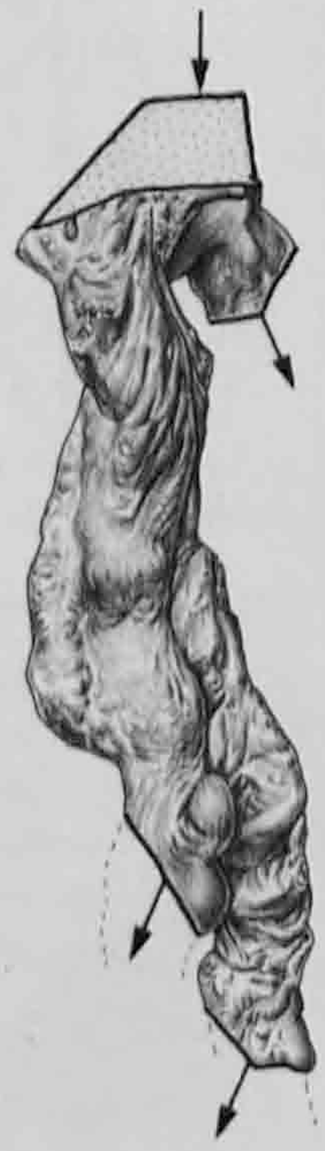


406



411

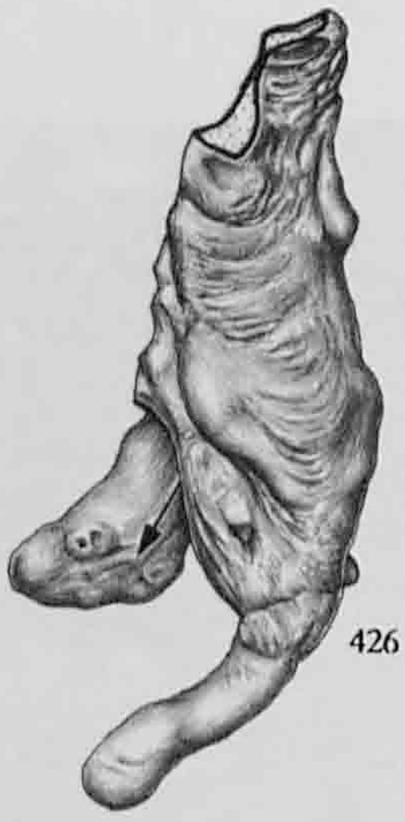




443

429

428



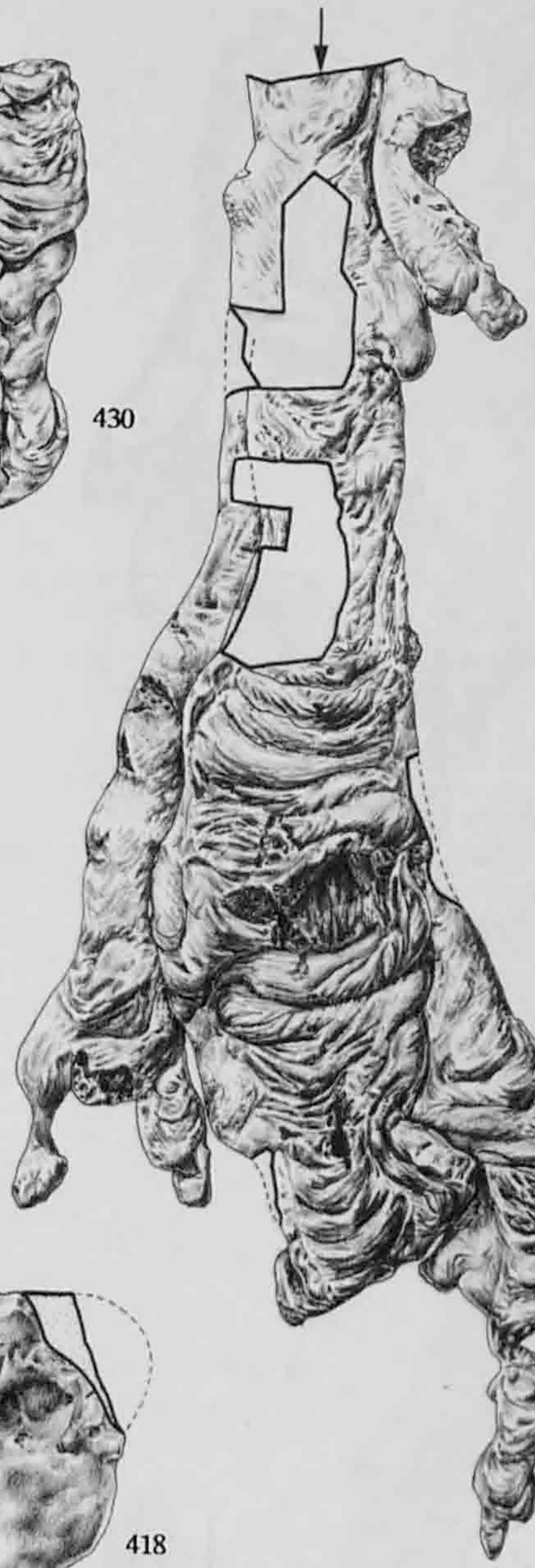
426

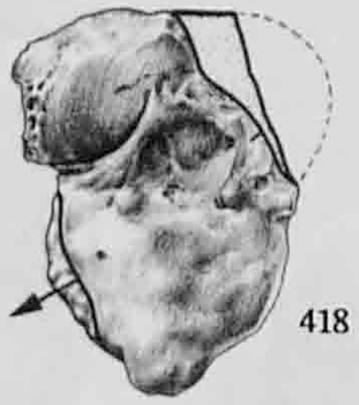
423

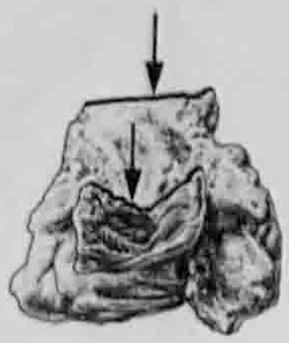
Scories de la dernière coulée du bas fourneau 2

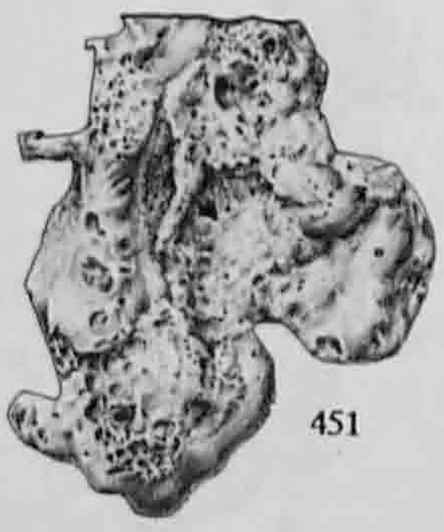
Echelle 1:3

Planche 5





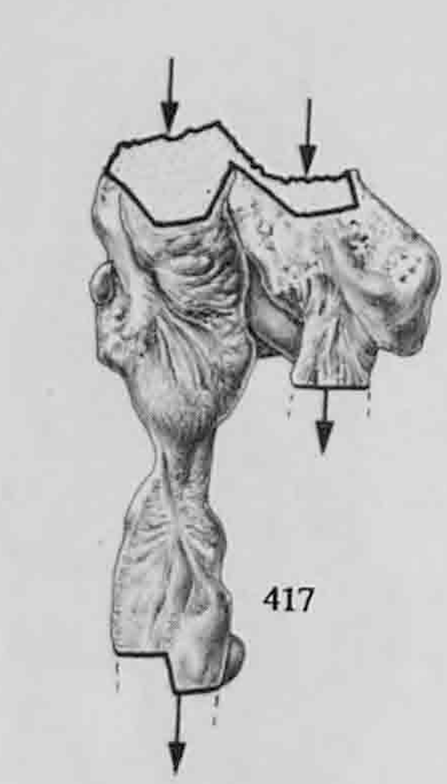




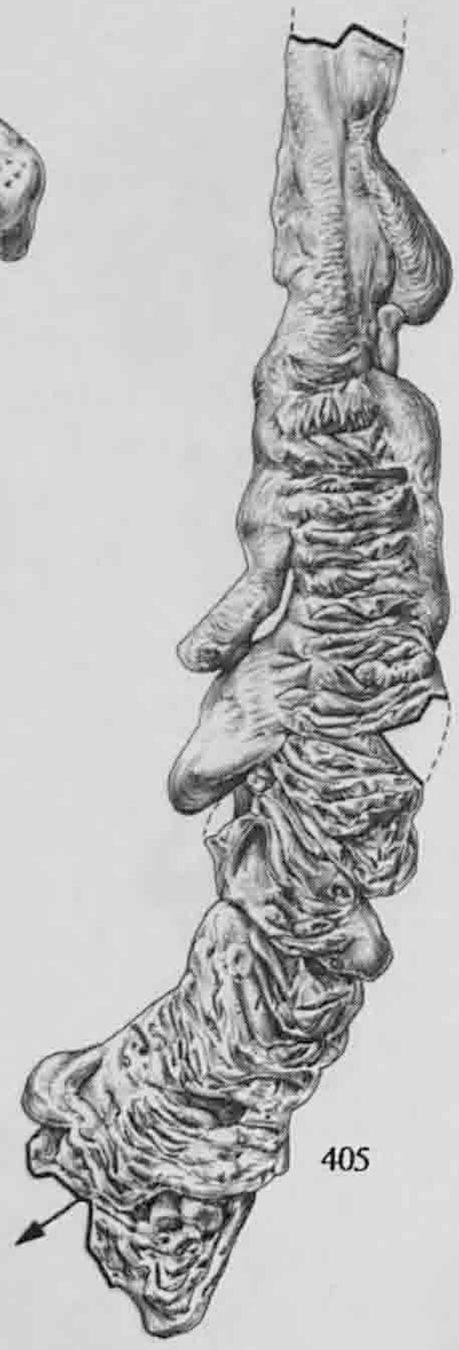
Scories de la dernière coulée du bas fourneau 2

Echelle 1:3

Planche 6



417

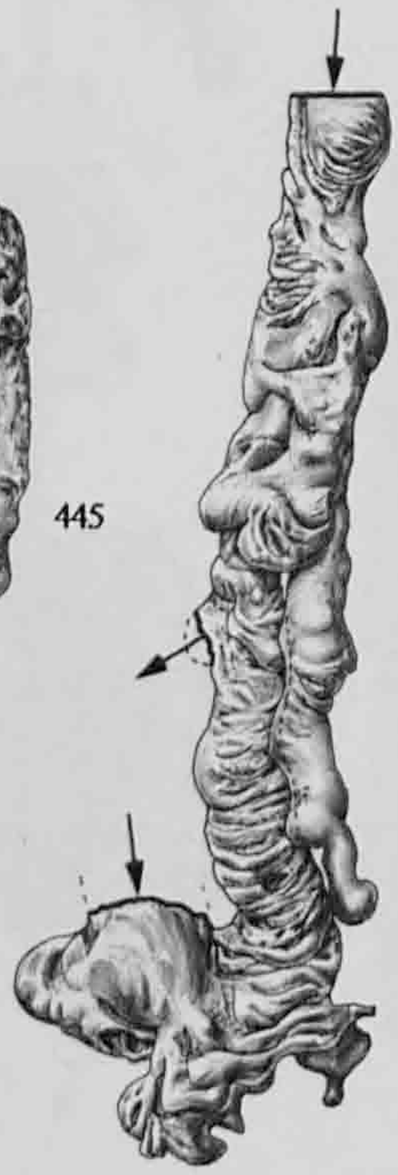


405

407

427

445



431

410

413

409

Scories de la dernière coulée du bas fourneau 2

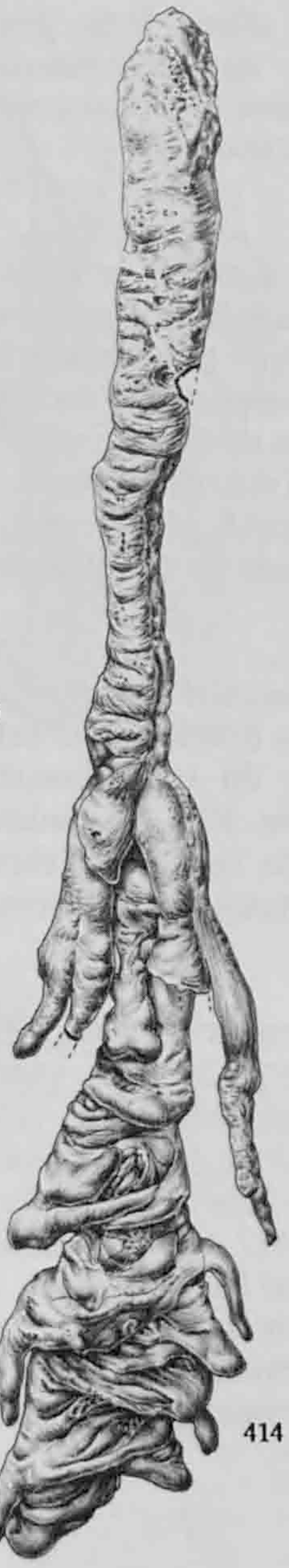
Echelle 1:3

408

435

412

425



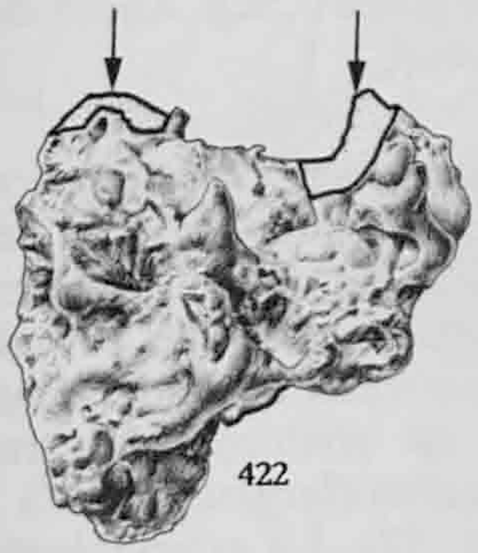
414

421

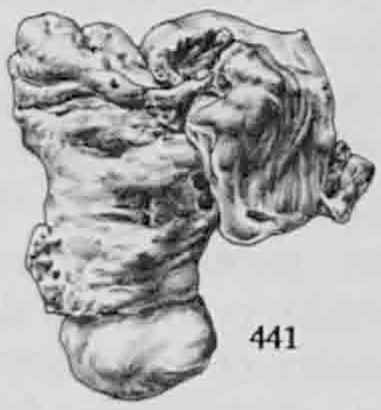
438

442

401



422



441

Scories de la dernière coulée du bas fourneau 2

Echelle 1:3

Les bulbes ont généralement des surfaces ridées ressemblant à un tissu froissé. Les vaguelettes sont le signe d'une forte pente ou bien d'une rupture de pente dans l'écoulement. La morphologie lisse se retrouve le plus souvent aux extrémités distales (aval) des coulures.

Il n'y a pas de relation entre l'aspect de la surface supérieure et la composition chimique qui est à peu près la même pour toutes les scories (chap. 5.4.4, p. 80). La morphologie de la surface reflète plutôt la température du liquide qui s'écoule : lisse à haute température (viscosité faible), ridée à plus basse température (viscosité plus forte). La formation de vaguelettes suppose un écoulement à caractère plus turbulent.

La porosité est généralement très abondante (supérieure à 50%). Elle est l'expression de l'expulsion, au cours du refroidissement, des gaz dissous dans le liquide. Elle est d'autant plus abondante que la viscosité du liquide est élevée. Les scories à surface lisse sont toujours les moins poreuses.

L'écoulement des pièces se fait souvent avec une pente assez forte, supérieure à celle de la cuvette du bas fourneau. Les pièces 403, 411 et 431 prennent naissance à une vingtaine de centimètres au-dessus de la surface sur laquelle elles s'écoulent. Les coulures 426, 427 et 415 ont clairement été alimentées verticalement (pl. 4 et pl. 6). La plupart des bulbes semblent également dans ce cas. Il n'y a pas accumulation de la scorie liquide au fond du bas fourneau, mais bien écoulement depuis un point situé à 20 ou 30cm plus haut.

Plusieurs coulures portent, soudées à elles, de petits fragments de nature variée : cailloux, morceaux d'argile cuite, pisolithes partiellement réduits, fragments de scorie. Par exemple, un petit morceau de coulure est tombé sur la pièce 403 en train de se solidifier, creusant un petit cratère (dépliant n° 2). La pièce 423 est un bulbe partiellement écoulé qui supporte une pièce de scorie non coulée portant clairement des empreintes de charbon de bois.

Au cours de la dernière opération de réduction pratiquée dans le bas fourneau 2, on a évacué progressivement hors de la cuve les 30kg de liquide résultant de la fusion du minerai, en quantité de 0.5 à 1kg à la fois. Les premiers écoulements sont les plus importants en volume et le liquide pourrait être un peu plus chaud. A la fin de l'opération, les écoulements sont plus petits et plus visqueux. Il semble que c'est un processus actif pendant lequel l'ouvrier doit aider la scorie à s'écouler.

5.4.3 La dernière coulée de scorie du bas fourneau 1

L'ensemble trouvé devant le bas fourneau 1 comporte bien des points communs avec la dernière coulée du bas fourneau 2 (fig. 54). Il est donc interprété de la même manière, même s'il est nettement moins cohérent (chap. 6.1.2, p. 87). Les perturbations postérieures à la mise en place sont en effet beaucoup plus importantes. Le remontage s'est avéré infructueux. Il n'a pas été possible de reconstituer des pièces entières ni d'isoler l'ensemble des fragments qui appartiennent en propre à la coulée.

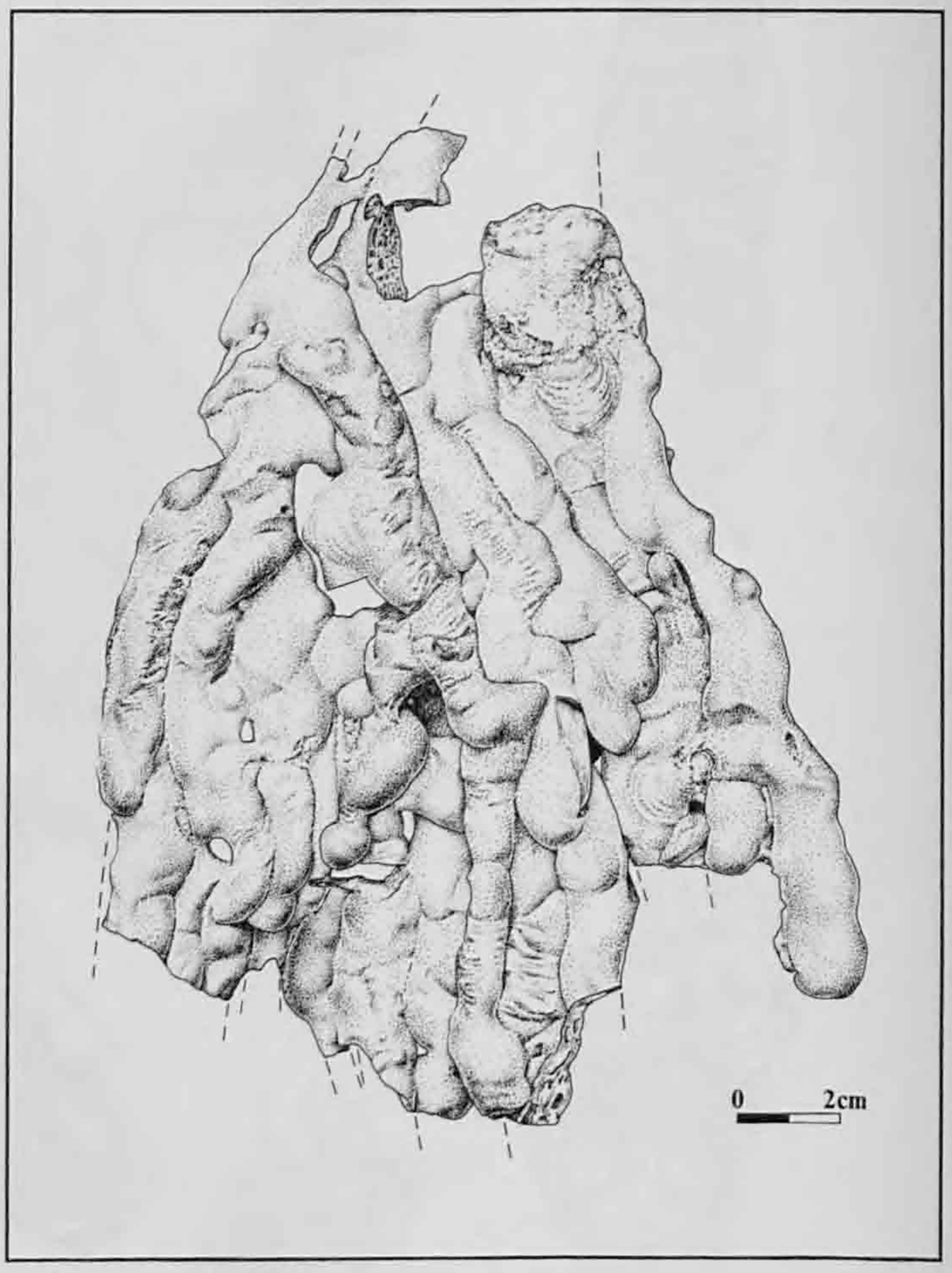


Fig. 52. Coulure n° 291. Face supérieure.

Cette coulée est, elle aussi, composée de coulures individuelles successives, mais les plus gros fragments reconstitués ne dépassent guère 0.5kg. Aucun dénombrement n'est donc possible.

Les formes des coulures et l'aspect de surface sont plus difficiles à appréhender compte tenu de l'état de conservation du matériel. En plus de pièces très similaires à celles de la dernière coulée du bas fourneau 2, on trouve de nombreux fragments lourds et peu poreux provenant de coulures en forme de boudin ou d'amas de boudins (largeur jusqu'à 15cm) soudés et entrelacés (fig. 52). La morphologie lisse est beaucoup plus fréquente. Apparemment, c'est elle qui domine l'ensemble. Par rapport à la coulée du bas fourneau 2, c'est une différence très nette.

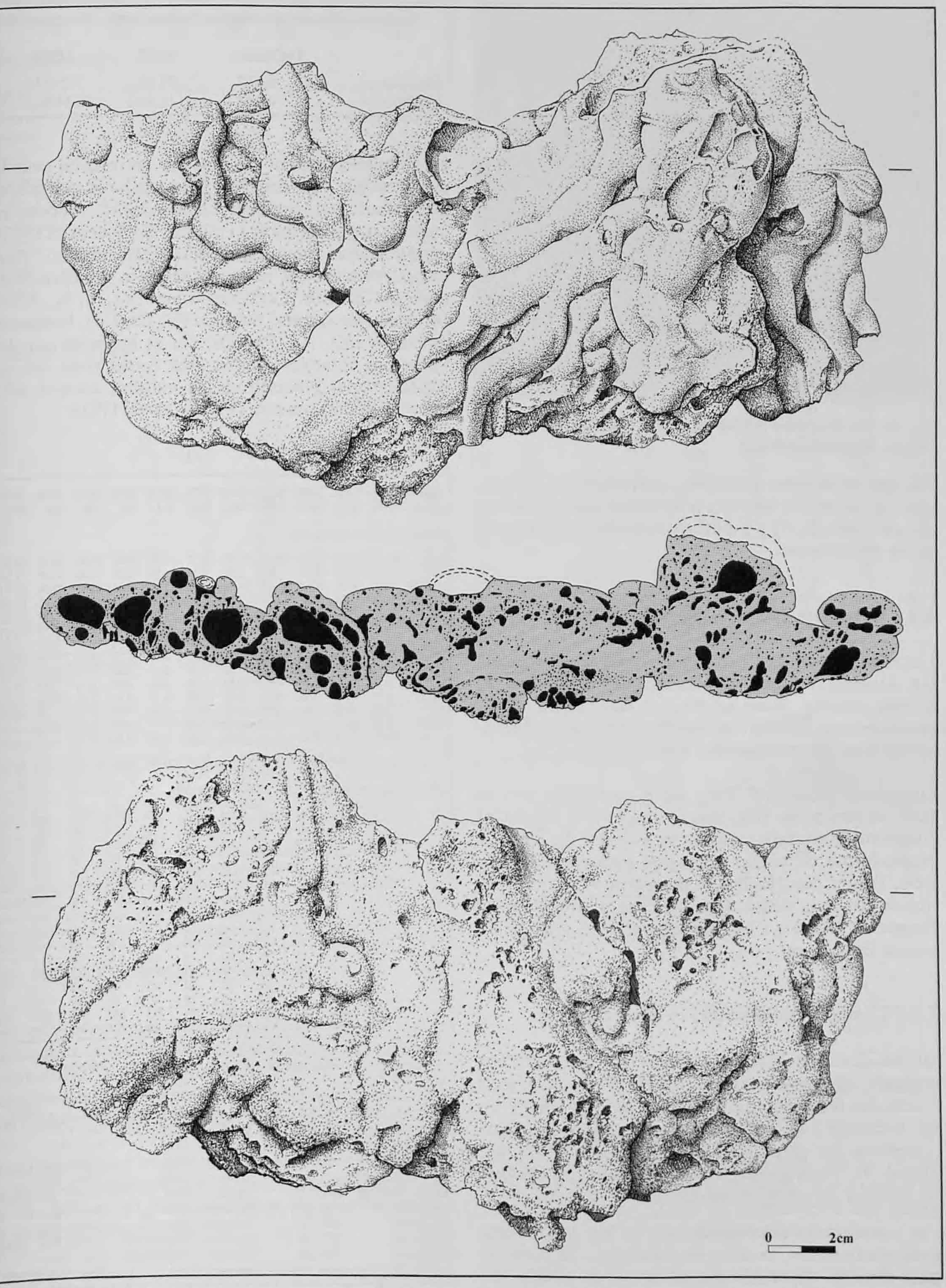


Fig. 53. Gros bloc de scorie coulée n° 250. Face supérieure, coupe et face inférieure (structure concentrique, en blanc dans la coupe : pisolithe).

Fig. 54. Bas fourneau 1. Une partie de la dernière coulée de scories en stratigraphie.

De très nombreux pisolithes, partiellement réduits, sont collés sur les surfaces inférieures ou supérieures de ces coulures. Il y a plusieurs dizaines d'exemples de ce phénomène.

5.4.4 Les autres scories coulées

Les zones de rejets à la périphérie des bas fourneaux ont également fourni d'innombrables fragments de scories coulées. Dans la plupart des cas et à tous points de vue, ils sont comparables aux pièces découvertes dans les cuvettes des fourneaux.

Une seule pièce (n° 250) attire l'attention par sa taille et son poids (fig. 53). Il s'agit d'un important fragment de coulure en amas de boudins de 22cm de large, formé de scorie assez peu poreuse à surface lisse. Pesant plus de 2kg, il fait partie d'une coulure qui devait sans doute dépasser 5kg. Parmi tous les fragments étudiés, c'est pratiquement le seul qui se trouve dans ce cas.

5.4.5 Composition chimique et minéralogique

Sur les 22 échantillons de scories coulées qui ont été analysés, 15 proviennent de différents points du site; 5 sont des fragments isolés de la dernière coulée du bas fourneau 2 et les deux derniers sont des coulures complètes de cette même coulée (tab. 13 et 14; annexe 3). Trois prélèvements différents ont été faits sur chacun de ces deux échantillons.

Les constituants principaux sont le fer à différents états d'oxydation, la silice et l'alumine. Ils forment plus de 95% du total. Seule la chaux atteint des teneurs supérieures à 1%; les autres éléments sont très peu abondants (fig. 55).

Scories coulées : principaux composants chimiques			
	FeOtotal	**SiO2**	**Al203**
Maximum	64.63	31.78	23.94
Minimum	40.47	16.00	14.03

Le chimisme ne peut pas être mis en relation avec la morphologie des surfaces. Les coulures complètes présentent une certaine hétérogénéité : pour les constituants principaux (FeO tot, SiO2 et Al2O3), la variation peut atteindre 5% relatif (1% absolu). Pour les autres éléments majeurs, seule la dernière décimale est affectée. Certaines traces (Zr, Y, Sr, Rb et Ba) sont très stables, d'autres (V, Cr, Co), beaucoup moins. Na2O, As, Pb, Zn, Cu et Ni montrent des variations relatives parfois très fortes mais qui ne dépassent pas l'incertitude de mesure, compte tenu des très faibles teneurs (Pfeifer et al. 1991).

Echantillon	BOE 403.1	BOE 403.2	BOE 403.3	BOE 426.1	BOE 426.2	BOE 426.3	BOE 461	BOE 462	BOE 463	BOE 464	BOE 465
Eléments majeurs [% poids]											
SiO2	20.12	19.04	19.05	30.18	31.78	30.92	26.02	30.18	31.28	30.12	28.38
TiO2	1.01	0.99	0.99	1.21	1.28	1.24	1.19	1.27	1.25	1.13	1.10
Al2O3	18.31	19.35	19.50	21.48	20.51	21.03	22.36	23.86	21.41	20.24	20.11
Fe2O3	23.28	21.28	26.73	14.22	12.37	14.61	17.73	12.39	10.89	13.02	15.07
FeO	26.78	30.11	22.41	24.23	26.55	24.83	24.64	24.11	27.83	27.74	27.33
MnO	0.12	0.12	0.13	0.14	0.14	0.14	0.24	0.17	0.14	0.15	0.13
MgO	0.38	0.42	0.40	0.29	0.30	0.30	0.28	0.32	0.30	0.37	0.25
CaO	1.72	1.75	1.76	1.19	1.21	1.19	0.98	1.75	1.27	1.53	0.92
Na2O	0.10	0.12	0.07	0.34	0.08	0.06	0.05	0.00	0.17	0.07	0.06
K2O	0.39	0.41	0.40	0.53	0.54	0.52	0.66	0.69	0.57	0.60	0.45
P2O5	0.38	0.38	0.37	0.24	0.27	0.25	0.19	0.16	0.24	0.26	0.28
H2O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO2	0.49	0.19	0.17	0.67	0.48	0.19	0.11	0.48	0.46	0.21	0.18
FeM	6.07	5.09	7.41	5.01	4.31	4.15	5.34	4.25	3.70	4.08	5.32
Total	99.15	99.25	99.39	99.73	99.82	99.43	99.79	99.63	99.51	99.52	99.58
Eléments traces [ppm]											
Zr	250	246	244	292	313	301	285	303	305	293	269
Y	44	44	44	49	50	49	79	67	48	52	50
Sr	36	37	36	40	41	39	36	47	42	48	37
Rb	11	10	11	17	17	17	16	15	18	19	14
Ba	135	132	129	128	128	128	148	189	130	165	103
V	1246	1428	1420	1241	930	1080	1181	1312	1145	1114	1199
Sn	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Sb	<5	9	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Ag	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2
As	16	31	28	28	26	24	12	9	16	<8	26
Pb	22	19	15	6	11	9	<6	<6	6	11	9
Zn	56	59	59	51	44	47	86	32	45	52	67
Cu	21	34	27	26	21	22	<3	10	10	19	32
Ni	39	44	44	26	15	18	17	13	18	23	27
Cr	303	391	399	330	213	271	317	344	314	325	321
Co	48	47	54	210	159	135	34	57	108	85	81

Echantillon	Localisation	Forme	Aspect de surface	Minéraux
BOE 403.1 sup	N4, c.6	boudin	vaguelettes	Fay, Her, (Qz)
BOE 403.2 mil	N4, c.6	boudin	vaguelettes	Fay, Her
BOE 403.3 inf	N4, c.6	plaque	lisse	Fay, Her
BOE 426.1 inf	N4, c.6	tuyau	ridé	(Fay), Her
BOE 426.2 mil	N4, c.6	tuyau	ridé	(Fay), Her
BOE 426.3 sup	N4, c.6	tuyau	ridé	(Fay), Her, (Qz)
BOE 461	N4, c.6	boudins	lisse	Fay, Her
BOE 462	N4, c.6	boudins	lisse	(Fay), Her
BOE 463	N4, c.6	boudin	vaguelettes	(Fay), Her, (Qz)
BOE 464	N4, c.6	boudin	vaguelettes	Fay, Her
BOE 465	N4, c.6	tuyau	ridé	Fay, Her, (Qz)

Tab. 13. Analyses de scories de la dernière coulée du bas fourneau 2.

Echantillon	BOE 201	BOE 202	BOE 203	BOE 204	BOE 205	BOE 206	BOE 207	BOE 208	BOE 209	BOE 210	BOE 211	BOE 212	BOE 213	BOE 214	BOE 250
Eléments majeurs [% poids]															
SiO2	26.66	25.05	19.99	29.28	26.93	28.10	26.82	18.89	16.00	28.80	29.16	23.29	25.45	26.68	23.61
TiO2	0.97	1.05	0.75	1.27	0.98	1.04	1.10	0.74	0.77	1.04	1.14	0.97	1.21	1.07	1.03
Al2O3	23.94	22.17	14.63	23.83	20.75	22.30	20.86	17.20	14.03	18.78	22.12	20.05	23.08	20.94	20.57
Fe2O3	16.06	21.67	24.40	15.05	12.97	18.19	13.90	24.51	20.26	12.31	14.98	22.99	16.10	12.11	16.99
FeO	25.16	19.78	29.38	22.74	31.35	25.03	30.41	31.86	43.37	33.20	26.98	28.14	27.77	32.26	29.74
MnO	0.23	0.18	0.18	0.22	0.18	0.22	0.24	0.08	0.14	0.18	0.26	0.17	0.14	0.19	0.23
MgO	0.43	0.27	0.41	0.44	0.28	0.31	0.53	0.16	0.40	0.51	0.52	0.35	0.26	0.31	0.27
CaO	1.78	2.17	3.34	2.37	1.91	0.87	2.29	0.80	1.44	1.92	2.40	0.88	1.02	1.89	1.49
Na2O	0.04	0.00	0.02	0.02	0.04	0.02	0.04	0.00	0.00	0.02	0.03	0.07	0.00	0.02	0.13
K2O	0.75	0.61	0.67	0.86	0.73	0.69	0.75	0.24	0.52	0.98	0.95	0.73	0.70	0.71	0.60
P2O5	0.21	0.22	0.44	0.19	0.29	0.19	0.25	0.34	0.44	0.42	0.19	0.24	0.14	0.30	0.23
H2O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO2	0.41	0.20	0.26	0.28	0.17	0.18	0.33	0.22	0.21	0.23	0.50	0.20	0.20	0.22	0.31
FeM	3.49	5.63	4.60	3.16	2.93	2.36	1.55	4.36	2.24	0.80	0.62	1.67	3.04	2.97	4.07
Total	100.13	99.00	99.07	99.71	99.51	99.50	99.07	99.40	99.82	99.19	99.85	99.75	99.11	99.67	99.27
Eléments traces [ppm]															
Zr	232	248	191	313	247	243	289	186	196	273	280	241	290	268	250
Y	51	46	60	74	55	96	78	47	50	74	95	68	54	51	68
Sr	50	48	53	54	44	44	49	24	31	43	55	41	45	57	43
Rb	22	14	17	21	22	22	20	10	11	20	24	24	16	18	15
Ba	330	159	255	320	174	243	430	102	220	301	484	213	200	272	253
V	1271	1302	942	1296	1179	1269	980	1138	859	880	1032	1227	1353	1052	1161
Sn	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Sb	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	5	5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Ag	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2
As	<8	12	14	<8	17	13	14	21	34	11	16	<8	20	13	20
Pb	<6	6	15	<6	8	12	<6	6	7	<6	<6	<6	<6	13	<6
Zn	36	39	47	35	41	54	28	79	43	43	43	51	42	51	57
Cu	55	10	32	49	17	40	60	41	36	24	44	21	19	23	11
Ni	11	5	54	13	7	14	21	35	58	15	21	21	16	9	19
Cr	380	317	196	303	324	303	439	309	222	203	271	338	389	249	366
Co	20	42	34	39	55	63	23	41	59	23	18	120	72	79	170

Ech.	Localisation	Forme	Aspect de surface	Minéraux
BOE 201	F7 c.2 (site)	tuyau	ridé	Fay, Her, (Qz)
BOE 202	F7 c.2 (site)	boudins	lisse	Fay, Her, Wü, (Qz)
BOE 203	N2 c.2 ou 3 (f1)	boudins	lisse	Fay, Her, (Qz)
BOE 204	N2 c.2 ou 3 (f1)	tuyau	fracturé	Fay, Her
BOE 205	O2 c.2 (f1)	tuyau	fracturé	Fay, Her, (Qz)
BOE 206	O2 c.2 (f1)	boudins	lisse	Fay, Her, (Qz)
BOE 207	N2 c.3 (f1)	tuyau	ridé	Fay, Her, (Qz)
BOE 208	O1 c.2 (site)	boudins	lisse	Fay, Her, (Qz)
BOE 209	M6 c.1 (site)	boudins	lisse	Fay, Her, (Wü, Qz)
BOE 210	M6 c.1 (site)	boudin	vaguelettes	Fay, Her, (Qz)
BOE 211	N1 c.2 (site)	boudins	vaguelettes	Fay, Her, (Qz)
BOE 212	L3 c.2 (site)	boudins	lisse	Fay, Her, (Qz)
BOE 213	H4 c.2 (site)	tuyau	ridé	Fay, Her, (Qz)
BOE 214	H4 c.2 (site)	tuyau	vaguelettes	Fay, Her, (Qz)
BOE 250	L3 c.2 (site)	boudins	lisse	Fay, Her, (Qz)

Tab. 14. Analyses de scories coulées.

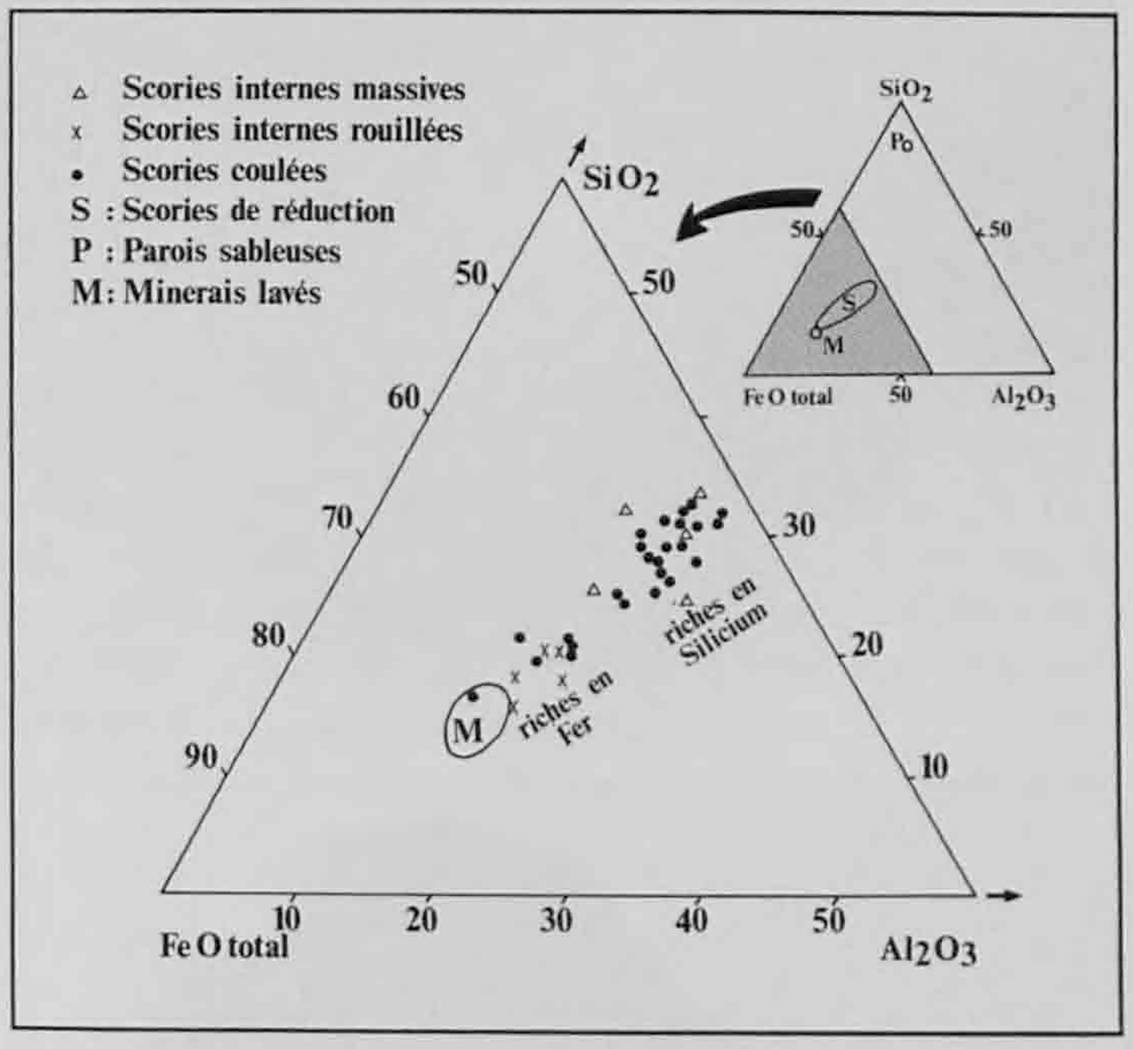


Fig. 55. Composition chimique des scories coulées, internes massives et internes rouillées.

Les caractéristiques chimiques des scories du site sont identiques à celles de la dernière coulée du bas fourneau 2. Les variations au sein de la coulée se retrouvent, à peine amplifiées; au niveau du site, elles sont supérieures à celle des pièces individuelles.

Deux groupes d'importance inégale se dessinent sur la base du rapport SiO2 / FeO total : d'une part, quatre pièces (n° 203, 208, 209 et 403); de l'autre, les 18 échantillons restants.

Ces groupements sont bien visibles pour SiO2, FeO tot, Al2O3, TiO2, P2O5, Zr, Sr et Ni. Ils disparaissent pour les autres éléments. Les teneurs en MnO, MgO, Na2O, K2O, Y, Rb, As, Pb, Zn et Cu se répartissent suivant une loi normale, alors que pour CaO, Ba, V, Cr et Co, la distribution est moins régulière et les écarts beaucoup plus grands.

La Fayalite (Fe2SiO4) - silicate de fer de la famille des Péridots - et la Hercynite (FeAl2O4) - oxyde de fer et d'alumine de la famille des Spinelles - sont les

deux constituants cristallins principaux dans les scories coulées. Le Quartz (SiO2) est présent en très faible quantité dans la plupart des échantillons. La Wüstite (FeO), oxyde de fer instable à basse température, est rare (2 cas) et peu abondante. La Ferrite (Fer alpha) n'a pas été détectée. La présence de verre se déduit des analyses chimiques.

5.5 Les scories internes massives

Certains fragments de scories ne montrent pas, sur les surfaces initiales conservées, de structures de fluage (fig. 57). Ce sont généralement des blocs assez volumineux (10cm d'arête) de forme quelconque qui ne peuvent pas faire partie de coulures.

Les pièces sont souvent massives ou du moins, comportent des parties massives prises dans un entrelacement dont les vides ont été laissés par des charbons de bois disparus.

Les surfaces sont généralement déchiquetées, moulant un amas de charbons de bois; la couleur brunâtre est due au développement d'hydroxydes de fer

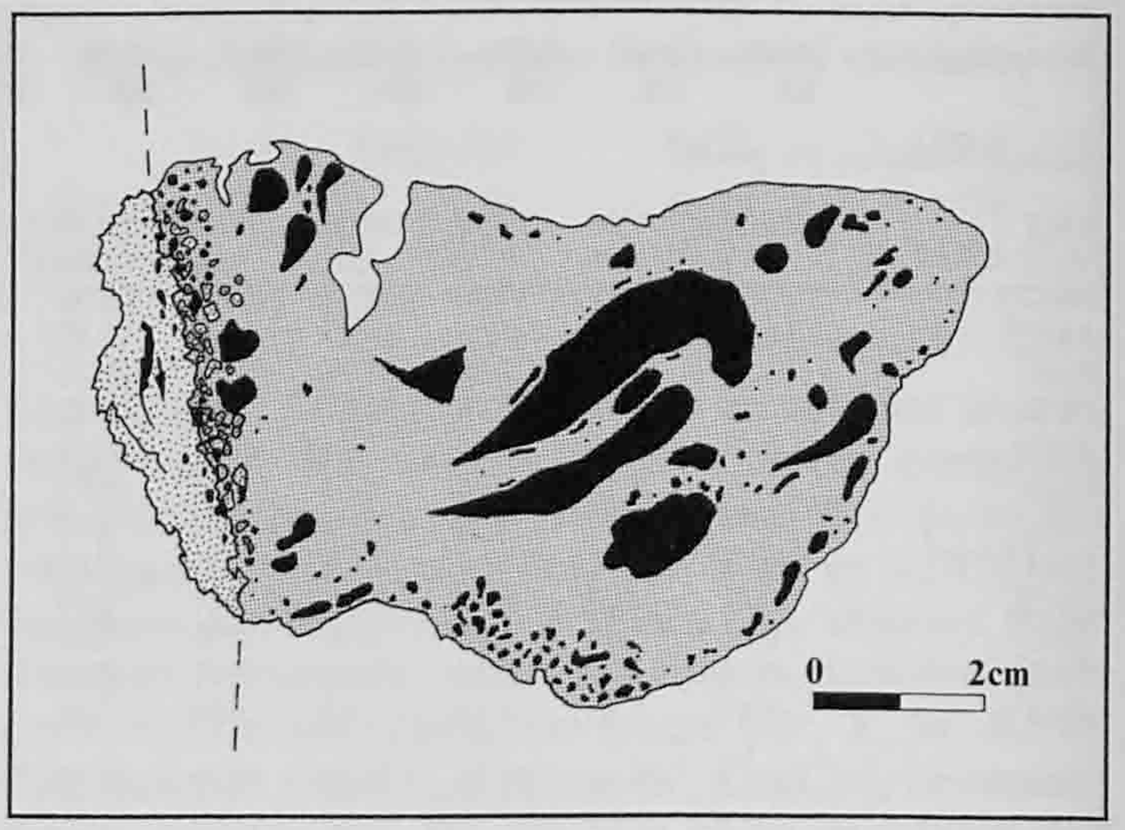


Fig. 56. Scorie interne massive n° 639. Coupe (à gauche de la ligne de tirets : paroi sableuse).

secondaires (rouille). Par endroits, on observe des taches rouge sombre qui trahissent l'altération de zones riches en fer métallique. Localement, sur certaines pièces, on peut voir des surfaces lisses et onduleuses gris sombre, rappelant l'aspect habituel des scories coulées.

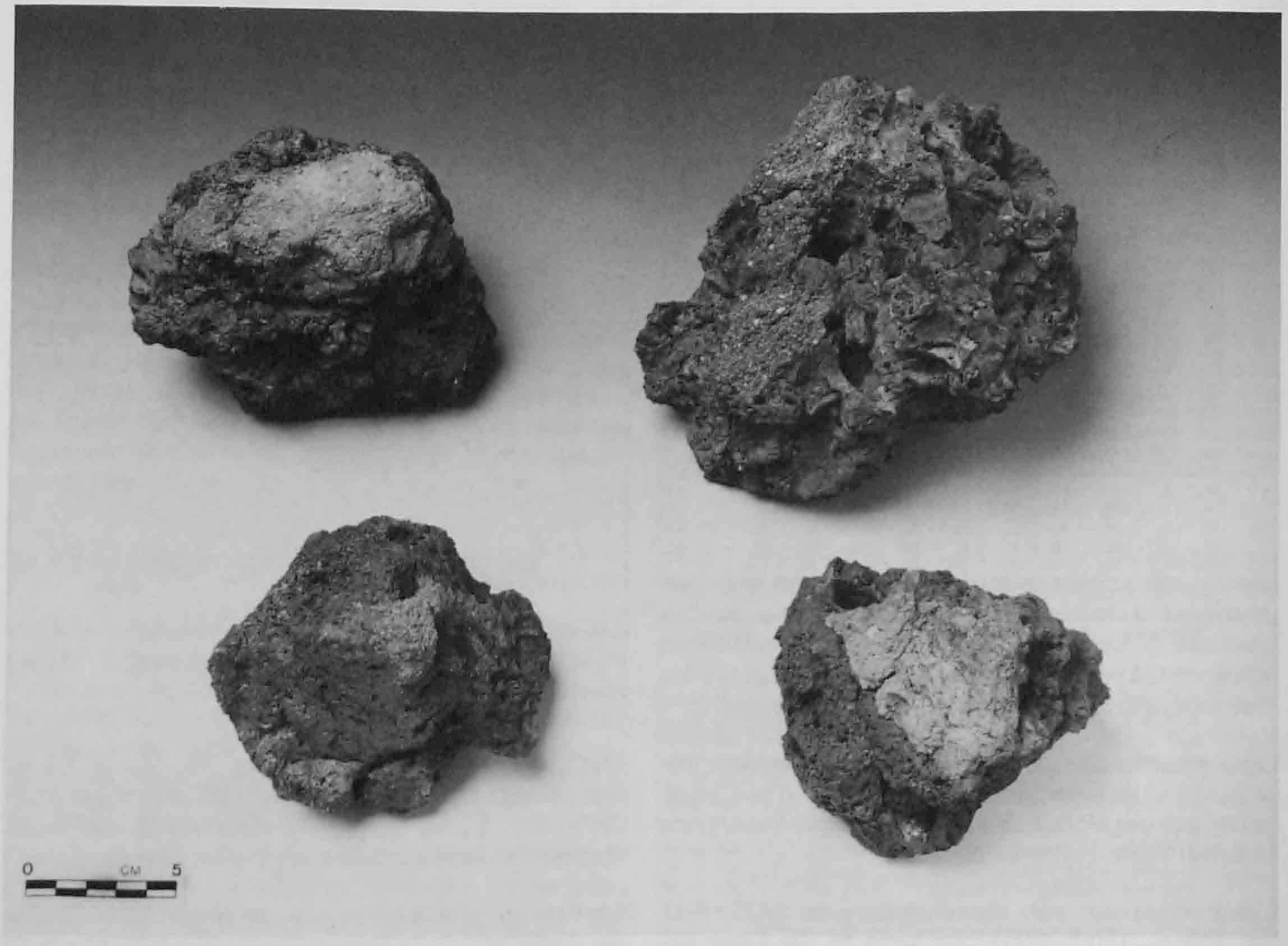


Fig. 57. Scories internes massives n° 602, 693, 694 et 697.

Echantillon	BOE 610	BOE 623	BOE 639	BOE 642	BOE 643
Eléments majeurs [% poids]					
SiO2	30.02	24.40	23.42	29.60	28.59
TiO2	1.12	1.00	1.11	1.44	1.44
Al2O3	20.30	17.94	24.52	16.44	22.28
Fe2O3	16.37	22.50	29.27	17.68	12.34
FeO	23.60	28.25	12.89	29.05	30.15
MnO	0.16	0.16	0.18	0.23	0.22
MgO	0.25	0.23	0.45	0.41	0.36
CaO	2.54	0.73	1.79	2.47	1.33
Na2O	0.04	0.06	0.08	0.10	0.03
K2O	0.70	0.58	0.55	1.18	0.75
P2O5	0.28	0.28	0.24	0.36	0.23
H2O	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00
CO2	0.27	0.16	0.21	0.18	0.16
FeM	3.45	2.85	5.20	0.00	2.03
Total	99.10	99.14	99.91	99.18	99.91
Eléments traces [ppm]					
Zr	284	261	262	388	371
Y	50	61	63	81	59
Sr	51	43	48	63	56
Rb	19	15	16	43	19
Ba	171	147	275	441	294
V	911	948	1354	361	887
Sn	<5	<5	<5	<5	<5
Sb	<5	<5	<5	<5	<5
Ag	<2	<2	<2	<2	<2
As	9	<8	<8	<8	37
Pb	7	15	<6	<6	<6
Zn	48	41	54	27	52
Cu	27	29	17	12	10
Ni	9	15	17	13	11
Cr	236	216	261	50	173
Co	175	24	143	144	254

Ech.	Localisation	Forme	Aspect de surface	Minéraux
BOE 610	O5 surface	bloc massif	régulier	Fay, Her
BOE 623	N4 c.2 (f2)	bloc massif	régulier, placage sableux	Fay, Her
BOE 639	N4 c.2 (f2)	bloc massif	régulier, placage sableux	Fay, Her, (Qz, Fer)
BOE 642	N4 c.2 (f2)	bloc massif	régulier, placage sableux	Fay, Her
BOE 643	N4 c.2 (f2)	bloc massif	régulier	Fay, Her, (Qz)

Tab. 15. Analyses de scories internes massives.

Dans plus de 60% des cas, des matériaux sableux cuits, de couleur grisâtre, adhèrent à la pièce. Ce sont des fragments de la paroi du bas fourneau. Il peut s'agir d'un simple placage ou de morceaux plus gros. Il est très difficile de définir une polarité pour ces fragments informes. Lorsque c'est le cas, la morphologie lisse se trouve généralement sur la partie supérieure de la pièce et semble plus ou moins horizontale. Les surfaces inférieures sont moulées sur les charbons.

En coupe, le contact avec la paroi sableuse peut être net ou diffus si la paroi a commencé à fondre (fig. 56). La matrice est gris sombre et de grands cristaux aciculaires ou prismatiques sont visibles à l'oeil nu. L'abondance de la porosité est très variable : en général, elle est assez faible (10 à 20%). Le fer métallique est fréquent dans ce type de scorie : il est visible dans la moitié des pièces découpées (de ‹ 1% jusqu'à 10%). Il se présente sous forme de globules sphériques de faible diamètre (0.1mm), de nodules aux contours déchiquetés (1 à 10mm) ou de filaments disséminés dans la matrice, autour des pores ou des charbons.

Tout indique que ces pièces se sont refroidies lentement à l'intérieur du bas fourneau en contact avec la paroi, soit en fin d'opération, soit en s'accumulant dans des zones froides loin des tuyères. Elles devaient être arrachées à la fin de l'opération et rejetées avec les autres débris. Les fouilles n'ont livré qu'un nombre limité de fragments de ce type de scorie et l'image que l'on peut en avoir est relativement imprécise (chap. 6.2, p. 90).

Les analyses chimiques des scories internes massives rattachent celles-ci au groupe riche en SiO2 des scories coulées, avec, pour certains échantillons, un caractère siliceux encore plus marqué (fig. 55 et tab. 15). Le seul point à relever est qu'elles sont plutôt pauvres en V et en Cr, mais qu'elles ont été enrichies en Co.

Les minéraux présents sont la Fayalite et la Hercynite. Bien que les parties sableuses aient été exclues des préparations, le Quartz apparaît deux fois sur cinq. Ce sont toujours des parties pauvres en fer métallique qui ont été analysées; il y a toutefois de la Ferrite dans l'échantillon 639.

5.6 Scories internes rouillées

Les scories dénommées "internes rouillées" sont des pièces de petites dimensions, n'excédant généralement pas 5cm de longueur et pesant en moyenne 15gr. Leurs formes sont extrêmement compliquées : boursouflées et déchiquetées, elles correspondent à des assemblages de lobes centimétriques et d'arêtes (fig. 59). Les surfaces sont terreuses et recouvertes de rouille. La morphologie ne permet pas de définir une polarité, mais on remarque fréquemment des empreintes de charbons de bois.

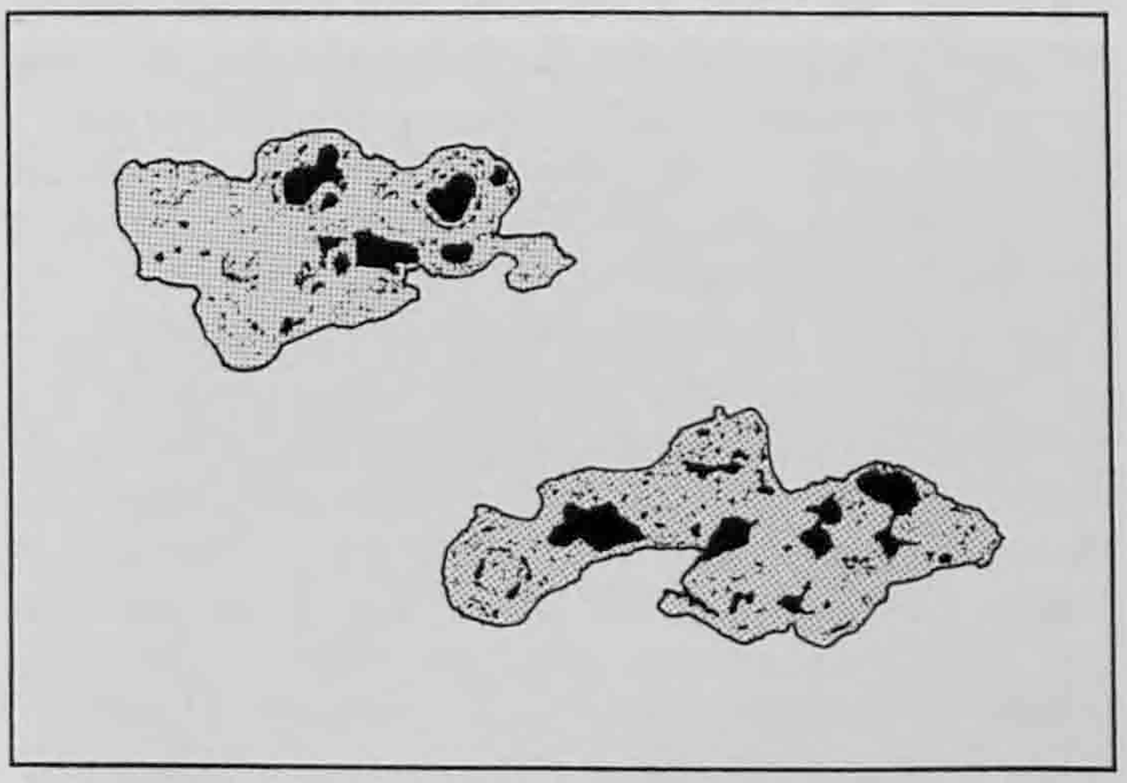


Fig. 58. Scories internes rouillées. Coupes. Structures concentriques : pisolithes. Echelle 1:1.

Echantillon	BOE 301	BOE 302	BOE 304	BOE 305	BOE 306
Eléments majeurs [% poids]					
SiO2	16.46	15.24	17.93	18.69	16.79
TiO2	0.92	0.75	0.79	0.88	0.77
Al2O3	17.95	17.08	16.54	16.78	16.05
Fe2O3	39.93	39.93	40.67	32.96	38.49
FeO	16.47	23.95	12.86	26.22	22.39
MnO	0.12	0.10	0.13	0.11	0.14
MgO	0.36	0.11	0.44	0.20	0.33
CaO	0.99	0.35	1.73	0.52	1.09
Na2O	0.01	0.04	0.00	0.03	0.08
K2O	1.11	0.48	1.01	0.85	1.00
P2O5	0.35	0.40	0.45	0.33	0.40
H2O	3.66	0.69	5.46	1.08	1.33
CO2	1.59	0.88	1.71	1.16	0.89
FeM	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	99.92	100.00	99.72	99.81	99.75
Eléments traces [ppm]					
Zr	232	198	201	220	188
Y	44	42	41	46	39
Sr	30	24	34	25	30
Rb	34	15	30	28	29
Ba	139	66	215	126	111
V	1201	1279	1218	1192	1242
Sn	<5	<5	<5	<5	<5
Sb	8	6	7	<5	<5
Ag	<2	<2	<2	<2	<2
As	123	126	200	127	97
Pb	<6	6	<6	<6	<6
Zn	25	72	29	54	40
Cu	77	122	82	66	48
Ni	105	89	90	110	113
Cr	363	322	329	313	322
Co	96	73	59	63	147

Ech.	Localisation	Forme	Aspect de surface	Minéraux
BOE 301	N4 c.5 (f2)	informe	déchiqueté, rouillé	Fay, Her, Mag, Fer, Qz, Goe, Lép
BOE 302	N4 c.5 (f2)	informe	déchiqueté, rouillé	(Fay), Her, Mag, Fer, (Qz), Goe, Lép
BOE 304	N4 c.5 (f2)	informe	déchiqueté, rouillé	(Fay), Her, Mag, (Fer, Qz), Goe, Lép
BOE 305	N4 c.5 (f2)	informe	déchiqueté, rouillé	(Fay), Her, Mag, (Fer), Qz, Goe, Lép
BOE 306	N4 c.5 (f2)	informe	déchiqueté, rouillé	(Fay), Her, Mag, (Fer, Qz, Goe)

Tab. 16. Analyses de scories internes rouillées.

En coupe, les lobes globulaires sont souvent centrés sur une grosse vacuole, parfois entourée de fines bulles aux surfaces concentriques, disposées parallèlement (fig. 58). Des filaments de fer métallique bordent parfois la porosité. Des grains de fer plus gros apparaissent également. La matrice est composée d'une pâte gris sombre, comme celle des autres scories. Cette structure interne rappelle celle des pisolithes qui composent le minerai. Les scories internes rouillées seraient en fait des amalgames de pisolithes partiellement réduits et partiellement fondus, c'est-à-dire du minerai incomplètement traité. Des pisolithes encore reconnaissables, bien que fortement chauffés, sont collés à plusieurs pièces.

Ces scories réagissent à l'aimant plus fortement que les autres catégories. Ce critère reste difficile à employer car la réaction est très inégale d'une pièce à l'autre et ne peut être clairement mise en relation avec d'autres caractères.

Les analyses chimiques des scories internes rouillées permettent de les distinguer clairement des autres catégories de vestiges (fig. 55 et tab 16). Elles sont fortement oxydées (Fe2O3) et riches en eau (H2O) et en gaz carbonique (CO2). Compte tenu de leur taille et de leur forme, il a été impossible d'enlever, lors de la préparation de l'échantillon, les parties superficielles altérées.

En recalculant les analyses sur une base anhydre (chap. 7.2.1, p. 101), elles apparaissent comme intermédiaires entre le groupe des scories coulées riches en fer et les minerais.

La Fayalite, la Hercynite et un peu de Quartz sont présents, comme dans les autres scories des Boulies. Les hydroxydes de fer (Lépidocrosite et Goethite) correspondent aux surfaces externes rouillées. La Ferrite a été systématiquement repérée ainsi que la Magnétite (Fe3O4). La présence de ce dernier minéral étaie l'hypothèse d'une réduction incomplète.

Fig. 59. Scories internes rouillées (la plus grande pièce mesure 6cm).

Chapitre 6

L'atelier de réduction

6.1 La stratigraphie

6.1.1 L'atelier

En surface de la tache noire, un léger replat et une concentration de blocs calcaires signalaient l'emplacement des bas fourneaux à flanc de coteau. Le matériel archéologique était concentré pour l'essentiel en aval de cette petite plate-forme (fig. 61).

En stratigraphie, la couche 1 est une unité artificielle dont l'épaisseur dépend essentiellement de la profondeur atteinte par la charrue et de la pédogénèse en cours. La mise en culture de ces terres, depuis plus de vingt ans, a éparpillé le matériel archéologique contenu dans cette couche. Cette observation se vérifie par l'extension différentielle de la coloration noirâtre à la surface du terrain (c. 1) et de la superficie réelle de la couche archéologique (c. 2; fig. 63).

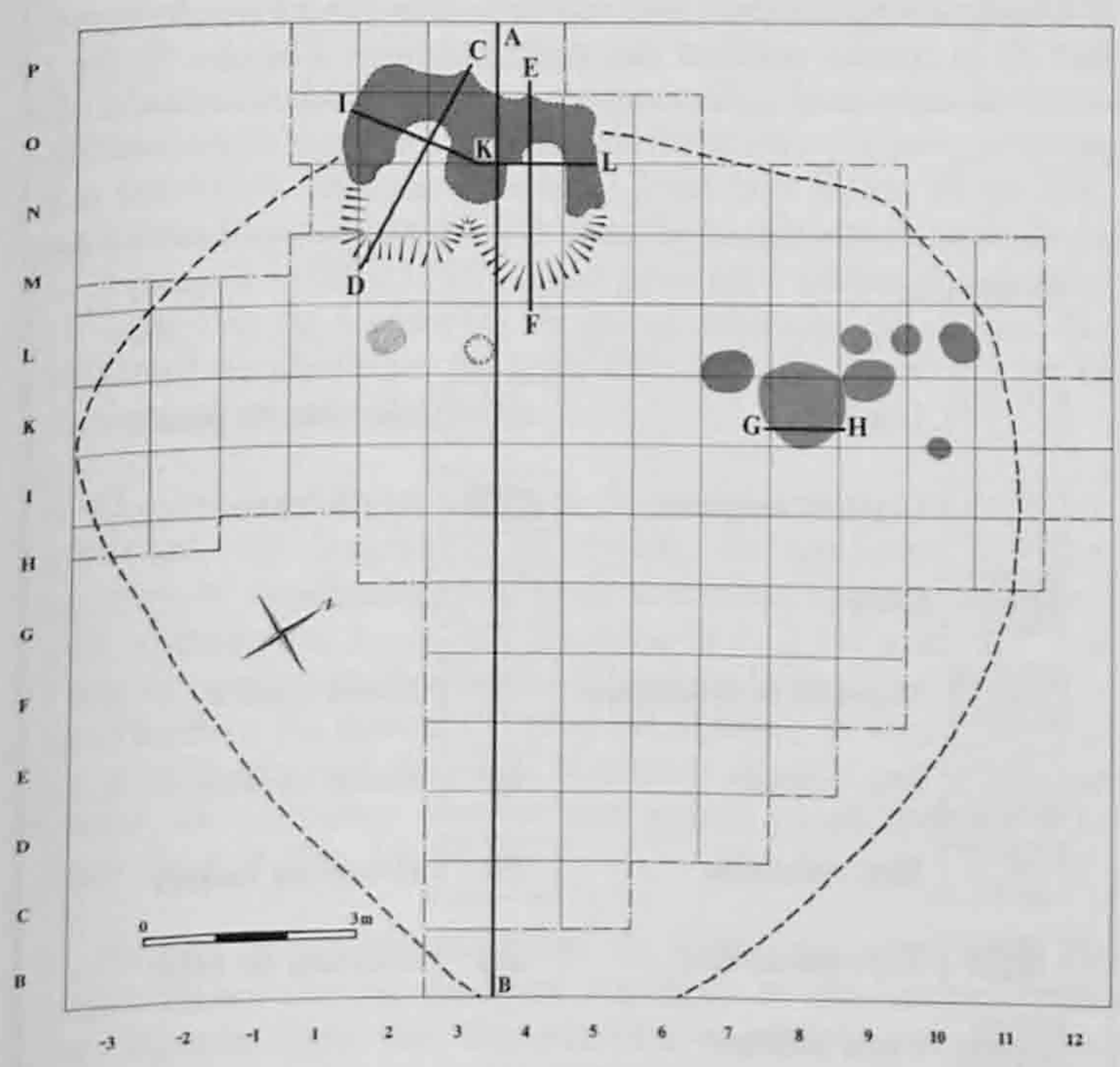


Fig. 60. Atelier des Boulies. Structures et emplacement des coupes.

Fig. 61. L'atelier de réduction en cours de fouille. Vue nord.

Dans les cuvettes des fourneaux, des restes de couches de fonctionnements et de destructions antérieurs sont recouverts par les bordures en place (c. 4 en partie).

Toute la zone à la périphérie des fourneaux est tapissée d'un fin niveau de charbons de bois dont l'épaisseur atteint par endroits une dizaine de centimètres (c. 6; fig. 62). Une quantité considérable de charbon a donc

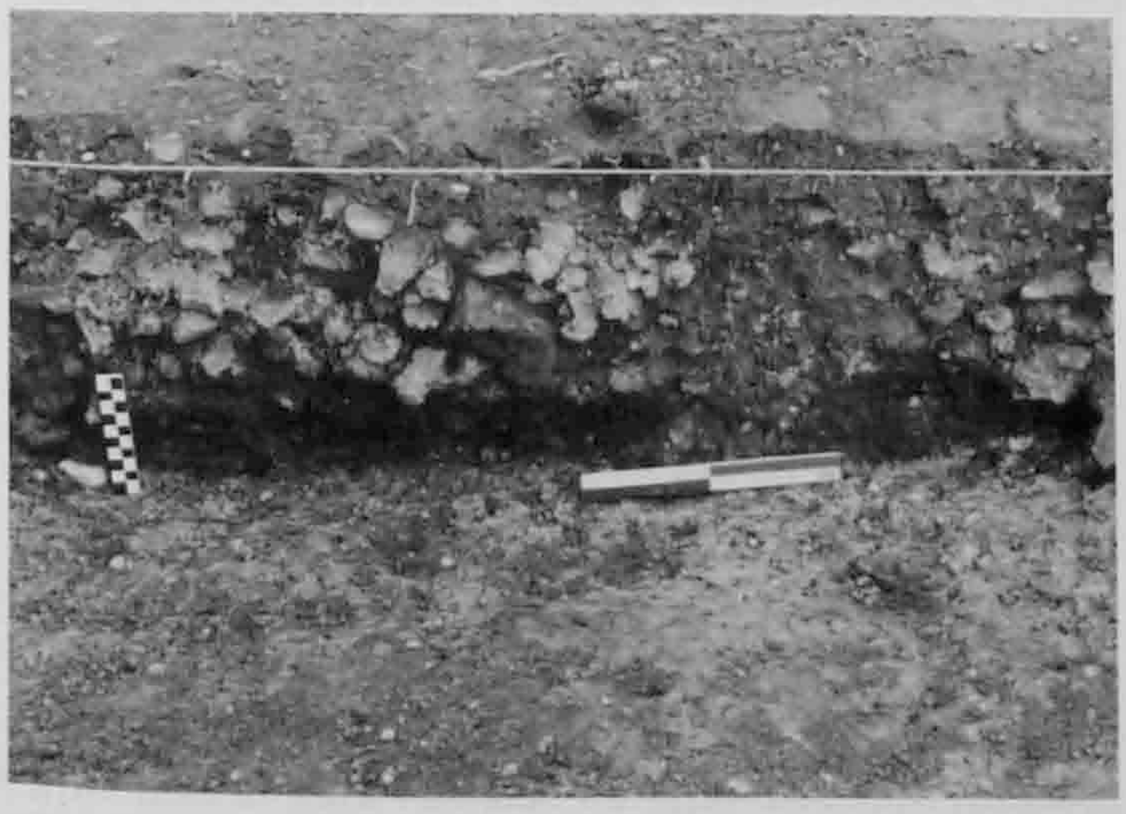
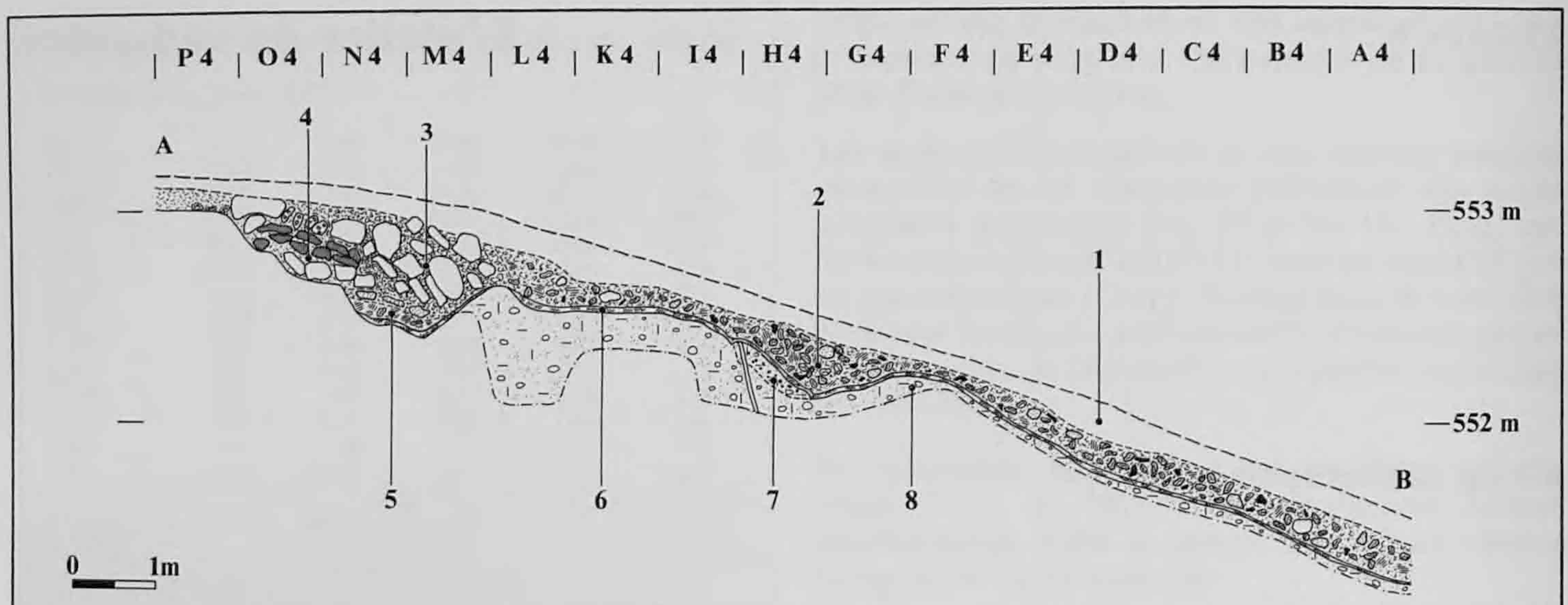


Fig. 62. Coupe stratigraphique à la périphérie. Vue nord-est.



Humus 1

Remblais archéologiques 2

Destruction du fourneau 3

Fourneau en place 4

Fonctionnement du fourneau 5

Niveau charbonneux 6

Substrat remanié 7

Substrat 8

1. Limons humiques fortement perturbés par les travaux agricoles. La couche recouvre tout le site. Elle contient du matériel archéologique remanié et des charbons de bois, d'où la coloration noirâtre de la surface (fig. 25, T1).

2. Sédiment très hétérogène composé d'éléments archéologiques très variés et non lités dans une matrice limono-sableuse humique assez abondante de couleur gris-noir (fragments de scories, de paroi de fourneau, de tuyères, de tuiles et nombreux charbons de bois). La couche recouvre les zones situées à la périphérie des fourneaux. Le matériel est partiellement remanié par les travaux agricoles.

3. Couche formée en majorité de blocs calcaires, de fragments de paroi sableuse, de quelques galets cristallins, de grès et de scories dans une faible matrice sablo-limoneuse à charbons de bois.

4. Eléments architecturaux du bas fourneau en place.

5. Sédiment sablo-charbonneux à forte composante charbonneuse et contenant des scories de réduction en tout genre. La couche est présente uniquement devant le fourneau, au fond de la cuvette.

6. Niveau noir comprenant des charbons de bois prismatiques dans une fine matrice charbonneuse légèrement sableuse. Sus-jacent au substrat, il s'étend sur tout le site, sauf sous les structures de fourneau et dans les carrés I/H3 et 4.

7. Sédiment assez hétérogène à graviers vosgiens, fragments d'argile cuite et charbons de bois, dans une matrice sablo-limoneuse abondante. Il est traversé par un trou de poteau. Le contact de la couche avec la c. 8 sous-jacente est graduel.

8. Graviers vosgiens dans une matrice sablo-limoneuse; le sommet de la couche contient des concentrations d'oxydes de fer.

Fig. 63. Coupe stratigraphique du site de réduction (A-B, fig. 60).

été amenée sur le site avant le plein fonctionnement du ou des bas fourneau(x). Peut-être a-t-on stocké cette matière première dans le périmètre de l'atelier.

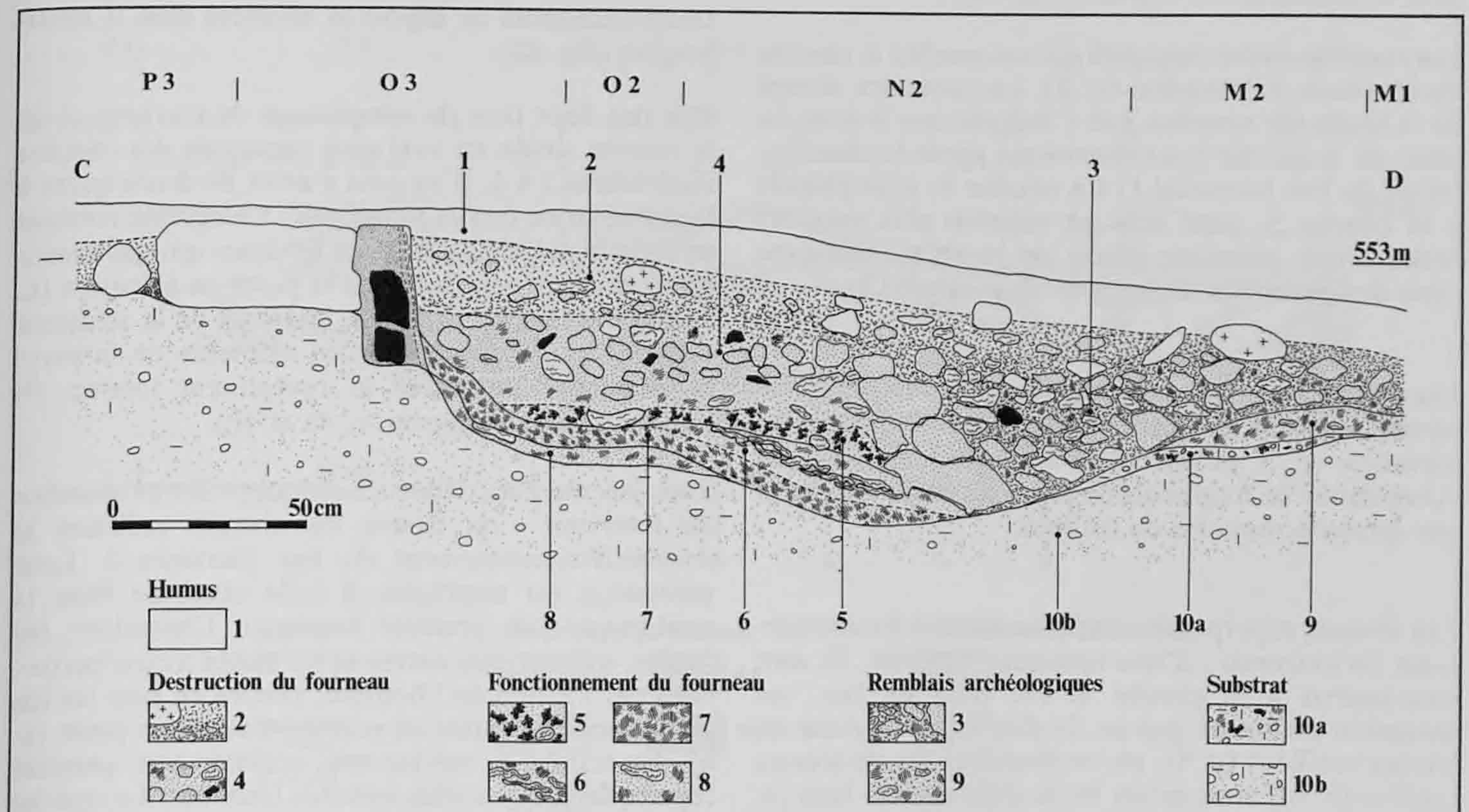
La couche 7 est antérieure à ce niveau charbonneux. Elle se distingue par l'état fortement altéré des fragments d'argile cuite qu'elle renferme et une texture semblable au substrat sous-jacent. Les morceaux d'argile pourraient être l'indice que les tuyères ont été fabriquées sur le site même.

Enfin, deux trous (de poteaux ?) aménagés dans le substrat naturel ont été mis en évidence dans les mètres carrés H4 et L3 (fig. 63 et fig. 5, p. 13). Leur fonction doit être mise en relation avec la structuration de l'espace du site (chap. 6.2 et 6.3).

Symboles

- Limons
- Graviers vosgiens
- Sable
- Matériel archéologique
- Bloc calcaire
- Bloc cristallin
- Grès molassique
- Paroi sableuse
- Morceau de paroi
- Argile cuite
- Pisolithe
- Scorie coulée
- Scorie rouillée
- Scorie en calotte
- Charbon de bois

6.1.2 Le bas fourneau 1



1. Limons humiques à coloration brun-noir. Cette couche comporte quelques blocs calcaires et galets cristallins, en partie rubéfiés, ainsi que du matériel archéologique disséminé et des charbons de bois. Autour de la bordure semi-circulaire de pierres, les limons reposent sur le substrat naturel (c. 10b).

2. Matériaux hétérogènes fins dans une matrice humique sablo-limoneuse abondante. Ils consistent en fragments de paroi sableuse (très friables à solidement scorifiés ou vitrifiés), en scories éparses ainsi qu'en charbons de bois et en graviers. Le contact avec la c. 4 sous-jacente est graduel.

3. Matériaux hétérogènes très grossiers dans une matrice sablo-limoneuse peu abondante contenant quelques graviers. La transition latérale vers la c. 2 est très floue; de ce fait, une prolongation de la c. 2 dans la partie supérieure de la c. 3 jusqu'à la limite N2/M2 ne peut être exclue. La couche se compose de fragments de paroi sableuse, de scories, de tuiles et de charbons de bois. Elle remplit la totalité de la cuvette devant le fourneau.

4. Couche formée en majorité de grands morceaux de paroi sableuse, de fragments de tuiles, de quelques grandes scories et de charbons de bois dans une matrice sableuse peu abondante. La transition avec la c. 2 est marquée par l'augmentation graduelle des éléments de paroi sableuse. La limite entre les couches 3 et 4 est abrupte et soulignée par de gros fragments de paroi. Certains portent des traces en forme de rainures, comme une grand pièce trouvée à la base de c. 4 (fig. 35, p. 53).

5. Niveau riche en charbons de bois fins, contenant de nombreuses scories internes rouillées et des scories coulées éparses dans une matrice limono-sableuse abondante. Vers l'ouverture du fourneau, la c. 4 le recouvre et l'interrompt de façon abrupte.

6. Couche constituée d'un ou de plusieurs lits superposés de scories coulées dans une matrice charbonneuse et limoneuse. Elle a subi des perturbations dues uniquement à l'action humaine. Il s'agit d'une projection dans ce profil, car la couche n'a pu être décelée et observée que dans la partie nord-est de la cuvette (fig. 46, p. 65).

7. Niveau assez homogène de couleur noire, caractérisé par de fines particules de charbon de bois. En dehors du profil, en plan, il est entrecoupé par de minces passées lenticulaires de sable orangé. Son extension correspond à celle de la c. 5 partiellement sus-jacente.

8. Mince lit se distinguant du niveau 7 par une matrice sableuse de couleur orange-beige nettement plus abondante et par des charbons de bois en moins grande quantité. Il est conservé vers l'arrière du fond du fourneau.

9. Couche peu épaisse située à la périphérie de la cuvette. Elle est composée de limons sableux contenant des charbons de bois fins assez abondants et quelques scories de petites dimensions.

10a. Substrat rubéfié renfermant à son sommet des morceaux de charbon de bois, des petits morceaux d'argile cuite, ainsi que quelques fragments de scories.

10b. Substrat naturel (Graviers vosgiens), correspondant à la c. 8 de l'ensemble du site. Par endroits un chapage sablo-argileux tapissait la surface du terrain encaissant. Entre ce placage et le substrat, un très mince niveau gris-noir, formé de goudron, a été observé.

Fig. 64. Coupe stratigraphique du bas fourneau 1 (C-D, fig. 60).

Dans la stratigraphie du bas fourneau 1, trois ensembles de dépôts se distinguent (fig. 64) :

Les remblais archéologiques qui ont comblé la cuvette du fourneau à l'abandon (c. 3). Le caractère abrupt de la limite des couches 3 et 4 indique que la mise en place de la couche 3 est intervenue après la désaffectation du bas fourneau 1. La couche 9, sous-jacente à la couche 3, peut être en relation soit avec les restes d'une première phase de remblai, soit avec l'une des dernières utilisations du fourneau 1.

Les couches qui contiennent les éléments architecturaux issus de la destruction du bas fourneau en élévation (c. 2 et 4). Elles sont caractérisées par l'abondance de fragments de paroi sableuse interne et une quantité moindre de cailloux.

Les niveaux superposés relatifs au dernier fonctionnement du fourneau : d'une épaisseur variable, ils sont sous-jacents à la couche 4. De haut en bas, cet ensemble est formé par un lit charbonneux riche en scories rouillées (c. 5), un ou plusieurs lits de scories coulées (c. 6), ainsi qu'un lit de charbons de bois (c. 7). La distinction des unités stratigraphiques est plus délicate que dans le cas du fourneau 2. La couche 8, enfin, semble témoigner d'une phase d'utilisation antérieure du fourneau. Les limites entre ces niveaux et les couches de destruction ne sont pas toujours très nettes.

La porte du fourneau est clairement signalée par les courbes altimétriques du substrat (chap. 4.4.1, p. 64). Les morceaux de paroi sableuse à rainures contre lesquels se heurtent les remblais ne reflètent donc pas l'emplacement exact de la partie frontale. De plus, ils se situent trop en aval dans la cuvette, par rapport aux niveaux témoignant du dernier fonctionnement.

La partie en élévation de l'appareil désaffecté a été probablement nivelée et partiellement déblayée. La moindre densité des fragments de revêtement sableux dans le remplissage interne le confirme. Il est possible que les blocs du manteau externe aient été récupérés pour la reconstruction du fourneau 2. Dans ce cas, il faudrait admettre que le fourneau 2, dans sa première étape de construction, ne comportait que peu d'éléments lithiques. Or, la superstructure du bas fourneau 1 n'était pas non plus nécessairement renforcée par une grande quantité de blocs. La relation stratigraphique entre les remplissages des deux fourneaux ne permet pas de trancher la question.

Le niveau 10a correspond à un horizon de piétinement qui s'est formé durant la période d'activité du fourneau.

6.1.3 Le bas fourneau 2

Deux ensembles de dépôts se décèlent dans la stratigraphie (fig. 65).

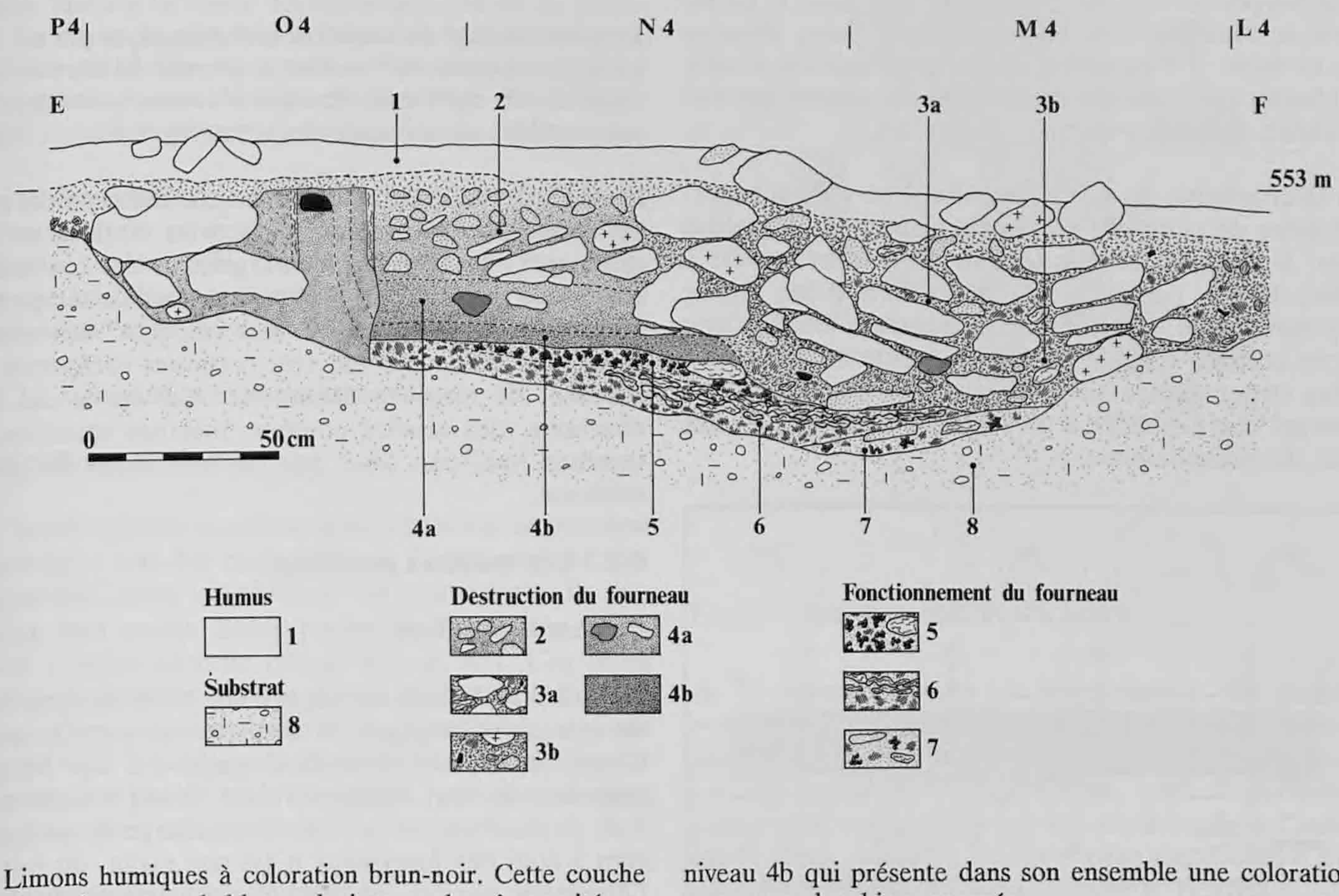
Plus des deux tiers du remplissage du fourneau et de la cuvette située en aval sont constitués des couches supérieures 2 à 4. Il ne peut y avoir de doute quant à la provenance de ces matériaux. La cuvette contient en effet la majorité des blocs lithiques qui ont constitué le manteau extérieur de la paroi en élévation (c. 2, en partie; c. 3a et 3b). L'intérieur de la structure détruite recèle par contre les éléments de la paroi sableuse qui formaient le revêtement interne du fourneau (c. 2, en partie; c. 4a et 4b).

Sous-jacents à ces dépôts chaotiques - liés à l'abandon du fourneau - on trouve les niveaux reflétant le dernier fonctionnement du bas fourneau 2. Leur succession est semblable à celle observée dans la stratigraphie du premier fourneau. Cependant, les limites en sont plus nettes et les unités moins perturbées par l'action de l'homme; preuve en sont les lits de la dernière coulée de scories, trouvés en place (c. 6). La couche 5, sus-jacente, contient une quantité remarquable de scories internes rouillées. La couche 7 pourrait être quant à elle le résultat d'une utilisation antérieure au dernier fonctionnement.

La position de la dernière coulée détermine de manière certaine l'emplacement de la porte du fourneau 2. Les éléments lithiques contenus dans les couches 2 et 3 confirment cette image : les lits de blocs situés à l'intérieur du fourneau sont inclinés vers l'arrière de la structure, tandis que le pendage de ceux situés en aval est orienté vers la cuvette. Par ailleurs, il ne fait aucun doute que la totalité de ces blocs faisait partie de la superstructure de l'appareil. Seuls les éléments lithiques des parties superficielles ont parfois subi des déplacements après l'abandon du site. L'intérieur du fourneau 2, enfin, contient une masse sableuse de plus en plus homogène et compacte vers le fond : l'élévation s'est écroulée sur elle-même en scellant les couches qui témoignent du dernier fonctionnement.

Appellation	Site	Bas-fourneau 1	Bas-fourneau 2	Foyer de grillage
Humus	1	1	1	-
Remblais archéologiques	2	3	-	1
Destruction du fourneau	3	2,4	2,3,4	2,3
Fourneau en place	4	b-f	b-f	-
Fonctionnement du fourneau	5	5,6,7	5,6	-
Niveau charbonneux	6	-	-	-
Niveau charbonneux	-	7	6base	-
Fonctionnement antérieur	-	8,9	-	-
Fonctionnement antérieur	-	-	7	-
Substrat remanié	7	-	-	-
Substrat	8	10a,10b	8	4

Tab. 17. Correspondance des appellations de couches.



1. Limons humiques à coloration brun-noir. Cette couche contient davantage de blocs calcaires que la même unité au-dessus du fourneau 1. A l'arrière de la bordure lithique (carré P4-5 et O5), en contact direct avec le substrat, une nette concentration de charbons de bois et de pisolithes a été remarquée.

2. Couche limono-sableuse recouvrant l'intérieur du fourneau 2; la composante limoneuse diminue vers la base de la couche. L'essentiel des éléments grossiers est constitué de fragments de paroi sableuse orangée. La transition vers la c. 3a est marquée par un accroissement des blocs lithiques dans ce dernier l'ensemble. Le passage à la couche 4 sous-jacente est graduel.

3. Ensemble remplissant toute la cuvette à l'avant du fourneau. Sa partie supérieure (c. 3a) recèle presque exclusivement des blocs calcaires, quelques grès et des galets cristallins dans une matrice humique limono-charbonneuse. Dans la partie inférieure de la couche (c. 3b), deux concentrations de grosses scories - dont des scories en calotte - ont été repérées à gauche (N/M3-4) et à droite (M5) de la cuvette devant le fourneau. En quantité moindre, la couche a livré des scories, des tuiles, des charbons, des blocs calcaires fortement chauffés, ainsi que quelques morceaux de tuyères. La limite latérale entre les c. 4 et c. 3b est floue.

4. Couche principalement caractérisée par des morceaux de paroi sableuse dans une matrice sableuse (c. 4a), surmontant un niveau très compact et assez homogène de fragments sablo-argileux (c. 4b). Quelques scories parsèment ce niveau 4b qui présente dans son ensemble une coloration orange sombre bien marquée.

5. Couche couvrant une bonne partie de la surface interne du fourneau, ainsi que de la cuvette qui s'ouvre à l'avant. Elle est définie par une matrice charbonneuse et sableuse noir-brun parsemée de petites scories rouillées (1 à 6cm de long). La composante charbonneuse (en fines particules) est dominante.

6. Couche formée de plusieurs lits de scories coulées superposés et s'imbriquant les uns dans les autres; elle est épaisse d'une quinzaine de cm. La matrice est constituée de fines particules de charbon de bois. A sa base sur une épaisseur de 3 cm, un niveau charbonneux contenant de petites scories de coulée tapisse le fond de la cuvette. Vers l'intérieur du fourneau, il ne s'agit plus que de charbons. Par endroits, la couche apparaît plus hétérogène, du fait de la présence de scories rouillées et de fragments de paroi sableuse.

7. Ensemble hétérogène s'étendant à la base de la cuvette. La matrice sablo-limoneuse brune peu abondante renferme des scories diverses - mais principalement celles à l'aspect rouillé - des charbons de bois, ainsi que des fragments de paroi sableuse cuits ou scorifiés.

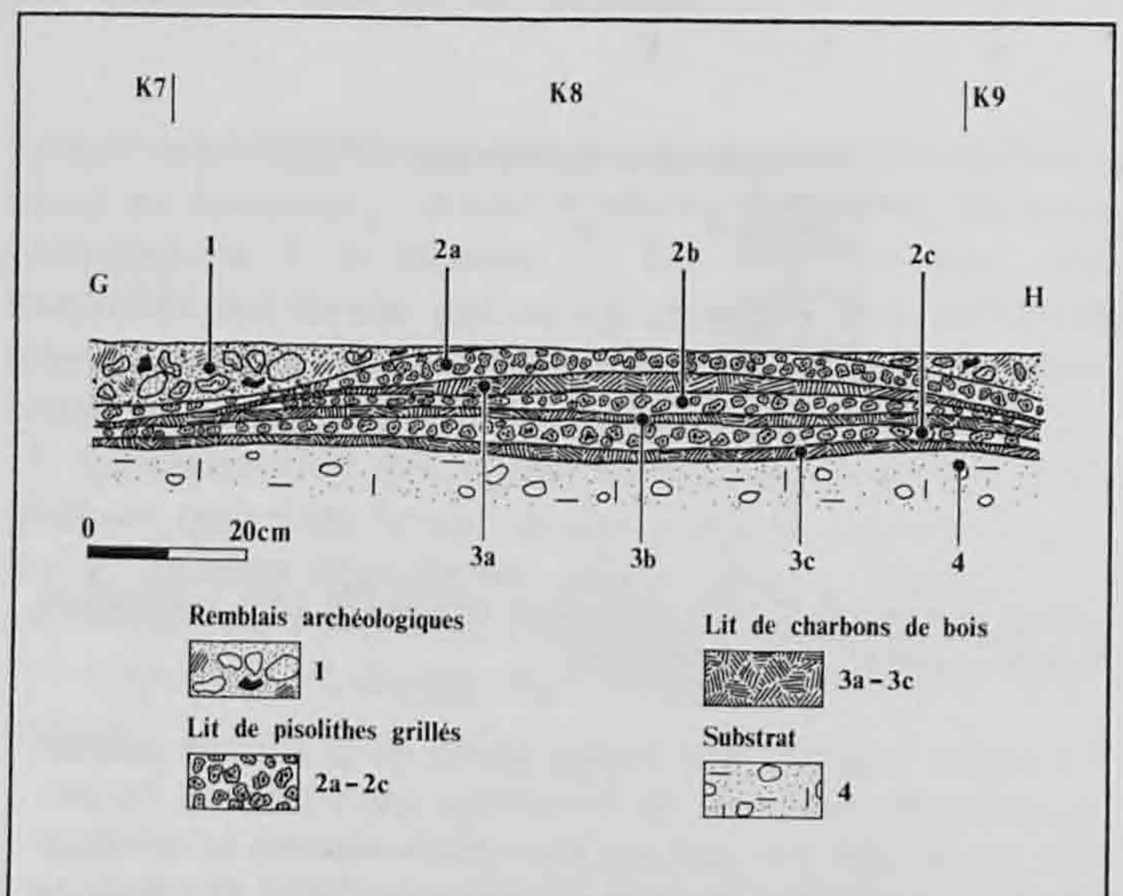
8. Substrat naturel composé de Graviers vosgiens dans une matrice limono-sableuse beige. A l'emplacement du bas fourneau, le fond de la cuvette présente une nette rubéfaction, laquelle est un peu moins marquée au fond du fourneau.

Fig. 65. Coupe stratigraphique du bas fourneau 2 (E-F, fig. 60).

6.1.4 Les foyers de grillage

Sept foyers ouverts ont été mis au jour dans la partie nord de l'atelier. Leur diamètre varie entre 20cm et 1m environ. A l'exception des deux structures situées le plus au nord-est, ces foyers sont recouverts par des remblais archéologiques (c. 1 du site).

La stratigraphie du foyer de grillage en K8 est représentative de celle des six autres structures du même type. Il s'agit dans tous les cas d'un foyer ouvert à même le sol, parfois situé en bordure d'une légère dépression. Un ensemble de dépressions ainsi qu'une rigole creusée dans le sens de la pente sont associés à ces structures de combustion. Ces aménagements peuvent correspondre à un système d'évacuation des eaux de ruissellement.



1. Couche archéologique, correspondant à la c. 2 de la stratigraphie du site.

2. Lits de pisolithes grillés d'une épaisseur moyenne de 2cm.

3. Lits de charbons de bois dont l'épaisseur moyenne est également de 2cm. Les lits 3a, 3b et 3c s'intercalent entre les lits 2a, 2b et 2c.

4. Graviers vosgiens, correspondant à la c. 8 de la stratigraphie du site (tab. 17, p. 88).

Fig. 66. Coupe stratigraphique d'un foyer de grillage (G-H, fig. 60).

Le contexte archéologique et les analyses chimiques ne laissent pas le moindre doute au sujet de la fonction de ces foyers : il s'agit d'un lieu de grillage du minerai lavé (chap. 5.1, p. 69). Le mode de mise en place (microstratifications) reste cependant énigmatique. L'alternance de minces lits de charbons avec des lits de pisolithes a été observée dans la plupart des foyers dégagés : il est donc plausible de penser qu'elle est liée soit au déroulement de l'opération de grillage (origine fonctionnelle) soit à des perturbations intervenues après le fonctionnement (origine sédimentaire ou pédogénétique).

6.2 Répartition spatiale des vestiges sur l'atelier

Le prélèvement du mobilier archéologique par m² sur toute la surface de l'atelier a permis de déceler des répartitions différentielles qui n'étaient pas toujours perceptibles au moment de la fouille.

Les 115m² fouillés ont livré une quantité considérable de matériel, notamment des scories coulées et des morceaux de paroi sablo-argileux. Le caractère d'urgence de la fouille conjugué au laps de temps très court qui lui était imparti ont impliqué des choix, dont celui de ne pas récolter certaines catégories de mobilier de manière exhaustive. Tel est le cas des charbons, des scories coulées, internes massives et internes rouillées, ainsi que des morceaux de paroi sableuse.

6.2.1 Les matières premières

Le charbon de bois

Le charbon de bois est réparti sur toute la superficie du site métallurgique. Il souligne en particulier la limite de la couche archéologique (c. 2). Malgré l'absence de tout vestige évident relatif à la fabrication du charbon sur le site, un stockage de ce matériau à côté des fourneaux n'est pas exclu, du fait de l'épaisseur parfois considérable du niveau charbonneux sous-jacent à la couche archéologique. Il est également présent dans toutes les unités stratigraphiques.

Le minerai

Le minerai est, après le charbon de bois, la deuxième matière première essentielle présente sur le site. Il a

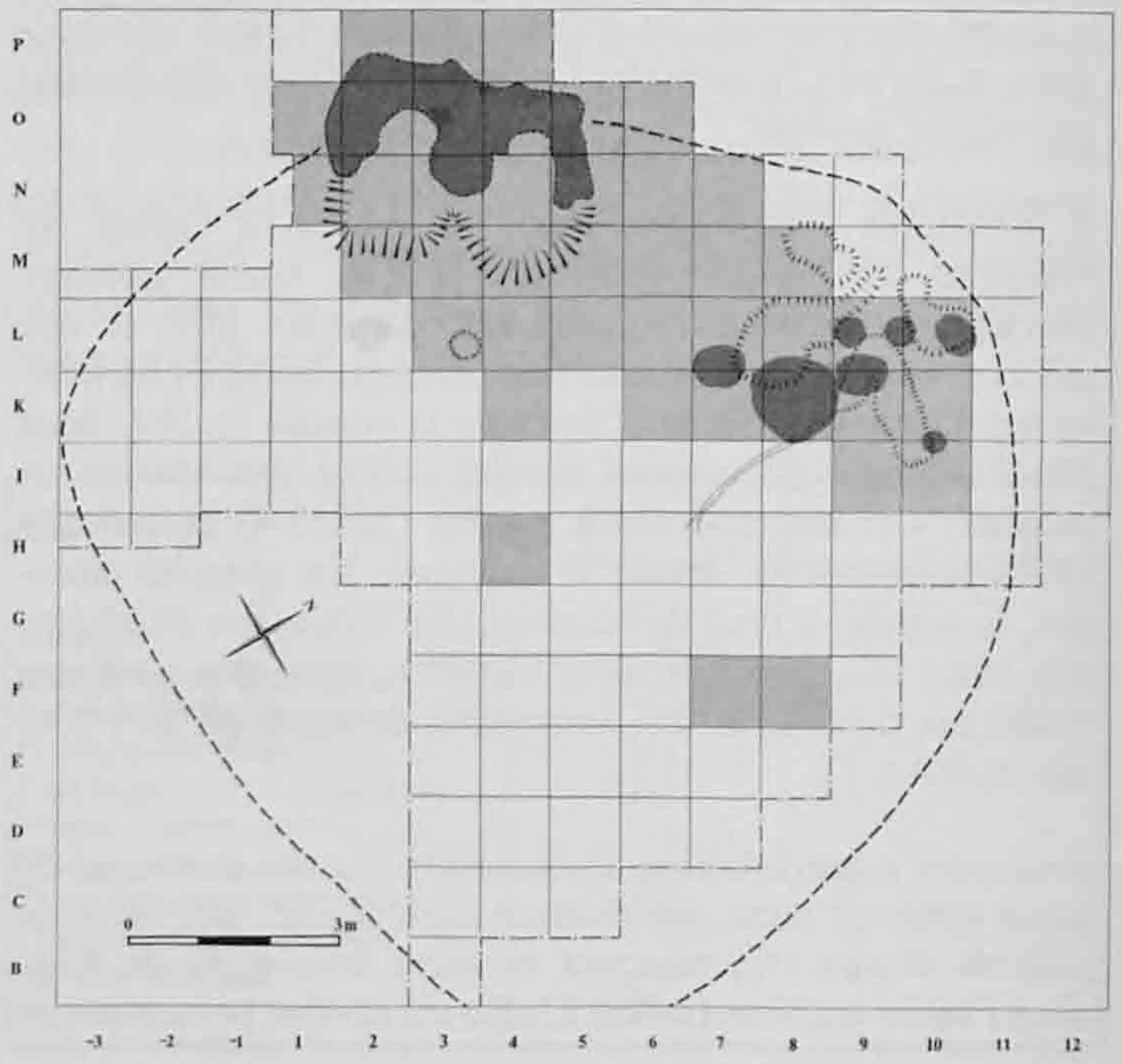


Fig. 67. Répartition spatiale du minerai.

été mis au jour dans la moitié nord de l'atelier (fig. 67). Il couvre la surface depuis l'arrière des fourneaux jusqu'à la limite orientale des foyers de grillage. La carte de répartition confirme que le minerai, une fois grillé dans les foyers, a été acheminé vers les fourneaux. Aucun vestige de stockage du minerai grillé n'a été mis en évidence sur le site.

Les concentrations relevées dans les carrés P1 à P4 permettent de postuler que le chargement des bas fourneaux s'est effectué par l'arrière. L'accès au gueulard des fourneaux encastrés dans la pente est le plus aisé à cet endroit (chap. 4.4, p. 64).

6.2.2 Les matériaux de construction

Les cailloux et blocs

De nombreux blocs calcaires et cristallins en position secondaire ont été enregistrés à l'emplacement des fourneaux, dans les niveaux de destruction. Ils faisaient sans aucun doute partie de l'élévation de la paroi lithique externe (chap. 6.1, p. 85). Ces blocs ont fait l'objet de relevés précis avec prises d'altitudes, mais n'ont pas été ramassés. Quelqu'uns étaient éparpillés à la surface de l'humus à la périphérie. Ils ne portaient pas de traces de taille, mais des marques rubéfiées dues à la chaleur.

Les scories en forme de calotte

Les scories en forme de calotte sont des résidus issus d'une autre étape de travail, ultérieure à celle de la réduction dans la méthode directe (chap. 4.1., p. 49).

Les pièces retrouvées sur l'atelier et ramassées de manière exhaustive se concentrent pour la plupart à l'emplacement des deux fourneaux (fig. 68). Il s'agit

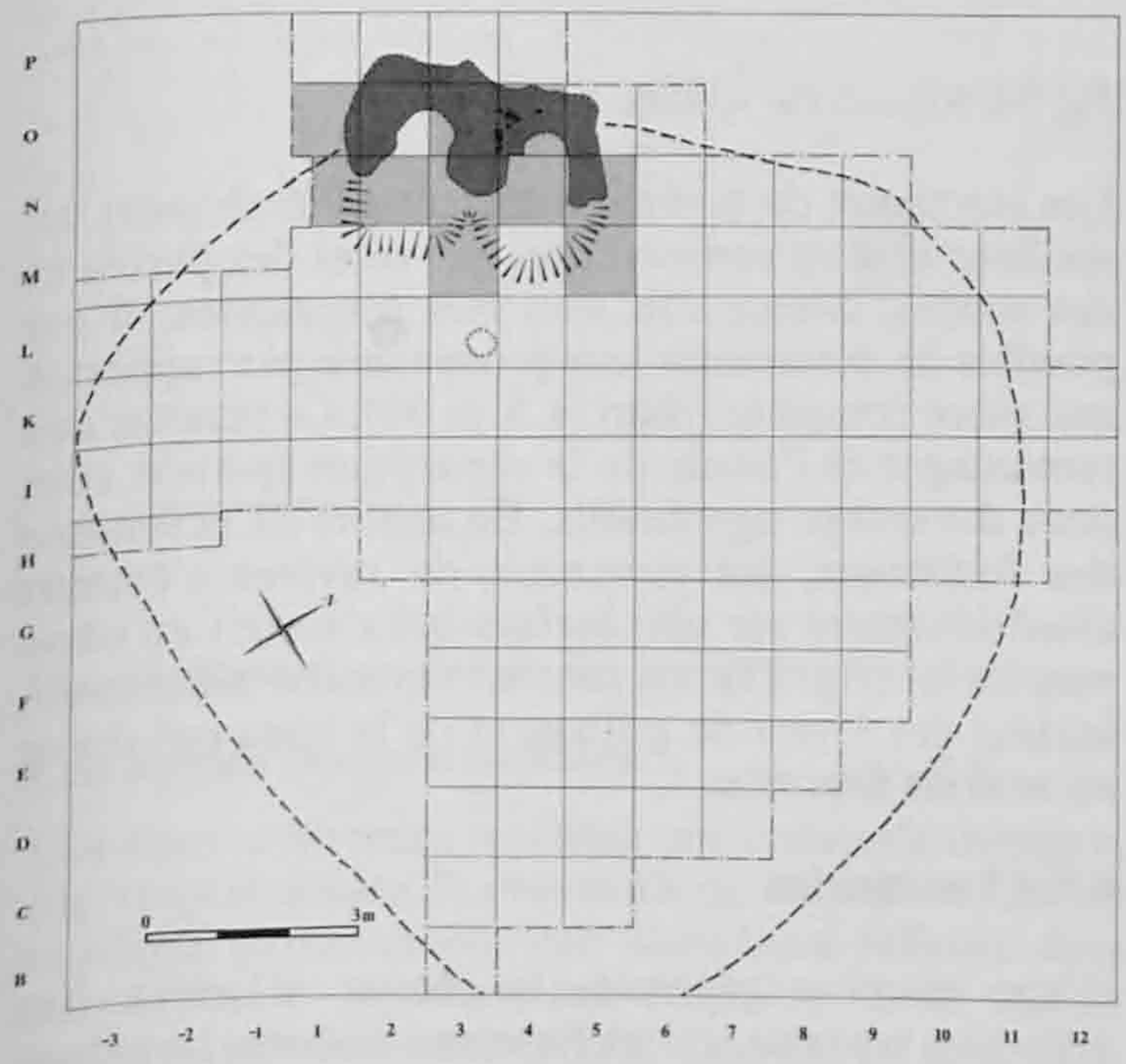


Fig. 68. Répartition spatiale des scories en forme de calotte.

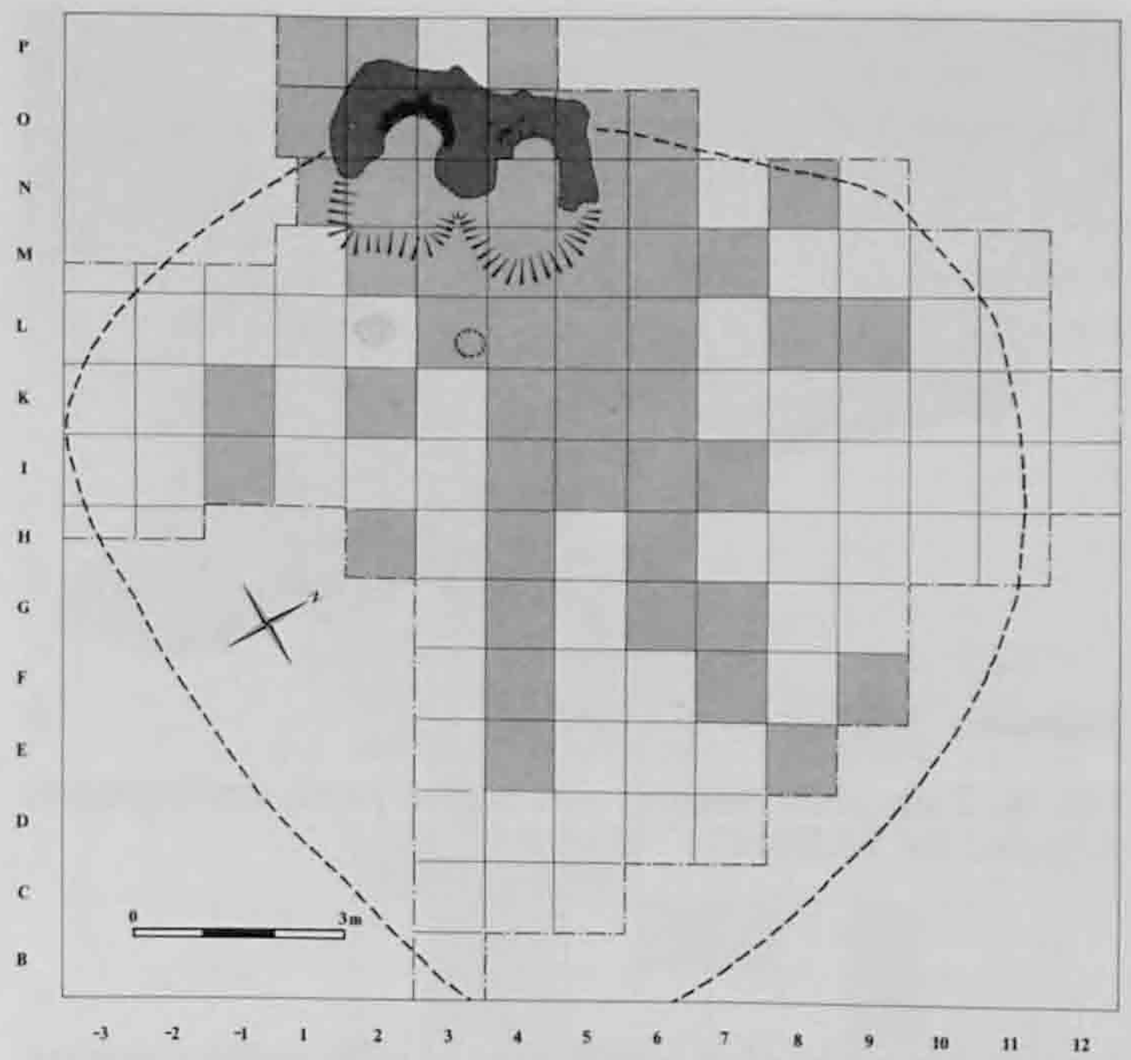


Fig. 69. Répartition spatiale des tuiles.

de 23 pièces entières ou fragmentées. Un nombre remarquable d'entre elles a été incorporé dans la paroi du bas fourneau 2. Elles ont été réemployées comme éléments de construction. Rien ne permet de penser que ces déchets ont été produits dans l'atelier des Boulies. En effet, aucun vestige significatif n'a été découvert lors de la fouille (chap. 8, p. 107).

Les tuiles

Les deux tiers des tuileaux récoltés sur le site proviennent des fourneaux et du remplissage des cuvettes (fig. 69). La majorité d'entre eux constitue le "hérisson" qui renforce le revêtement interne du fourneau 1.

Ces pièces non plus n'ont pas été fabriquées sur place, mais proviennent vraisemblablement d'un établissement romain des environs à l'état d'abandon.

Fig. 70. Tuile creuse (imbrex) remontée à partir des fragments de tuiles du "hérisson".

BIBL. PUBL.
NEUCHÂTEL
ET UNIV.

Fig. 71. Tuile plate (tegula) remontée à partir des fragments de tuiles du "hérisson".

Le site connu le plus proche est la villa gallo-romaine des Montoyes, qui se trouve à vol d'oiseau à un peu plus de 2km des bas fourneaux (Paccolat 1991).

Ce mobilier a été récolté dans sa totalité. Sa répartition à la périphérie indique les zones où les débris de fourneaux ont été rejetés.

Une trentaine de remontages a été effectuée entre les fragments de tuiles du "hérisson". Les artisans semblent avoir apporté de très gros fragments, voire même des pièces entières. Les tegulae en constituent la majorité, mais quelques imbrices sont également présentes. Plusieurs morceaux comportent une extrémité déformée par la chaleur, ce qui a limité les possibilités de remontage.

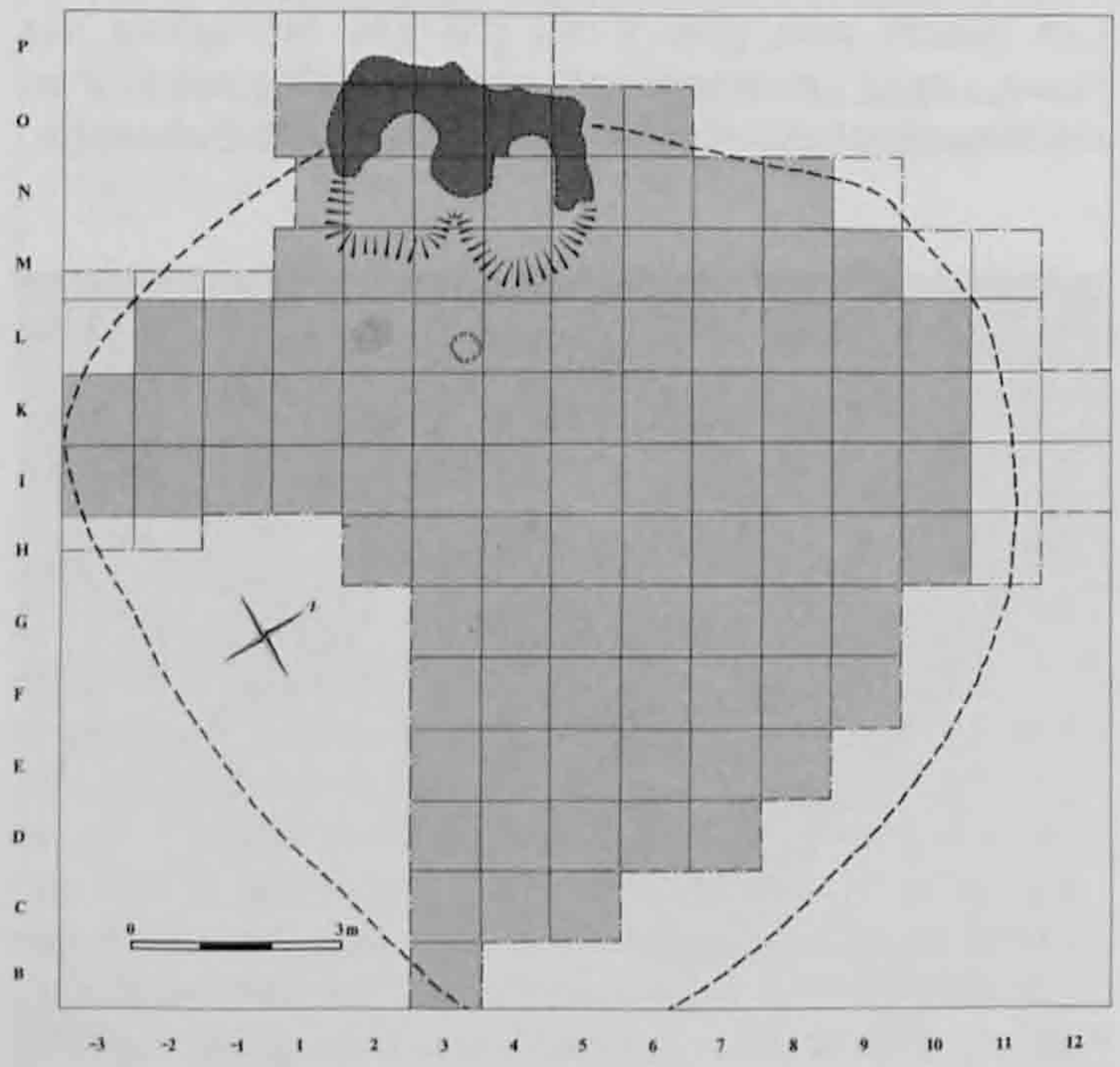


Fig. 72. Répartition spatiale des morceaux de paroi sableuse et des scories coulées.

Le revêtement interne sablo-argileux (paroi sableuse)

Répartis sur toute la surface du site, les morceaux de revêtement interne du fourneau représentent la quatrième catégorie des éléments constructifs (fig. 72). Elle est la plus fournie. Les fragments se sont plus ou moins bien conservés en fonction de la chaleur qu'ils ont subie. Ceux qui se trouvaient les plus éloignés de la source de chaleur sont extrêmement friables et ont fortement souffert des divers phénomènes d'altération : ils se sont fréquemment désagrégés au moment de leur dégagement, ce qui rend une étude quantitative impossible. La plupart des fragments récoltés ont au moins une face scorifiée.

6.2.3 Les éléments de soufflerie

Les tuyères

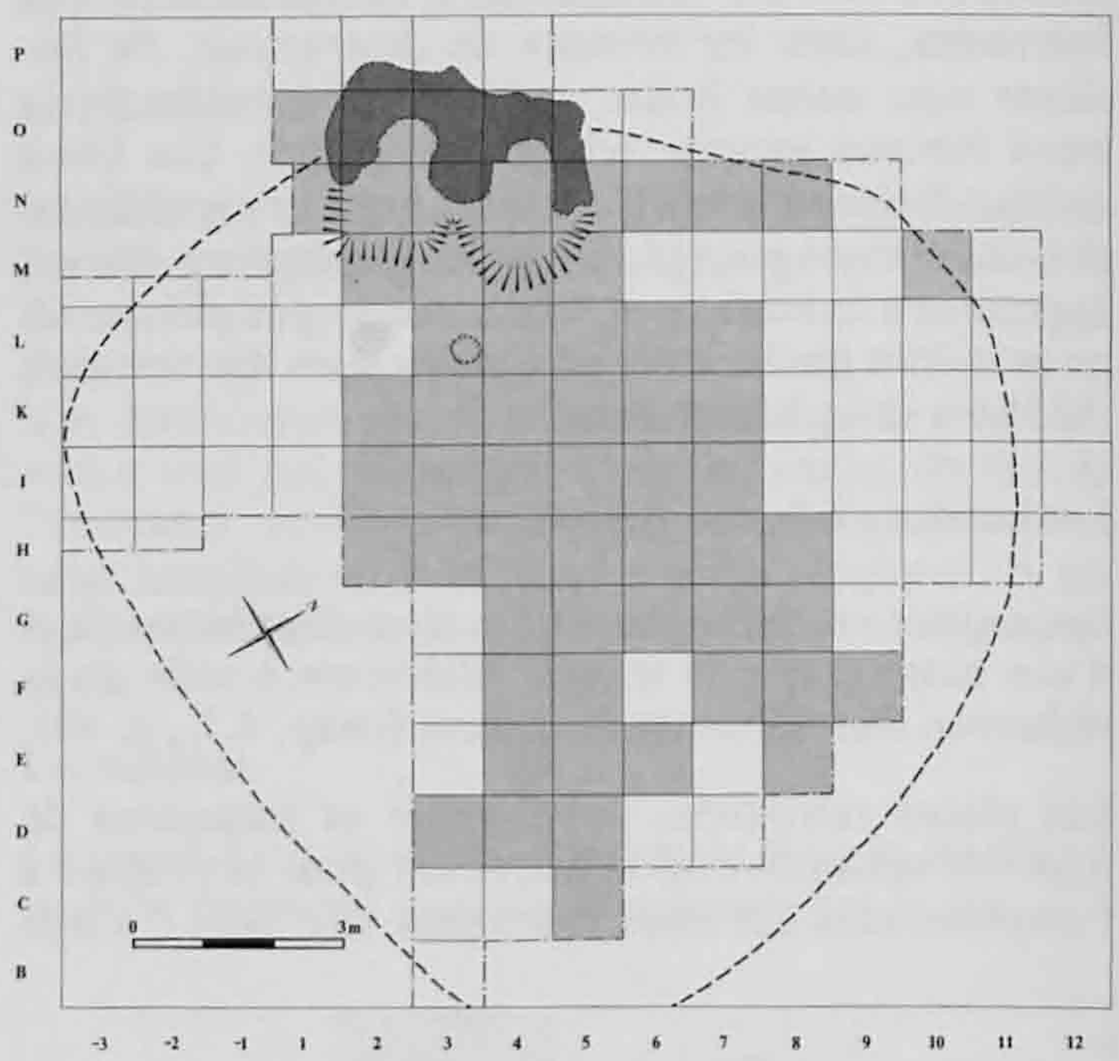


Fig. 73. Répartition spatiale des tuyères.

Les morceaux de tuyères montrent généralement un meilleur état de conservation que celui des parois et des scories. Même s'ils sont très fragmentés, il est possible de déterminer leur provenance par rapport à une pièce complète (chap. 4.3, p. 56). Le résultat des remontages et l'étude de la répartition spatiale sont donc davantage significatifs. En dehors du périmètre des fourneaux, les morceaux de tuyères s'étalent essentiellement sur une surface qui s'élargit en cône vers l'aval (fig. 73). Ils sont en revanche absents du secteur des foyers de grillage et de la zone sud-ouest en aval du fourneau 1.

6.2.4 Les résidus

D'une manière générale, la récolte sélective des différents types de scories (internes massives, internes rouillées et coulées) restreint la pertinence des

données de répartition spatiale. Néanmoins, le ramassage exhaustif par unité stratigraphique dans la zone des bas fourneaux valorise certaines observations relatives à la répartition de ces résidus à la périphérie.

Les scories coulées

Les scories coulées sont les objets les plus fréquents sur le site. Elles ont été récoltées de façon sélective, mais non arbitraire, c'est-à-dire que les concentrations visibles sur le terrain ont généralement fait l'objet de prélèvements plus importants. Dans la mesure du possible, toutes les scories présentant une variation de faciès ou une morphologie particulière ont été récoltées. La carte de répartition est à peu près identique à celle des fragments de paroi sableuse (fig. 72). Seul le secteur sud-ouest n'a fourni qu'une faible quantité de scories coulées.

Les scories internes massives

Les scories internes massives sont surabondantes dans la zone des fourneaux (fig. 74). A la différence des scories internes rouillées, elles ne sont pas recyclables avec les techniques mises en oeuvre à l'époque (chap. 5.5, p. 82). Quelqu'unes ont cependant été utilisées dans la construction du fourneau 2. Ce réemploi accentue en partie leur concentration dans les mètres carrés des fourneaux.

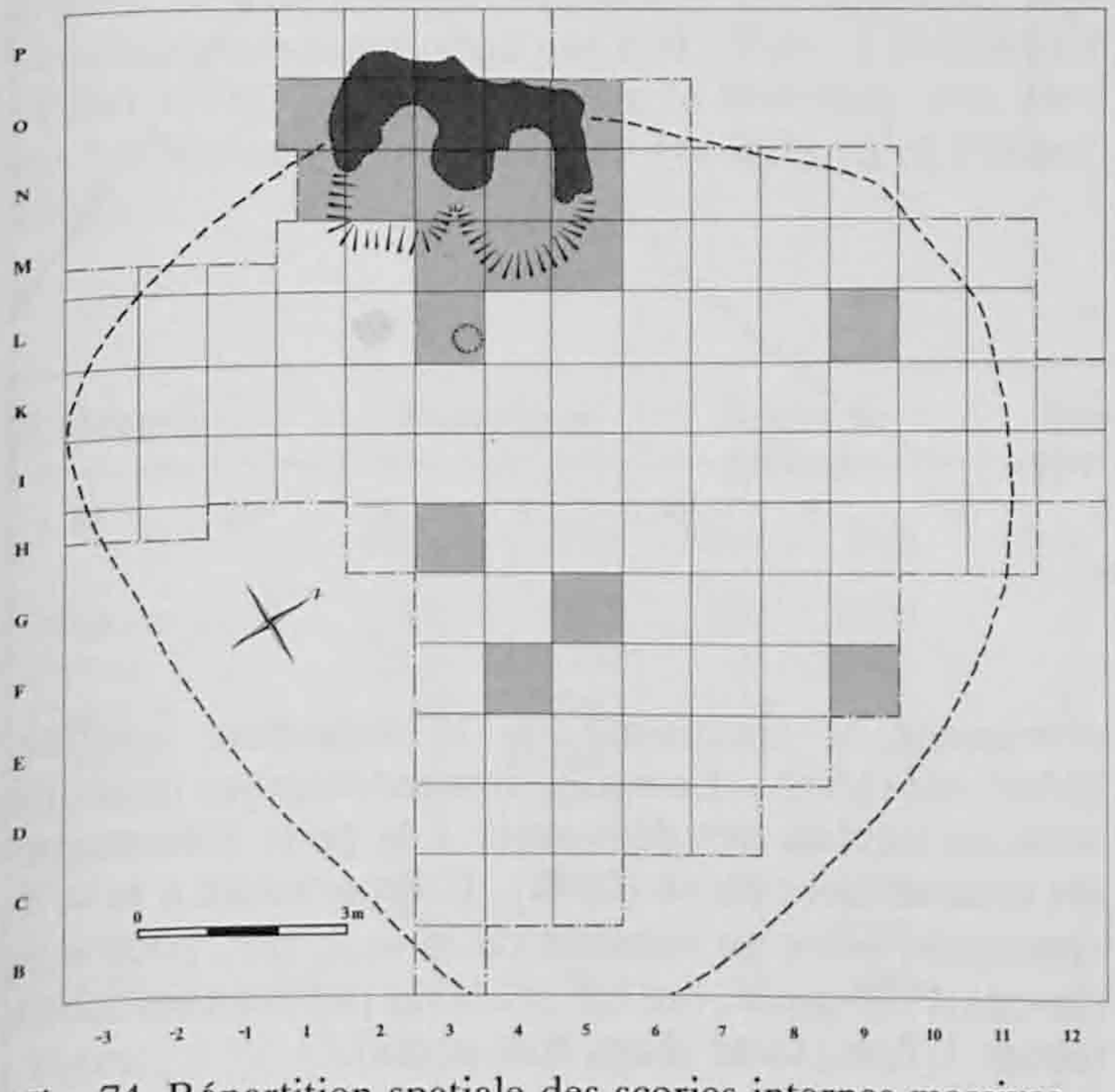


Fig. 74. Répartition spatiale des scories internes massives.

Les scories internes rouillées

Les scories internes rouillées ont vraisemblablement été recyclées dans le processus de réduction. Ce fait explique partiellement leur abondance relative dans le périmètre de fourneaux (fig. 75). Leur nature (minerai partiellement réduit) n'est pas en contradiction avec un tel recyclage. Le niveau supérieur du dernier fonctionnement du bas fourneau 2 contenait 4kg de ces scories. Il reflète la vidange du fourneau à la fin de l'opération.

A la périphérie, la présence des scories rouillées semble se limiter à la zone en aval des fourneaux. Leur absence totale dans la zone sud-ouest reflète certainement la réalité.

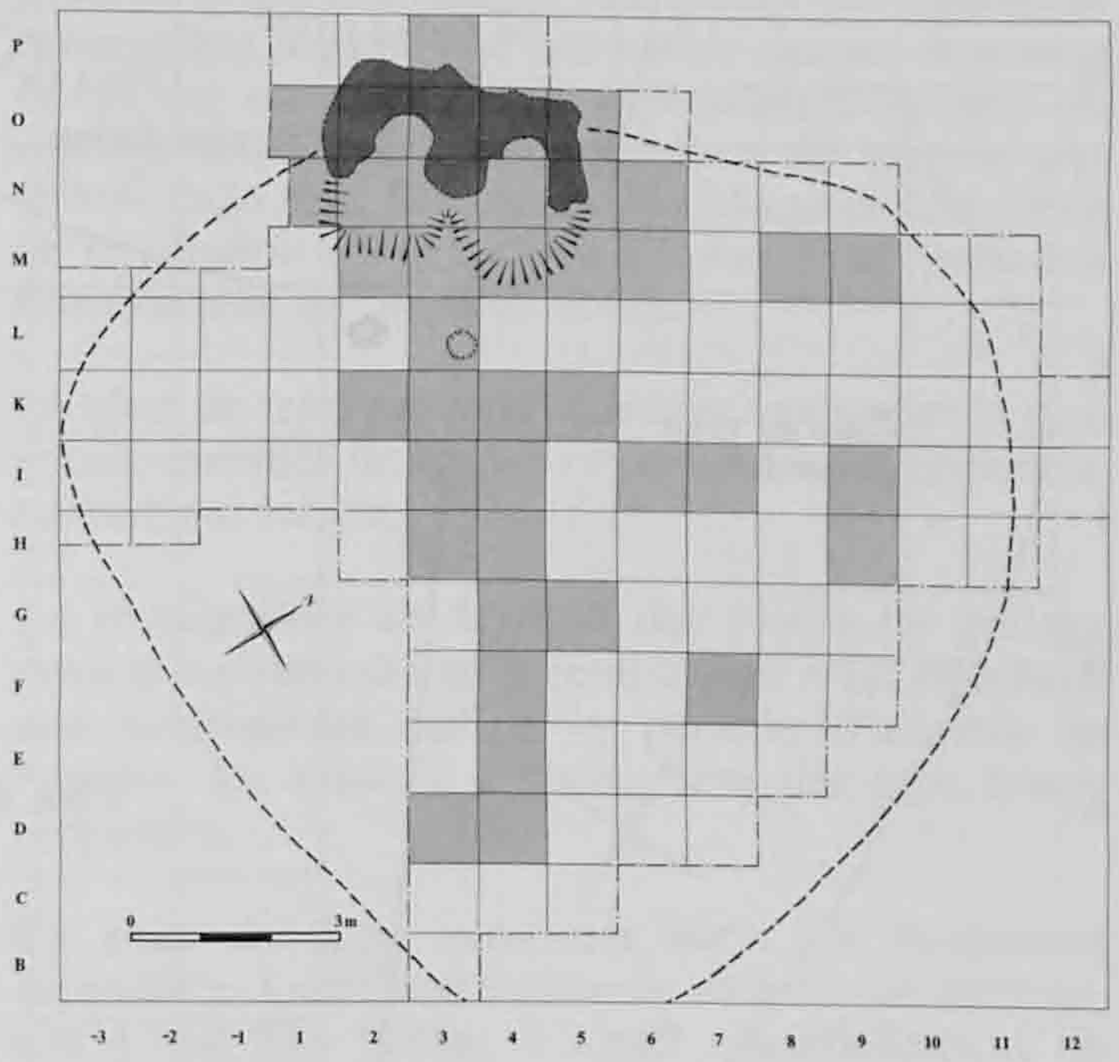


Fig. 75. Répartition spatiale des scories internes rouillées.

6.2.5 Les pièces en fer

Mis à part un morceau de fer interprété comme produit éventuel du processus de réduction (chap. 5.3, p. 71), quatres pièces ferreuses fortement corrodées ont été récoltées. Elles sont toutes positionnées soit dans la couche 1, soit au sommet de la couche 2 : elles ne datent donc pas obligatoirement de la période d'activité de l'atelier. Il s'agit de deux clous, longs de 3.5 et 6.3cm, d'un morceau plat à trou en forme de segment de cercle (dimensions : 4 x 3cm) et d'une pièce massive allongée (15cm), d'une épaisseur de 1 à 1.5cm. Les clous proviennent peut-être de constructions rudimentaires en bois (chap. 6.3). En revanche, la fonction des deux autres objets demeure hypothétique, malgré les radiographies dont ils ont fait l'objet. Leur morphologie est en effet fortement défigurée par la corrosion. La pièce à trou peut correspondre à un fragment de boucle de ceinture (mérovingienne ?) et l'objet allongé, à un outil quelconque.

6.3 Synthèse

De façon générale, la zone des fourneaux contraste avec les alentours : plus de la moitié des éléments récoltés (56% du poids) provient de cette zone qui

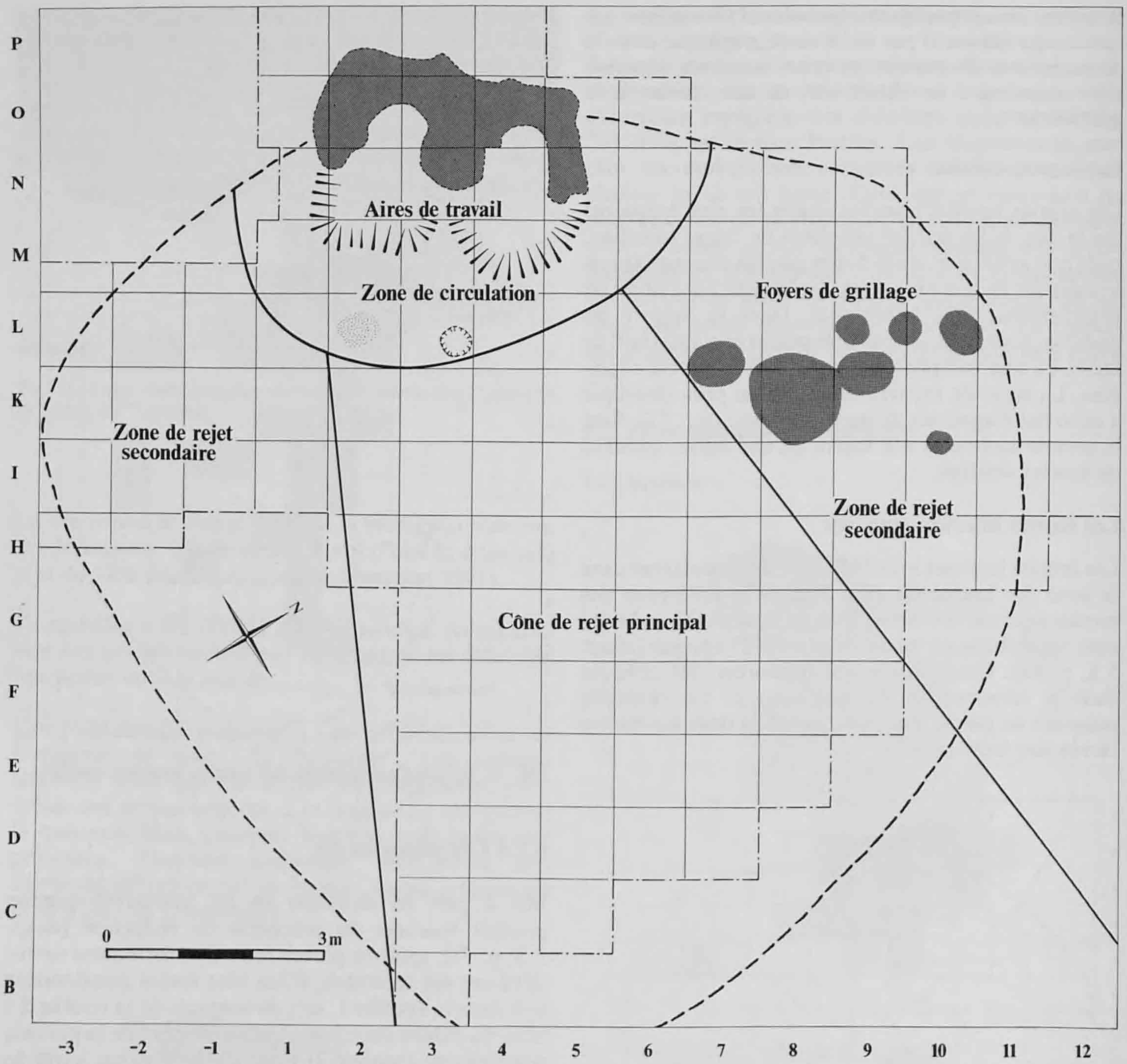


Fig. 76. Structures et organisation spatiale du site métallurgique.

Catégorie	Utilisation	M²	Rép.
Charbon de bois	matière première	110	oui
Minerai	matière première	42	oui
Scories en calotte	construction	10	oui
Paroi sableuse	construction	100	non
Tuiles	construction	49	oui
Tuyères	soufflerie	59	oui
Scories internes rouillées	résidus	39	non ?
Scories internes massives	résidus	18	non ?
Scories coulées	résidus	100	non
Pièces en fer	produit/objet	4	--

Rép. : répartition interprétable

Tab. 18. Répartition spatiale et attribution fonctionnelle du mobilier archéologique.

représente le cinquième de la superficie fouillée (24m² sur 115m²). Le matériel archéologique recueilli dans les déblais des décapages à la pelle mécanique est relativement élevé (20%). Il appartenait à la c. 1 remaniée, voire au sommet de la c. 2, qui, pour des raisons d'efficacité, ont été déblayés préliminairement (chap. 1.7, p. 16 et chap. 6.1, p. 85).

Il convient cependant d'apporter quelques nuances à cette vision globale. Même si la répartition spatiale du mobilier n'est significative pour aucun type de scories, ni pour les fragments de paroi sableuse, il est possible de donner un sens à la répartition des éléments tels que charbon, minerai, scories en calotte, tuiles et tuyères (tab. 18).

L'extension spatiale du minerai signale deux aires de travail contiguës : celle des foyers de grillage et celle des deux bas fourneaux.

Quant aux éléments qui font partie intégrante de la construction des bas fourneaux (tuiles, scories en calotte et fragments du revêtement interne), leur attribution ne fait aucun doute.

80% des tuiles et 90% des scories en calotte ont été mis au jour dans la zone des fourneaux. Il en résulte que la majorité était encore en place ou du moins dans les couches de destruction des structures. Les calottes prélevées en dehors de la zone des fourneaux sont issues des déblais du décapage mécanique, ce qui confirme les importants remaniements de la couche superficielle (c. 1).

La zone d'activité autour des fourneaux se subdivise en deux parties : les cuvettes qui forment l'aire de travail devant chaque fourneau et la zone de circulation qui entoure les fourneaux (fig. 76). La première englobe les éléments constructifs du fourneau 2 à l'abandon et les remblais à l'entrée du fourneau 1. La seconde contient une moins grande quantité de matériaux.

Un trou de poteau est situé dans la zone de circulation en L3. Il peut être l'indice d'une installation rudimentaire (toit) destinée à protéger les aires de travail devant chaque fourneau. Un exemple très semblable est mentionné par P.-L. Pelet à Bellaires 3 (Pelet 1973). Le fait de mettre le fourneau sous abri est archéologiquement attesté (Motyková et Pleiner 1987).

Une zone d'intense rubéfaction (surface : 0.25m²), bien délimitée, était visible en L2. L'absence de mobilier archéologique ou de structures évidentes à ses abords ne permet pas de l'interpréter précisément. Elle peut correspondre à l'emplacement d'un petit foyer domestique ou artisanal.

La plupart des tuyères ont été trouvées en dehors du périmètre des fourneaux. Les pièces principales se répartissent pour 80% d'entre elles sur une trentaine de mètres carrés, lesquels représentent le cône de rejet principal. La faible présence de tuyères aux abords de la zone des foyers de grillage et dans l'aire de circulation confirme par ailleurs l'interprétation fonctionnelle de ces deux zones.

Le cône de rejet principal contient également la plus grande quantité de scories coulées et de fragments de revêtement interne.

La stratigraphie de la zone des foyers de grillage montre clairement que le remblayage n'est intervenu que tardivement durant la période d'activité de l'atelier. En effet, il a rendu cinq des sept foyers inopérants.

La zone de rejet sud-ouest enfin est également secondaire. La concentration de mobilier archéologique y est très faible; il s'agit essentiellement de morceaux de revêtement interne.

En conclusion, la répartition des catégories d'objets dans les différentes zones du site correspond à l'organisation fonctionnelle de l'atelier. Les déplacements sont réduits au minimum, les lieux de circulation ne

Catégorie	Fourneaux		Foyers de grillage		Zone de rejet ouest		Cône de rejet principal		Déblais		Totaux	
	Nbre	Pds	Nbre	Pds	Nbre	Pds	Nbre	Pds	Nbre	Pds	Nbre	Pds
Minerai	261	3885	191	2290	0	0	21	295	122	2750	595	9220
Parois	1338	128100	78	12780	9	1725	521	77255	368	49400	2314	269260
Calottes	22	20980	0	0	0	0	0	0	4	2720	26	23700
Coulées	--	162140	--	7760	-	0	--	50905	--	69050	--	289855
Internes	61	28915	1	275	0	0	7	4630	28	10240	97	44060
Rouillées	--	28315	--	1210	-	0	--	3680	--	6645	--	39850
Tuiles	361	54900	10	1185	1	190	45	6075	83	6520	500	68870
Tuyères *	292	14600	24	1200	0	-	412	20600	273	13650	1001	50000
Eponges	3	960	1	780	0	0	0	0	0	0	4	1740
Totaux	2338	442795	305	27480	10	1915	1006	163440	878	160975	4537	796555
%	51.5	55.6	6.7	3.5	0.2	0.2	22.2	20.5	19.4	20.2	100	100

Fourneaux : P1 à L5 / M6
Foyers de grillage : L6 à H11 / I12
Zone de rejet ouest : M-3 à H2 / I1
Cône de rejet principal : K2 à A3 / C5 / D7 / F9

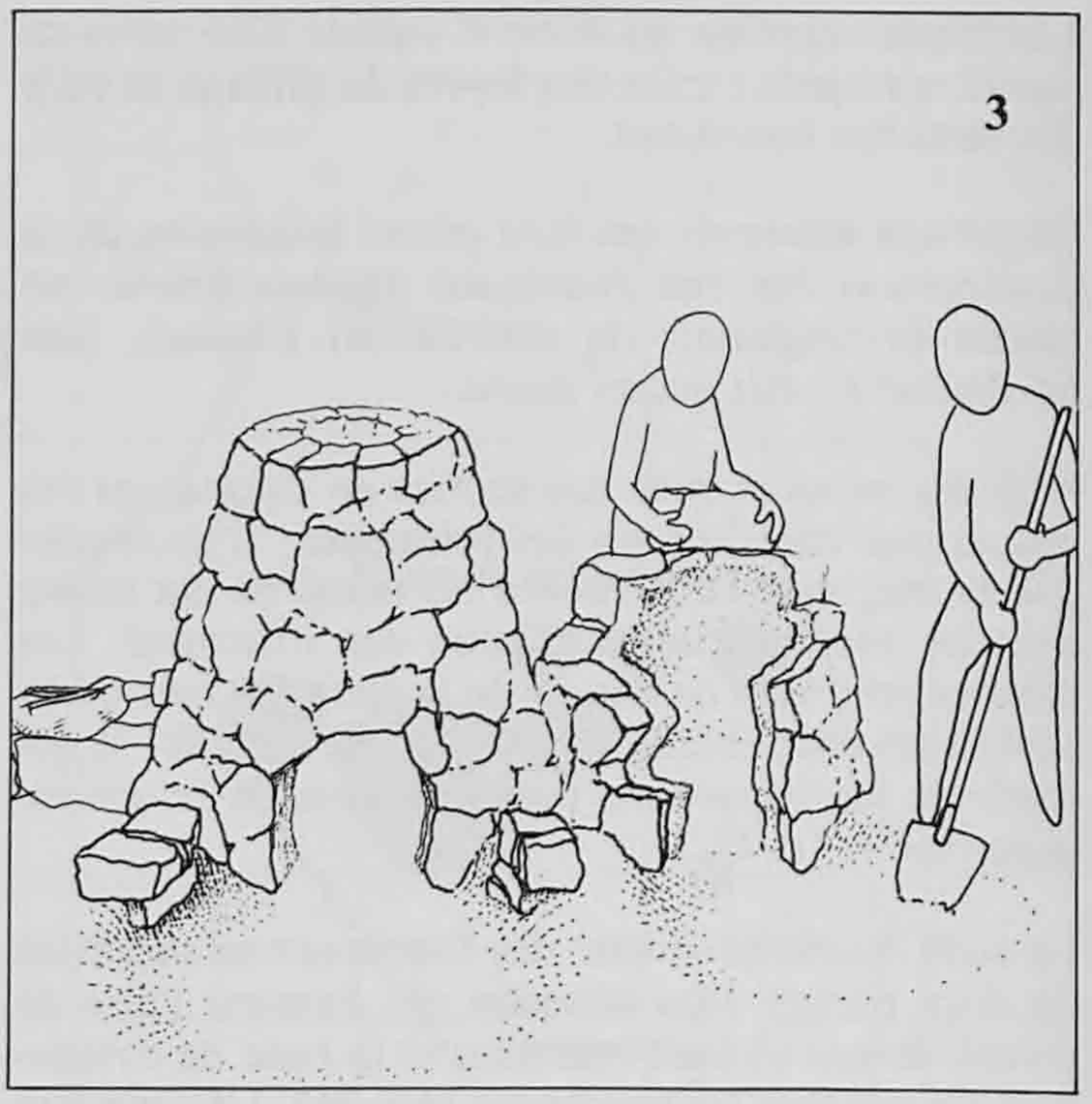
* le poids des tuyères est approximatif

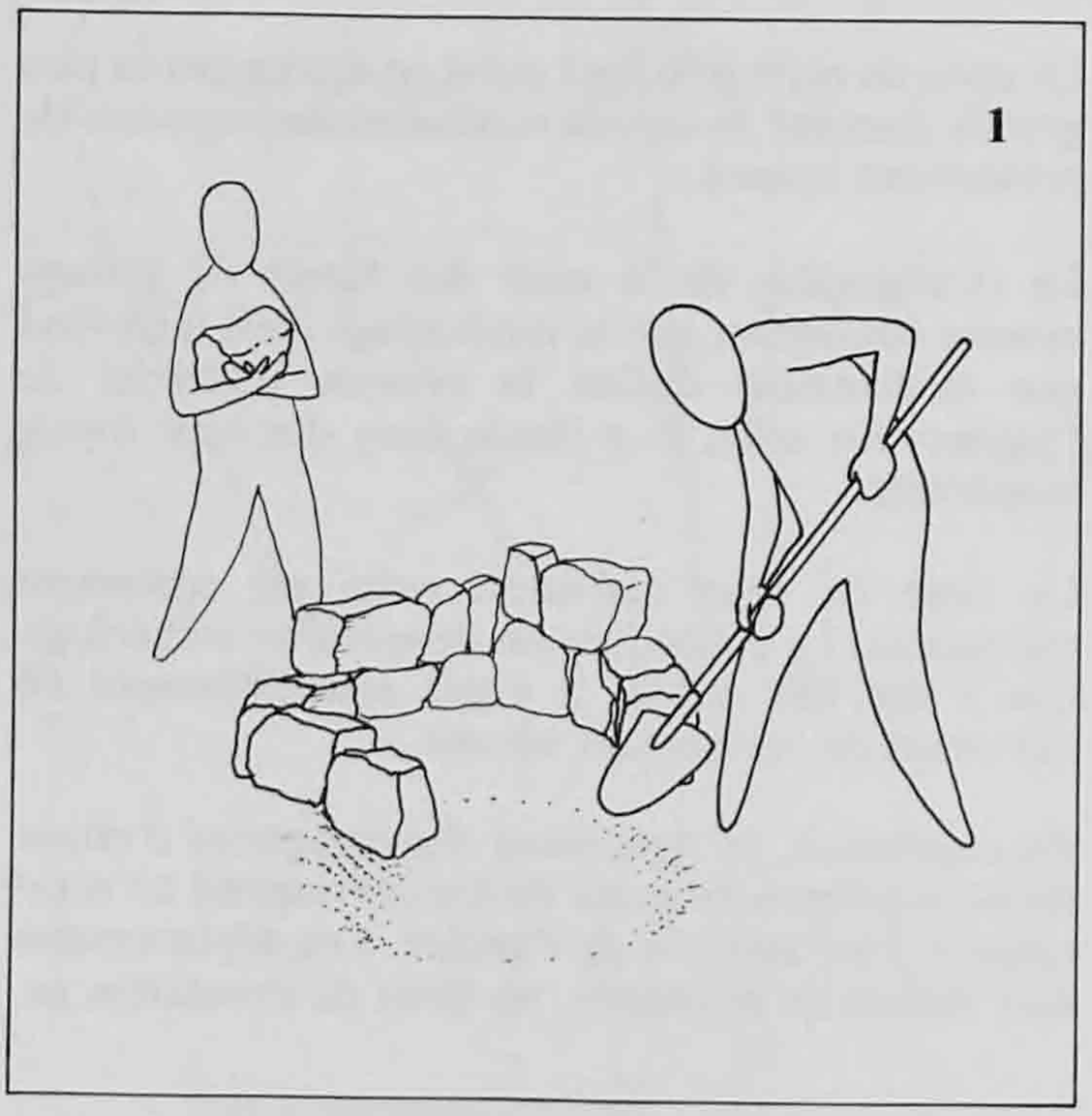
Tab. 19. Poids du mobilier archéologique récolté sur l'atelier des Boulies (pds : poids en gr; nbre : nombre de fragments, pour le minerai : nombre de pisolithes de ⌀ > 1cm).

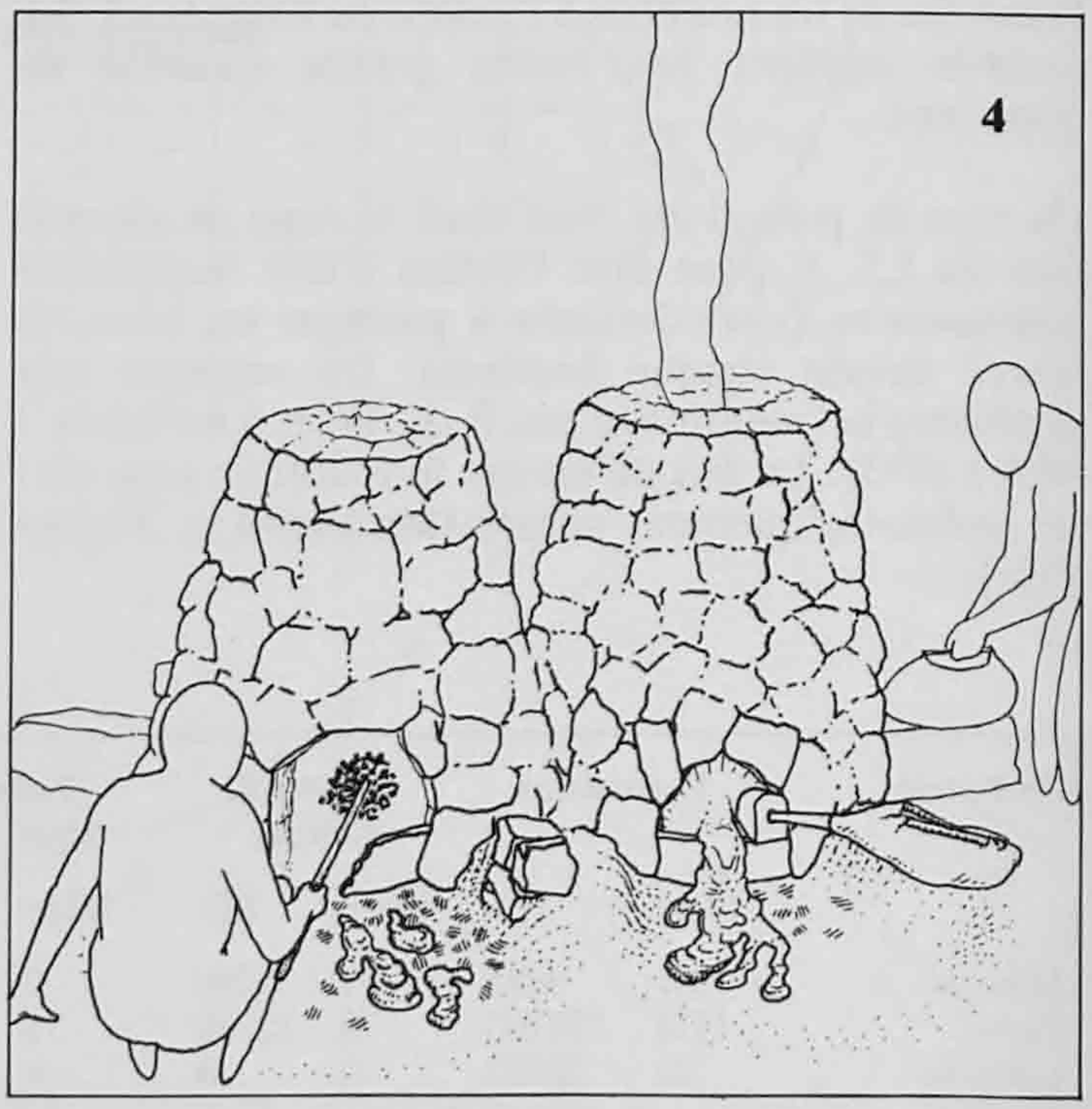
sont pas encombrés et les masses de déchets sont évacuées en contrebas de la légère plate-forme des fourneaux.

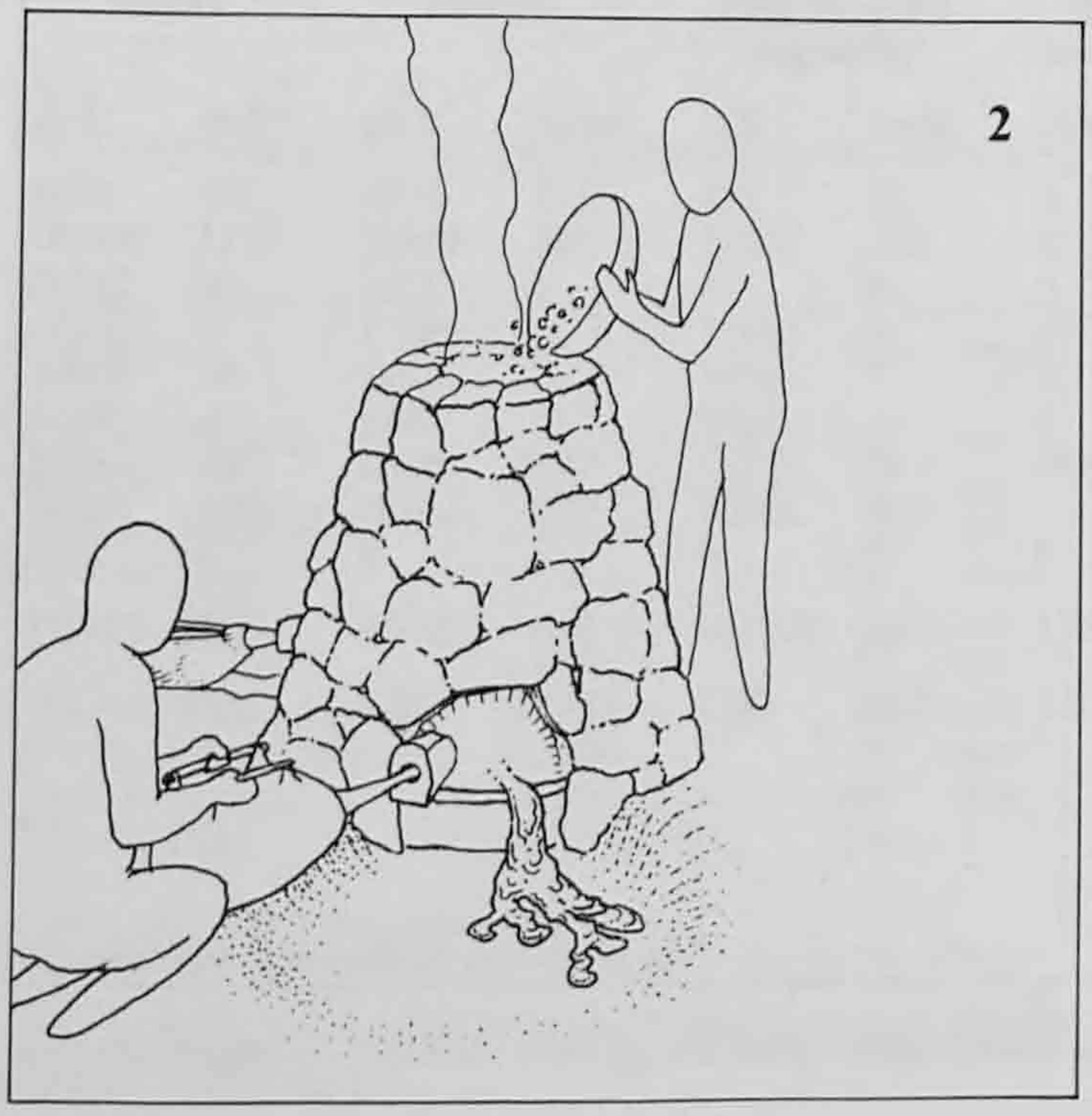
6.4 Histoire de l'atelier

La mise en commun des données architecturales et des données stratigraphiques, telles qu'elles ont été présentées dans les chapitres précédents, permet de retracer l'histoire du fonctionnement des deux fourneaux, depuis leur construction jusqu'à leur abandon, et de détailler les transformations qu'ils ont subies.



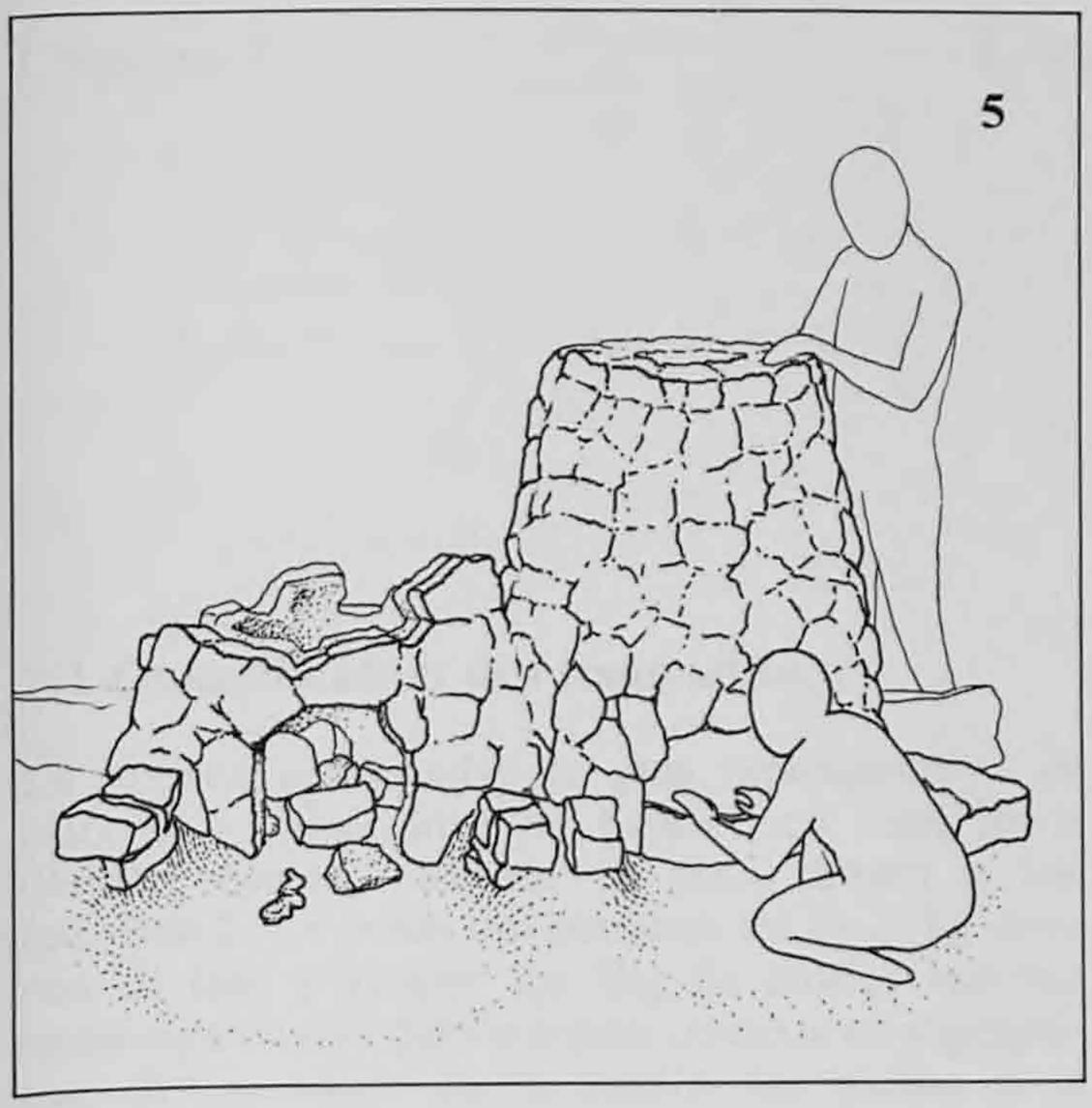


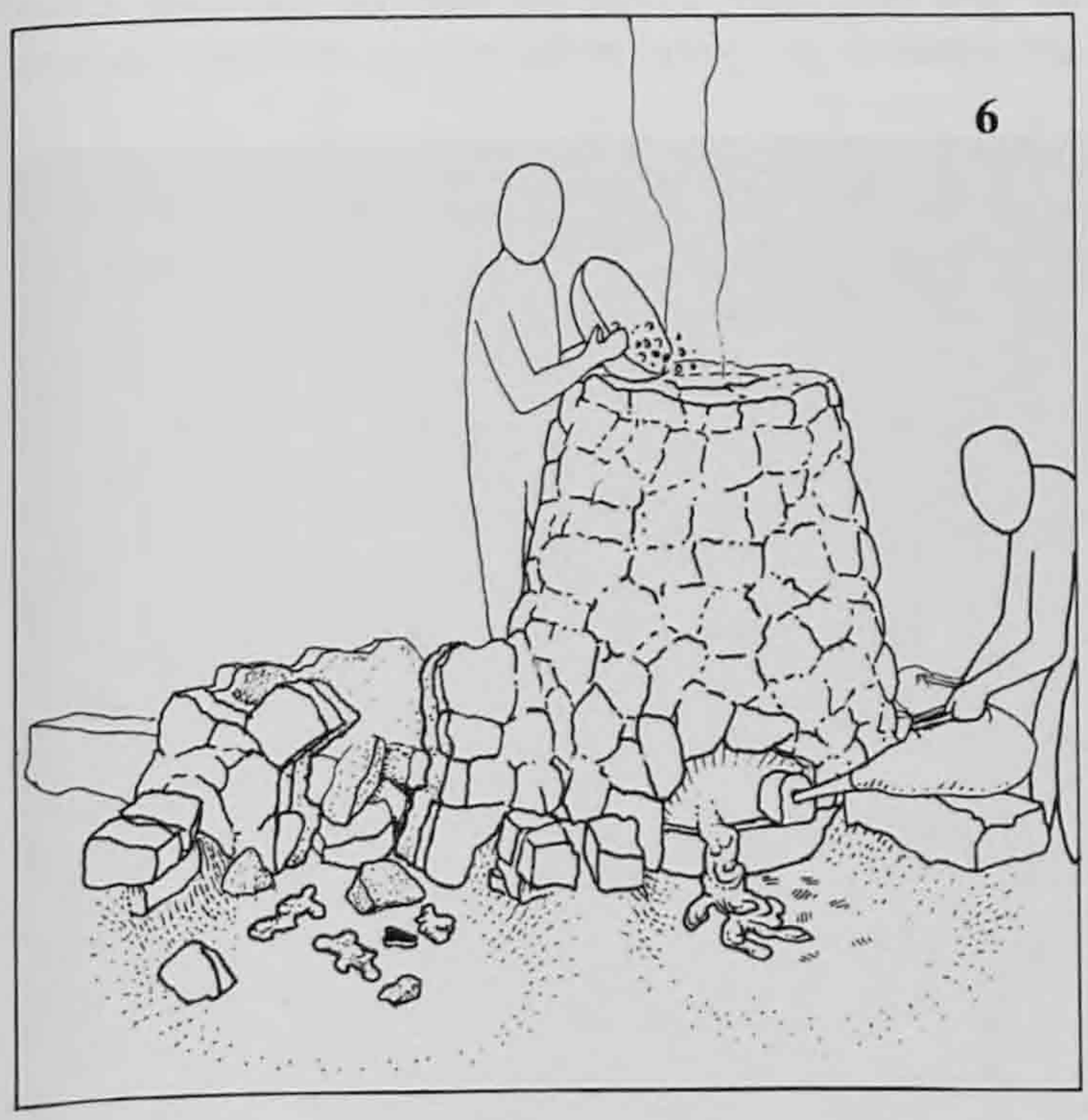




Il faut toutefois être conscient que la seule image complète dont nous disposions est celle du dernier état du fourneau 2 avant son abandon et qu'elle reflète donc uniquement la dernière phase d'utilisation.

Les vestiges architecturaux démontrent que le bas fourneau 1 a été construit avant le bas fourneau 2 (1). Nous ignorons le nombre de fonctionnements de ce premier fourneau ainsi que le nombre de réfections qu'il a connues avant que le second ne soit construit (2). Le rajout des murets de la cuvette est probablement en relation avec la construction du second


5

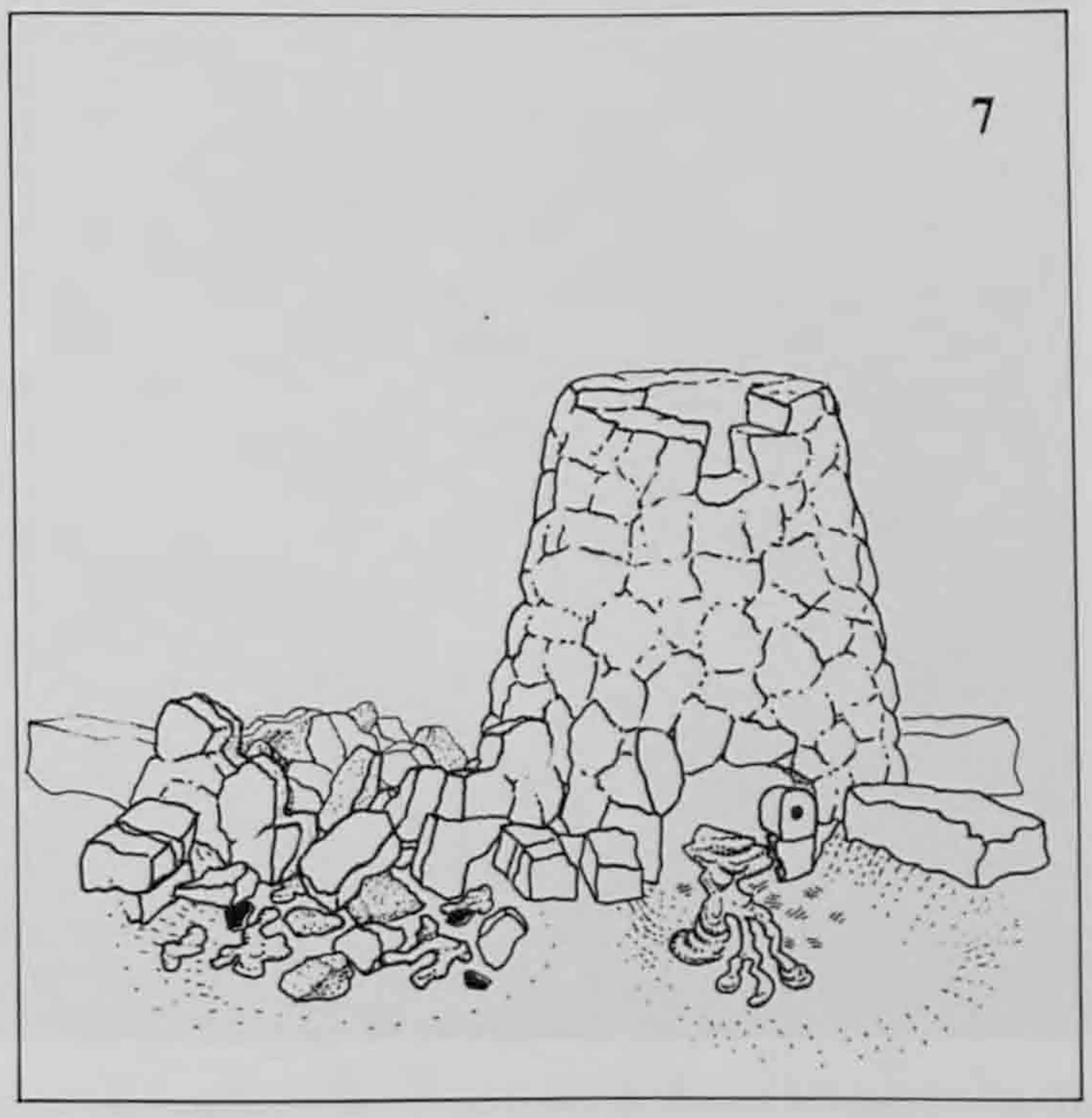

6

fourneau : on délimite ainsi l'aire de travail à l'entrée du fourneau 1 et l'on soutient conjointement à droite la superstructure du fourneau 2 (3). La première phase de fonctionnement du second fourneau parle pour la coexistence des deux installations : elles devaient fonctionner soit en parallèle, soit en alternance (4). En effet, le revêtement interne gauche du fourneau 2 est d'une faible épaisseur (0.2m) et devait trouver appui contre la paroi en élévation du premier fourneau. Sa bordure lithique devait donc reposer sur la partie extérieure de l'assise du bas fourneau 1.

Par la suite, le fourneau 1 a été abandonné, tandis que le fourneau 2 continuait de fonctionner, comme on peut le lire dans le remplissage des deux structures et des cuvettes. Dans le fourneau 1, les couches qui témoignent de son dernier fonctionnement sont surmontées par une couche de destruction qui ne remplit pas la totalité de la cuvette. Cette dernière a servi de zone de rejet, alors que le fourneau 2 était encore en activité.

L'importante réfection de la paroi du second fourneau a dû intervenir après la destruction du fourneau 1 (5). Il est plausible que les bordures lithiques de la cuvette ont été rajoutées à ce moment-là : le fourneau 2 devient dès lors une construction à part entière (6).

L'abandon du fourneau 2 est marqué distinctement dans la stratigraphie du remplissage. Après la dernière phase de fonctionnement, dont témoignent les coulées successives de scorie trouvées en place à l'ouverture, le fourneau a été vidé afin de faciliter l'extraction de l'éponge. La couche de scories rouillées qui coiffe les coulures en est la preuve. Ensuite, le fourneau désaffecté s'est écroulé progressivement, remplissant de blocs la totalité de la cuvette. L'espace intérieur, quant à lui, a été comblé par les éléments de paroi sableuse. La tuyère frontale s'est trouvé écrasée sous la masse des éboulis. Les artisans ont abandonné le fourneau 2 sans récupérer autre chose que le soufflet et les outils, dont nulle trace ne nous est parvenue (7).


7

Chapitre 7

L'exploitation : approche quantitative

7.1 Quantification des trouvailles

La donnée quantitative la plus représentative du matériel archéologique de l'atelier est celle de la dernière coulée retrouvée en place devant le bas fourneau 2. Le poids des coulures est de 30kg environ. Il faut y ajouter les 5kg de scories internes massives trouvées dans le même contexte stratigraphique. Si l'on admet que la totalité des résidus de la dernière opération du fourneau a été récoltée, leur poids doit être de plus ou moins 35kg. Les 4kg de scories rouillées en relation avec la vidange du fourneau sont associés stratigraphiquement, mais n'entrent pas en compte pour les calculs de fonctionnement de par leur nature (chap. 5.6, p. 83).

Le calcul de l'ensemble des résidus produits sur le site se base sur les valeurs obtenues pour les mètres carrés D4 (58kg), E7 (45kg) et K4 (38kg) dont les scories ont été quantifiées. L'épaisseur moyenne de la couche archéologique dans les trois mètres carrés est de 15 à 20cm. Il est donc possible d'établir un rapport de proportion entre l'épaisseur moyenne de la couche (par 10cm) et le poids des scories quantifiées (en kg).

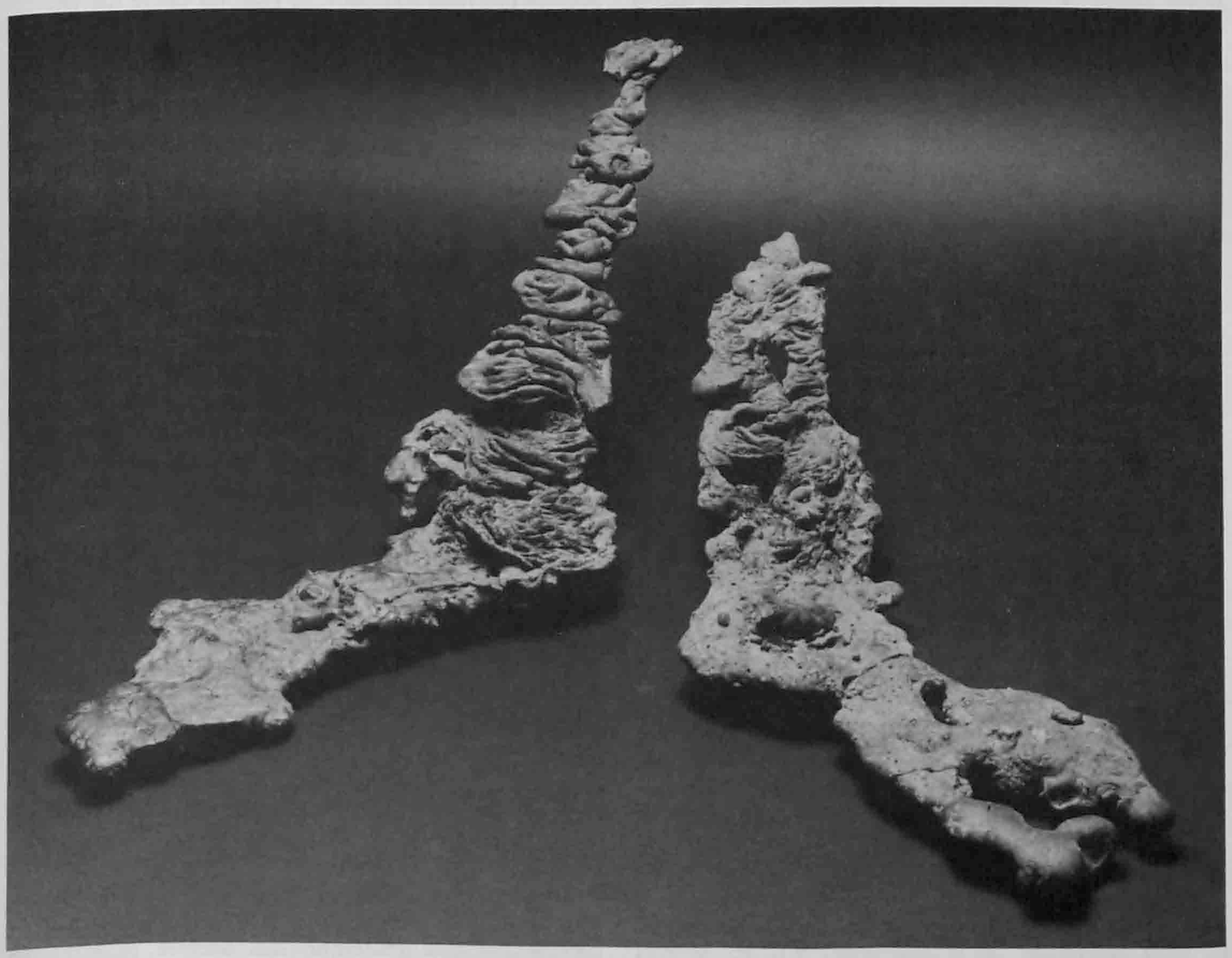


Fig. 77. Dernière coulée du bas fourneau 2. Coulures n° 411 (à gauche, longueur : 50cm) et n° 403 (à droite, longueur : 40cm).

Il est de 1 pour 2 en E7, de 1 pour 3 en K4 et de 1 pour 4 en D4. Si l'on tient compte d'une moyenne de 1 pour 3, on peut donc dire que sur une épaisseur de 10cm, on récolte environ 30kg de scories.

Les 114m² fouillés se répartissent de la manière suivante :

M²	Caractérisés par	Kg / épaisseur moyenne
50	beaucoup de scories	60 / 20cm
25	beaucoup de scories	30 / 10cm
30	moins de scories	20 / 10cm
8	bas fourneaux	50 / --
100	déblais de décapage	10 / 5cm

5500 kg ± 500 kg de scories en tous genres ont donc été produits dans l'atelier des Boulies.

Certains facteurs qui interviennent dans cette estimation tendent à accroître ce résultat; d'autres au contraire ont tendance à le diminuer. La variation du rapport entre le poids et l'épaisseur moyenne est le point faible de l'estimation. A notre avis, les différents phénomènes s'équilibrent et il est suffisant de tenir compte d'un facteur d'erreur de plus ou moins 10%.

Le calcul de proportion entre les différents types de scories (coulées, internes massives et internes rouillées) peut se faire de deux façons, soit au niveau de l'ensemble du dernier fonctionnement du bas fourneau 2, soit au niveau des quantités de résidus récoltés sur l'atelier :

Catégorie	Bas fourneau 2		Atelier		Déblais	
	kg	%	kg	%	kg	%
Scories coulées	30	77	290	77.5	69	80.5
Scories internes massives	5	13	44	12	10	11.5
Scories internes rouillées	4	10	40	10.5	6.6	8

La cohérence entre les deux premiers ensembles est frappante. Néanmoins, il ne faut pas négliger que les valeurs sont quelque peu interdépendantes, du fait que la majorité du matériel provient de la zone des fourneaux. Le matériel des déblais, par contre, qui a été récolté avant la fouille et sans idées préconçues, donne un résultat analogue. L'ordre de grandeur ne doit donc pas être remis en question. Il montre en outre que la sélection opérée dans le ramassage de ces catégories de mobilier n'a eu que peu ou pas d'influence sur leur représentativité globale sur le site.

5500	±	500kg	scories en tous genres
4300	±	390kg	scories coulées
650	±	60kg	scories internes massives
550	±	50kg	scories internes rouillées

La récupération des scories internes rouillées n'est pas clairement reflétée par les chiffres : cette catégorie peut être proportionnellement sur-représentée en raison du mode de ramassage. Il est cependant tout aussi plausible que le recyclage de ces déchets n'ait pas été pratiqué systématiquement, étant donné que le ravitaillement en minerai ne devait pas poser de problème.

Le volume de scories produites dans l'atelier est très faible par rapport à celui des grands sites de réduction, où les résidus se comptent par centaines, voire par millions de tonnes.

Connaissant le poids des scories du dernier fonctionnement du bas fourneau 2, le nombre de processus de réduction qui ont eu lieu dans les deux fourneaux peut être estimé.

Total atelier	Dernier fonctionnement du bas fourneau 2	Nombre de processus
5500 ± 500kg	40kg	125 à 150

Le calcul peut bien entendu se faire avec ou sans les scories internes rouillées, le résultat est le même.

Les données archéologiques ne permettent pas en revanche de préciser le nombre de fonctionnements du fourneau 1, ni par conséquent celui relatif au fourneau 2.

A partir du nombre minimum d'individus de tuyères et du poids total de scories, il est possible d'établir la fréquence de remplacement de ces éléments.

Nombre minimum d'individus	: 40 pièces
Tuyères frontales	: 15 pièces
Tuyères latérales	: 25 pièces
Fréquence de remplacement des tuyères frontales	: tous les 10 processus
Fréquence de remplacement des tuyères latérales	: tous les 6 processus

Le nombre de remplacements plus élevé des tuyères sises dans la paroi latérale peut indiquer qu'elles subissent un plus grand impact de chaleur et qu'il faut donc les remplacer plus fréquemment. Cependant, les chiffres sont à prendre avec prudence. Le phénomène du réemploi, en cassant le bec interne obstrué, relativise la valeur du nombre absolu de tuyères. En effet, il est impossible d'estimer le nombre de réutilisations d'une pièce qui a subi ce genre de raccourcissement.

7.2 Calcul du rendement des bas fourneaux

La composition chimique des scories exprime la complexité de l'opération de réduction du minerai de

fer dans le bas fourneau. Elle est avant tout le reflet de la composition chimique du minerai, mais la paroi du bas fourneau joue également un rôle non négligeable.

Il est possible de quantifier l'opération de réduction, grâce à une bonne connaissance des minerais, des scories et des parois.

L'influence de la cendre de charbon de bois est secondaire, mais bien marquée tout de même. Le comportement des éléments traces est mis en évidence, avec un net fractionnement de ceux-ci entre scorie et métal. Ce comportement n'est pas le même pour les différents éléments : il est fortement influencé par les conditions physico-chimiques dans lesquelles s'effectue la réduction.

7.2.1 Formation des scories

Dans l'hypothèse la plus simple, on peut considérer que le stock d'éléments chimiques présents dans le minerai se scinde en deux composants au cours de l'opération de réduction : du fer solide, d'une part, et de la scorie liquide, d'autre part. Connaissant la composition chimique du minerai ou plus exactement du concentré qui a été mis dans le four (pisolithes lavés et grillés) et celle des scories, il est possible de calculer la troisième composante. On utilisera donc une équation simple :

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

Pour travailler avec cette équation, il est nécessaire d'utiliser des moyennes et cela peut poser des problèmes difficiles. Dans le cas du site des Boulies, les minerais analysés présentent des variations importante de composition chimique. Elles sont dues à la présence de gangue argileuse en plus ou moins grande quantité. Par contre, les pisolithes lavés sont très homogènes. Le grillage ne provoque pas de modifications fondamentales. Les calculs seront donc basés sur une moyenne arithmétique des analyses de minerai lavé ou grillé.

La gamme de composition chimique des scories est beaucoup plus étendue. La moyenne est donc moins représentative. Il est logique d'exclure du calcul les scories internes rouillées : ce sont des morceaux de minerai incomplètement traités. Les autres échantillons sont tous pris en compte dans la moyenne arithmétique. Si l'on exclut les analyses 203, 208, 209 et 403 (groupe des scories coulées riches en fer), cela ne modifie pas de manière importante les résultats du calcul.

Il faut bien sûr tenir compte des produits gazeux qui se forment au cours de la réduction et qui s'échappent. L'eau contenue dans le minerai est soustraite au système. Le carbone est également perdu ainsi qu'une partie de l'oxygène. Pour s'affranchir de ces problèmes, il faut recalculer les analyses brutes en base anhydre : tous les éléments qui ne forment pas de composés gazeux doivent être additionnés et normés à cent.

$$SiO2 + Al2O3 + Fe2O3 + FeO + FeM + MnO + MgO + CaO + Na2O + K2O + P2O5 + \Sigma \text{ traces} = 100$$

La somme des éléments traces est toujours inférieure à 0.25%, ce qui reste très faible. Il n'est donc pas nécessaire dans ce cas de tenir compte des oxydes que peuvent former ces éléments. Le cas échéant, le Soufre S peut poser des problèmes de calcul, mais il n'est pas présent dans les échantillons étudiés.

Les pourcentages d'oxydes obtenus sont ensuite divisés par le poids moléculaire de l'oxyde et multipliés par le poids atomique de l'élément considéré. On obtient ainsi le pourcentage en poids de l'élément dans l'échantillon normé en base anhydre.

Exemple :

Poids atomique de Fe	= 55.84
Poids atomique de O	= 15.999
Poids moléculaire de FeO	= 55.84 + 15.999 = 71.839
FeO x 55.84 / 71.839	= FeO x 0.7773 = Fe

Les minerais, comme les scories, sont essentiellement composés de fer, de silicium et d'aluminium qui forment toujours plus de 95% du total. En première approche, on utilisera seulement ces trois éléments. Avec l'équation générale proposée plus haut, en prenant 100gr de scorie comme unité, on établit le système de trois équations suivant :

$$\text{M gr Si / 100gr minerai} = \text{gr Si / 100gr scorie}$$

$$\text{M gr Al / 100gr minerai} = \text{gr Al / 100gr scorie}$$

$$\text{M gr Fe / 100gr minerai} = \text{gr Fe / 100gr scorie} + F \text{ gr Fe}$$

En principe, connaissant le contenu en Si, Al et Fe de 100gr de scorie et de 100gr de minerai, il suffit de calculer M à l'aide des deux premières équations pour pouvoir ensuite trouver F dans la troisième.

Dans le cas qui nous occupe, ce système n'a pas de solution. En effet, pour trouver M constant, il faut que les rapports entre Si et Al dans les minerais et dans les scories soient identiques. Or ce n'est pas le cas et pour cette raison, il faudra faire intervenir un autre facteur dans l'équation de base.

En effet, le rapport entre Si et Al des minerais est proche de 0.8 (moyenne 0.78, minimum 0.54 et maximum 0.84); il y a toujours plus d'aluminium que

de silicium dans le minerai. Pour les scories, au contraire, il est toujours supérieur (moyenne 1.12, minimum 0.86 et maximum 1.35). Dans les scories, le silicium est pratiquement toujours plus abondant que l'aluminium. Par rapport au minerai, les scories sont non seulement appauvries en fer, mais aussi enrichies en silicium. Il est impossible de rendre compte de ce phénomène en faisant simplement fondre le minerai et en retirant du fer; il faut aussi ajouter du silicium.

Cet ajout peut se faire de plusieurs manières. L'hypothèse la plus séduisante est d'y voir une contribution du revêtement interne des parois sableuses qui sont très siliceuses, avec environ 82% de SiO2; l'examen macroscopique montre clairement qu'elles participent à la réaction. La définition de la composition chimique moyenne de la paroi se fait en excluant bien sûr les échantillons qui ont subi des modifications liées au contact avec la charge. Les compositions des fragments non modifiés sont assez proches les unes des autres. On peut également imaginer un ajout de sable mélangé à la charge, mais aucun indice archéologique indiquant une telle manipulation n'a été relevé pendant la fouille. Il n'est par contre pas possible de modifier la composition de la charge dans le sens désiré, en utilisant une partie de la gangue du minerai : dans les argiles sidérolithiques, le rapport entre Si et Al n'est pas très élevé. Il faut donc en rajouter une grande quantité pour obtenir le résultat voulu. Dans ce cas, on fait baisser considérablement la teneur en fer de la charge et le rendement devient nul.

Fig. 78. Paroi sableuse n° 705.

Il faut donc modifier l'équation de base de la réduction qui devient :

Minerai + Paroi = Scorie + Fer

De la même manière, on modifie le système d'équations :

M gr Si /100gr min + P gr Si /100gr par = gr Si /100gr scor
M gr Al/100gr min + P gr Al/100gr par = gr Al/100gr scor
M gr Fe/100gr min + P gr Fe/100gr par = gr Fe/100gr scor + F gr Fe

Soit en données chiffrées :

M x	6.37	+ P x	38.44	=	12.11		
M x	8.20	+ P x	10.33	=	10.96		
M x	48.55	+ P x	5.94	=	37.31	+	F

On tire de ce système les facteurs suivants :

M = 1.184	P = 0.118	F = 21.121

L'équation de base donne :

119gr minerai + 12gr paroi = 100gr scorie + 21gr fer

L'inégalité de poids entre les deux parties de la formule n'est qu'apparente : il faut tenir compte de la réduction des oxydes de fer et donc d'une perte en oxygène.

Comme ce sont des moyennes qui ont été utilisées dans ces calculs, il convient de nuancer le résultat. Toutefois, l'ordre de grandeur est correct.

Il faut faire fondre environ 120gr de minerai et 10 à 15gr de paroi sableuse pour fabriquer 100gr de scorie et 20gr de fer.

Le rendement de l'opération, c'est-à-dire le rapport entre la quantité de fer présente dans le minerai utilisé et la quantité de fer effectivement produite, est de l'ordre de 30%.

7.2.2 Contribution du charbon de bois

Pour compléter cette approche, il faut rendre compte du comportement des autres éléments chimiques qui amène à nuancer les conclusions basées sur les seuls composants principaux. A partir de la composition moyenne des minerais et des parois, on calcule, à l'aide des facteurs trouvés précédemment, la contribution de ces matériaux pour les différents éléments présents. On compare ensuite ce résultat avec la moyenne des scories réelles (tab. 20).

Parmi les éléments majeurs, il n'y a que le titane qui ait un comportement cohérent. Il y a donc encore un autre facteur qui influence la composition chimique.

Le calcium est l'élément pour lequel l'écart entre la valeur théorique calculée et la moyenne est le plus grand : il est dix fois plus abondant que prévu. Pratiquement absent du minerai, en quantité infime dans la paroi, il est par contre le quatrième composant des scories, par ordre d'importance; c'est l'un des rares éléments qui, par ailleurs, présente une distribution anormale dans les scories (chap. 5.4.5, p. 80). Il semble donc obéir à d'autres règles que les composants principaux.

Une contamination accidentelle (morceaux de calcaire introduits par erreur dans la charge) est improbable puisque toutes les scories analysées montrent cet enrichissement en calcium. La très faible proportion interdit également d'y voir un ajout volontaire dans un but technique (fondant). Un ou deux pour cent de calcium ne modifient pas fondamentalement les propriétés de la scorie. Si les avantages d'une charge calcaire avaient été perçus par les artisans, ceux-ci ne se seraient pas limités à un apport aussi faible.

L'explication la plus rationnelle est de faire intervenir la cendre de charbon de bois dans la réaction.

Le charbon contient 70 à 80% de carbone, 20 à 30% de matières volatiles (O, H, N) et 2 à 3% de cendres. Les principaux éléments chimiques présents dans les cendres sont les sels minéraux nécessaires à la croissance du bois : le calcium (CaO 30 à 50%), le potassium (K2O 10 à 20%), le phosphore (P2O5 5 à 15%), le magnésium (MgO 0 à 10%), le fer (FeO 0 à 5%) et le soufre (0 à 2%). Le silicium est extrêmement variable (SiO2 0 à 50%). En général, il ne se trouve dans le bois - et donc dans le charbon - que s'il est abondant dans le sol où pousse celui-ci. Les cendres contiennent également du carbone et de l'azote en quantité notable.

En l'absence d'analyses faites sur du matériel archéologique ou directement comparable (cendres de charbon de bois de hêtres et de sapins modernes poussant aux environs du site), il faut utiliser avec prudence ces données générales glanées dans la bibliographie (Gilles 1958; Tylecote 1990; Lessing 1926).

Composition du charbon de bois	
Carbone C	70 à 80%
Matières volatiles (O, H, N)	20 à 30%
Sels minéraux (CaO, K2O, MgO, P2O5, SiO2, etc.)	2 à 3%

Les deux ou trois pour cent de matières minérales contenues dans le charbon se mêlent à la scorie pendant la réaction. Le calcium est l'un des principaux éléments présents dans le bois, d'autant que le substrat jurassien où poussent les forêts est essentiellement calcaire. Sa présence dans les scories peut s'expliquer par la contribution de la cendre de charbon.

Les autres éléments indispensables au bois sont le magnésium (Mg), le potassium (K) et le phosphore (P). Pour les deux premiers, on constate un enrichissement dans les scories : ils sont deux fois plus abondants que ne le voudrait la théorie. Ce phénomène pourrait confirmer l'hypothèse proposée.

Par contre, la teneur en phosphore est plus faible que prévu, alors que l'on aurait attendu une augmentation. L'explication de ce comportement est à chercher dans un autre domaine.

Au cours de l'opération de réduction, à des températures situées aux environs de 1000°C, les oxydes de fer sont transformés en métal. Une partie des autres éléments reste sous forme d'oxydes, c'est le cas de SiO2, Al2O3, CaO, K2O, etc. Mais d'autres éléments sont réduits comme Fe, ils passent alors à l'état métallique. Pour le cuivre, par exemple, la réduction se produit dès 300°C. Pour le phosphore, elle débute vers 800°C, à une température à peine plus élevée que pour le fer, mais très certainement atteinte dans le bas fourneau. Les faibles teneurs en phosphore des scories s'expliquent donc par le comportement thermodynamique de cet élément : il passe partiellement en alliage dans le métal.

Le sodium (Na2O) peut également être présent dans le charbon en faible quantité, mais à plus de 1000°C, il entre en ébullition et peut être perdu sous forme de gaz. Les très faibles teneurs témoignent sans doute de ce phénomène.

7.2.3 Le comportement des éléments traces

Les teneurs en éléments traces s'expliquent à peu près de la même manière. Zr, Y et Rb correspondent plus ou moins aux prévisions théoriques. Sr et Ba augmentent assez nettement. Il est possible de voir là une contribution des cendres de charbon de bois, bien

que la composition des traces dans ces matériaux soit encore beaucoup moins bien connue que celle des éléments majeurs.

	Minerai x 1.20	+ Paroi x 0.12	= Contribution totale	Apport cendre	Scorie	Fer produit
Eléments						
Si (%)	7.57	4.54	12.11	(?)	12.11	
Al	9.74	1.22	10.96	(?)	10.96	
Fe	57.73	0.70	58.43	(?)	37.31	21.12
Ti (%)	0.65	0.03	0.68		0.63	
Mn	0.08	0.004	0.08		0.14	
Mg	0.05	0.04	0.09	x	0.20	
Ca	0.11	0.01	0.12	x	1.15	
Na	0.00	0.02	0.02	x ?	0.04	
K	0.01	0.27	0.28	x	0.55	
P	0.17	0.004	0.17	x	0.11	x
Zr (ppm)	280	21	301		279	
Y	54	2	56		61	
Sr	20	6	26	x ?	45	
Rb	4	15	19		17	
Ba	38	61	99	x ?	179	
V	1808	7	1815	?	1119	x
As	156	3	159	?	15	x
Pb	131	1	132	?	7	x ?
Zn	169	10	179	?	48	x ?
Cu	59	2	61	?	26	x
Ni	186	4	190	?	21	x
Cr	620	10	630	?	293	x
Co	115	26	141	?	84	x

x élément présent
x ? élément vraisemblablement présent
? élément éventuellement présent
(?) élément dont la présence éventuelle est négligée dans les calculs

Tab. 20. Comparaison des chiffres théoriques et réels des éléments chimiques.

Les autres éléments traces sont largement appauvris dans les scories. Comme le phosphore, ils sont réduits aux températures du bas fourneau et passent en partie dans le métal. Cela n'a rien d'étonnant pour Cu, Ni et Co, qui sont réduits par le carbone à des températures inférieures à celles du fer. Pb et Zn sont non seulement réduits, mais peuvent être transformés en gaz dans ces conditions. Les diminutions constatées sont donc normales. Par contre, Cr et V ne se laissent réduire en théorie qu'à des températures nettement plus hautes, respectivement 1250°C et 1400°C. Sans pouvoir affirmer que ces conditions thermiques ont été atteintes, la diminution de Cr et de V est certainement un indice de températures élevées lors de la réduction.

7.3 Estimation de la production

A l'aide des coefficients tirés des analyses chimiques et des estimations de poids des scories trouvées sur le site, le calcul de la production devient possible. Deux remarques préliminaires s'imposent.

Tout d'abord, ces estimations se basent sur ce que l'on peut tirer de l'étude des vestiges des Boulies. Elles reflètent donc des conditions précises : nature du minerai, chimie des scories et de la paroi, conservation des vestiges, constatations archéologiques, etc. Il ne peut être question d'utiliser sans précaution les mêmes coefficients pour tenter cette démarche à partir des résultats d'une autre fouille.

De plus, tout au long du calcul, les erreurs s'additionnent et moins les données archéologiques sont précises, moins les paramètres que l'on fait intervenir sont maîtrisés. Les chiffres qui en résultent doivent donc être pris pour ce qu'ils sont : au mieux, des estimations, au pire, des ordres de grandeur.

7.3.1 La production

La dernière opération de réduction pratiquée dans le bas fourneau 2 a produit une trentaine de kilos de scories coulées. A cela s'ajoutent environ 5kg de scories internes massives.

Les scories internes rouillées, qui sont du minerai partiellement réduit, ne participent pas complètement à la réaction. Elles peuvent être négligées dans les calculs.

Fig. 79. Dernière coulée du bas fourneau 2. Coulure n° 412 (longueur : 51cm).

Une opération de réduction, soit environ 35kg de scorie, peut être formulée de la manière suivante :

Production d'une opération

41.65kg minerai + 4.20kg paroi
=
35kg scorie + 7.35kg fer

De la même manière, en se basant sur l'estimation du poids total des scories du site des Boulies, il est possible de donner des ordres de grandeur concernant l'ensemble de la production (chap. 7.1, p. 99).

Production du site

5950kg (± 600kg) minerai + 600kg (± 60kg) paroi
=
5000kg (± 500kg) scorie + 1050kg (± 100kg) fer

Ces chiffres sont relativement cohérents.

Dans l'équation, le minerai est calculé en base anhydre. En tenant compte de l'eau, on recalcule le poids de pisolithes lavés. La moyenne des mesures donne une densité apparente de 2.1 qui permet de calculer le volume. Le minerai tout-venant contient de 35 à 50% de pisolithes.

	"Minerai anhydre"	->	Pisolithes lavés	->	Minerai tout-venant
kg	41.65	->	47.38	->	± 100 à 150
m^3			± 0.22		± 0.50 à 0.75
kg	± 6000	->	± 6800	->	±14500 à 21500
m^3			± 32		± 70 à 110

Il ne fait pas de doute qu'une telle quantité de minerai ait été disponible dans les environs immédiats du site, compte tenu des réserves inexploitées qui existent encore (chap. 3.2, p. 29). L'exploitation de 70 à 110m^3 de Sidérolithique riche en pisolithes peut réclamer l'excavation d'un volume beaucoup plus important (roches encaissantes, sidérolithique stérile) qu'il est impossible à calculer. Remarquons tout de même qu'un trou de 10 x 10 x 10m, ce qui n'est pas énorme, représente déjà 1000m^3.

Un peu plus de 4kg de sable provenant de la paroi sont fondus au cours d'une seule opération de réduction. En considérant une densité moyenne de 1.75 pour ce matériau, 4.2kg correspondent à moins de 3 litres (2400cm^3). Tenant compte que la paroi ne réagit que sur une hauteur de 50cm, il suffit de la faire fondre sur 0.2 ou 0.3cm d'épaisseur (diamètre interne du fourneau : 70cm). Cela ne cause donc pas de dégâts trop importants. Toutefois, cet impact n'est pas réparti de manière uniforme et la partie située à proximité de la tuyère latérale est davantage endommagée. En dix opérations, la paroi n'aura perdu que 2 à 3cm d'épaisseur en moyenne. Mais en 75 opérations, soit la durée de vie moyenne du fourneau, l'épaisseur de la paroi consommée est de l'ordre de 20cm ! On arrive ici à une impossibilité technique : le volume de la cuve deviendrait en effet beaucoup trop important. Il faut donc rechaper le four régulièrement, comme le montrent les vestiges en place.

On produit une éponge qui contient 7.35kg de fer. Les trouvailles archéologiques d'éponges sont trop rares ou trop difficiles à interpréter pour être comparées ici. Par contre, des produits plus élaborés ayant subi un premier martelage ont souvent un poids du même ordre de grandeur (5 à 10kg) que celui qui peut être calculé aux Boulies (Tylecote 1987). La comparaison la plus intéressante se fait avec les lingots en fer bipyramidaux (Kleemann 1981). Ces pièces bien connues, mais dont on discute encore la chronologie, résultent sans doute de la mise en forme de l'éponge (Rädeker et Naumann 1961; France-Lanord 1963). Leur poids se répartit entre 4 et 10kg, mais la majorité pèse entre 5.5 et 8kg. Il faut bien entendu tenir compte d'une perte de fer qu'occasionne la mise en forme (chap. 8.4, p. 114).

La production totale d'éponges de fer sur le site serait de l'ordre de 1050kg. Avec la perte occasionnée par le raffinage de celles-ci, ce chiffre doit être ramené entre 800 et 900kg.

La plupart des outils en fer anciens (clous, ferrures, outils agricoles et artisanaux, couteaux, fers à cheval, etc.) ne dépassent guère quelques centaines de grammes. Les pièces de plus d'un kilo (grands outils, armes, poutrelles, ancres de bateau, etc.) sont relativement rares, même si elles peuvent parfois atteindre des poids considérables (plusieurs centaines de kilos).

Enclumes	5	à	50	kg
Marteaux	0.5	à	2.5	kg
Epées	1	à	3	kg
Couteaux	0.1	à	0.3	kg
Lingots bipyramidaux	4	à	10	kg
Lingots en barre	0.3	à	1	kg

7.3.2 La consommation de bois

La question de la consommation de charbon de bois ne peut pas être directement résolue par nos résultats. Il est tout de même possible de chiffrer la contribution des cendres de charbon de bois à la formation des scories (environ 2gr de cendre pour 100gr de scorie). Toutefois, tous les sels minéraux de la cendre n'entrent pas forcément dans la scorie. Le rapport entre le minerai et le charbon que l'on tire du calcul (1.2 pour 1) est donc sous-évalué.

Il est possible par ailleurs de tirer argument des chiffres connus pour la production de fer par la méthode directe au charbon de bois. Ils sont tirés soit de comptes rendus de processus traditionnels (François 1838), soit de reconstitutions expérimentales à but scientifique (Gilles 1957; Pawliska et al. 1983). Dans tous les cas, ils ne sont pas directement comparables puisqu'ils reflètent des réalités légèrement différentes de celle des Boulies. Suivant les sources, le rapport entre le poids du minerai et celui du charbon varie de 2 pour 1 à 1 pour 6 en ce qui concerne l'opération de réduction seule.

Face à de tels écarts, il semble inévitable de proposer des estimations minimum (rapport 1 pour 1) et maximum (rapport 1 pour 4). Pour connaître la quantité de bois nécessaire, il faut également tenir compte des 70 à 80% de poids perdus au cours de la carbonification.

100kg de bois	->	20 à 30kg de charbon
100m³ de bois	->	60 à 70m³ de charbon

Minerai/ charbon	Poids du charbon (kg)	Poids du bois (kg) 70%	80%	Volume du bois (m³) densité moyenne 0.7	
1 pour 1	6000	20000	30000	29	43
1 pour 4	24000	80000	120000	116	172

La consommation de bois de l'atelier pour la réduction du minerai oscille donc entre 29 et 172m³. Ces chiffres sont à comparer avec les estimations de volume de bois à l'hectare. Actuellement, on estime normal, sur un terrain boisé de qualité médiocre, de trouver entre 200 et 300m³ de bois en fûts à l'hectare (Robert 1972). Ce chiffre est plus que doublé dans une forêt de première qualité. L'impact de l'activité sidérurgique primaire de l'atelier sur la forêt est donc limité.

Il faut aussi rappeler que d'autres activités nécessitent du bois ou du charbon (grillage du minerai, mine et lavage). Enfin, le raffinage des éponges, qui a probablement été pratiqué à proximité de l'atelier de réduction, contribue de manière significative à la consommation de combustible (chap. 8, p. 107; Crew 1991).

Les estimations proposées doivent donc être réévaluées en regard de ces considérations : il faut sans doute les doubler.

7.3.3 Le temps de travail

Pour compléter l'image du site, on peut encore émettre quelques réflexions sur le temps de travail nécessaire au fonctionnement du site. On se basera surtout sur les tentatives de reconstitution expérimentale, tout en tenant compte de la situation locale.

Une opération de réduction demande environ une journée de travail pour deux ou trois personnes.

Pour l'extraction de 40kg de minerai, son transport sur quelques centaines de mètres, son lavage et son grillage, le travail d'une personne pendant une journée est sans doute suffisant.

La carbonisation du charbon en meule peut prendre plusieurs jours, en fonction de la taille de la meule. Mais celle-ci fournira du combustible pour plusieurs opérations. L'abattage du bois et la construction de la meule sont également des travaux importants. Un minimum d'une journée est sans doute nécessaire pour fabriquer 100kg de charbon.

L'ouverture de la mine, la construction et l'entretien des bas fourneaux ne jouent qu'un rôle secondaire, de même que la fabrication des tuyères et des soufflets.

Bien sûr, les travaux sont répartis sur une durée plus longue. L'abattage des arbres précède sans doute de plusieurs mois la carbonisation : le rendement est meilleur avec du bois sec. Le minerai est laissé à l'air libre quelque temps avant le lavage dans le ruisseau.

Opération	Temps de travail : jours pour 1 homme
Ouverture de la mine	10
Construction des bas fourneaux	10
Fabrication des tuyères et soufflets	10
Abattage et construction de la meule	150
Carbonification et transport du charbon	150
Préparation et transport du minerai	150
Réduction	450
Entretien des bas fourneaux	15
Total	945

Pour une équipe de trois personnes, ce qui est sans doute le minimum de personnel requis pour faire fonctionner le bas fourneau, il faut compter 315 jours de travail.

Tout le bois est abattu en début de saison, puis l'on extrait et prépare le minerai pendant que le bois sèche. Après cela, on fabrique le charbon et enfin, on procède à la réduction. Théoriquement, en une seule année, le travail pourrait être accompli par une équipe de trois hommes. En pratique, les artisans s'arrêtent sans doute en hiver en raison des conditions climatiques relativement dures. En comptant deux ans, on laisse la marge nécessaire pour cultiver un potager et procéder au travail de raffinage des éponges de fer.

Enfin, ces différents travaux (charbonnage, mine, réduction et raffinage) ne sont peut-être pas le fait des mêmes artisans. Si mine et réduction sont étroitement liées aux Boulies, le charbonnage et le raffinage ne sont pas clairement démontrés sur place. Ce fait peut refléter une spécialisation des ouvriers ou une répartition du travail en fonction des saisons.

Chapitre 8

Les scories en forme de calotte

Les scories en forme de calotte sont bien connues sur un grand nombre de sites archéologiques. L'interprétation technique de ces pièces n'est pas encore définitivement acquise. L'étude du matériel des Boulies nous permet d'avancer des arguments nouveaux. Dans ce cas précis, les scories en forme de calotte sont interprétées, non pas comme résidus de la réduction du minerai de fer, mais comme ceux des travaux de purification du métal (raffinage de l'éponge).

8.1 Le raffinage de l'éponge de fer

L'éponge de fer, produit de la réduction du minerai par la méthode directe, est un bloc riche en métal mais encore impur. Il contient des inclusions de scories, des particules de fer réoxydées, des fragments de charbon, etc. De plus, la porosité est encore très forte. Ce matériau n'est donc pas directement forgeable; il faut au préalable le purifier et le compacter. Cette opération - le raffinage de l'éponge de fer - se pratique dans un bas foyer, simple foyer ouvert et muni d'une soufflerie (fig. 80). Il peut aussi s'agir d'une construction plus élaborée, avec des murets de protection et un avant-foyer.

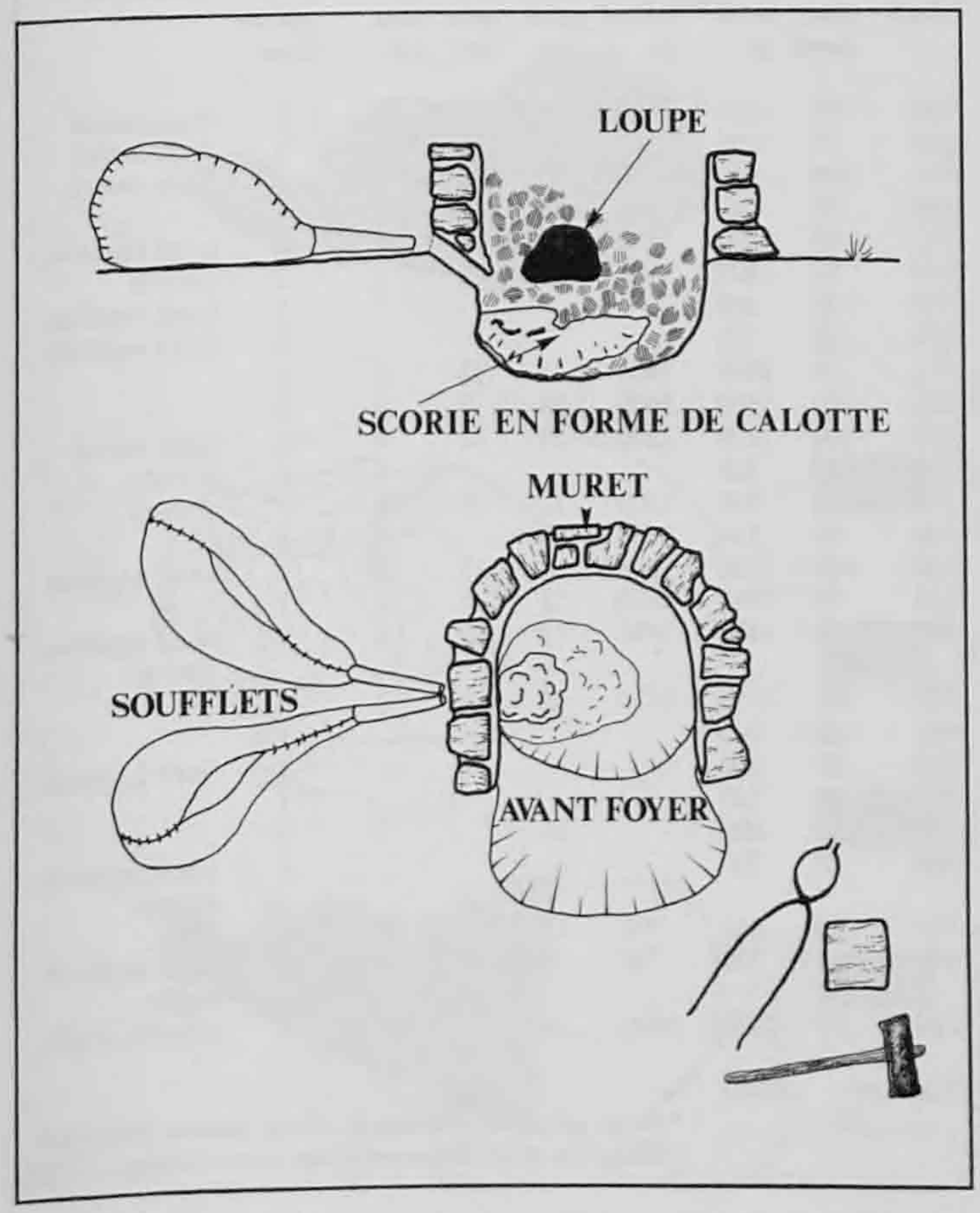


Fig. 80. Schéma d'un bas foyer.

L'éponge est réchauffée et martelée à plusieurs reprises jusqu'à ce que les impuretés aient été évacuées et que les particules de fer se soient soudées les unes aux autres. Le produit de cette opération, la loupe de fer, est forgeable.

Dans le fond du bas foyer, sous le trou qui amène le vent du soufflet, les matières fondues s'agglutinent et forment une scorie en forme de calotte. A la fin de l'opération, elle est arrachée et rejetée. Au cours de ce travail, d'autres débris se sont constitués : des petits morceaux de scories dans le brasier à l'intérieur du bas foyer et des résidus du martelage autour de l'enclume. Ces derniers se composent de scories en forme de goutte, expulsées lors de la compression par martelage, et de battitures lamellaires ou globulaires. Celles-ci sont des fragments provenant d'une pellicule d'oxydes de fer qui se forme à chaud au contact de l'air sur la surface de la pièce et qui est brisée par les coups de marteau. Le travail de forgeage, soit l'ensemble des opérations destinées à mettre en forme les objets ou à modifier les propriétés physiques du métal, produit également des battitures. Dans le fond du foyer de forge, des résidus s'accumulent : il peut aussi en résulter des scories en forme de calotte. La distinction entre les produits du raffinage et ceux du forgeage est très difficile à établir. Elle est de plus un peu artificielle car les deux opérations, qui nécessitent des installations très semblables, ont pu être pratiquées dans le même foyer. Néanmoins, le raffinage de l'éponge, produit impur, fabrique sans doute une plus grande quantité de résidus que le forgeage.

8.2 Les calottes des Boulies

Les fouilles des Boulies ont livré une série de scories qui forment une catégorie distincte. Une vingtaine de pièces, bien conservées, sont clairement identifiables

(fig. 81 et pl. 8 à 10); à celles-ci se rattache une dizaine de fragments plus petits.

Ce sont des scories en forme de calotte sphérique ou plus souvent elliptique (fig. 82). Le plus grand diamètre varie entre 10 et 20cm et l'épaisseur maximale entre 3 et 10cm. Elles pèsent entre 650 et 2300gr et sont apparemment plus denses que les autres scories du site.

Leur surface inférieure est convexe et relativement régulière. De couleur brunâtre, due à la présence de rouille, elle est marquée de reliefs lobés d'amplitude millimétrique et d'empreintes de charbons de bois.

La surface supérieure est horizontale, concave ou plus rarement convexe. Dans la plupart des cas, il existe un bourrelet de couleur grise, à surface lisse et vitreuse, avec un relief ondulé d'amplitude centimétrique. Ce bourrelet n'est pas situé au centre, mais il est tangent à un bord; sa limite est marquée par une dépression. Le reste de la surface supérieure est recouvert de rouille et le relief est plus acéré et déchiqueté. Les empreintes de charbons y sont bien marquées.

A l'endroit où le bourrelet est tangent au bord de la pièce, celui-ci est souvent recouvert d'un placage argileux partiellement fondu, collé à la scorie et présentant des traces d'arrachement. C'est la marque laissée par la paroi du bas foyer.

La structure interne de ces pièces est souvent complexe (fig. 81 et 82). Au contact avec la surface inférieure, une première zone de quelques millimètres d'épaisseur est caractérisée par une porosité très fine et très abondante sans orientation précise. De petits fragments de charbon de bois, parfois des grains de sable, adhèrent à la surface. Au-dessus, la matrice grise devient beaucoup plus importante. La porosité, plus large, est orientée de manière radiaire et se développe perpendiculairement à la surface inférieure.

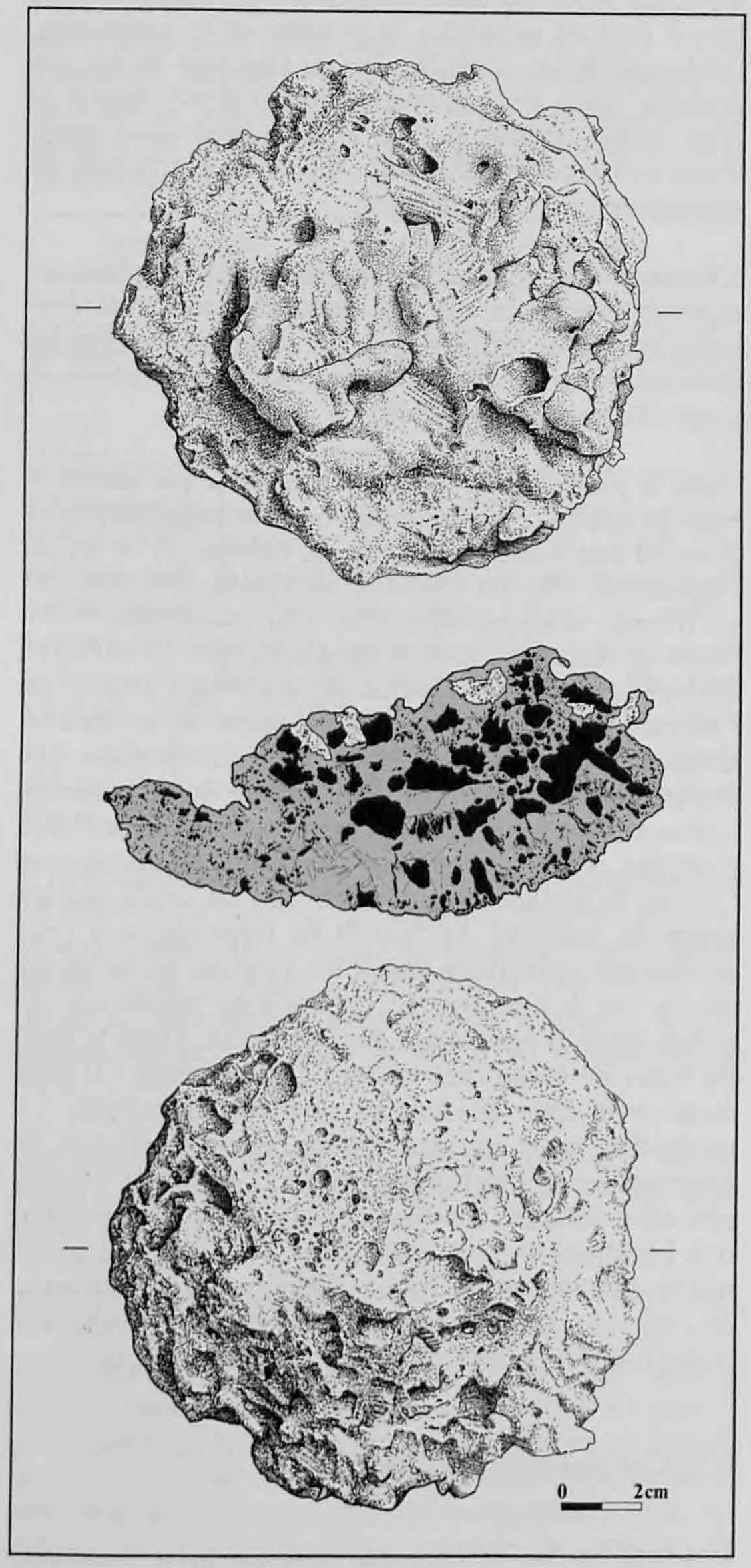
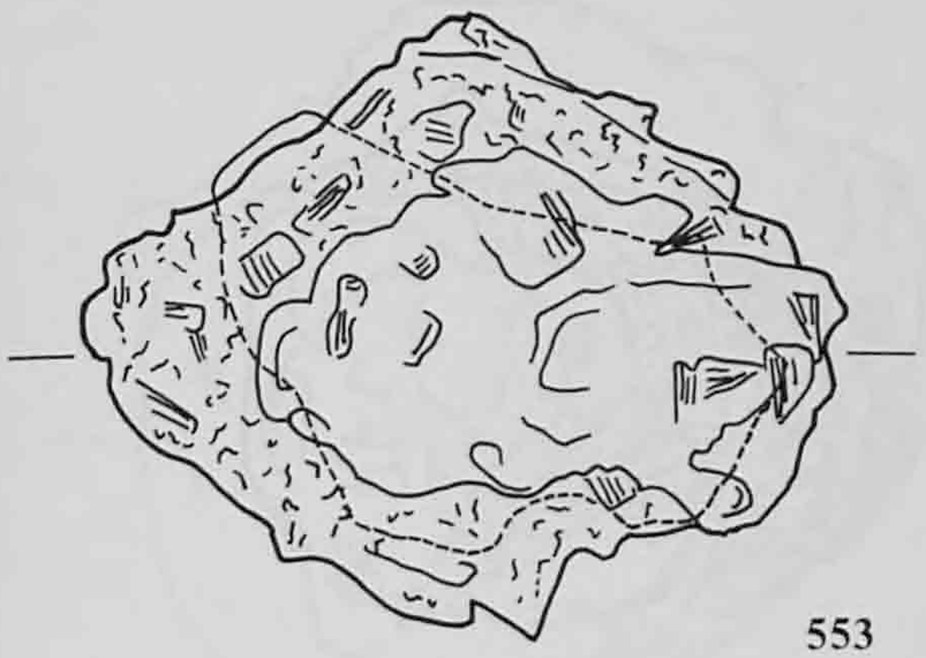


Fig. 81. Scorie en forme de calotte n° 503. Face supérieure, coupe et face inférieure (Symboles : pl. 8).

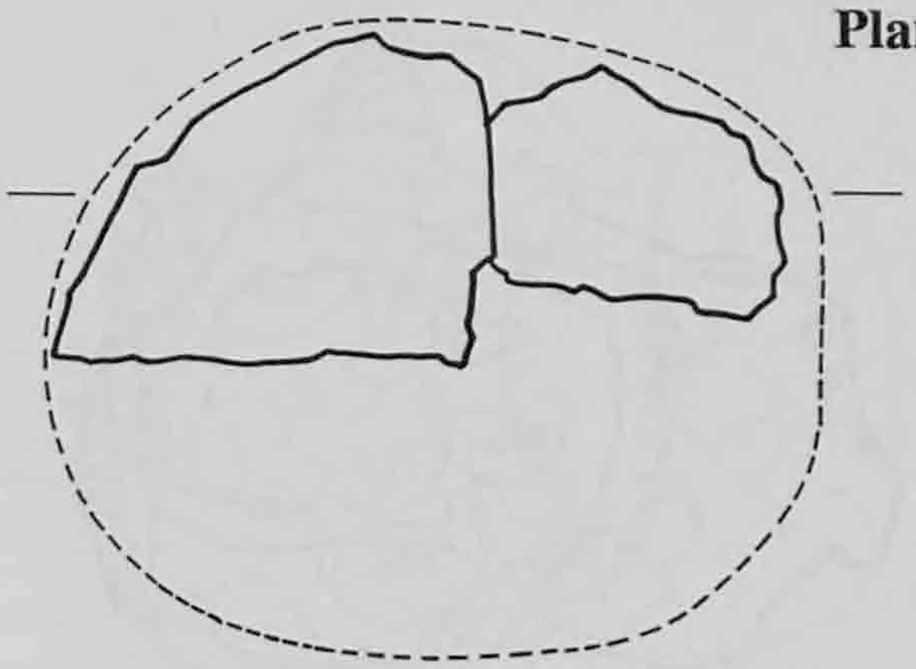
N° objet	% conservé	Poids cons. gr.	Poids estimé gr.	⌀ max. cm	⌀ min. cm	Epaisseur cm	Nbre opérations	Remarque
503	100	1200	1200	14	13	8	1	trace métal
504	95	2250	2300	16	14	9	1	trace métal
505	100	650	650	12	10	5	1	trace métal
506	85	580	700	14	10	5	1	
515	95	1850	1900	20	15	6	1	bord argileux
516	50	820	1600	20	15	7	1	silicate
518	20	290					1	bord argileux
519	20	170					1	bord argileux
521	70	1020	1450	15	13	5	1	
528	100	1600	1600	15	9	6	2	
529	100	1270	1270	13	12	9	1	trace métal
533	20	220				3	1	silicate
534	50	790	1500	12	10	4	1	silicate
535	50	830	1600	15		5	1	
550	100	1150	1000 *	14	11	6	2	bord argileux
551	90	1440	1600	18	15	6	1	
552	100	1480	1480	19	15	6	1	bord argileux, mortier
553	100	1750	1750	18	15	10	2	
592	20	100					1	
593	20	200					1	bord argileux
594	20	250					1	
595	30	600		10		7	2	
596	20	700					3	bord argileux, silicate
597	80	550	700	13	12	4	1	
598	100	720	720	10	9	8	2	bord argileux, argile
599	80	1220	1500	18	12	5	2	silicate, argile
Total 26		23700						

* cette pièce est constituée d'une calotte complète (1000gr) et d'un fragment d'une autre calotte (150gr)

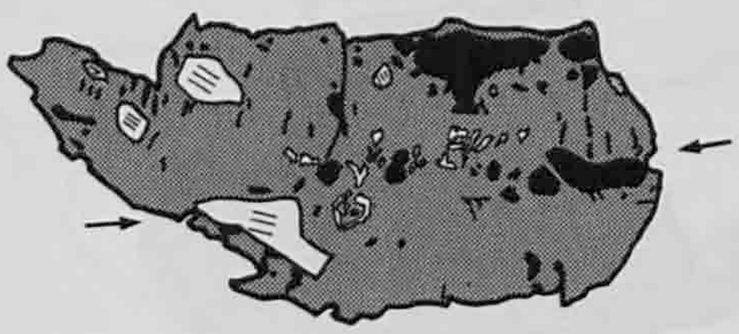
Tab. 21. Scories en forme de calotte.

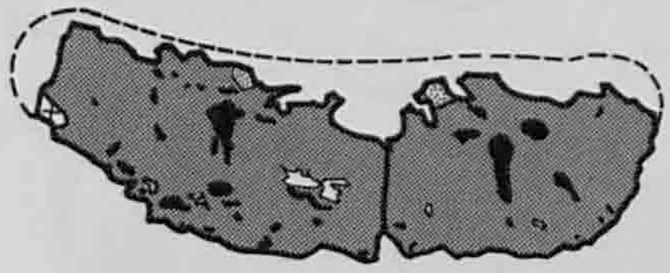


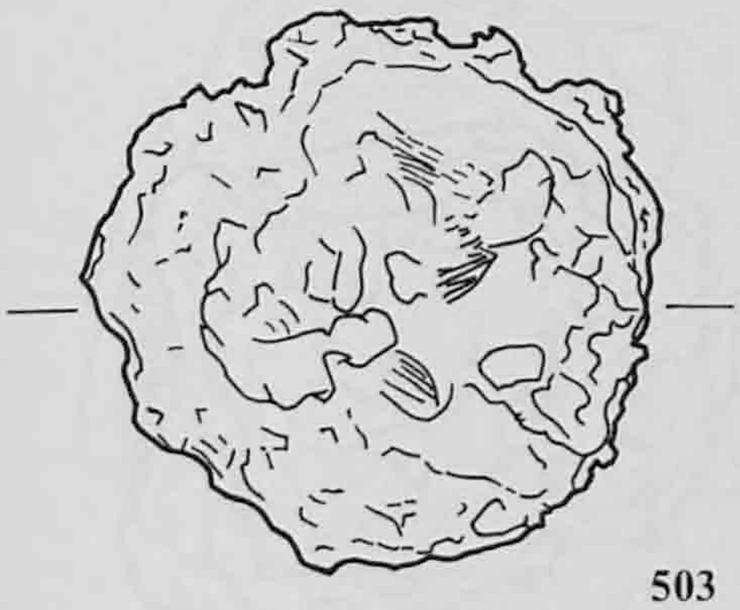
553



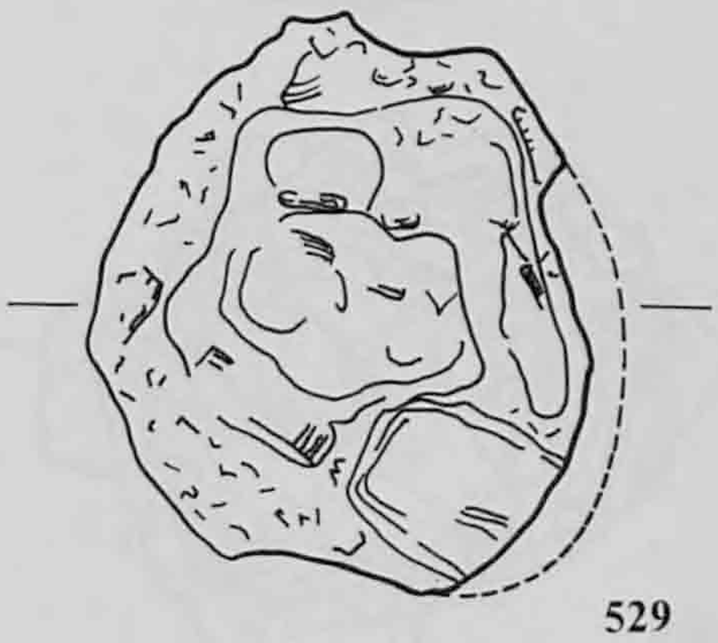
535



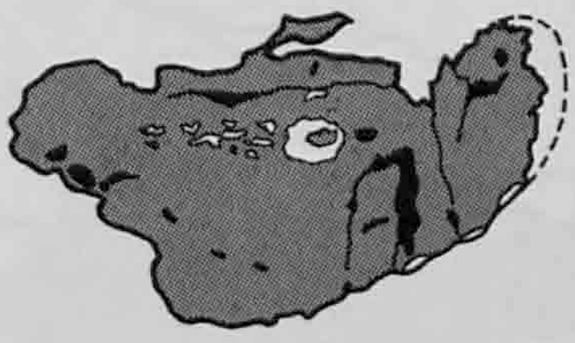


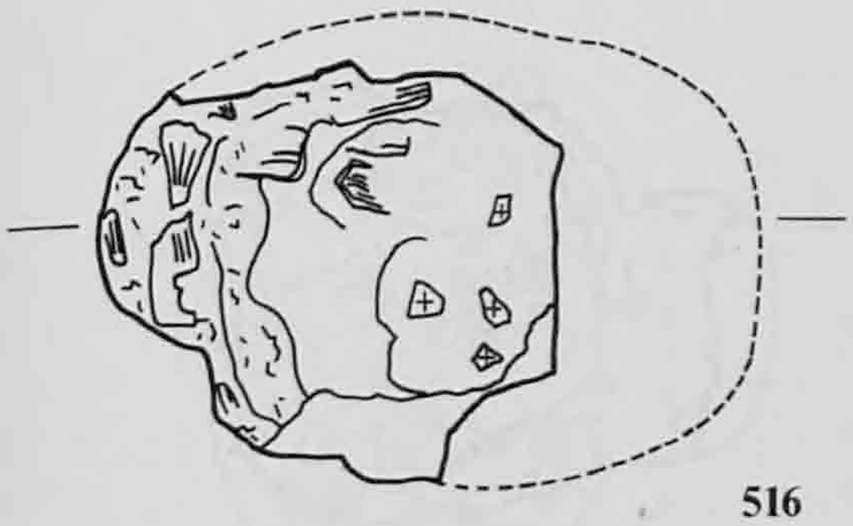


503



529

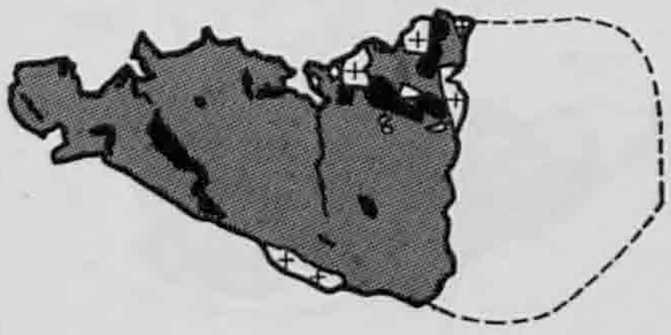




516

LEGENDE

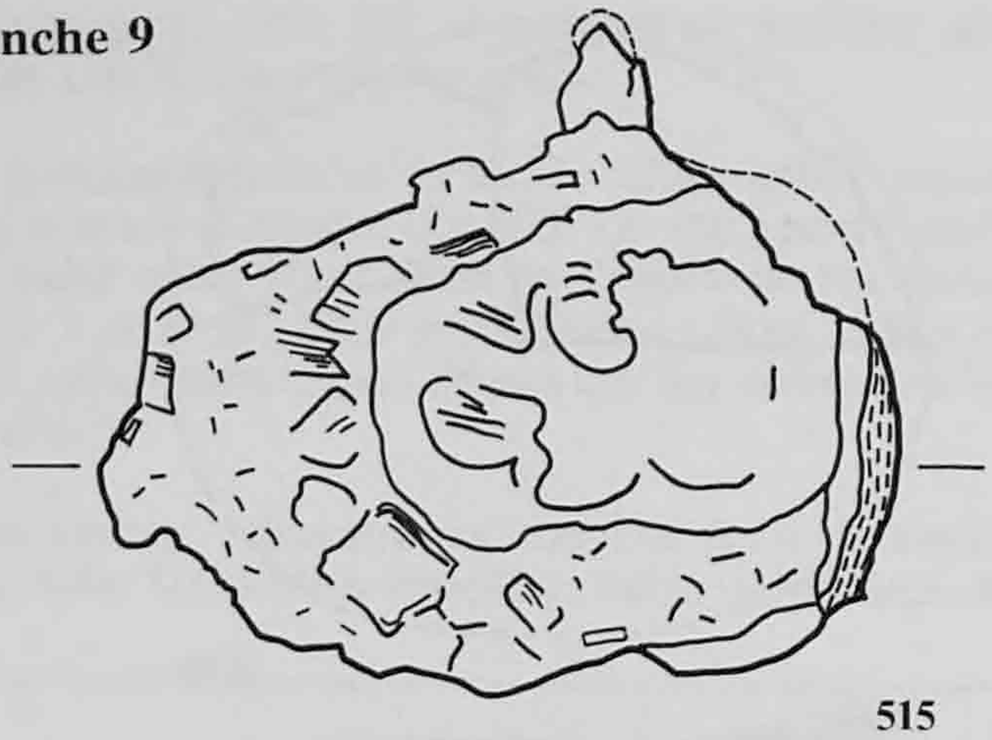
- Matrice grise sombre (Fayalite)
- Aiguille de Fayalite
- Porosité
- Grain de roche non-fondu
- Fer métallique
- Materiaux fondus clairs
- Charbon
- Placage argileux (bord du bas foyer)
- → ← Limite entre 2 pièces soudées



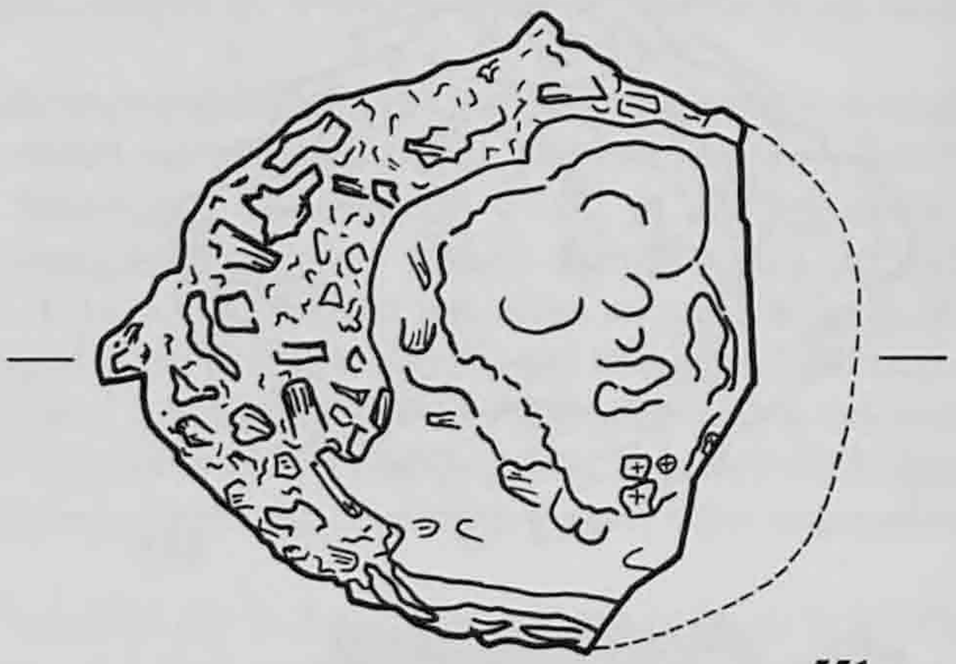
Scories en forme de calotte. Face supérieure et coupe.

Echelle 1:3

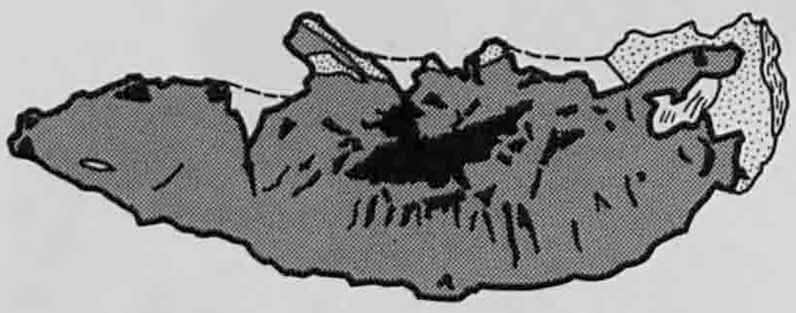
Planche 9

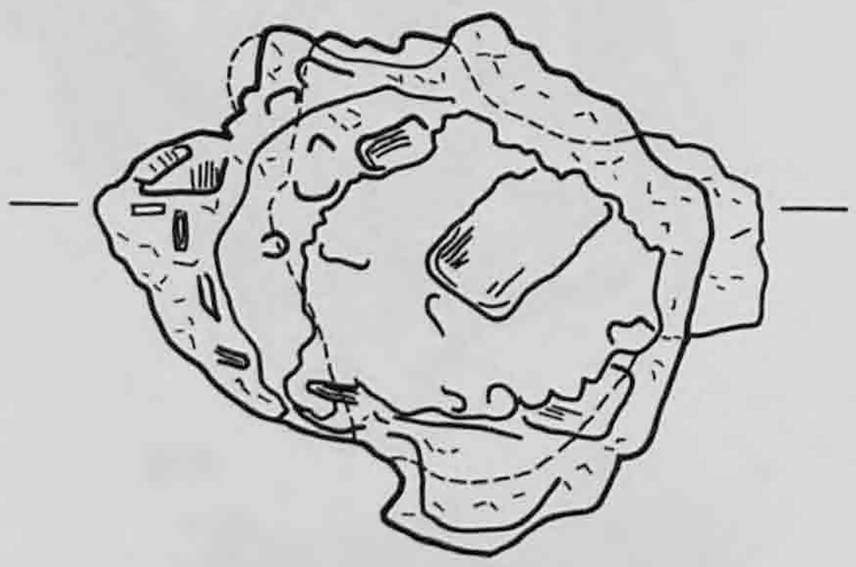


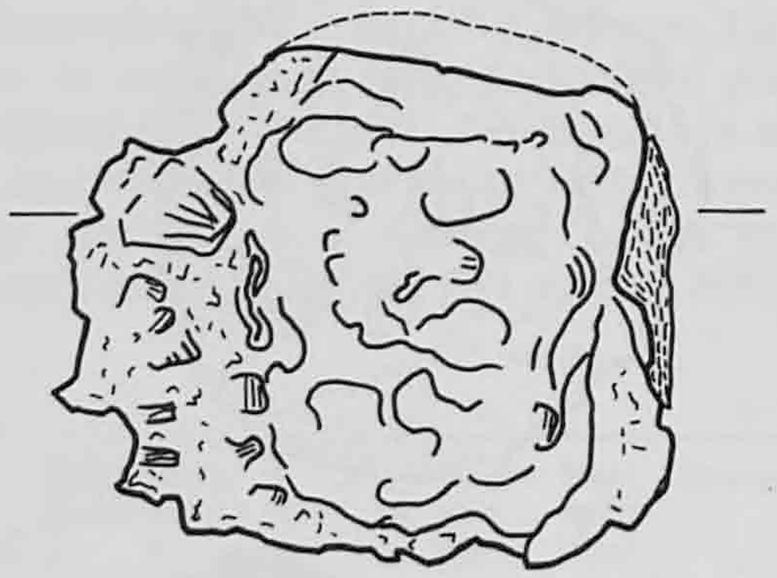
515



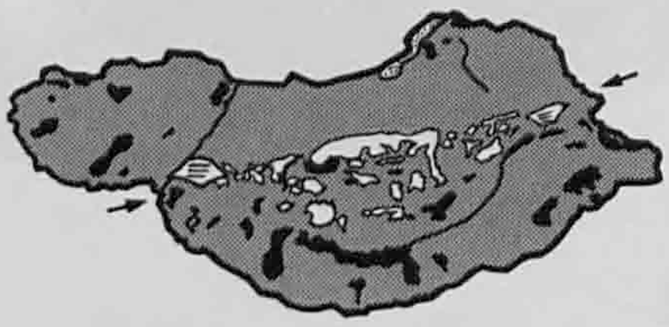
551



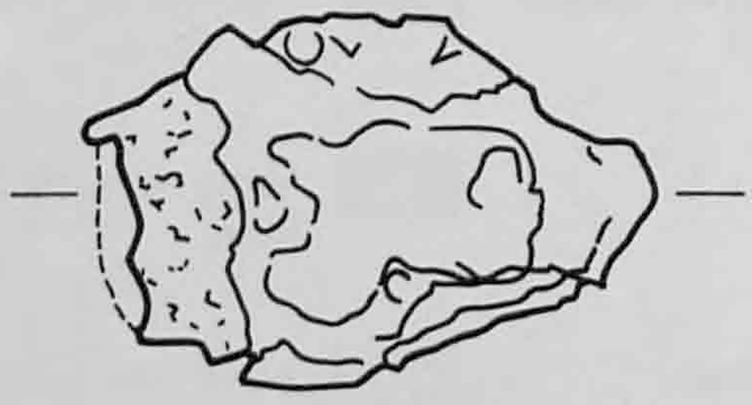




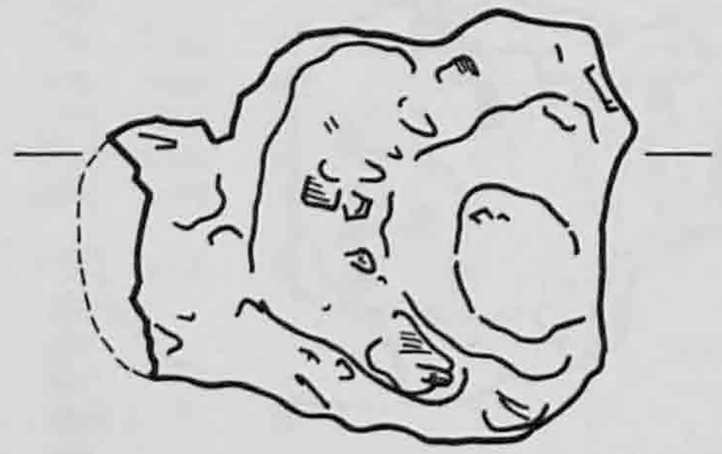
528



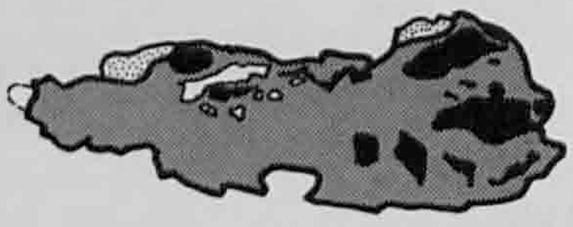
550



505

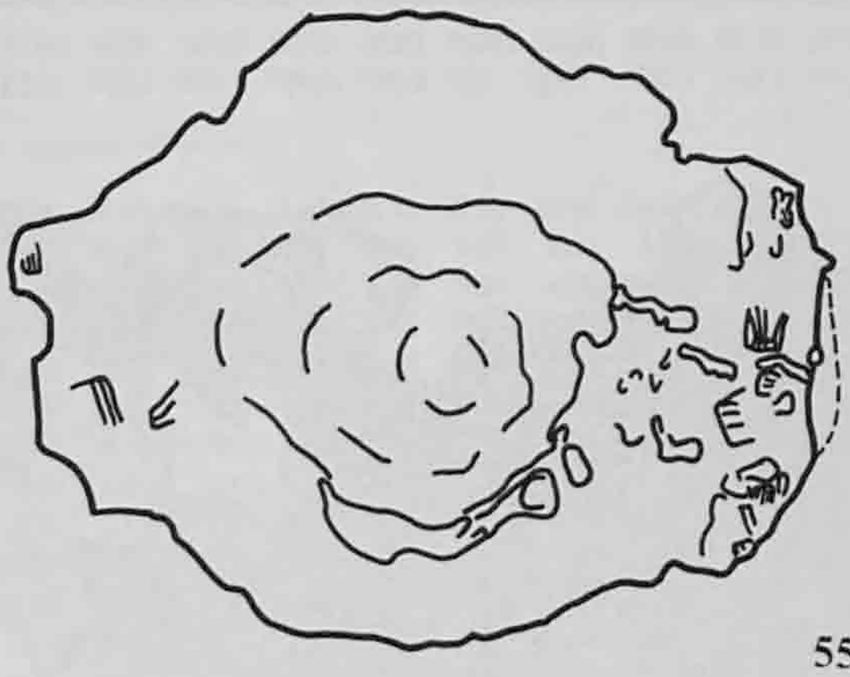


506

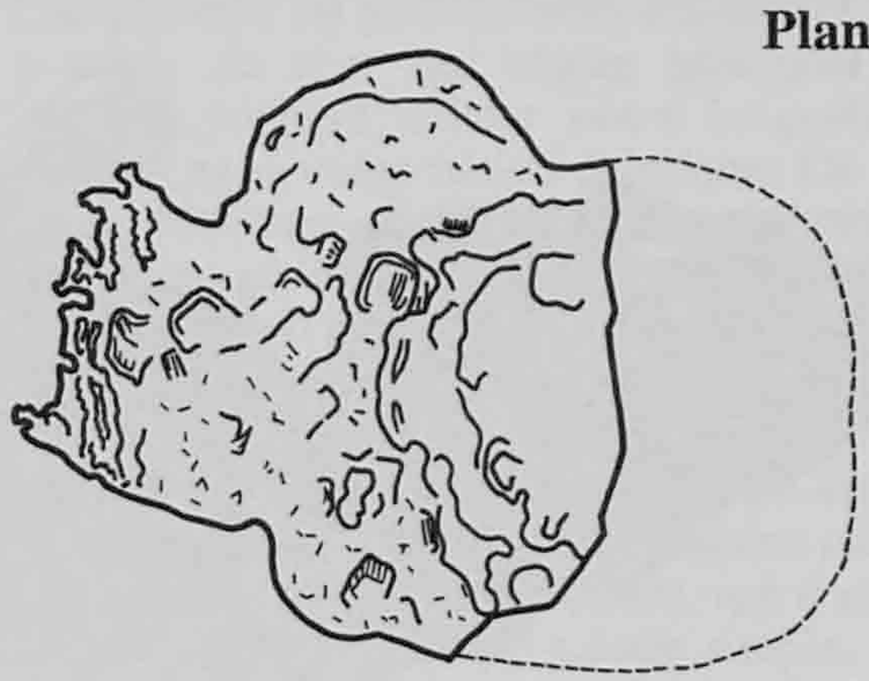


Scories en forme de calotte. Face supérieure et coupe.

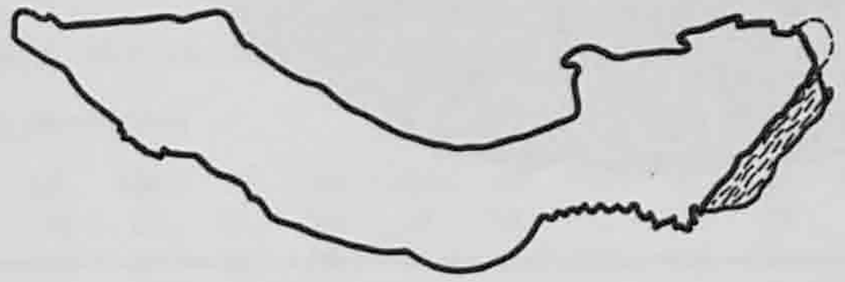
Echelle 1:3

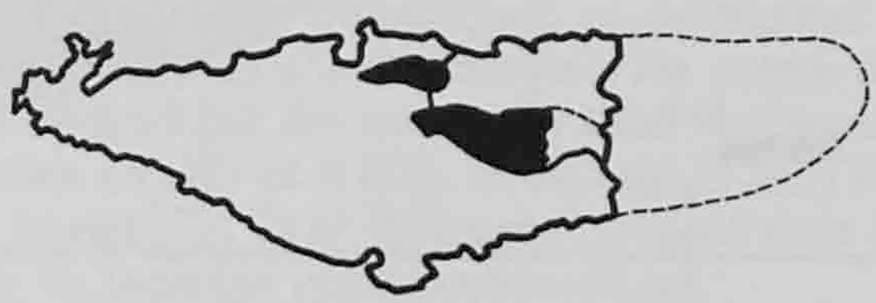


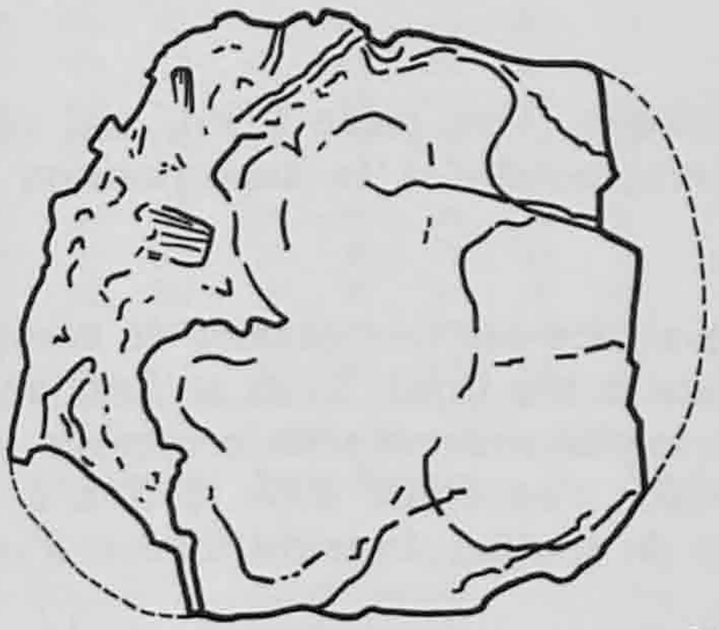
552



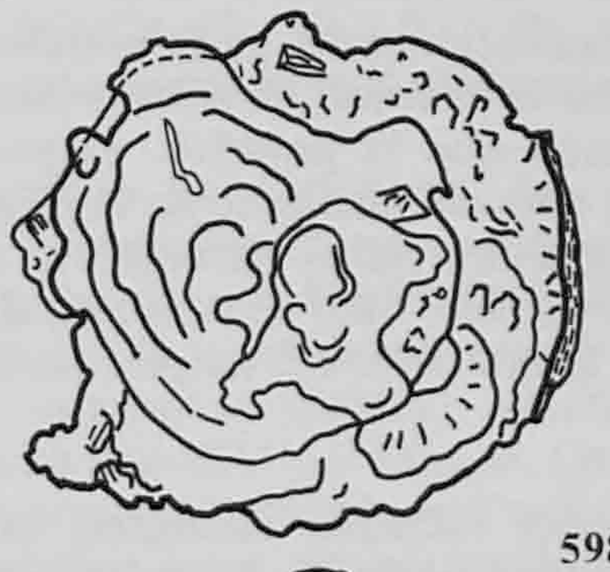
521



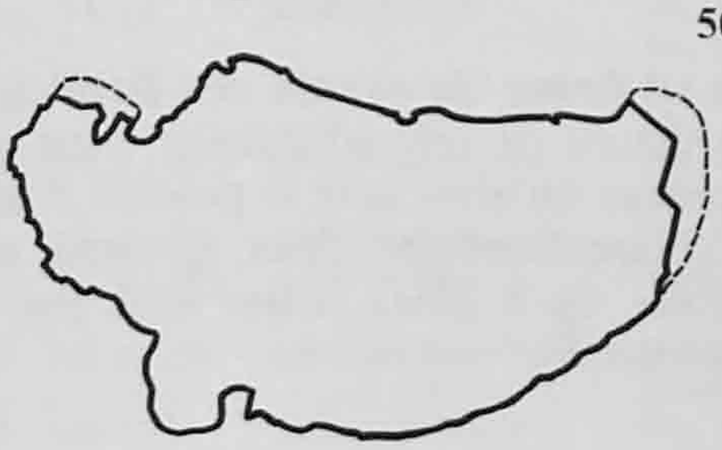




504

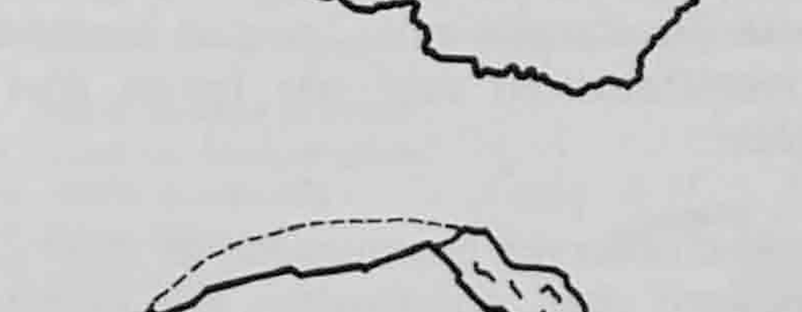


598



597

599



Scories en forme de calotte. Face supérieure et section.

Echelle 1:3

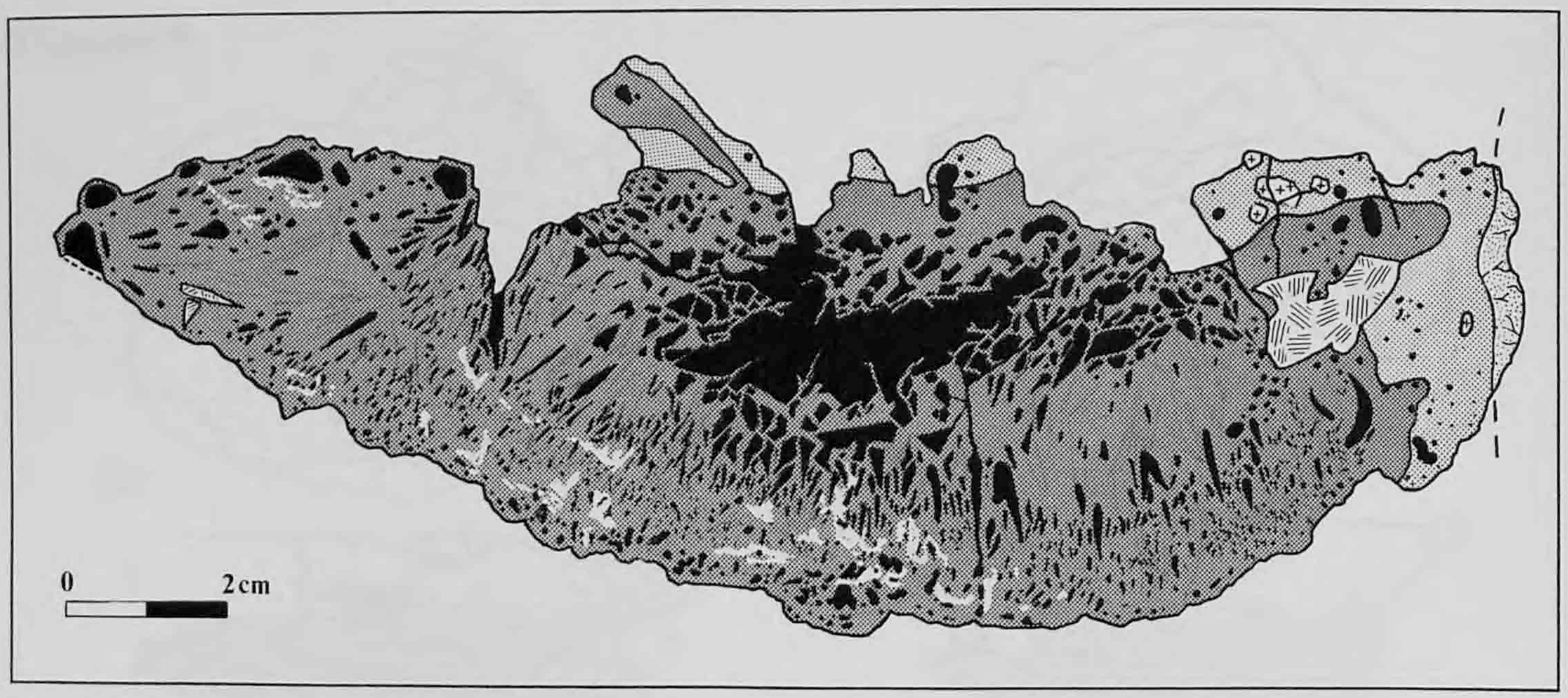


Fig. 82. Scorie en forme de calotte n° 515. Coupe (Symboles : pl. 8, p. 109).

De grands cristaux aciculaires, parfois centimétriques, se forment dans la matrice, plus ou moins selon la même orientation que la porosité. Approximativement aux deux tiers de la hauteur de la pièce, sous le bourrelet, de grandes bulles parallèles à la surface inférieure sont visibles. Elles sont surtout abondantes de côté, là où le bourrelet est tangent au bord de la pièce.

Au-dessus de ces vacuoles allongées, la porosité diminue à nouveau en taille et en proportion par rapport à la matrice.

Dans la partie supérieure, des inclusions d'autres matériaux sont visibles. Il peut s'agir de grains de roche siliceuse ou d'argile cuite, parfois centimétriques. Ces matériaux ont subi une fusion plus ou moins complète.

Il est fréquent d'observer des nuances de coloration de la matrice (gris clair, gris sombre, gris jaunâtre). Des morceaux de charbons de bois peuvent être pris dans la masse à tous les niveaux. Le bord argileux, lorsqu'il est bien développé, présente des altérations dues à la chaleur, allant d'une fusion complète à une simple rubéfaction.

Le fer métallique n'est pas rare dans ces objets. Il peut se trouver sous différentes formes : petits globules circulaires (diamètre : 0.1mm à 1mm) ou filaments : ceux-ci sont présents soit dans la masse, soit autour de vacuoles ou de charbons de bois, soit en masses aux contours dentelés (diamètre de l'ordre du centimètre).

Certaines pièces (528, 553, 595) sont doubles, ce qui signifie qu'elles sont constituées par la superposition de deux calottes. Une pièce (596), mal conservée, pourrait correspondre à la superposition de trois unités.

L'observation des calottes permet de restituer leur position dans le bas foyer. Elles se forment au fond de celui-ci, le plus souvent sous le charbon. Au point le plus chaud, c'est-à-dire sous le trou à vent qui amène l'air du soufflet, la paroi fond et s'amalgame à la scorie.

Les scories en forme de calotte des Boulies présentent une structure de refroidissement bien marquée qui laisse penser qu'elles sont le produit d'une seule opération (respectivement deux et trois pour les pièces doubles ou triples). Elles sont par ailleurs assez volumineuses.

8.3 Composition chimique et minéralogique

Six pièces ont été analysées au laboratoire et dans cinq cas, deux prélèvements ont été faits à des endroits différents sur le même objet. A tous points de vue, les compositions sont très différentes de celles des autres scories du site (fig. 83 et tab. 22; annexe 3). Néanmoins, les calottes ne forment pas un groupe homogène.

Si l'on prend en considération l'ensemble des analyses, on est frappé par les fortes variations. Les distributions des teneurs ne sont pratiquement jamais normales et aucun sous-groupe cohérent n'apparaît. Il ne peut donc être question de travailler avec des moyennes, il faut considérer séparément chaque pièce.

Echantillon	BOE 515.1	BOE 515.2	BOE 516	BOE 528.1	BOE 528.2	BOE 535	BOE 536	BOE 550.1	BOE 550.2	BOE 553.1	BOE 553.2
Eléments majeurs [% poids]											
SiO2	25.11	29.67	19.15	11.35	28.41	27.84	30.44	22.40	25.23	21.21	37.13
TiO2	0.34	0.39	0.22	0.31	0.35	0.25	0.30	0.33	0.32	0.25	0.46
Al2O3	6.63	7.00	3.89	7.30	4.69	4.04	4.90	7.17	7.03	4.05	6.19
Fe2O3	33.25	24.22	49.35	43.53	29.45	26.71	27.99	29.03	26.65	38.52	34.39
FeO	24.33	25.39	18.97	26.07	22.35	32.55	23.56	30.64	29.75	25.58	4.27
MnO	0.09	0.10	0.07	0.16	0.19	0.10	0.09	0.08	0.08	0.06	0.08
MgO	0.46	0.53	0.28	0.43	0.61	0.54	0.52	0.46	0.42	0.31	0.42
CaO	3.49	4.81	1.11	2.53	3.72	2.92	3.66	1.70	2.43	2.30	4.24
Na2O	0.08	0.11	0.04	0.03	0.17	0.09	0.11	0.05	0.07	0.07	0.22
K2O	0.84	1.30	0.63	0.61	2.10	1.14	1.47	1.00	1.44	1.09	2.45
P2O5	0.55	0.62	0.27	0.42	0.41	0.29	0.34	0.43	0.50	0.58	0.57
H2O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO2	0.22	0.15	0.21	0.14	0.15	0.14	0.16	0.15	0.10	0.17	0.13
FeM	4.82	5.38	5.93	7.04	6.54	3.53	6.55	6.44	5.04	5.01	9.20
Total	100.21	99.67	100.12	99.92	99.14	100.14	100.09	99.88	99.06	99.20	99.75
Eléments traces [ppm]											
Zr	121	149	73	80	129	97	116	91	106	101	183
Y	18	21	16	28	19	14	17	20	22	15	21
Sr	43	57	22	38	63	33	42	38	53	31	59
Rb	28	39	27	12	61	42	50	39	48	32	67
Ba	216	310	159	231	536	223	269	307	458	222	452
V	454	336	213	684	139	142	144	466	268	132	127
Sn	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Sb	<5	<5	6	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Ag	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2
As	<8	<8	159	11	29	184	<8	38	<8	<8	<8
Pb	<6	<6	<6	<6	<6	<6	<6	<6	<6	<6	<6
Zn	29	15	24	18	21	20	20	25	26	23	16
Cu	48	33	109	74	95	78	84	37	45	32	33
Ni	67	36	214	46	97	264	71	112	13	11	11
Cr	205	125	92	352	77	87	85	209	82	46	65
Co	61	44	111	50	93	109	70	67	30	25	26

Echantillon	Localisation	Partie analysée	Minéraux
BOE 515.1	N3, c.2	extrémité distale	Fay, Her, (Mag)
BOE 515.2	N3, c.2	partie centrale	Fay
BOE 516	N3, c.2	partie centrale	Fay, Her, Mag, Fer, (Leu)
BOE 528.1	N3, c.2 ou 8	sup : extrémité distale	Fay, Her, Wü, Mag, (Leu)
BOE 528.2	N3, c.2 ou 8	inf : partie centrale	Fay, Wü, Mag, (Fer, Qz, Leu)
BOE 535	N2, c.1 (f1)	partie centrale	Fay, Mag, (Leu)
BOE 536	N2, c.1 (f1)	partie centrale	Fay, (Wü, Mag, Fer, Leu)
BOE 550.1	N4, c.1 (f2)	extrémité proximale	Fay, Her, Wü, (Mag, Leu)
BOE 550.2	N4, c.1	partie supérieure	Fay, Her, Wü, (Leu)
BOE 553.1	O4, paroi f2	sup : partie supérieure	Fay, Her, Wü, Mag, (Leu)
BOE 553.2	O4, paroi f2	inf : partie centrale	Fay

Tab. 22. Analyses de scories en forme de calotte.

Les analyses 535.0 et 536.0 ont été effectuées sur la même pièce en des points équivalents par rapport à la structure interne. Elles sont assez proches l'une de l'autre, mais pour bon nombre d'éléments, il y a des écarts considérables. 550.1 et 550.2 proviennent aussi d'une même pièce, mais sont faites en des points non équivalents. Les différences que l'on observe sont pourtant du même ordre que pour la paire précédente. 515.1 et 515.2 sont prélevées de la même manière mais montrent des écarts plus nets. L'hétérogénéité à l'intérieur d'une même pièce n'est donc pas négligeable. Compte tenu du petit nombre d'analyses, il n'est pas possible de tirer des règles générales sur la relation qui pourrait exister entre la position du prélèvement et sa composition chimique. De recherches plus étendues (Serneels, en préparation), il ressort qu'en général, la partie supérieure de la calotte (bourrelet) est plus siliceuse, tandis que la partie inférieure est plus riche en fer.

Les couples 528.1 / 528.2 et 553.1 / 553.2 appartiennent à des pièces doubles. Les variations chimiques entre les calottes supérieure et inférieure sont plus importantes qu'au sein d'une calotte simple.

Si FeO total reste inversement proportionnel à SiO2, comme dans les scories coulées, les autres éléments ne semblent pas liés entre eux aussi strictement. Les alcalins (Na2O et K2O), le calcium (CaO) et certaines traces (Zr, Sr et Rb) s'enrichissent avec la silice, mais de manière moins systématique.

Les teneurs en traces varient de manière complexe. Les seules relations constantes sont Ba › Zr › Sr = Rb › Y et V › Cu, Co, Cr › Zn › Pb. Quant à As et Ni, ils ont un comportement totalement incohérent.

La composition minéralogique des calottes varie beaucoup. Deux échantillons ne contiennent, comme phase cristalline, que la Fayalite. Les autres comportent au moins trois minéraux parmi les suivants : Hercynite, Magnétite (Fe3O4), Wüstite (FeO), Fer (Fe), Leucite (KAlSiO4) et Quartz. On peut systématiquement postuler la présence d'une phase vitreuse. Aucune relation entre la position du prélèvement et la composition minéralogique ne peut être mise clairement en évidence.

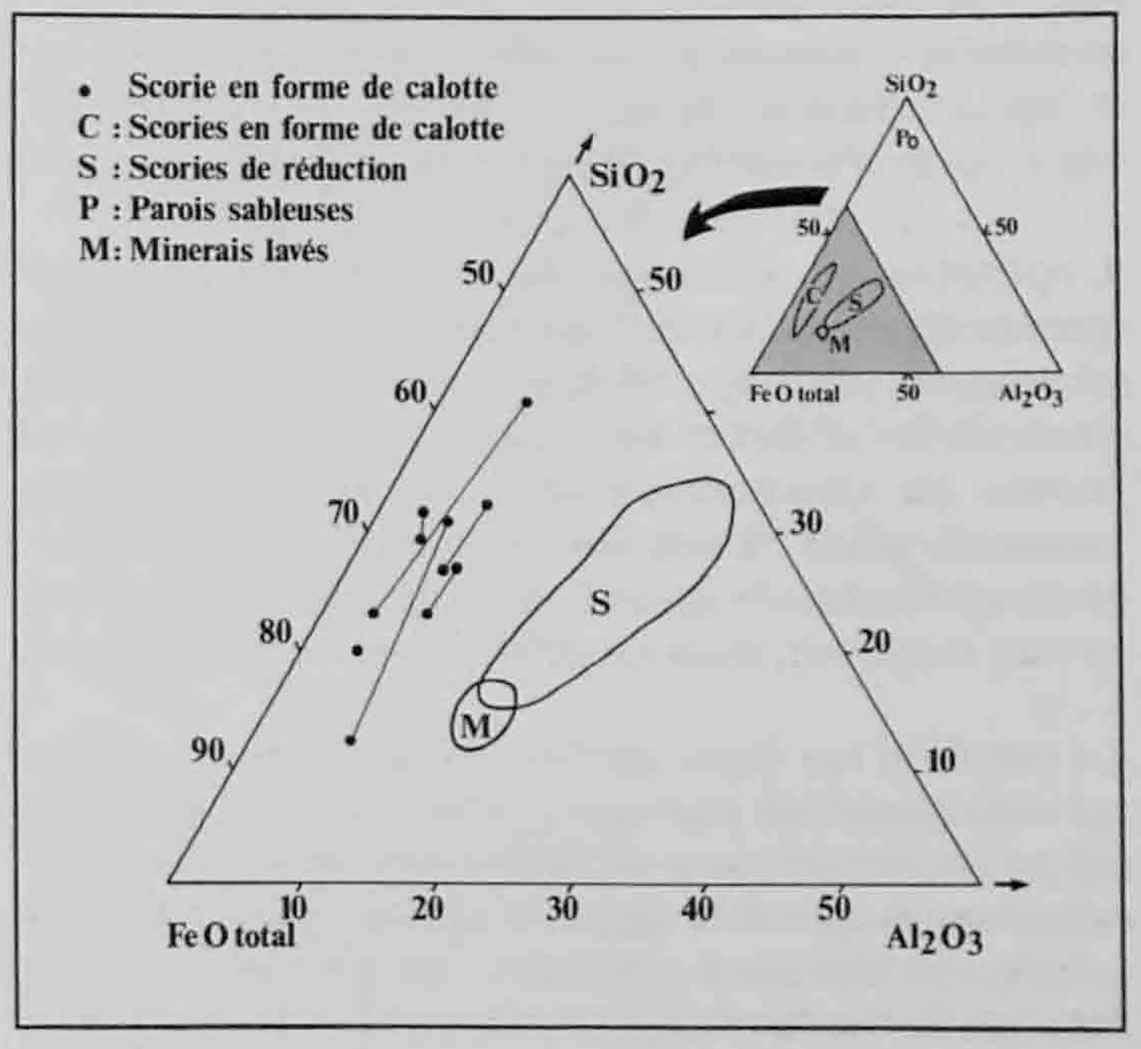


Fig. 83. Composition chimique des scories en forme de calotte.

8.4 Les calottes : résidus du raffinage de l'éponge de fer

Il est possible de démontrer que les calottes ne peuvent pas être le résidu de la réduction des pisolithes du Sidérolithique de la région. Or, il est très peu probable qu'elles résultent du traitement d'un autre minerai (chap. 5.1, p. 69). Par contre, les analyses montrent qu'elles pourraient avoir été produites au cours d'une autre étape du processus sidérurgique : le raffinage de l'éponge de fer.

Pour démontrer cette affirmation, on peut tenter le même raisonnement que pour les scories coulées. Cette fois, comme il n'est plus possible d'utiliser des moyennes, les mêmes opérations ont été faites pour chaque pièce séparément, puis les résultats ont été comparés.

En utilisant la même procédure de calcul que précédemment (base anhydre normée à cent, transformée en % poids d'élément), on peut appliquer l'équation de base de la réduction (minerai + paroi = scorie + fer, chap. 7.2, p. 100).

Les scories en forme de calotte sont très pauvres en aluminium (le rapport entre Si et Al varie de 2 pour 1 à 7 pour 1). Une très faible quantité de minerai fournit donc tout l'aluminium. Le silicium est produit en faible quantité par le minerai et il faut rajouter une quantité appréciable de sable siliceux. C'est pour le fer que le problème se pose. Peu de minerai ne fournit que peu de fer. Or, les calottes sont riches en fer. Dans tous les cas, la quantité de fer produite est trop faible : les calculs montrent qu'il faut systématiquement ajouter du fer au minerai pour pouvoir fabriquer la scorie, ce qui est une aberration. L'hypothèse de la réduction ne peut donc pas être retenue.

Minerai + Paroi ≠ Calotte + Fer

L'opération de raffinage est encore plus complexe que la réduction. Pour l'approcher, on peut proposer le schéma suivant : l'éponge est composée, d'une part, de fer à l'état métallique et d'autre part, de scorie. La composition de cette scorie n'est pas connue à priori. Dans une première approximation, on peut considérer qu'elle est la même que la scorie coulée moyenne, mais ce point ne peut être confirmé.

La paroi du bas foyer participe à la réaction, comme en témoignent les placages argileux collés à certaines pièces, mais les traces de fusion sont beaucoup moins importantes que dans le bas fourneau. Pendant l'opération, un ajout de matière est probable : pour faciliter la soudure du fer, on nettoie les surfaces à souder recouvertes d'une pellicule d'oxydes, soit par martelage, soit en utilisant des décapants. Ces substances se combinent avec les oxydes et forment des minéraux qui se détachent plus facilement du métal. On peut utiliser du sable, de l'argile et bien d'autres substances. La cendre de charbon joue à nouveau un rôle, comme au cours de la réduction.

Il en résulte un bloc de fer purifié (la loupe de fer) et des déchets. Parmi ceux-ci, seule la calotte nous est connue. Les caractéristiques des battitures ne peuvent être que supposées. Généralement, ce sont des oxydes de fer assez purs, mais on trouve aussi des combinaisons plus complexes.

L'équation du raffinage peut donc être formulée :

Fer/Eponge + Scorie/Eponge + Décapant = Calotte + Fer/Loupe

Soit le système :

E gr Si /100gr éponge + D gr Si /100gr décapant
= gr Si /100gr calotte

E gr Al/100gr éponge + D gr Al/100gr décapant
= gr Al/100gr calotte

fer/éponge + E gr Fe/100gr éponge + D gr Fe/100gr décapant
= gr Fe/100gr calotte + fer/loupe

En admettant, dans la deuxième équation, que tout l'aluminium présent dans la calotte provient de la scorie refondue qui était prise dans l'éponge, on trouve le coefficient E. Ensuite, on calcule D dans la première équation. La seule manière de résoudre la troisième équation est de soustraire une partie du fer de l'éponge et de l'incorporer dans la calotte. En rapportant les chiffres obtenus au poids de l'objet, on obtient des estimations comparables entre elles.

La comparaison des données que l'on peut tirer des analyses des différentes calottes souligne que les chiffres pris individuellement n'ont pas grand sens. On ne peut ainsi tenir compte que des ordres de grandeur (tab. 23). L'approche reste donc essentiellement qualitative.

Globalement, le stock chimique d'une scorie en calotte se décomposerait de la manière suivante :

2/5 résultent de la scorie de réduction piégée dans l'éponge et refondue;
1/5 est de la silice ajoutée sous forme de décapant;
2/5 est constitué de fer de l'éponge réoxydé et perdu.

La perte en fer calculée représente entre 5 et 10% du contenu en fer supposé de l'éponge (7.35kg). A cela s'ajoute le métal perdu dans les battitures.

Une hypothèse importante a été formulée au cours du calcul : la nature de l'ajout. Le rapport entre Si et Al

dans les calottes, très élevé (2 pour 1 à 7 pour 1), implique que le silicium a dû être ajouté en proportion beaucoup plus importante que l'aluminium. La paroi du bas foyer, étant argileuse et donc riche en aluminium, ne peut pas jouer ce rôle. Pour la même raison, on peut exclure l'utilisation de pisolithes ou d'argiles sidérolithiques au cours de cette opération. Un sable de quartz plus ou moins pur ferait bien l'affaire.

L'observation macroscopique des scories en forme de calotte permet de confirmer la présence de grains de sable et parfois même de petits cailloux dans la partie supérieure des pièces qui est généralement plus siliceuse. Ceci indique peut-être que l'utilisation de décapants devient de plus en plus importante au fur et à mesure que se déroule l'opération de raffinage et que s'accumule la scorie en forme de calotte au fond du bas foyer. Les parties analysées ont été choisies en excluant les inclusions visibles à l'oeil nu, ce qui explique l'absence presque totale du Quartz parmi les minéraux des calottes.

Si toutefois le matériau ajouté a une composition plus complexe que celle qui est supposée ici (sable + argile, par exemple) et contient une certaine quantité d'aluminium, cela modifie fortement le rapport calculé entre la scorie refondue et l'ajout.

CaO, K2O et MgO s'enrichissent parallèlement. On peut y voir l'expression d'une contamination par les cendres de charbon de bois (chap. 7.3.3, p. 106). Cette vision est peut-être un peu trop simple car dans les calottes, cet enrichissement va de pair avec une augmentation de SiO2. Il faut noter que les calottes sont nettement plus riches en CaO que les scories de réduction. Le phosphore, qui est également un constituant fréquent de la cendre de charbon, a le même comportement que CaO. Il est globalement plus abondant que dans les scories de réduction. Ces observations pourraient indiquer une consommation importante de charbon à ce stade du processus métallurgique.
Le comportement des éléments traces n'est pas assez cohérent pour venir conforter ou infirmer cette démarche.

Calotte n°	Scorie refondue gr	Décapant SiO2 gr	Perte en fer* gr	%
515.1	581	317	633	8
515.2	618	399	526	7
516.0	286	227	755	10
528.1	539	35	683	9
528.2	170	412	643	8
535.0	149	404	693	9
536.0	357	389	551	7
550.1	331	168	433	6
550.2	328	203	397	5
553.1	164	329	841	11
553.2	250	583	529	7

* pour une éponge de 7.35kg (chap. 7.3.1, p. 104)

Tab. 23. Composition chimique des scories en forme de calotte : interprétation des analyses.

Les analyses chimiques permettent de rejeter l'hypothèse de la réduction des pisolithes sidérolithiques pour expliquer la formation des scories en forme de calotte. Si elles n'apportent pas la preuve formelle que ces pièces témoignent de l'opération de raffinage de l'éponge de fer, elles confortent cette hypothèse. La structure interne cohérente des pièces démontre qu'elles se forment en une seule opération. Compte tenu de leur volume, nous pensons qu'elles résultent plutôt du travail de raffinage que du forgeage proprement dit.

La coexistence de Fer métallique, de Wüstite et de Magnétite dans certains échantillons témoigne d'un déséquilibre général. En effet, dans un système atteignant l'équilibre, ces trois minéraux ne devraient pas être présents ensemble. Ce pourrait être le reflet du travail au bas foyer dans lequel l'atmosphère, tantôt réductrice, tantôt oxydante, change continuellement.

8.5 L'atelier de raffinage

Sur le site, les scories en forme de calotte sont toutes en position de réemploi dans la construction du bas fourneau 2 (chap. 6.2, p. 91). Il n'y en a aucune dans les zones de rejet des scories liées au fonctionnement des deux bas fourneaux. Elles ne peuvent donc pas être mises en rapport avec ces appareils.

Par ailleurs, aucune structure de bas foyer n'a été découverte au cours des investigations archéologiques sur le site. De même, les résidus associés - scories en goutte et battitures - n'ont pas été observés. L'opération de raffinage de l'éponge de fer n'a donc laissé aucune trace dans le périmètre fouillé.

L'utilisation des scories en forme de calotte comme matériau de construction laisse penser qu'elles devaient se trouver à proximité immédiate du site de réduction, au plus à quelques centaines de mètres. C'est dans ce périmètre restreint qu'il faut imaginer la présence d'un atelier spécialisé, éventuellement lié à un habitat.

Utilisées pour construire le bas fourneau 2, elles pourraient avoir été produites lors du traitement des éponges fabriquées dans le bas fourneau 1, mais rien ne prouve qu'elles ne soient pas beaucoup plus anciennes. En effet, des installations métallurgiques plus vieilles de plusieurs siècles ont fort bien pu exister dans le secteur.

Chapitre 9

Conclusion

9.1 Les étapes de la chaîne opératoire

La métallurgie du fer peut être décrite comme une suite d'opérations techniques menant de la substance naturelle (minerai) à l'objet fonctionnel en fer métallique : cette suite s'appelle la chaîne opératoire de la sidérurgie (GSAF 1991a). Aux Boulies, certaines étapes sont attestées par des vestiges matériels; d'autres peuvent être supposées et situées grâce à l'étude des témoins archéologiques.

L'extraction du minerai est documentée indirectement. Avant que ne débute l'exploitation, le minerai sidérolithique est, selon des critères non industriels, abondant dans le secteur. Ce sont les lentilles riches en pisolithes qui ont été exploitées. Le Sidérolithique se présente sous la forme d'un niveau plus ou moins continu qui affleure dans les versants du Cras des Fonnés et de la Combe des Boules. Ailleurs, le recouvrement stérile atteint une épaisseur de 10 à 50 mètres.

A l'époque mérovingienne, le minerai est sans doute exploité par des travaux à ciel ouvert. Le volume consommé dans les deux bas fourneaux n'est pas énorme et les terrains relativement meubles ne demandent pas l'utilisation de techniques ou d'outillages particuliers pour l'extraction.

Les travaux postérieurs, attestés pour le XIXe siècle et probables pendant le Moyen Age, ont totalement modifié la topographie des environs. Pour cette raison, il est impossible de mettre en relation une structure d'extraction particulière (puits, tranchée, minière) avec la période de fonctionnement de l'atelier.

Il est toutefois vraisemblable de situer les travaux miniers contemporains du fonctionnement de l'atelier à l'endroit où le vallon des Boulies rejoint celui de la Rouge Eau.

Les traitements préliminaires destinés à enrichir le minerai et à améliorer ses qualités ont laissé davantage de traces reconnaissables. Après l'abattage, le minerai est transporté dans le vallon des Boulies et stocké sur les versants. A cet endroit, il a pu subir un lessivage par les eaux de pluie. Le ruisseau a également été utilisé pour le lavage comme en témoignent les sédiments. Des chenaux et des fosses (dépression 9), situés dans les pentes, sont peut-être également en relation avec cette opération. Ce procédé permet de séparer les pisolithes ferrugineux de leur gangue argileuse. On obtient ainsi un concentré à une teneur moyenne de 42% Fe.

Une fois lavé, le minerai est stocké à proximité immédiate de l'atelier de réduction (tache 2). On puisera dans cette réserve au fur et à mesure des besoins.

Les pisolithes subissent ensuite un chauffage préliminaire (grillage). Des aires de 50 à 100cm de diamètre, recouvertes de fines couches de pisolithes chauffés et de charbon de bois superposées, ont été retrouvées dans le périmètre fouillé. Elles sont interprétées comme les foyers où cette opération s'est effectuée. Les pisolithes grillés perdent une partie de l'eau qui les imprègne. Ce traitement thermique développe également un réseau de microfractures et provoque un début de réduction des oxydes de fer.

La réduction du minerai de fer se pratique dans un bas fourneau. C'est à ce moment-là que l'on extrait le fer métallique. Les deux appareils découverts aux Boulies sont des constructions assez sophistiquées. La partie basse est encastrée dans le substrat. L'élévation est bâtie avec des parois épaisses en pierres recouvertes à l'intérieur par un revêtement en sable. A la hauteur de la tuyère latérale, ce revêtement est renforcé dans un des deux fourneaux par un "hérisson" de tuileaux romains. Le diamètre interne de la cuve est de 60 à 70cm; la hauteur est estimée à 1.5m. Une porte est aménagée dans le sens de la pente; son cadre est probablement constitué par des tuileaux disposés de façon radiale. Elle est barrée par un seuil d'une dizaine de centimètres de haut et s'ouvre sur une cuvette bordée de murets en pierre. Une tuyère est encastrée horizontalement dans la paroi latérale à 50cm au-dessus du fond. Une seconde est placée dans la porte, près d'un montant, supportée par un bloc d'argile. Elle est orientée vers le centre du fond du bas fourneau.

Fig. 84. Reconstitution du site métallurgique des Boulies.

Le combustible utilisé est le charbon, plus efficace que le bois. Ce sont le hêtre et le sapin qui fournissent la matière première. Comme l'image du paysage donnée par les pollens diverge nettement de celle fournie par les charbons, la question de savoir si l'on a trouvé ces essences en quantité suffisante à proximité du site demeure posée.

L'opération de réduction débute par un chauffage préliminaire du bas fourneau. Après la mise à feu, la cuve est remplie de charbon, dont la combustion, activée par la soufflerie, permet d'atteindre plus de 1000°C à la hauteur de la tuyère latérale et entre 600 et 800°C plus haut dans la cuve.

Au moment où le régime thermique se stabilise et où la production de monoxyde de carbone est optimale, on commence à charger le minerai par le gueulard. La charge descend au rythme de la combustion du charbon et on complète au fur et à mesure le remplissage de la cuve par des apports successifs de minerai et de charbon.

La réduction commence dans la partie supérieure de la cuve. Une partie des oxydes de fer est progressivement transformée en métal alors qu'en descendant, la charge pénètre dans des zones toujours plus chaudes. Un peu au-dessus de la tuyère latérale, la température est suffisante pour faire fondre la scorie. Le liquide qui se forme est un mélange d'oxydes de fer, de silice et d'alumine, qui entraîne les autres impuretés. Etant fluide, il s'écoule vers le bas entre les charbons ardents. Un peu en dessous de la tuyère latérale, la température est plus faible et la scorie devient alors trop visqueuse pour poursuivre sa descente. A l'aide de la tuyère frontale, on relance la combustion dans la partie inférieure du bas fourneau et liquéfie ainsi à nouveau la scorie qui s'est accumulée. Au besoin, l'artisan aide la scorie à s'écouler par la porte, au moyen d'une barre de fer (le ringard).

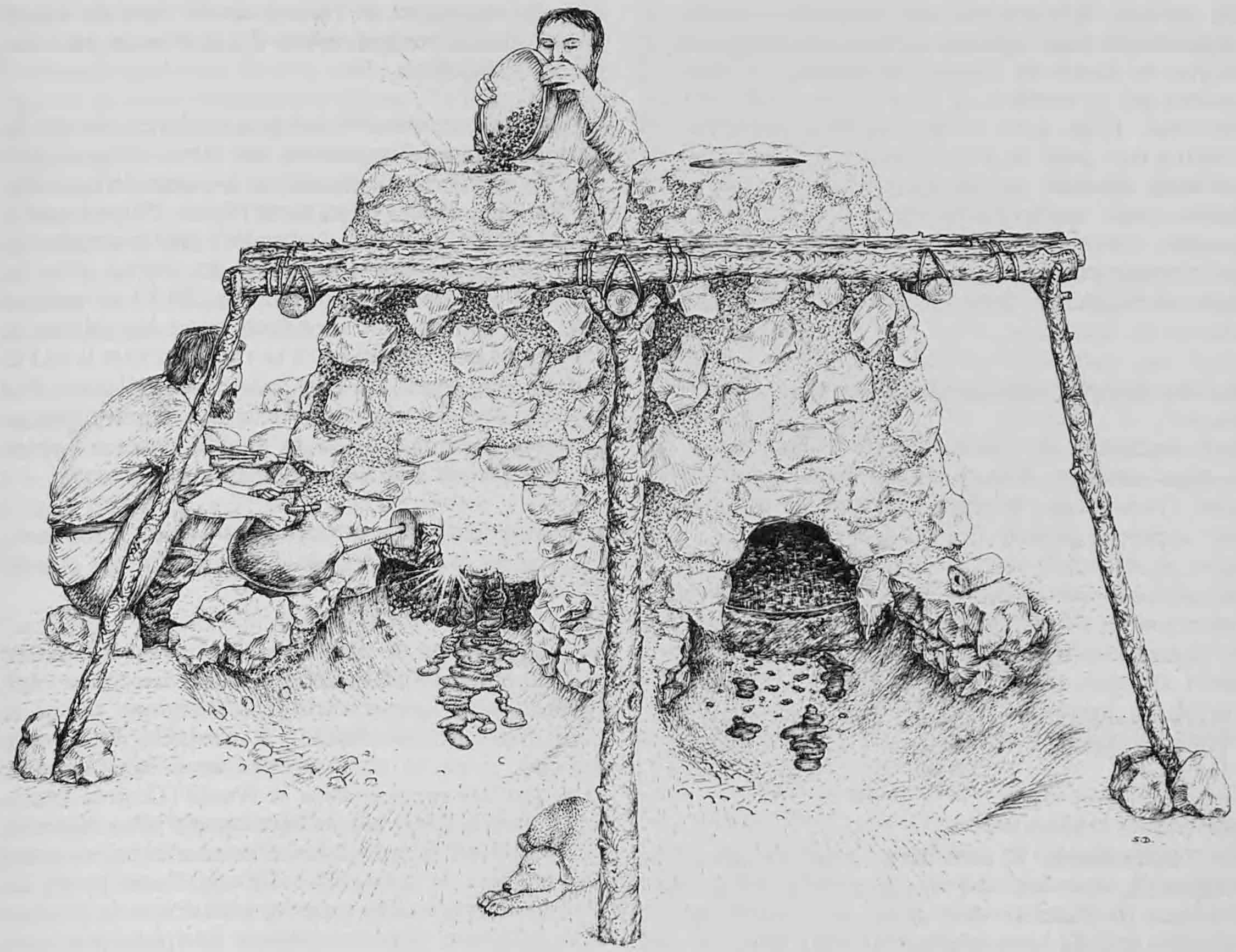


Fig. 85. Reconstitution des bas fourneaux. L'image proposée se base sur les données présentées dans le cadre de cet ouvrage. Toutefois, certains éléments ont été reconstitués plus librement, en l'absence d'indices archéologiques précis : il s'agit notamment de l'aspect extérieur des fourneaux en élévation, de l'abri installé au-dessus des cuvettes, du type de soufflet employé et enfin du seuil qui barre la porte.

Cette manipulation se répète une cinquantaine de fois au cours d'une opération de réduction. L'écoulement de la scorie libère de la place à l'intérieur de la cuve pour traiter la charge suivante de minerai.

Le fer métallique quant à lui ne fond pas; il devient tout au plus pâteux. Les particules métalliques se rassemblent et forment une éponge de fer qui se bloque dans le brasier. L'artisan la déplace éventuellement dans le fourneau à l'aide du ringard et cherche à amalgamer au mieux le métal. Il contrôle sans doute aussi la position de la pièce dans la cuve. Car s'il est soumis à un courant d'air trop fort, le fer se décarbure, voire s'oxyde.

Le processus s'arrête lorsque l'éponge devient trop volumineuse et empêche la charge de descendre. La pièce de fer est alors extraite du bas fourneau par la porte. Le minerai incomplètement réduit (scories internes rouillées), le charbon non consumé et les scories attachées à la paroi (scories internes massives) sont évacués par la même occasion (défournement). Il est vraisemblable qu'on laisse le feu s'éteindre auparavant. En tout cas, il n'y a aucune trace d'un martelage à chaud de l'éponge immédiatement après l'opération de réduction.

Avant de recommencer un nouveau processus, le fourneau et les tuyères sont, si nécessaire, remis en état. Les scories et autres débris sont rejetés à la périphérie. Lors d'une nouvelle opération, les petits morceaux d'éponge et le minerai incomplètement réduit peuvent être recyclés dans le bas fourneau. Quant à l'éponge, elle est peut-être placée une seconde fois dans l'appareil afin d'être purifiée, mais aucun indice archéologique ne le confirme.

A ce stade du travail, le produit du bas fourneau est encore bien imparfait. Sa texture est vacuolaire et il contient encore des impuretés. L'étape suivante de la chaîne opératoire est donc le raffinage de l'éponge de fer. La pièce est réchauffée dans un bas foyer ouvert et progressivement compactée et soudée à elle-même par martelage. Les inclusions de scories sont refondues ou expulsées sous les coups de marteau.

Sur le site, il n'y a pas de structure évidente se rapportant à cette opération. Seule une vingtaine de scories en forme de calotte, interprétées comme les résidus qui se forment au fond du bas foyer, ont été trouvées. Elles sont utilisées comme matériau de construction pour le bas fourneau 2. Le travail du raffinage n'a donc pas été pratiqué dans le périmètre fouillé mais vraisemblablement dans un lieu très proche. Aucune trouvaille ne se rapporte au travail de forgeage proprement dit, c'est-à-dire à la mise en forme d'objets fonctionnels.

9.2 Le district sidérurgique du Jura

Les conditions de fouille et de conservation des vestiges ainsi que l'étude de ces derniers au laboratoire (remontage, analyses chimiques), permettent une approche quantitative du site.

	Dernière opération de réduction dans le bas fourneau 2	Production de l'atelier
Scories produites	35 kg	5000 ± 500 kg
Pisolithes utilisés	48 kg	6800 ± 600 kg
Fer produit	7.5 kg	1050 ± 100 kg

Ces estimations, à considérer avec la prudence nécessaire, donnent une image somme toute assez modeste de l'atelier des Boulies. La quantité de minerai utilisée est négligeable par rapport aux réserves. L'exploitation n'a modifié que superficiellement la topographie. Les quelque 1000kg de métal produit ne dépassent pas la demande locale. Le charbon dont on s'est servi peut être fourni par quelques hectares de taillis.

Cette vision doit toutefois être nuancée. Si le site des Boulies apparaît comme une entreprise de petite envergure, aux besoins limités, il s'inscrit dans le contexte plus large du district sidérurgique du Jura.

Entre Laufon au nord-est et Saint-Imier au sud-ouest, l'industrie du fer a une longue histoire. Le XIXe siècle a été la période de production la plus intense, mais c'est déjà au début du XVIe siècle que s'implantent les premiers hauts fourneaux succédant à des installations plus primitives (Kürsteiner et al. 1990). Pour les périodes antérieures, les archives et donc les repères chronologiques, font défaut; les vestiges par contre sont encore abondants à l'heure actuelle.

Les travaux de terrain qui viennent à peine de commencer ne fournissent pas encore de données archéologiques modernes en quantité suffisante. Les investigations entreprises au cours des cinquante dernières années ont été très ponctuelles. La seule vision d'ensemble concernant l'ancien Evêché de Bâle à laquelle on puisse se référer est le fruit de trente années de recherches, faites il y a plus de cent ans par A. Quiquerez.

Ce savant connaissait bien la métallurgie du fer de par sa fonction d'inspecteur des mines et son esprit aigu de chercheur. Il arpenta en tous sens le territoire du Jura historique. Dans cette région, d'une superficie de 500km² environ, il estimait à 400 le nombre de sites métallurgiques (des amas de scories pour la plupart) et en avait visité plus de 200 ! Les vestiges sont particulièrement abondants entre les vallées de Delémont et de Moutier; ils se raréfient vers le sud et l'ouest. En Ajoie, ils sont très peu nombreux. Par contre, vers le nord-est, la zone sidérurgique se prolonge dans une région qu'A. Quiquerez n'a guère étudiée (cantons de Soleure et Bâle campagne).

Il peut y avoir par site un ou plusieurs fourneaux, mais même les plus grands ne fournissent pas plus de 300m³ de déchets.

Sa haute densité de sites - lesquels ont probablement produit entre 10000 et 20000 tonnes de scories - fait du Jura historique le district sidérurgique ancien le plus important de Suisse. A l'échelle du monde antique, il ne se compare pas avec les immenses exploitations connues dans le Weald (Grande-Bretagne, Cleere 1983) ou la Montagne Noire (France, Sablayrolles 1982), régions où les scories se comptent par millions de tonnes. Le Jura se classe parmi les districts moyens dont on peut penser que la production s'exporte vers les régions périphériques sans forcément circuler sur de très longues distances.

Toutefois, un facteur nous échappe encore à l'heure actuelle : la chronologie. La méthode directe de réduction du minerai de fer est employée depuis l'Age du Fer et perdure jusqu'à la fin du Moyen Age, soit sur environ vingt siècles. A l'intérieur de cet immense laps de temps, il nous est encore impossible pour le district du Jura de proposer des subdivisions.

9.3 Le peuplement mérovingien du Jura

Les vestiges relatifs à la sidérurgie ancienne datant du Haut Moyen Age sont nombreux dans le Jura suisse. Dans la région de Schaffhouse, un fourneau mérovingien a été mis au jour à Merishausen. Dans le Jura vaudois, aux Bellaires, à Prins-Bois et à Montcherand, la majorité des fourneaux découverts datent de cette époque. Les deux fourneaux des Boulies viennent compléter l'inventaire, mais celui-ci n'est de loin pas exhaustif. La bibliographie et les observations issues des premières prospections récentes laissent entrevoir que le nombre de sites à bas fourneaux mérovingiens est certainement encore plus élevé dans nos contrées.

Ce fait n'a rien d'étonnant si l'on songe que les sites archéologiques d'époque mérovingienne sont particulièrement nombreux dans la vallée de Delémont, par rapport au reste du territoire suisse. Il s'agit presque exclusivement de nécropoles. En effet, aucun habitat mérovingien n'a été mis en évidence jusqu'à ce jour. L'élément le plus caractéristique de ces cimetières datant des VIe et VIIe siècles est leur richesse en mobilier funéraire en fer (boucles de ceinture, armes, etc.). La majorité des données provient cependant de fouilles du siècle passé, d'où le manque de connaissances précises sur ces sites.

La nécropole la plus importante, qui a livré probablement plusieurs centaines de tombes, se trouvait à Bassecourt. Ce village est situé à moins de deux kilomètres au sud du site des Boulies, là où la Rouge Eau se jette dans la Sorne. Deux cimetières mérovingiens ont en outre été mis au jour à Courfaivre, un autre à Develier et un à Vicques.

Le nombre élevé de nécropoles et une industrie de fer bien développée permettent de déduire un peuplement relativement concentré. Un développement local accru se poursuit depuis l'époque romaine. Les estimations indiquent 4 à 7 habitants par kilomètre carré (Schifferdecker 1984).

La toponymie apporte également des indices parlant pour un accroissement de la population durant les VIe et VIIe siècles. Les villages dont l'appellation remonte probablement à cette époque sont nombreux et notamment tous ceux qui comportent la syllabe "cour", tels Bassecourt, Boécourt, Courtételle, Courfaivre, etc.

La richesse en minerai de fer de cette région du Jura peut fort bien être à l'origine de ce développement démographique. Elle a pu favoriser l'installation de groupes ethniques qui peu à peu ont acquis un bien-être matériel, comme le montre le riche mobilier de certaines tombes fouillées.

En résumé, durant le Haut Moyen Age, le Jura est une région peuplée, riche de son minerai de fer et de son bois dont il a su tirer profit.

9.4 Bilan et perspectives

L'étude des Boulies à Boécourt s'inscrit dans le contexte de l'archéologie de sauvetage. Cette situation d'urgence permet de mobiliser les moyens nécessaires à une intervention, mais en contrepartie, impose des limites strictes aux investigations. Le temps imparti, aussi bien pour les travaux de terrain que pour l'élaboration des résultats, ainsi que l'exiguïté du territoire considéré interdisent une approche autre que ponctuelle. C'est pourquoi, le présent volume se propose de fournir l'étude détaillée d'un site archéométallurgique et non pas celle de l'ensemble du district sidérurgique du Jura.

S'il n'est pas justifié, sur la base d'une étude aussi spécifique que celle de la région des Boulies, de prétendre à la généralisation, il paraît en revanche judicieux de mettre rapidement à la disposition de la communauté scientifique des résultats concrets. Nous espérons que ceux-ci serviront de point de départ pour de nouvelles recherches, en particulier sur le territoire du canton du Jura.

Une prospection systématique permettant le repérage sur le terrain des sites miniers et métallurgiques est une étape qui s'impose. Les publications d'Auguste Quiquerez constituent pour une telle étude une base dont bien peu de régions disposent à l'heure actuelle. Toutefois, les données chronologiques sont indispensables pour appréhender l'évolution d'un district et c'est certainement sur ce point que les travaux anciens sont le moins précis. La compréhension de l'histoire des techniques, de leurs progrès et de leur diffusion passe en outre par l'étude détaillée du fonctionnement des fourneaux, c'est-à-dire de leur architecture, ainsi que des résidus et des produits. De nouvelles investigations tant sur le terrain qu'en laboratoire s'annoncent prometteuses.

Résumé

Le site des Boulies à Boécourt (JU) se trouve à l'extrémité nord-ouest de la vallée de Delémont, au pied du col des Rangiers.

Les recherches archéologiques (cartographie minière, relevé topographique, sondages et fouille) ont été menées en 1989 dans le cadre de la construction de l'autoroute N16-Transjurane. Les travaux de terrain ont été complétés par l'élaboration des données archéologiques (remontages, études stratigraphique, architecturale et quantitative), ainsi que par différentes approches en laboratoire (datation par C14 et archéomagnétisme, palynologie et anthracologie, analyses métallurgiques).

Tout le secteur est riche en minerai de fer sidérolithique. Celui-ci est constitué par des concrétions d'oxydes de fer (pisolithes), prises dans une matrice argileuse rouge (bolus). Il est déposé sur la surface karstifiée des calcaires (Malm) et recouvert par des graviers (Pliocène). Le long des versants des principaux ravins, il a été mis à nu par l'érosion.

L'exploitation du minerai a débuté par des travaux à ciel ouvert (minières) à l'emplacement des affleurements naturels, puis s'est développée en suivant les poches riches, à l'aide de tranchées ou de courtes galeries. Ce n'est qu'au XIXe siècle que des puits profonds ont été forés à travers les terrains supérieurs, pour atteindre les parties souterraines du gisement. Cette dernière période d'exploitation est bien connue grâce aux rapports contemporains établis par A. Quiquerez (concession du Rayon de Séprais). Certains puits, ainsi que diverses structures minières repérés sur le terrain peuvent être attribués à cette ultime phase d'activité.

Les travaux plus anciens ont laissé de nombreuses traces dans la topographie, mais, en général, l'absence d'indices chronologiques ne permet pas de proposer une datation.

Dans le petit vallon des Boulies, des installations sidérurgiques artisanales ont été découvertes. L'atelier de réduction du minerai de fer, situé en amont, comporte deux bas fourneaux, plusieurs foyers de grillage du minerai et des zones de rejet de scories : ces vestiges sont datés de l'époque mérovingienne. A quelques mètres se trouve un dépôt de minerai lavé. Dans la partie inférieure du vallon, le ruisseau, actif à cette période, a été utilisé pour le lavage. D'autres structures (fosses, chenaux, etc), plus difficiles à interpréter, sont également en relation avec le traitement préliminaire du minerai. Au cours du Haut Moyen Age, l'extraction à ciel ouvert a pu se faire à l'entrée du vallon où le Sidérolithique affleurait. Toutefois, à cet endroit, les bouleversements postérieurs ont effacé les traces anciennes.

Installés à flanc de coteau, les deux bas fourneaux destinés à la réduction du minerai de fer ont été construits successivement et réparés à plusieurs reprises : la stratigraphie et l'architecture montrent que le fourneau 1 existait avant le fourneau 2 et que ce dernier a continué d'être utilisé après l'abandon du premier appareil. Néanmoins, pendant la phase principale d'activité de l'atelier, les deux installations ont fonctionné, soit en alternance, soit en parallèle.

Ils ne diffèrent l'un de l'autre que sur des points de détail et sont très proches des bas fourneaux du Haut Moyen Age, fouillés dans le Jura vaudois (Bellaires) et en Lorraine (Ludres).

Le fond des fourneaux est légèrement encastré dans le substrat. Les parois de la cuve sont constituées d'un manteau de pierres et d'un revêtement interne en sable, renforcé par des fragments de tuiles romaines. La partie frontale, qui comportait une large porte, n'a pas été préservée. A l'origine, la hauteur des appareils devait atteindre 1.50m. A l'avant des fourneaux s'ouvre une cuvette peu profonde, creusée dans la pente et délimitée par des murets. La ventilation est assurée par une double soufflerie. Une tuyère est placée plus ou moins horizontalement dans la paroi de la cuve, à 50cm au-dessus du fond. Une seconde, frontale et inclinée vers le bas, occupe une moitié de la porte. L'autre moitié est laissée libre pour permettre à la scorie liquide de s'écouler vers l'extérieur. Le fer métallique, à l'état pâteux, n'est extrait du fourneau qu'à la fin de l'opération.

Les scories résultant de la dernière opération de réduction dans le bas fourneau 2 ont été retrouvées

en place. Cette dernière coulée se compose d'une soixantaine de pièces distinctes. L'évacuation de la scorie se fait au fur et à mesure de l'avancement du travail. L'aspect des coulures varie en fonction de la viscosité du liquide et de la pente de l'écoulement : celui-ci, dans certains cas, s'est effectué verticalement, attestant par là l'existence d'un seuil dans la porte. Les remontages démontrent qu'une même pièce comporte des morphologies très différentes.

Au cours du dernier fonctionnement du bas fourneau 2, 40kg de scories ont été produits. On peut estimer que l'ensemble du site a livré 5500kg de scories. Les analyses chimiques de minerais, de fragments de revêtement et de scories, permettent en outre de calculer la quantité de fer produite (éponge de fer), soit environ 7kg par opération. La production totale de l'atelier est de l'ordre d'une tonne.

Plusieurs scories en forme de calotte ont été réutilisées comme matériaux de construction dans le bas fourneau 2. Ces pièces, qui se distinguent des scories de réduction par leur morphologie et par leur chimisme, résultent du raffinage des éponges de fer, pratiqué dans un bas foyer. Aucune structure du site ne peut être mise en relation avec ce travail; toutefois, la présence de ces objets laisse supposer qu'un atelier spécialisé se trouvait à proximité.

Les artisans ont utilisé le charbon de hêtre et de sapin comme combustible. Ces bois abondent actuellement dans les forêts du Jura au-dessus de 600 mètres d'altitude. Après l'abandon du site, le couvert forestier est moins important, puisque dans les spectres polliniques, les essences recherchant la lumière et l'humidité dominent (bouleau et noisetier). Des espaces ouverts existent et sont partiellement mis en valeur par l'homme. Si le fonctionnement de l'atelier a contribué au défrichement, il n'est sans doute pas seul en cause.

L'atelier des Boulies est une entreprise de petite dimension. L'approvisionnement en matières premières (minerai et charbon) ne devait pas poser de problème. Quant à la production, elle n'excédait, à elle seule, pas les besoins locaux. Toutefois, il ne faut pas perdre de vue que ce site s'inscrit dans le contexte du district sidérurgique du Jura qui est le plus important de Suisse.

La sidérurgie mérovingienne a laissé des traces dans différentes régions de Suisse (Vaud, Schaffhouse). Dans la vallée de Delémont, elle doit être mise en rapport avec l'occupation humaine dense dont témoignent de nombreuses nécropoles.

Zusammenfassung

Die Fundstelle "Les Boulies" bei Boécourt (JU) befindet sich am nordwestlichen Ende des Delsberger-beckens, am Fusse des Rangierspasses.

Die archäologischen Untersuchungen (Kartierung des Bergbaus, topographische Aufnahme, Sondierungen und Ausgrabung) wurden 1989 im Zusammenhang mit dem Nationalstrassenbauprojekt N16-Transjurane durchgeführt. Im Anschluss an die Arbeiten im Gelände erfolgte die Auswertung der archäologischen Daten (Rekonstruktion, stratigraphische, architektonische und quantitative Analysen), vervollständigt durch verschiedene Laboruntersuchungen (Datierung mittels C14 und Paläomagnetismus, Pollenanalyse und Holzkohlenbestimmung, sowie metallurgische Analysen).

Das untersuchte Gebiet ist sehr eisenerzhaltig. Es handelt sich um Bohnerzformationen (Siderolithikum), welche aus Eisenoxydkonkretionen (Bohnerz) in einem lehmigen Ganggestein (Bolus, Bohnerztone) bestehen. Diese Schichten wurden auf der Karstoberfläche des Kalkgebirges (Malm) abgelagert und durch Vogesenschotter (Pliozän) überdeckt. An den Abhängen der tief eingeschnittenen Schluchten ist das Erz durch die Erosion wieder freigelegt worden.

Der Erzabbau begann im Tagebau (Pingen), dort wo die erzhaltige Schicht ausbeisst; er weitet sich danach aus, indem die erzhaltigen Linsen mittels Gräben und Stollen ausgebeutet werden. Erst im Laufe des 19. Jh. werden tiefe Schächte durch das Deckgestein getrieben, um die unsichtbaren Teile der Lagerstätten zu erreichen. Diese letzte Abbauphase ist dank der zeitgenössischen Rechenschaftsberichte von A. Quiquerez (Konzession "Rayon de Séprais") sehr gut bekannt. Bestimmte Schächte und verschiedene im Gelände erfasste Bergbaubefunde können dieser Abbauphase zugewiesen werden.

Ältere Aktivitäten haben ebenfalls zahlreiche Spuren in der Topographie hinterlassen; der Mangel an chronologischen Indizien verunmöglicht es aber im Allgemeinen eine Datierung vorzuschlagen.

Im Tälchen "Les Boulies" wurden vorindustrielle Einrichtungen der Eisenerzaufbereitung und -verhüttung entdeckt. Der Verhüttungsplatz, im oberen Teil des Tales gelegen, umfasst zwei Rennöfen, mehrere Erzröstherde und Schlackenabfallzonen. Die Befunde datieren aus der Merowingerzeit. Einige Meter daneben befindet sich ein Depot von gewaschenem Erz. Im unteren Teil des Tales wurde ein damals aktiver Bach zur Erzwäsche verwendet. Weitere Befunde (wie Gruben, Rinnen, usw.), deren eindeutige Interpretation schwerfällt, haben ebenfalls einen Bezug zur Erzanreicherung. Während des Frühmittelalters könnte der Erzabbau am Talausgang , wo die Bohnerzformationen ausbissen, erfolgt sein. Jüngere Eingriffe haben jedoch an dieser Stelle allfällige ältere Spuren überlagert und verwischt.

Die beiden Rennöfen zur Eisenerzverhüttung sind im flachen Talhang errichtet worden. Sie wurden nacheinander gebaut und mehrmals repariert : Stratigraphie und Architektur zeigen, dass der Ofen 1 vor dem Ofen 2 bestand und der Ofen 2 nach der Auflassung des Ofens 1 noch benutzt wurde. Während der Hauptphase der Aktivität des Werkplatzes arbeiteten die beiden Öfen jedoch abwechslungsweise oder gleichzeitig.

Die beiden Apparate unterscheiden sich nur in Einzelheiten voneinander. Sie sind den frühmittelalterlichen Rennöfen des Waadtländer Jura (Bellaires) und denen in Lothringen (Ludres) sehr ähnlich.

Die Ofensohle ist in den gewachsenen Boden eingetieft. Die Schachtwände werden von einem Steinmantel und einer Innenverkleidung aus Sand gebildet. Die Verkleidung ist durch römische Ziegelstücke verstärkt. Von der Stirnseite, die eine weite Ofentüre besass, ist in situ nichts erhalten geblieben. Die ursprüngliche Höhe der Öfen betrug 1.50 m. Vor den Apparaten wurde eine flache Mulde ebenfalls in den gewachsenen Boden eingetieft und seitlich durch Mäuerchen begrenzt. Ein doppeltes Gebläse stellt den nötigen Zug im Ofeninnern sicher. Eine Düse sitzt 50cm über der Sohle, mehr oder weniger waagrecht in der seitlichen Schachtwand. Eine zweite Düse, mit starker Neigung zur Sohle, nimmt stirnseitig eine Hälfte der Türe ein. Die andere Hälfte ist offen, damit die flüssige Schlacke aus dem Ofen abfliessen kann. Das metallische Eisen bleibt teigig und wird erst am Ende des Arbeitsvorganges aus dem Ofen herausgeholt.

Die Fliessschlacken des letzten Verhüttungsprozesses im Rennofen 2 sind in situ gefunden worden. Dieser Schlackenfluss setzt sich aus ungefähr 60 Objekten zusammen. Die Beseitigung der Schlacke aus dem Ofeninnern erfolgt nach und nach während des Arbeitsablaufes. Das Aussehen der Schlacken ändert sich je nach der Viskosität der Flüssigkeit und dem Neigungswinkel beim Abfliessen : dieses erfolgte teilweise senkrecht, was für eine Schwelle in der Türe spricht. Die Schlackenrekonstruktionen beweisen, dass ein und dasselbe Objekt sehr verschiedene Oberflächenbeschaffenheiten aufweisen kann.

Im Laufe des letzten Verhüttungsvorganges im Rennofen 2 sind 40kg Schlacken angefallen. Nach Schätzungen beläuft sich die Schlackenproduktion für den gesamten Werkplatz auf 5500kg. Die chemischen Analysen des Erzes, des sandigen Wandverputzes, sowie der Schlacken erlauben es die hergestellte Eisenmenge zu berechnen. Sie beträgt ungefähr 7kg für einen Arbeitsvorgang. Die Gesamtmenge des auf dem Werkplatz hergestellten Eisens beläuft sich auf 1 Tonne.

Mehrere Kalottenschlacken sind als Baumaterial im Rennofen 2 wiederverwendet worden. Diese Schlakken bilden sich bei der Reinigung des Eisenschwammes in einem Ausheizherd. Sie unterscheiden sich morphologisch und chemisch von den Verhüttungsschlacken. Auf dem Werkplatz konnten keine Befunde mit dieser Arbeit in Zusammenhang gebracht werden.

Die Anwesenheit der Kalottenschlacken auf der Fundstelle weist jedoch darauf hin, dass sich in der Umgebung ein Werkplatz für diese Arbeit befand.

Holzkohle von Buche und Tanne wurde als Brennmaterial auf dem Werkplatz verwendet. Diese Baumarten beherrschen heute das Waldbild des Juras oberhalb von 600m ü. M. Nach der Auflassung des Platzes ist der Wald weniger dicht, denn in den Pollenspektren überwiegen die licht- und feuchtigkeitsliebenden Arten (Birke und Hasel). Unbewaldete Flächen sind in der Umgebung vorhanden und werden teilweise vom Menschen bewirtschaftet. Die Tätitkeit des Werkplatzes hat sicher zur festgestellten Abholzung beigetragen, kann aber nicht allein dafür verantwortlich gemacht werden.

Der Verhüttungsplatz "Les Boulies" ist ein Unternehmen von bescheidenen Ausmassen. Die Rohstoffversorgung (Erz und Kohle) erfolgte sicher ohne jeglichen Schwierigkeiten. Die Menge des produzierten Eisens überstieg, für sich allein, nicht die lokalen Bedürfnisse. Der Zusammenhang dieser Fundstelle mit dem gesamten Eisenherstellungsbezirk des Juras, dem bedeutensten in der Schweiz, muss jedoch in Betracht gezogen werden.

Die Spuren der Eisenerzverhüttung des Frühmittelalters finden sich in mehreren Regionen der Schweiz (Waadt, Schaffhausen). Im Delsbergerbecken besteht sicher ein Bezug zur dichten Besiedlung, auf welche die zahlreichen Gräberfelder dieser Zeit hinweisen.

Abstract

The site of Les Boulies at Boécourt (JU) is located at the north-western extremity of the Delémont valley, at the foot of the Les Rangiers pass.

The archaeological research (mining cartography, topographic mapping, sounding and digging) was performed in 1989, during the construction of the N16-Transjurane highway. The fieldwork has provided abundant material for subsequent archaelogical research (fragment reassembly, stratigraphy, architecture and quantitative studies) and laboratory analysis (14C and archaeomagnetic dating, palynology, anthracology and metallurgy).

The investigated region is rich in siderolithic iron ore. The ore is composed of iron oxide concretions with centimetre diameters (pisolith) in a red clay matrix (bolus). Previously deposited on the karstic surface of calcarous rocks (Malm) and ovelain by Pliocene gravels, erosion has exposed the ore along the slopes of the main ravines.

Ore mining originated with small open pits near the original outcrops, then followed the rich lenses, using trenches and short drifts. During the 19th century deep shafts were utilised to reach the ore at deeper levels. Those works are described by A. Quiquerez (claim of Rayon de Séprais). Some shafts an other mining structures studied on the field can be related to this last phase of activity.

The older works are clearly evident due to changes in the topography, but, at present no chronological data exists for this earlier period.

In the small valley of Les Boulies, remains related to artisanal iron working have been found. The workshop where the iron ore was reduced is composed of two furnaces, several roasting hearths and rejected slag piles : these remains yield a merovingian age. At a distance of some metres away is a washed or deposit. In the lower part of the valley, a paleostream was used to wash the ore. Other structures (holes, channels, etc), which are more difficult to interpret, are also probably related to the preliminary treatment of the ore. During the Early Middle Ages, surface extraction possibly took place at the entrance of the lesser valley, where Siderolithic outcrops occured. But, in this area, subsequent human activity has obliterated the older traces.

Situated on the side of the slope, the two furnaces devoted to the reduction of iron ore were built and repaired many times. Stratigraphy and architecture demonstrate that furnace 1 predates furnace 2. However, during the main phase of activity, the two furnaces were in similtaneous or alternate operation. After the destruction of furnace 1, the second one was used alone.

These two furnaces show only minor differences and both are very similar to the early medieval structures found in Jura vaudois (Bellaires) and in Lorraine (Ludres).

The bottom of the furnaces is lightly fastened to the substratum. The walls of the shaft are composed of a mantle of stone with an internal lining of sand, strengtened with roman tiles fragments. The front part with the large door was not well preserved. The height oh these structures reached 1.5 m. A small shallow basin is situated in front of the furnace. The air was supllied by a double set of bellows. A first tuyere is located more or less horizontaly through the wall of the shaft, 50 cm above the bottom. A second frontal tuyere sloping downwards was placed in one half of the door. The second half was open to allow the liquid slag to flow out. The metallic iron, in a pasty condition, was extracted at the end of the operation.

The slags from the last reduction process of furnace 2 have been found in situ. This last tapping comprises about sixty distinct pieces. Tapping slag occurs in proportion of the progress of the work. The aspect of the surface changes with the viscosity of the liquid and the flow slope. In some cases, the flow is vertical, demonstrating the existence of a door-sill. Reassembly of the smaller fragments into complete pieces demonstrates different morphologies within the same object.

During the last operation in furnace 2, 40 kg of slags were produced. A total amount of 5500 kg is estimated for the all site. Calculations from the chemical

analysis of ores, fragments of walling and slags suggest approximately 7 kg of iron (bloom) was produced during one operation, and that total the production from the workshop was approximately 1 ton.

Some slags with a plano-convex shape were reused as building material for furnace 2. These pieces can be distinguished from the reduction slag by morphology and chemical composition, and are the results of refining the raw iron bloom, within a hearth. Currently no structure exists on the site that can be related to this type of work. Therefore the presence of a professional workshop within the vicinity can be presumed.

The workmen used charcoal from beech and fir trees as fuel. These trees are presently abundant within the forests of the Jura Mountains above 600 meters. After the abandonment of the site, the forest was less abundant since the spectra of pollens indicate that species of trees prefering light and humidity (birch and hazel) dominate. Agriculture was practised in the open spaces of the forest. Althought the workshop has had an influence on the landscape, it cannot be solely responsible for the changes.

The workshop at Les Boulies was a small enterprise with locally abudant raw materials (ore and charcoal), and the production did not exceed the local needs. Nevertheless, it should be noted that this site is within the iron working district of Jura which is the most important in Switzerland.

The merovingian iron industry has left traces in other regions of Switzerland (Vaud and Schaffhouse). At this time, the Delémont valley also has had a large population as evidenced by the numerous cemeteries within this region.

Bibliographie

Abréviations

AEHW Archiv für das Eisenhüttenwesen, Düsseldorf.
BHV Bibliothèque Historique Vaudoise, Lausanne.
CNRS Centre National de Recherches Scientifiques, Paris
GSAF Groupe de travail Suisse d'Archéologie du Fer.
MPEF Max-Planck-Institut für Eisenforschung
MH Minaria Helvetica.
OPH Office du patrimoine historique, Porrentruy.
RHS Revue d'Histoire de la Sidérurgie, Nancy.
SE Stahl und Eisen, Düsseldorf.
SJE Société jurassienne d'Emulation, Porrentruy.
SSHM Société Suisse d'Histoire des Mines.
VDE Verein Deutscher Eisenhüttenleute.

Abetel Emmanuel (à paraître)
L'établissement sidérurgique de Montcherand. BHV (Cahiers d'Archéologie Romande, 53).

Andrieux Philippe
1990 *Prolégomènes à une étude tracéologique sur les structures d'élaboration thermique et les parois argilo-sableuses, application à la paléométallurgie du fer*. 3 vol., thèse, Université de Franche-Comté, 599 p.

Bachmann Hans-Gert
1982 *The Identification of Slags from Archaeological Sites*. University of London, Institute of Archaeology, 37 p., 33 pl. (Occasional Publication, 6).

Bartuska Milošlav et Pleiner Radomír
1968 Untersuchung der Schlackenproben von Mühlthal. In : Dannheimer Hermann : *Epolding-Mühlthal, Siedlung, Friedhöfe und Kirche des Frühen Mittelalters*. Beck, Munich, p. 97-102, 3 pl. (Münchener Beiträge zur Vor- und Frühgeschichte, 13)

Bastin Bruno
1971 Recherches sur l'évolution du peuplement végétal en Belgique durant la dernière glaciation de Würm. *Acta Geographica Lovaniensia*, 9, 136 p.

Baumberger Ernst
1923 Bohnerz. I. Die Vorkommen im Juragebirge. In : *Die Eisen- und Manganerze der Schweiz*. Kümmerly & Frey, Berne, p. 5-125, 40 fig., 6 pl. (Die Eisen- und Manganerze der Schweiz, 1, Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geotechnische Serie, 13. Lieferung).

Bielenin Kazimierz
1974 *Starożytne górnictwo i hutnictwo żelaza w górach świetokryskich - Ancient Mining and Iron Metallurgy in the Holy Cross Mountains* -. Varsovie-Cracovie, 278 p., 28 tab., 128 fig.

Cleere Henry
1972 The Classification of Early Iron-Smelting Furnaces. *Antiquaries Journal*, 52, 1. Londres, p. 8-23, 3 pl.

1983 The Organization of the Iron Industry in the Western Roman Provincies in the Early Empire, with Special Reference to Britain. In : *Internationales Symposium zur vor- und frühgeschichtlichen Eisengewinnung. Festschrift für Hans Hingst*. Akademie Sankelmark bei Flensburg, 1980, p. 103-114 (Offa, 40).

Couteaux Michel
1977 A propos de l'interprétation des analyses polliniques de sédiments minéraux, principalement archéologiques. In : Laville Henri et Renault-Miskovsky Josette (réd.) : *Approche écologique de l'homme fossile*. Paris, p. 259-276 (Supplément 47 du Bulletin de l'Association française pour l'Etude du Quaternaire).

Crew Peter
1991 The Experimental Production of Prehistoric Bar Iron. *Historical Metallurgy*. Historical Metallurgy Society, Sheffield, 25, 1. 16 p., 4 fig., 11 pl.

Durrer Robert
1957 *Réduction des minerais de fer*. Dunod, Paris, 149 p. Traduction par M. Auxenfans de *Verhütten von Eisenerzen*. Stahleisen, Düsseldorf.

Eschenlohr Ludwig
1991 Le site sidérurgique de Boécourt-Les Boulies (JU - CH). *MH*, 11a. SSHM, p. 13-19, 5 fig.

Eschenlohr Ludwig et Serneels Vincent (à paraître)
Boécourt, Les Boulies (JU, Suisse) : archéologie et paléométallurgie. In : *Symposium International Paléométallurgie du Fer et Cultures*, 1-3 novembre 1990, Sevenans (Revue d'Histoire des Mines et de la Métallurgie).

Fehlmann Hans
1932 *Die Schweizerische Eisenerzeugung, ihre Geschichte und wirtschaftliche Bedeutung*. Kümmerly & Frey, Berne, 255 p., 76 fig. (Die Eisen- und Manganerze der Schweiz, 3, Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geotechnische Serie, 13. Lieferung).

Fleury Ernest
1909 *Le Sidérolithique suisse, contribution à la connaissance des phénomènes d'altération superficielle des sédiments*. Fragnière, Fribourg, 260 p., 5 pl. (Mémoires de la Société Fribourgeoise des Sciences Naturelles, 6)

Fluzin Philippe
1983 Notions élémentaires de sidérurgie. In : Echard Nicole (réd.) : *Métallurgies Africaines : nouvelles contributions*. Société des africanistes, Paris, p. 13-44, 8 fig. (Mémoires de la Société des africanistes, 9).

Forbes Robert James
1950 *Metallurgy in Antiquity : a notebook for archaeologists and technologists*. Brill, Leiden, 489 p., 98 fig.

Forrières Claude, Leroy Marc et Ploquin Alain
1989 La métallurgie du fer à Ludres en Lorraine : données archéométriques des conditions de réduction d'un bas-fourneau. In : Pleiner Radomír (réd.) : *Archaeometallurgy of Iron 1967-1987*. International Symposium, Liblice 1987, Prague, p. 253-278, 7 fig., 1 pl.

France-Lanord Albert
1963 Les lingots de fer protohistoriques. *RHS*, 4, 3, p. 167-179, 26 fig.

François Jules
1838 *Sur l'élaboration du minerai de fer dans le traitement à la catalane*. Foix.

Garillot J.
1967 Le grillage des minerais de fer. *RHS*, 8, 2, p. 95-103, 19 fig.

Gilles Joseph Wilhelm
1957 25 Jahre Siegerländer Vorgeschichtsforschung durch Grabungen auf alten Eisenhüttenplätzen. *AEHW*, 28, 4. VDE et MPEF, p. 179-185, 4 fig.

1958 Versuchsschmelze in einem vorgeschichtlichen Rennofen. *SE*, 78, 23. VDE et MPEF, p. 1690-1695, 9 fig.

GSAF
1991a *Minerai, scories, fer*. Cours d'initiation à l'étude de la métallurgie du fer ancienne et à l'identification des déchets de cette industrie. Association Suisse des Techniciens des Fouilles Archéologiques, 35 p., 13 pl. (Technique des fouilles, n° spécial).

1991b Groupe de travail Suisse d'Archéologie du Fer / Schweizerische Arbeitsgruppe für Eisenarchäologie. *MH*, 11a. SSHM, p. 34-41.

Guyan Walter Ulrich
1946 *Bild und Wesen einer mittelalterlichen Eisenindustrielandschaft im Kanton Schaffhausen*. Institut Rheinsprung 20, Bâle, 72 p., 13 fig., 11 pl. (Schriften des Instituts für Ur- und Frühgeschichte der Schweiz, 4).

1965 Die mittelalterliche Eisenhütte von Bargen-Hofwiesen. In : *Vita pro ferro, Festschrift für Robert Durrer*, Schaffhouse, p. 163-194.

Hutchinson Charles Strachan
1974 *Laboratory Handbook of Petrographic Techniques*. Wiley, New York, 527 p.

Jaccard Henri
1985 *Essai de toponymie. Origine des noms de lieux habités et des lieux-dits de la Suisse romande*. Slatkine, Genève, reprise de l'édition de Lausanne 1906, 560 p.

Jenkins Ron
1976 *An Introduction to X-Ray Spectrometry*. Heyden, Londres, 2e éd., 163 p., 95 fig., 16 tab.

Keesmann Ingo
1989 Chemische und mineralogische Detailuntersuchungen zur Interpretation eisenreicher Schlacken. In : Pleiner Radomír (réd.) : *Archaeometallurgy of Iron 1967-1987*, International symposium, Liblice 1987, Prague, p. 17-34, 4 fig., 1 pl.

Kleemann Otto
1981 Les lingots de fer bipyramidaux courts et épais, les lingots de fer du type Colmar. *Revue Archéologique de l'Est et du Centre Est*, 32, Dijon, p. 109-119, 9 fig.

Kresten Peter et Serning Inga
1983 The Calculation of Normative Constituents from the Chemical Analyses of Ancient Slags. *Jernkontorets Bergshistoriska Utskott*, 25, Stockholm, 25 p.

Kürsteiner Max, Hofmann Franz et Stalder Hans Anton
1990 *Eisenerz und Eisenindustrie im Jura*. Kümmerly & Frey, Berne, 26 p., 1 pl. (Beiträge zur Geologie der Schweiz, Kleinere Mitteilungen, 84).

Langouët Loïc
1989 L'archéomagnétisme. In : Mohen Jean-Pierre (réd.) : *Le temps de la préhistoire*, tome 1. Archéologia, Dijon, p. 229-230, 3 fig.

Laubscher Hans Peter
1948 *Geologie des Gebietes von Siegfriedblatt St-Ursanne 1085*. Kümmerly & Frey, Berne, 49 p., 4 fig., 3 pl. (Beiträge zur Geologischen Karte der Schweiz, Neue Folge, 92).

1963 Carte géologique et notice explicative 1085 St-Ursanne. *Atlas Géologique Suisse 1:25000*, Kümmerly & Frey, Berne, 26 p., 1 pl.

Leroy Marc, Forrières Claude et Ploquin Alain
1990 Un site de production sidérurgique du Haut Moyen Age en Lorraine (Ludres, Meurthe-et-Moselle). *Archéologie Médiévale*, 20, p. 141-179, 22 fig.

Lessing R.
1926 Coal Ash and Clean Coal, part I. *Fuel in Science and Practice*, 5. London, p. 17-23, 6 fig., 3 tab.

Liniger Hans
1925 *Geologie des Delsberger Beckens und der Umgebung von Movelier*. Francke, Berne, 71 p., 5 fig., 1 tab., 2 pl. (Beiträge zur Geologischen Karte der Schweiz, Neue Folge 55).

1966 Das Plio-Altpleistozäne Flussnetz der Nordschweiz. *Regio Basiliensis* 7/2, p. 158-177.

Liniger Hans et Keller Walter
1930 Carte géologique et notice explicative, 92 Movelier, 93 Soyhières, 94 Delémont et 95 Courrendlin. *Atlas Géologique Suisse 1:25000*. Francke, Berne, 6 p.

Moor Max
1952 *Die Fagion-Gesellschaften im Schweizer Jura*. Huber, Berne, 201 p., 36 fig., 13 tab. (Beiträge zur geobotanischen Landesaufnahme der Schweiz, 31).

Motykovà Karla et Pleiner Radomír
1987 Die römerzeitliche Siedlung mit Eisenhütten in Ořech bei Prag. *Památky archeologické*, 78. Prague, p. 371-448.

Osann Bernhard
1971 *Rennverfahren und Anfänge der Roheisenerzeugung*. VDE, Fachausschussbericht 9.001. Düsseldorf, 170 p., 8 tab., 85 fig., en 2 vol.

Paccolat Olivier
1991 *L'établissement gallo-romain de Boécourt, les Montoyes (JU, Suisse)*. OPH et SJE, 156 p., 99 fig., 14 pl. (Cahier d'archéologie jurassienne, 1).

Pawliska Volker, Schneider Stefan et Schuler Andreas
1983 Schmelzversuche in eingetieften Rennöfen. *AEHW*, 54, 12. VDE, p. 477-480, 7 fig.

Pelet Paul-Louis
1973 *Une industrie méconnue. Fer Charbon Acier dans le Pays de Vaud*. BHV, 272 p., 82 fig., 28 pl. (BHV, 49).

1978 *Fer Charbon Acier dans le Pays de Vaud. 2 : La lente victoire du haut-fourneau*. BHV, 354 p. (BHV, 59).

1982 Recherches sur la métallurgie du fer dans le Jura vaudois. In : *Mines et fonderies antiques de la Gaule*. Table ronde du CNRS, Toulouse 1980. CNRS, Paris, p. 205-214.

1983 *Fer Charbon Acier dans le Pays de Vaud. 3 : Du mineur à l'horloger*. BHV, 491 p. (BHV, 74).

Pfeifer Hans-Rudolf, Lavanchy Jean-Claude, Serneels Vincent
1991 Bulk Chemical Analysis of Geologicas and Industrial Materials by X-Ray Fluorescence, Recent Developments and Applications to Materials rich in Iron Oxyde. *Journal of Trace and Microprobe Techniques*, 9 (2 et 3), p. 127-147, 10 tab.

Pleiner Radomír
1965 Die Eisenverhüttung in der "Germania Magna" zur römischen Kaiserzeit. *Germania*, 45. Berlin, p. 11-86, 19 fig.

1969 Experimental Smelting of Steel in Early Medieval Furnaces. *Památky Archeologické*, 60, Prague, p. 458-487, 21 fig., 7 tab.

1958 *Základy slovanského Železarského Hutnickví v Českých Zemích -Die Grundlagen der Slavischen Eisenindustrie in den Böhmischen Ländern-*. Prague, 335 p., 68 fig., 4 tab., 33 pl., 5 cartes (Monumenta Archeologica, 6).

Quiquerez Auguste
1852 *Recueil d'observations sur le terrain sidérolithique dans le Jura bernois et particulièrement dans les vallées de Delémont et de Moutier*. 63 p., 7 pl.

1855 *Notice historique et statistique sur les mines, les forêts et les forges de l'ancien Evêché de Bâle*. Mathey, Berne, 197 p.

1866 *De l'âge du Fer. Recherches sur les anciennes forges du Jura bernois*. Michel, Porrentruy, 126 p., 4 pl. (Monuments de l'ancien Evêché de Bâle).

Quiquerez Auguste
1871 Notice sur les forges primitives dans le Jura. *Mittheilungen der Antiquarischen Gesellschaft in Zürich*, 17, 4. Höhr, Zurich, p. 71-88, 4 pl.

1881 *Les minières du Jura*. Manuscrit. Liasse 155, fonds A. Quiquerez, Musée de l'Hôtel-Dieu, Porrentruy.

Rachoud-Schneider Anne-Marie
1991 Approches palynologiques. In : Paccolat Olivier : *L'établissement gallo-romain de Boécourt, les Montoyes (JU, Suisse)*. OPH et SJE, p. 79-88, 3 fig. (Cahier d'archéologie jurassienne, 1).

Rädecker Wilhelm et Naumann Friedrich Karl
1961 Untersuchung vor- oder frühgeschichtliche Spitzbarren. *AEHW*, 32, 9. VDE, p. 587-595, 23 fig., 9 tab.

Robert Jean-François
1972 *Abrégé d'économie forestière*. Payot, Lausanne, 120 p.

Sablayrolles Robert
1982 Intérêt et problèmes de l'étude des ferriers antiques : l'exemple de la Montagne Noire. In : *Mines et Fonderies antiques de la Gaule*. Table ronde du CNRS, Toulouse 1980. CNRS, p. 183-190.

Schifferdecker François
1984 Le Haut Moyen Age. In : Bandelier André et Prongué Bernard, réd. *Nouvelle histoire du Jura*. SJE, p. 44-61, ill.

1989 Sur les pas d'Auguste Quiquerez, précuseur de l'archéologie industrielle. *Jurassica*, 3. Centre d'études et de recherches, Porrentruy, p. 40-41, 1 fig.

1990 Découvertes archéologiques mérovingiennes dans le canton suisse du Jura. *Bulletin de liaison*, 14. 12e journées internationales d'Archéologie mérovingienne. Association française d'Archéologie mérovingienne, Besançon, p. 34-39.

Schmid Emil
1949 *Carte de la végétation de la Suisse 1:200000*. Feuille 1. Kümmerly & Frey, Berne.

Schweingruber Fritz Hans
1976 *Prähistorisches Holz*. Die Bedeutung von Holzfunden aus Mitteleuropa für die Lösung archäologischer und vegetationskundlicher Probleme. Haupt, Berne, 106 p., 21 fig.

Schürmann Eberhard
1958 Die Reduktion des Eisens im Rennfeuer. *SE*, 78, 19. VDE, p. 1297-1308, 13 fig., 4 tab.

Segalen Pierre
1964 *Le fer dans les sols*. Office pour la recherche scientifique et technique Outre-Mer, Paris, 150 p., 25 fig.

Serneels Vincent
1988 Recherches archéométriques sur la sidérurgie antique en Suisse romande : un nouveau programme. *MH*, 8a. SSHM, p. 48-54, 4 fig.

(en préparation)
Recherches archéométriques sur la sidérurgie ancienne en Suisse romande. Thèse, Université de Lausanne.

Sperl Gerhard
1980 *Über die Typologie urzeitlicher, frühgeschichtlicher und mittelalterlicherEisenhüttenschlacken*.Österreichische Akademie der Wissenschaften, Vienne, 68 p., 61 fig., 19 tab. (Studien zur Industrie-Archäologie 7. Prähistorische Kommission und Erich-Schmid-Institut für Festkörperphysik in Leoben).

Steiner Michel
1979 Découverte d'une industrie sidérurgique de type archaïque à Lajoux (Suisse, canton du Jura). *Comptes rendus du 104e Congrès national des Sociétés savantes, Bordeaux*, 5. Bibliothèque nationale, Paris, p. 179-186.

Thellier E.
1981 Sur la direction du champ magnétique terrestre en France durant les deux derniers millénaires. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 24, p. 89-132.

Tylecote Ronald Frank
1987 *The early history of metallurgy in Europe*. Longman, Londres, 391 p.

Tylecote Ronald Frank
1990 *The Prehistory of Metallurgy in the British Isles*. The Institute of Metals, 2e éd., Londres, 257 p., 160 fig., 111 tab.

Tylecote Ronald Frank, Austin J.N. et Wraith A.E.
1973 Iron Smelting Experiments with a Schaft Furnace of the Roman Period. In : *Die Versuchschmelzen und ihre Bedeutung für die Metallurgie des Eisens und dessen Geschichte*. Symposium Schaffhausen 1970, p. 25-50, 3 fig., 12 tab., 1 pl.

VDE
1981 *Schlackenatlas / Slag Atlas*. Stahleisen, Düsseldorf, 282 p.

Wilson A. D.
1960 The Micro-determination of Ferrous Iron in Silicate Minerals by a Volumetric and Colorimetric Method. *The Analyst*, 85, Cambridge, p. 823-827, 4 tab.

Liste des illustrations

Illustrations dans le texte

Fig. 1. Situation générale du site des Boulies. 9

Fig. 2. Photo aérienne du secteur d'investigation du 30 mars 1989. 10

Fig. 3. Les différents secteurs d'investigation. 11

Fig. 4. Le site métallurgique avec les tranchées effectuées à la pelle mécanique. 12

Fig. 5. Le site métallurgique. Surface de fouille. 13

Fig. 6. Emplacement des prélèvements pour l'archéomagnétisme. 15

Fig. 7. La tache noire à l'emplacement du site métallurgique. 16

Fig. 8. Sondages creusés à la pelle mécanique. 16

Fig. 9. Les tranchées effectuées à l'emplacement du site métallurgique. 17

Fig. 10. Diagrammes polliniques. 20

Fig. 11. Végétation dans la partie sud-ouest du vallon. 21

Fig. 12. Proportions des essences arboréennes de charbons de bois. 23

Fig. 13. Proportions des essences arboréennes des spectres polliniques et des charbons. 24

Fig. 14. Esquisse géologique du Rayon de Séprais. 28

Fig. 15. Profil géologique schématique. 29

Fig. 16. Coupe stratigraphique de l'affleurement de Sidérolithique des Cerneux. 30

Fig. 17. Composition chimique des minerais. 32

Fig. 18. Pisolithes en coupe. 35

Fig. 19. Pisolithes. 35

Fig. 20. Relevé schématique des structures minières (cadre I, dépliant n° 1). 38

Fig. 21. Schéma des différents modes d'exploitation sur un versant. 39

Fig. 22. Carte minière du Rayon de Séprais par E. Baumberger (1923). 40

Fig. 23. Carte minière du Rayon de Séprais par A. Quiquerez (manuscrit de 1881). 41

Fig. 24. Vallon des Boulies. Versant sud. 41

Fig. 25. Vallon des Boulies. Situation des vestiges et des investigations. 42

Fig. 26. Dépression 9. Coupe sud-nord. 44

Fig. 27. Coupe sud-nord du lit du ruisseau. 44

Fig. 28. Colonne stratigraphique et bloc-diagramme schématique de l'ancien lit du ruisseau et du chenal antérieur. 44

Fig. 29. Schéma stratigraphique à travers le fond du vallon et le monticule 1. 45

Fig. 30. Monticule 1. 46

Fig. 31. Bas fourneaux 1 et 2. 51

Fig. 32. Bas fourneau 1. Vue générale. 52

Fig. 33. Bas fourneau 1. Détail du "hérisson". 52

Fig. 34. Tuyère latérale n° 30. Vue de la surface intérieure du fourneau 1 et coupe. 53

Fig. 35. Morceau de paroi avec empreintes de tuileaux. 53

Fig. 36. Bas fourneau 2. Vue générale. 54

Fig. 37. Bas fourneau 2. Importante réfection du revêtement sablo-argileux dans la partie gauche. 54

Fig. 38. Bas fourneau 2. Amoncellement de blocs calcaires. 55

Fig. 39. Coupe transversale des bas fourneaux 1 et 2. 55

Fig. 40. Remontages des tuyères. 57

Fig. 41. Tuyère frontale n° 1. Vue latérale. 58

Fig. 42. Tuyère latérale n° 28. Vue de profil. 59

Fig. 43. Tuyère latérale n° 28. Vue de l'extérieur. 59

Fig. 44. Bloc-support et tuyère frontale n° 29. 63
Fig. 45. Reconstitution idéale d'un bas fourneau des Boulies. 64
Fig. 46. Bas fourneaux 1 et 2. Reconstitution et éléments techniques. 65
Fig. 47. Composition chimique des parois sableuses. Variation en fonction de l'impact de chaleur. 70
Fig. 48. Paroi sableuse n° 702. Coupe. 71
Fig. 49. Bas fourneau 2. Une partie de la dernière coulée de scories en place. 72
Fig. 50. Les scories de la dernière coulée du bas fourneau 2. Distribution des poids reconstitués. 73
Fig. 51. Coulure n° 426. Coupe. 73
Fig. 52. Coulure n° 291. Face supérieure. 78
Fig. 53. Gros bloc de scorie coulée n° 250. Face supérieure, coupe et face inférieure. 79
Fig. 54. Bas fourneau 1. Une partie de la dernière coulée de scories en stratigraphie. 80
Fig. 55. Composition chimique des scories coulées, internes massives et internes rouillées. 81
Fig. 56. Scorie interne massive n° 639. Coupe. 82
Fig. 57. Scories internes massives n° 602, 693, 694 et 697. 82
Fig. 58. Scories internes rouillées. Coupes. 83
Fig. 59. Scories internes rouillées. 84
Fig. 60. Atelier des Boulies. Structures et emplacement des coupes. 85
Fig. 61. L'atelier de réduction en cours de fouille. 85
Fig. 62. Coupe stratigraphique à la périphérie. 85
Fig. 63. Coupe stratigraphique du site de réduction. 86
Fig. 64. Coupe stratigraphique du bas fourneau 1. 87
Fig. 65. Coupe stratigraphique du bas fourneau 2. 89
Fig. 66. Coupe stratigraphique d'un foyer de grillage. 90
Fig. 67. Répartition spatiale du minerai. 90
Fig. 68. Répartition spatiale des scories en forme de calotte. 91
Fig. 69. Répartition spatiale des tuiles. 91
Fig. 70. Tuile creuse remontée à partir des fragments de tuiles du "hérisson". 91
Fig. 71. Tuile plate remontée à partir des fragments de tuiles du "hérisson". 92
Fig. 72. Répartition spatiale des morceaux de paroi sableuse et des scories coulées. 92
Fig. 73. Répartition spatiale des tuyères. 92
Fig. 74. Répartition spatiale des scories internes massives. 93
Fig. 75. Répartition spatiale des scories internes rouillées. 93
Fig. 76. Structures et organisation spatiale du site métallurgique. 94
Fig. 77. Dernière coulée du bas fourneau 2. Coulures n° 403 et 411. 99
Fig. 78. Paroi sableuse n° 705. 102
Fig. 79. Dernière coulée du bas fourneau 2. Coulure n° 412. 104
Fig. 80. Schéma d'un bas foyer. 107
Fig. 81. Scorie en forme de calotte n° 503. Face supérieure, coupe et face inférieure. 108
Fig. 82. Scorie en forme de calotte n° 515. Coupe. 112
Fig. 83. Composition chimique des scories en forme de calotte. 113
Fig. 84. Reconstitution du site métallurgique. 118
Fig. 85. Reconstitution des bas fourneaux. 119
Fig. 86. Repérage du CMT dans l'espace (d'après L. Langouët 137

Planches

Pl. 1. Vue aérienne du secteur d'investigation et coupe stratigraphique de l'affleurement de Sidérolithique des Cerneux. 33
Pl. 2- 3. Tuyères. 60
Pl. 4- 7. Scories de la dernière coulée du bas fourneau 2. 74
Pl. 8-10. Scories en forme de calotte. 109

Illustrations hors texte

Dépliant n° 1. Carte des vestiges miniers.
Dépliant n° 2. Dernière coulée du bas fourneau 2. Coulures n° 411 et 412. Faces supérieures et inférieures. Coulure n° 403. Coupe.

Liste des tableaux

Tab. 1. Comparaison des essences arboréennes des deux spectres polliniques. 21

Tab. 2. Essences de charbon de bois. 22

Tab. 3. Comparaison des essences arboréennes en fonction du mode de prélèvement. 22

Tab. 4. Essences arboréennes dans les différents contextes archéologiques. 23

Tab. 5. Analyses de minerais. 32

Tab. 6. Classification des grands puits. 40

Tab. 7. Anomalies topographiques du vallon des Boulies. 43

Tab. 8. Réactions chimiques principales pendant la réduction dans un bas fourneau. 50

Tab. 9. Bas fourneaux 1 et 2. 56

Tab. 10. Les tuyères. 62

Tab. 11. Analyses de parois sableuses. 70

Tab. 12. Les scories de la dernière coulée du bas fourneau 2. 72

Tab. 13. Analyses de scories de la dernière coulée du bas fourneau 2. 80

Tab. 14. Analyses de scories coulées. 81

Tab. 15. Analyses de scories internes massives. 83

Tab. 16. Analyses de scories internes rouillées. 84

Tab. 17. Correspondance des appellations de couches. 88

Tab. 18. Répartition spatiale et attribution fonctionnelle du mobilier archéologique sur l'atelier de réduction. 94

Tab. 19. Poids du mobilier archéologique récolté sur l'atelier des Boulies. 95

Tab. 20. Comparaison des chiffres théoriques et réels des éléments chimiques. 104

Tab. 21. Scories en forme de calotte. 108

Tab. 22. Analyses de scories en forme de calotte. 113

Tab. 23. Composition chimique des scories en forme de calotte : interprétation des analyses. 115

Annexe 1

Archéomagnétisme

La datation par archéomagnétisme repose sur la combinaison de deux phénomènes distincts : l'un - géophysique - est la variation au cours du temps du champ magnétique terrestre (CMT); l'autre - physique - consiste en l'apparition d'une aimantation thermorémanente (ATR) très stable dans les minéraux magnétiques des argiles chauffées à plus de 700° C et refroidies en présence d'un champ magnétique. L'aimantation de ces minéraux représente donc un enregistrement du CMT lors du dernier processus de chauffe, au-dessus du seuil de température indiqué.

Pour dater une structure par archéomagnétisme, il s'agit en premier lieu de la situer par rapport au nord géographique et au plan horizontal du lieu afin de déterminer la direction du champ magnétique fossilisé dans cette structure. Celle-ci est conventionnellement caractérisée par la déclinaison D et l'inclinaison I (fig. 86). L'inclinaison I est l'angle entre l'ATR, qui dépend du CMT, et le plan horizontal local. La déclinaison D est l'angle entre la direction du nord magnétique et celle du nord géographique.

On dispose de mesures directes du CMT depuis le XVIIe siècle. Pour les périodes antérieures, ce sont les propriétés magnétiques des argiles cuites démontrées par E. Thellier, qui ont permis de reconstituer ces variations séculaires (Thellier 1981). Une ébauche des courbes de variation de I et D à Paris pour les deux derniers millénaires existe actuellement. Par une correction qui est en fonction de la latitude du lieu, on peut déduire le CMT de celui-ci en adaptant les valeurs obtenues à celles des courbes établies pour Paris.

Tandis que l'inclinaison et la déclinaison varient lentement et de manière irrégulière à l'échelle humaine, leurs variations sont plus importantes à l'échelle du siècle.

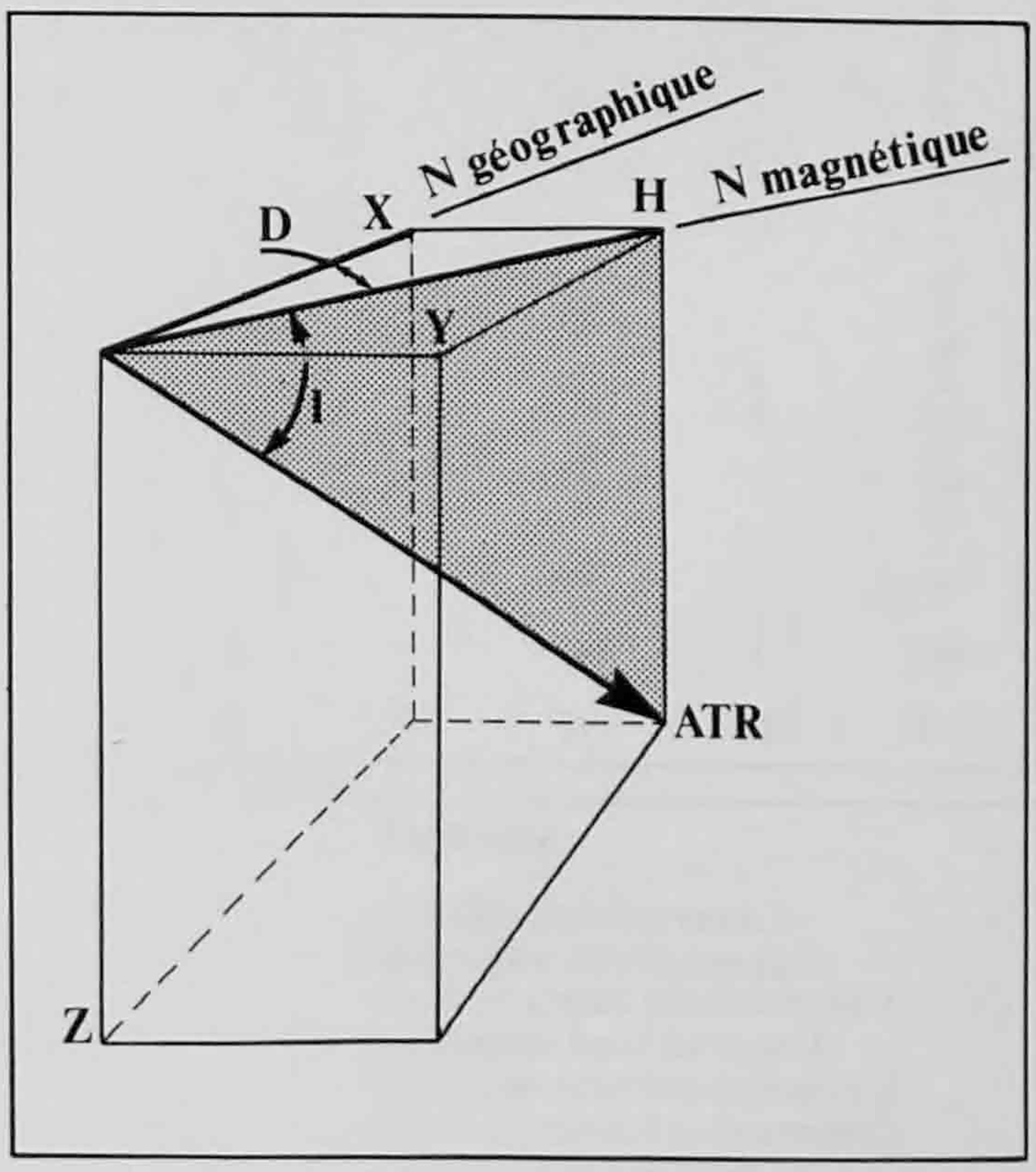


Fig. 86. Repérage du champ magnétique terrestre dans l'espace (d'après L. Langouët, 1989).

Anthracologie

Essences de charbons de bois par lot

Lot	Aulne	Chêne	Erable	Frêne	Hêtre	Noisetier	Orme	Résineux	Sapin	Saule ou peuplier	Total
1					24						24
2					11						11
3					28				2		30
4			6		3				1		10
5					6						6
6	3				4				3		10
7					15						15
8	23				30	2	2		11		68
9	2				5						7
10					9				3		12
11	2				1				1		4
12					7				4		11
13			3		56				16		75
14					3				13		16
15		4			2				8		10
16					15				9	1	29
17				1	340	1			172	3	517
18	1				53				18		72
19					155				110		265
20			2		84		2	15	18		121
Divers					35				37		72
Total	31	4	11	1	886	3	4	15	426	4	1385
%	2.2	0.3	0.8	0.1	64	0.2	0.3	1.1	30.8	0.3	100 %

Lot	Provenance	Attribution
1	N1, alentours du fourneau 1, c. 6	alentours bas-fourneau 1
2	N1 à N3, remplissage cuvette du fourneau 1, c. 3	destruction bas-fourneau 1
3	N2, O2, O3, fond du fourneau 1, c. 5 à 8	fonctionnement bas-fourneau 1
4	O2, O3, remplissage supérieur du fourneau 1, c. 2 et 4	destruction bas-fourneau 1
5	N2, fond de la cuvette du fourneau 1, c. 3	fonctionnement bas-fourneau 1
6	N3, fond de la cuvette du fourneau 1, c. 6 et 7	fonctionnement bas-fourneau 1
7	M3	alentours bas-fourneau 2
8	O4, N4, N5, fond du fourneau 2, c. 6	fonctionnement bas-fourneau 2
9	O4, N4, remplissage supérieur du fourneau 2, c. 2	destruction bas-fourneau 2
10	N5, alentours du fourneau 2	alentours bas-fourneau 2
11	M4, M5, cuvette du fourneau 2	destruction bas-fourneau 2
12	L4	zones de rejet
13	Zone périphérique, couche charbonneuse (c. 6)	zones de rejet
14	F7, F9, G5, zone de rejet est	zones de rejet
15	L7, K8, zone des foyers de grillage	foyers de grillage
16	O3, fond du fourneau 1, c. 6 et 7	fonctionnement bas-fourneau 1
17	K8, foyer de grillage	foyers de grillage
18	Remplissage du fourneau 1, c. 4	destruction bas-fourneau 1
19	I-K10, foyer de grillage	foyers de grillage
20	L10, foyer de grillage	foyers de grillage
21	divers; échantillons individuels	zones de rejet

Lots 1 à 15, 21 : prélèvement à vue.
Lots 16 à 20 : prélèvement en vrac.

Annexe 3

Méthodes d'analyses

L'analyse chimique par fluorescence des rayons x et méthodes complémentaires

Les analyses chimiques ont été réalisées au Centre d'Analyse Minérale (Section des Sciences de la Terre) de l'Université de Lausanne selon une procédure développée dans le cadre des recherches de V. Serneels (Pfeifer et al. 1991).

Sur les échantillons, après étude préliminaire (description, photographie, etc.), on prélève 50 à 100gr qui sont broyés et réduits en poudre. Quinze grammes de poudre sont pressés en forme de disque; les éléments traces sont dosés à l'aide d'un spectromètre de fluorescence x (appareil Philips PW 1400, tube Sc/Mo) sur cette pastille. Par ailleurs, 1000 milligrammes sont calcinés à 1000°C (mesure de la perte au feu), mélangés à 5000 milligrammes de LiBO4 et fondus à 1500°C. Les éléments majeurs sont dosés sur cette perle de verre au moyen du spectromètre.

Bombardé par un faisceau de rayons x, chacun des éléments présents dans l'échantillon est excité (Jenkins 1976). Pour revenir à son état normal, il émet des rayons x secondaires caractéristiques. L'intensité de ce signal est mesurée par un détecteur. En comparant ce signal avec ceux de substances de composition connue, on déduit la concentration de l'élément dans l'échantillon. Pour les éléments majeurs, on calcule ensuite la teneur sous forme d'oxyde. C'est donc une méthode comparative qui utilise une série de standards. La qualité des résultats dépend en grande partie de la nature de l'étalonnage. Les standards doivent non seulement contenir les différents éléments en concentrations comparables à celles des échantillons analysés, mais aussi avoir une composition globale proche. Il faut que la gamme d'étalonnage soit suffisante et que la matrice soit similaire. Dans le cas des substances très riches en oxydes de fer qui ont été analysées ici, les standards de minerais de fer sont les mieux adaptés. Ils sont malheureusement peu nombreux et parfois mal connus.

Les facteurs et les méthodes de correction doivent être soigneusement choisis car la présence d'une grande quantité de fer crée des interférences inhabituelles.

Le Fe^{2+} est dosé séparément par voie humide (colorimétrie, Wilson 1960), ce qui permet de calculer le rapport FeO/Fe2O3. Le carbone sous forme C et CO2 est dosé par coulométrie (appareil Coulomat 702).

Ces deux mesures, ainsi que celle de la perte au feu globale à 1000°C, permettent de déterminer la présence d'eau - H2O - (perte au feu négative) ou de fer à l'état métallique - FeM - (perte au feu positive). Si ces deux constituants se trouvent ensemble dans l'échantillon, le calcul est faussé; mais, ils sont les seuls à pouvoir le faire, car les autres éléments (Mn, V. etc.) ne sont présents qu'en quantités négligeables.

Nous remercions l'équipe du Centre d'Analyse Minérale : H.-R. Pfeifer, chef du Centre, J.-C. Lavanchy, premier laborantin, J. Simic, J.-M. Menoud et A. Sanchez, préparateurs, pour leur aide précieuse.

Eléments chimiques dosés par fluorescence des rayons x

Eléments majeurs (en % poids)

		calculé en oxyde ->	
Si	silicium	SiO2	silice
Ti	titane	TiO2	
Al	aluminium	Al2O3	alumine
Fe	fer	Fe2O3	oxyde ferrique
Mg	magnésium	MgO	magnésie
Mn	manganèse	MnO	
Ca	calcium	CaO	chaux
Na	sodium	Na2O	soude
K	potassium	K2O	potasse
P	phosphore	P2O5	

Eléments traces (en ppm)

Zr	zirconium	Sn	étain	Cu	cuivre
Y	yttrium	Sb	antimoine	Ni	nickel
Sr	strontium	Ag	argent	Cr	chrome
Rb	rubidium	As	arsenic	Co	cobalt
Ba	baryum	Pb	plomb		
V	vanadium	Zn	zinc		

Mesures complémentaires

Dosage par colorimétrie	FeO
Dosage par coulométrie	C et CO2
Calcul sur la base de la perte au feu	Fe et H2O

Numération des échantillons analysés

BOE	vallon / site des Boulies
SEP	Rayon de Séprais
100	minerai
200	scorie de coulée
300	scorie interne rouillée
400	scorie de la dernière coulée du fourneau 2
500	scorie en calotte
600	scorie interne massive
700	paroi sableuse

Détermination des minéraux par diffraction des rayons x

Les phases cristallines ont été déterminées par diffraction des rayons x sur poudre au laboratoire de Radiocristallographie de l'Institut de Minéralogie de l'Université de Lausanne (Hutchinson 1974).

On mélange un peu de silicium métallique (0.12gr) à la poudre de l'échantillon (1.2gr). La préparation est étendue sur une plaquette soumise au faisceau de rayons x dans le diffractomètre (appareil Philips PW 1710). Le silicium joue le rôle de standard interne et permet de calibrer le spectre obtenu. En traversant l'échantillon, les rayons x sont diffractés dans des directions données par les structures cristallines des différents minéraux présents. Ces angles de diffraction sont caractéristiques, mais l'intensité du faisceau diffracté n'est que grossièrement proportionnelle à l'abondance du minéral dans la préparation. Telle que nous l'avons mise en oeuvre, ce n'est pas une méthode quantitative.

Pour les minéraux formant des solutions solides (remplacement d'un élément par un autre en proportions variables au sein d'une même structure cristalline) tels que les Spinelles et les Péridots, il n'est pas toujours possible de préciser la composition exacte. Certains spectres sont difficilement interprétables, sans doute en raison de la cristallisation extrêmement rapide des cristaux. Enfin, le fer absorbe fortement les rayons x, ce qui atténue les signaux (bruit de fond élevé) pour des matériaux riches en cet élément chimique. Les minéraux peu abondants (moins de 5%) ou peu diffractants peuvent donc passer inaperçus.

Minéraux identifiés par diffraction des rayons x

Fay	Fayalite	Fe2SiO4	silicate de Fe (Péridot)
Fer	Ferrite	Fe	fer métallique alpha
Goe	Goethite	FeO.OH	hydroxyde de Fe alpha
Her	Hercynithe	FeAl2O4	oxyde de Fe et de Al (Spinelle)
Lép	Lépidocrosite	FeO.OH	hydroxyde de Fe gamma
Leu	Leucite	KAlSiO4	silicate de K et Al (Feldspathoïde)
Mag	Magnétite	Fe3O4	oxyde de Fe (Spinelle)
Qz	Quartz	SiO2	oxyde de Si
Wü	Wüstite	FeO	oxyde de Fe

Nous remercions pour leur aide Ph. Thélin, chef du laboratoire et L. Dufresne, première laborantine.

Calculs de normes et diagrammes thermodynamiques

De la comparaison des analyses chimiques avec la composition minéralogique, il est possible déduire la présence d'une phase vitreuse dans les scories. La composition chimique de celle-ci ne peut pas être précisée par les méthodes mises en oeuvre dans ce travail. Les calculs de norme, qui visent à définir une composition minéralogique virtuelle calculée sur la base de l'analyse chimique globale, ne donnent pas de résultats cohérents (Kresten et Serning 1983). En particulier, le Fe^{3+}, toujours présent en quantité importante, ne peut pas trouver place dans les minéraux identifiés.

L'utilisation de diagrammes thermodynamiques est une aide précieuse pour l'interprétation des scories résultant du traitement des minerais métalliques (VDE 1981). Toutefois, ces matériaux ne témoignent que très rarement de conditions d'équilibre, ce qui complique notablement la démarche, d'autant que les compositions chimiques étudiées sont toujours plus complexes que ne le prévoient les modèles théoriques.

De très nombreuses publications fournissent des descriptions et des analyses chimiques de résidus métallurgiques anciens ainsi que des démarches interprétatives de ces données (Bachmann 1982; Bartuska et Pleiner 1968, Forrières et al. 1989; Keesmann 1989, Sperl 1980).

Crédit iconographique

Photographies

Ludwig Eschenlohr : 7, 24.
Piernicola Federici : 9, 32, 33, 36-38, 49, 53, 62.
Bernard Hiltpold : pl. 1 (coupe).
Bernard Migy : 19, 22, 35, 44, 57, 58, 61, 70, 71, 77-79.
Blaise Othenin-Girard : 8, 11, 26, 28, 30.
François Schifferdecker : pl. 1 (vue aérienne).

Dessins et plans

Simon Deshusses : 3-5, 14-18, 20, 21, 27, 29, 34, 39, 40, 45-48, 50-52, 55, 56, 59, 60, 63-69, 72-76, 80-85, pl. 2-7, dépliant n° 1.
Ludwig Eschenlohr : 6, 31, 46.
Yves Juillerat : 41-43, 54, dépliant n° 2.
Emmanuel Ziehli : 6, 25, 86, pl. 8-10.

Dépôt du mobilier et de la documentation

Section d'archéologie de l'Office du patrimoine historique à Porrentruy.

Adresses des auteurs

Ludwig Eschenlohr — Office du patrimoine historique, Section d'archéologie, case postale 64, 2900 Porrentruy 2.
Vincent Serneels — Université de Lausanne, Sciences de la Terre, Centre d'Analyse Minérale, BFSH 2, 1015 Lausanne-Dorigny.
Bernard Hiltpold — Office du patrimoine historique, Section d'archéologie, case postale 64, 2900 Porrentruy 2.

Volumes déjà parus dans la collection :

1. Paccolat Olivier et al. L'établissement gallo-romain de Boécourt, les Montoyes (JU, Suisse). Office du patrimoine historique et Société jurassienne d'Emulation, Porrentruy, 1991, 156 p., 99 fig., 14 pl. (Cahier d'archéologie jurassienne, 1)

2. Pousaz Nicole et al. L'abri-sous-roche mésolithique des Gripons à St-Ursanne (JU, Suisse). Office du patrimoine historique et Société jurassienne d'Emulation, Porrentruy, 1991, 176 p., 126 fig., 12 pl. (Cahier d'archéologie jurassienne, 2). ISBN 2-88436-000-X

A paraître :

4. Les sites de l'Age du Bronze final des Viviers à Glovelier et des Montoyes à Boécourt (Ludwig Eschenlohr, Patrick Paupe et al.).
5. Sondages archéologiques sur le tracé de la N16 entre Porrentruy et Delémont (Catherine Masserey et al.).
6. La villa gallo-romaine des Aiges à Alle (Blaise Othenin-Girard et al.).

Achevé d'imprimer le
10 décembre 1991
sous les presses de l'imprimerie du Pays
à Porrentruy

584 585 586

247

246

Boécourt, les Boulies

Carte des vestiges miniers

Dépliant n°1

245

P Puits

T Tache

M Monticule

B Barrage

Chenaux

Galerie

Charbonnière

Bas-fourneaux

Sidérolithique remanié sur lui-même

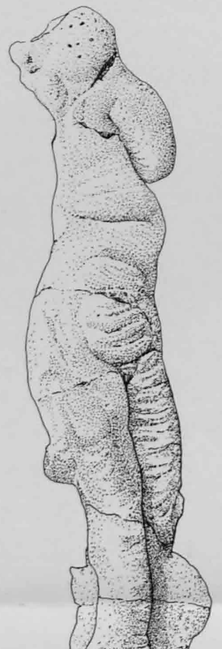
Sidérolithique remanié sur Tertiaire ou Quaternaire

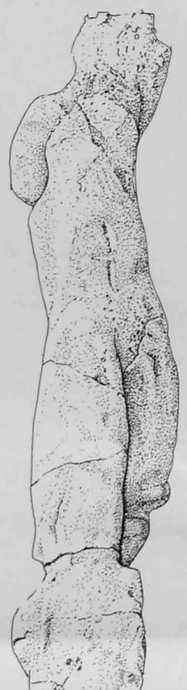
Densité accrue de structures minières

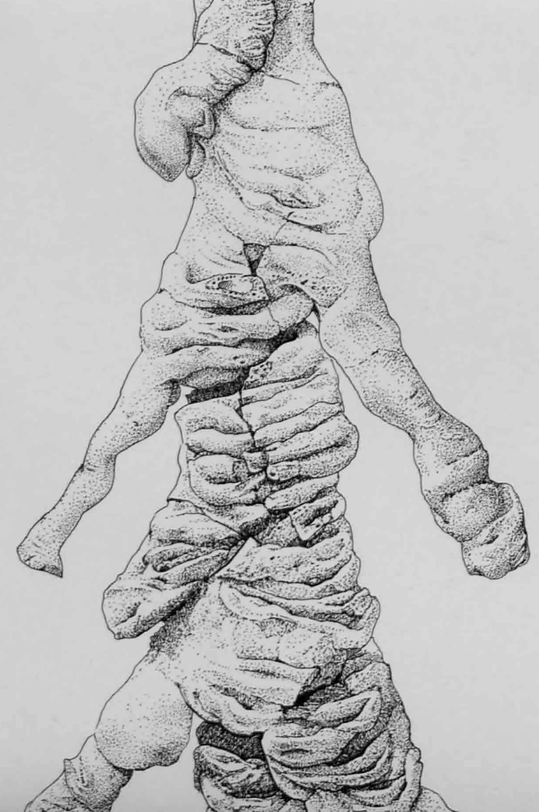
N

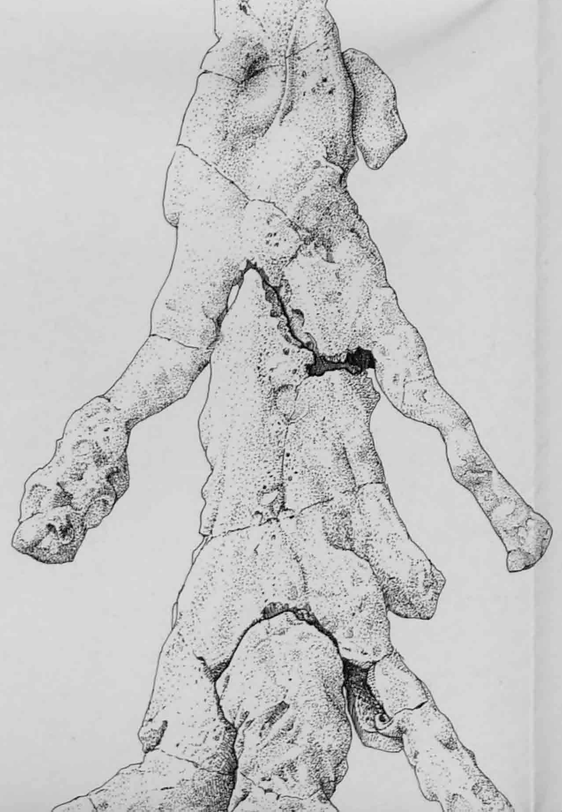
0 1km

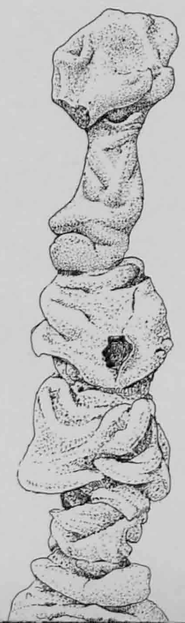
Echelle 1 : 5000 Equidistance 10m









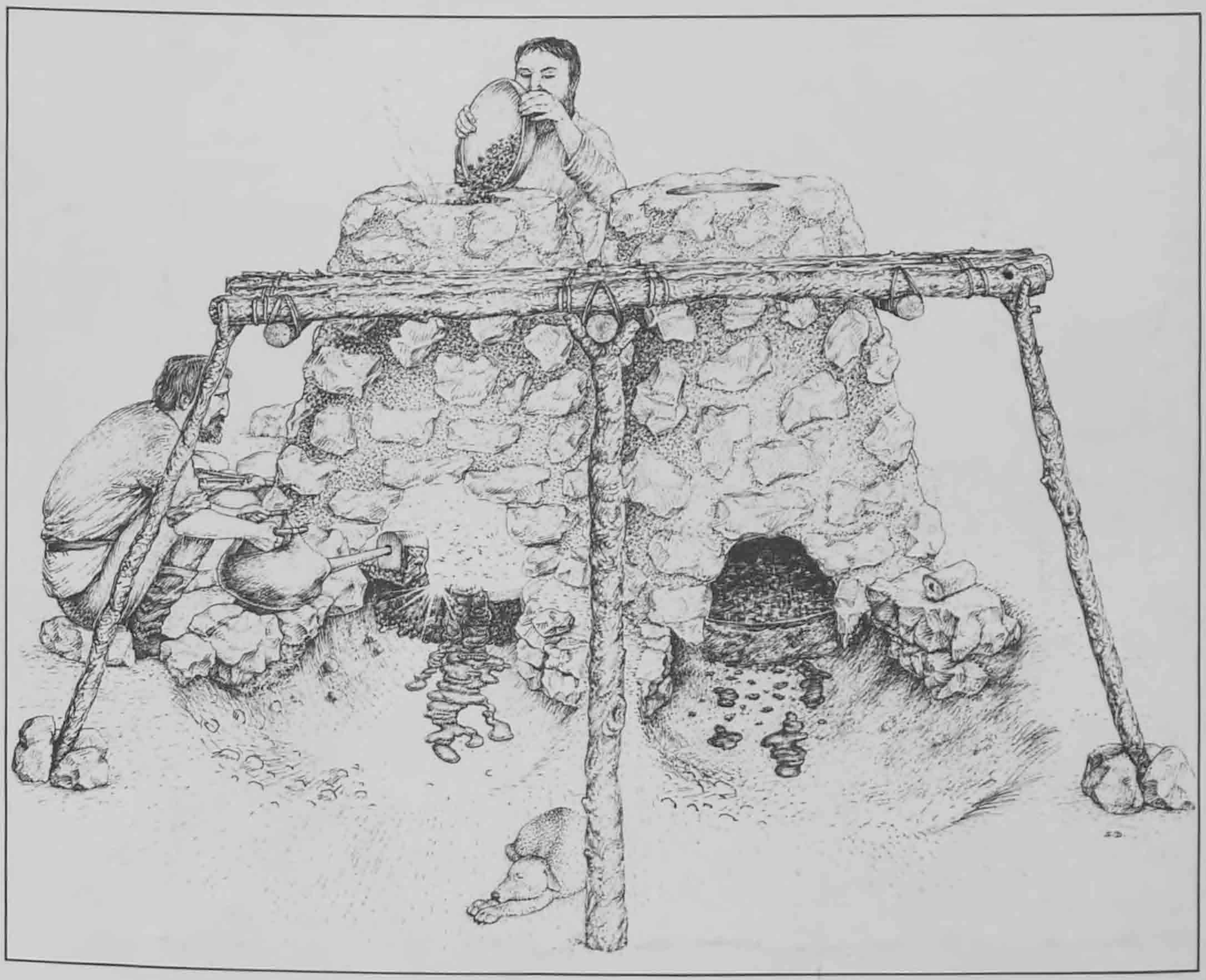


Boécourt, les Boulies

Dépliant n° 2

Dernière coulée du bas fourneau 2
Coulures n° 411 et 412 :
faces supérieures et inférieures
Coulure n° 403 : coupe

0 10 cm



ISBN 2-88436-001-8